



LATIN AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS EDUCATION

www.lajpe.org

Volume 8

Number 1

March 2014



A publication sponsored by the Latin American Physics Education Network
and the Institute of Science Education



LATIN AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS EDUCATION

Electronic version of this journal can be downloaded free of charge from the web-resource:

<http://www.lajpe.org>

Production and technical support

Enrique Martínez Roldán
Enrique.rolدان@gmail.com

Latin American Journal of Physics Education is indexed in:

DOAJ

Dialnet

latindex

EBSCO
PUBLISHING

INDEX  COPERNICUS
INTERNATIONAL

EDITORIAL POLICY

Latin American Journal of Physics Education (LAJPE) is a peer-reviewed, electronic international journal for the publication of papers of instructional and cultural aspects of physics. Articles are chosen to support those involved with physics courses from introductory up to postgraduate levels.

Papers may be comprehensive reviews or reports of original investigations that make a definitive contribution to existing knowledge. The content must not have been published or accepted for publication elsewhere, and papers must not be under consideration by another journal.

This journal is published quarterly (March, June, September and December), by the Latin American Physics Education Network (LAPEN) and the Institute of Science Education. Manuscripts should be submitted to cmoral@ipn.mx or lajpe@lapen.org.mx. Further information is provided in the "Instructions to Authors" on www.lajpe.org

Direct inquiries on editorial policy and the review process to: Cesar Mora, Editor in Chief, CICATA-IPN Av. Legaria 694, Col Irrigación, Del. Miguel Hidalgo, CP 11500 México D. F.

Copyright © 2011 César Eduardo Mora Ley, *Latin American Physics Education Network*. (www.lapen.org.mx)
ISSN 1870-9095

INTERNATIONAL ADVISORY COMMITTEE

Ann-Marie Pendrill, Göteborgs University (Sweden)
Bayram Akarsu, Erciyes University (Turkey)
Carl Wenning, Illinois State University (USA)
Diane Grayson, Andromeda Science Education (South Africa)
David Sokoloff, University of Oregon (USA)
Dean Zollman, Kansas State University (USA)
Edward Redish, University of Maryland (USA)
Elena Sassi, University of Naples (Italy)
Freidrich Herrmann, University of Karlsruhe (Germany)
Gordon Aubrecht II, Ohio State University (USA)
Hiroshi Kawakatsu, Kagawa University (Japan)
Jorge Barojas Weber, Universidad Nacional Autónoma de México (México)
Jorge Valadares, Universidade Aberta de Lisboa, (Portugal)
Laurence Viennot, Université Paris 7 (France)
Lillian C. McDermott, University of Washington (USA)
Marisa Michelini, University of Udine (Italy)
Minella Alarcón, UNESCO (France)
Orhan Karamustafaoğlu, Amasya University, (Turkey)
Pratibha Jolly, University of Delhi (India)
Priscilla Laws, Dickinson College (USA)
Ton Ellermeijer, AMSTEL Institute University of Amsterdam (Netherlands)
Verónica Tricio, University of Burgos (Spain)
Vivien Talisayon, University of the Philippines (Philippines)

EDITORIAL BOARD

Deise Miranda, Universidade Federal do Rio de Janeiro (Brasil)
Eduardo Moltó, Instituto Superior Pedagógico José Varona (Cuba)
Eduardo Montero, Escuela Superior Politécnica del Litoral (Ecuador)
Josefina Barrera, Universidade do Estado do Amazonas (Brasil)
Julio Benegas, Universidad Nacional de San Luis (Argentina)
Leda Roldán, Universidad de Costa Rica (Costa Rica)
Celso Ladera, Universidad Simón Bolívar (Venezuela)
Manuel Reyes, Universidad Pedagógica Experimental Libertador (Venezuela)
Mauricio Pietrocola, Universidad de Sao Paulo (Brasil)
Nelson Arias Ávila, Universidad Distrital, Bogotá (Colombia)
Octavio Calzadilla, Universidad de la Habana (Cuba)
Ricardo Buzzo Garrao, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (Chile)
Zulma Gangoso, Universidad Nacional de Córdoba (Argentina)

EDITOR-IN-CHIEF

César Mora, Instituto Politécnico Nacional (México)

ASSOCIATED EDITOR

Josip Slisko, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (México)

Dear colleagues, again we present an interesting issue of LAJPE. It is important to mention that the funding of an open journal is a very hard task in Latin America. However, we believe on sharing knowledge in a free way without consideration of country, race, religion, beliefs, etc. Science should be available to any person in the world, certainly some editorial business related to science are millionaire business, indeed succeed enterprises, I want to emphasize that this is not our case. LAJPE is a humble editorial work made with some small supports given by LAPEN, the Institute of Science Education and the National Polytechnic Institute from Mexico. We are making much with less, fortunately new fresh air has arrived to LAJPE, the editorial team is growing, two enthusiastic colleagues are collaborating and given great efforts, therefore I welcome to Isabel Contreras and Enrique Martínez. Indeed, their work joined with the collaboration of researchers on Physics Education all around the world will produce transcendental issues of LAJPE. On the other hand, some colleagues have left of the International Advising Committee, we thank their help and support, and we are looking for new young promises on research. Also young Physics students are reading LAJPE papers and are being motivated to be our collaborators. We say them simply, welcome to LAJPE community!

Sincerely,

Cesar Mora
Editor-in-chief

Estimados colegas, nuevamente presentamos un interesante número de LAJPE. Es importante mencionar que la financiación de una revista en línea de acceso abierto es una tarea muy difícil en Latinoamérica. Sin embargo, creemos en la libre difusión del conocimiento sin consideración de país, raza, religión, creencias, etc. La ciencia debe ser accesible a cualquier persona en el mundo, ciertamente algunos negocios editoriales relacionados con la ciencia son negocios millonarios, quiero enfatizar que este no es el caso de LAJPE. Este es un humilde esfuerzo editorial realizado mediante pequeños apoyos proporcionados por la red LAPEN, el Instituto de Educación en Ciencias y el Instituto Politécnico Nacional de México. Estamos haciendo mucho con poco, afortunadamente dos entusiastas colegas están haciendo un gran esfuerzo, por consiguiente les doy la bienvenida a Isabel Contreras y a Enrique Martínez. Sin duda, su trabajo unido a la colaboración de investigadores en Educación en Física en todo el mundo producirán numerosos trascendentes de LAJPE. Por otro lado, algunos colegas han dejado el Comité Asesor Internacional, agradecemos su esfuerzo y ayuda, y estamos en la búsqueda de nuevas promesas jóvenes en investigación. También jóvenes estudiantes de Física están leyendo artículos de LAJPE y están siendo motivados para ser nuestros colaboradores. Simplemente les decimos, ¡bienvenidos a la comunidad LAJPE!

Sinceramente,

Cesar Mora
Editor en jefe

Analizing high school students' problem solving through their personal epistemologies



Coleoni Enrique Andrés^{1,2}, Buteler Laura María^{1,2}, Perea María Andrea^{1,2}

¹*Instituto de Física Enrique Gaviola. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas.*

²*Facultad de Matemática, Astronomía y Física. Universidad Nacional de Córdoba. Medina Allende y Haya de la Torre. Ciudad Universitaria. CP 5000. Córdoba, Argentina.*

E-mail: ecoleoni@famaf.unc.edu.ar

(Received 27 September 2013, accepted 25 February 2014)

Abstract

A case study is presented in which the epistemic aspects of three students' productions during problem solving are analyzed. These students address a non-instructional Mechanics problem. The theoretical framework adopted is that of Cognitive Resources, which assumes that students' cognitive activities are epistemically framed via the activation of epistemic resources. The analysis shows that students' epistemic frames can account for certain characteristics of their reasonings. Furthermore, the epistemic analysis offered gives insight into how they are able to carry out a metacognitive analysis on their own reasoning. Regarding the characteristics in these students personal epistemologies, these high-school students exhibit an epistemic sophistication compared to that of more advanced university students reported in the literature.

Keywords: Personal epistemologies, cognitive resources, metacognition.

Resumen

Se presenta un estudio de caso en el que se analizan los aspectos epistémicos de producciones de tres estudiantes durante la resolución de problemas. Estos estudiantes abordan un problema no instruccional de Mecánica. El marco teórico adoptado es el de Recursos Cognitivos, que asume que las actividades cognitivas de los estudiantes se enmarcan epistemológicamente a través de la activación de los recursos epistémicos. El análisis muestra que los marcos epistémicos de los estudiantes pueden dar cuenta de algunas características de sus razonamientos. Además, el análisis epistémico ofrecido da una idea de la forma en que son capaces de llevar a cabo un análisis metacognitivo sobre su propio razonamiento. En cuanto a las características de las epistemologías personales de estos estudiantes, estos estudiantes de secundaria muestran una sofisticación epistemológica en comparación con la de los estudiantes universitarios más avanzados en la literatura.

Palabras clave: Epistemologías personales, recursos cognitivos, metacognición.

PACS: 01.40.Fk, 01.40.gb,

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCTION

In not few occasions, Physics Education Research has undertaken the study of students' epistemological beliefs about science as an attempt to better understand and accordingly address their difficulties in learning. [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. On the other hand, researchers interested in how students build their ideas about the epistemology of Physics (also often referred to as "Nature of Science", or NOS), have found that engaging students in inquiry activities during school practice is insufficient to change most of their ideas about NOS [8, 9].

Based on a review of research on students' epistemological beliefs, and on students' inquiry practices (including some of the ones mentioned above), Sandoval [10] points out a gap between results offered by these two kinds of studies and expresses this gap in the form of a

paradox: students' practices of inquiry appear to share much with science practice, and nevertheless, their expressed epistemological beliefs often seem hopelessly naïve. This author claims that the starting point to solve this paradox lies in the differences between practical epistemologies and formal epistemologies.

In the next subsections we will: briefly discuss these differences (Public vs. Personal Epistemologies), present our arguments to adopt personal epistemologies to study learning-related issues (Personal epistemologies to understand learning activities) and comment some existing work that follows the same trend (Some existing results on personal epistemologies); The next two sections outline the theoretical framework adopted and the setup of the study. Finally, results on students' epistemic sophistication are detailed in relation to their reasonings on the physical

II. PERSONAL EPISTEMOLOGIES TO UNDERSTAND LEARNING ACTIVITIES

We ascribe to Sandoval's [10] view that personal epistemologies, and not public epistemologies, are what should be focused on to better understand students' abilities as well as their difficulties in activities such as problem solving and inquiry. This author bases his argument on the revision of a great number of reports on the research of people's conceptions of NOS. His claim is based on two main issues.

First, as mentioned above, a person's epistemological conceptions are not stable and globally coherent, but rather fragmented, unstable and subject to context variations. This inconsistency across contexts has been reported by several authors [11, 9, 12]. Students' answers show inconsistencies not only when assessed through different instruments, but also at different times.

The second issue is precisely the difference between the set of ideas about scientific knowledge and its production that students appear to have about professional (formal) science, *i.e.* public epistemologies, and those about their own knowledge production in school science. This argument is similar to Hogan's [13] distinction between distal and proximal epistemologies. Her notion of distal epistemology is roughly the same as what we are calling public epistemology, and the term 'distal' connotes the distance of such ideas from students' own experience. Proximal epistemology, on the other hand, or the beliefs that students have about themselves as science learners, are more likely to influence their approaches to learning than distal epistemological ideas. Thus, in order to better understand students' approaches to learning, personal (proximal) rather than public (distal) epistemologies should be focused on.

Other researchers also agree that the focus should be laid on students' personal rather than public epistemologies [14, 15, 16]. Their reasons follow the same arguments: personal epistemologies are the ones involved in deciding (explicitly or implicitly) which is the relevant knowledge involved in cognitive tasks such as learning, problem solving, inquiry, etc. They are the means through which students answer the implicit question "what is this about? / what am I supposed to do here?" These practical or personal approaches to the construction of knowledge are much more informative to understand the characteristics of tasks such as argumentation, problem solving, inquiry, and learning in general. These are the arguments that we share and which lead us to adopt personal epistemologies as the lens through which to analyze students' productions while learning Physics.

III. SOME EXISTING RESULTS ON PERSONAL EPISTEMOLOGIES

The literature offers reports in which personal epistemologies have proven fruitful to understand students' learning activities. One such example is provided by Lising & Elby [17]. These authors analyze the productions of a student (pseudonym Jan). Their data come from Jan's problem solving sessions with another student and also from personal interviews. They show that Jan approaches the cognitive task at hand in two different ways. One of them is given the name of everyday/intuitive reasoning, as opposed to formal reasoning. When engaged in everyday reasoning, Jan attempts to make sense of situations as she would do in everyday situations, she calls upon her common sense and her memories of similar situations in the past when interacting with similar phenomena. When Jan exhibits a formal reasoning, she makes clear attempts to use formal tools such as formulas and physical concepts; the validity of these formal tools seems to be sustained solely on the authority of the source from which they were obtained. Beyond the characterization of these two kinds of reasoning, the authors are able to establish that Jan's difficulties in learning are epistemological in nature, and they can be understood in terms of a barrier between these two kinds of reasoning: they find that Jan reconciles ideas much less often when those reconciliations imply comparing an everyday reasoning with a formal reasoning than when those reconciliations occur between reasonings of the same type.

Hutchison & Hammer [18] present a report in which they show how university students in a junior year physics class frame their work in two different ways. The two framings are referred to as "the classroom game" and "making sense of a natural phenomenon". In the classroom game, the knowledge that is taken as valid is the one sanctioned to be correct by an authoritative source. Students' role in this frame is to reproduce that correct knowledge as closely as possible, *i.e.* they are supposed to deliver correct answers. The second framing they describe, on the contrary, is described by the authors as a more productive one, in which students are engaged in building knowledge as they try to make sense of a phenomenon. The valid knowledge in this frame can come from a variety of sources, such as observations, prior experience or instruction, and their main activity is to decide whether the ideas they build are coherent with what they already know. This work describes how teachers' interventions can nudge students into framing their classroom activity in more productive or unproductive ways.

Bing & Redish [19, 20] study the epistemic sophistication of advanced university students in what concerns the use of mathematics during physics problem solving. These authors aim at describing the epistemological component of students' evolving expertise. In the first of these reports [19] they show how a group of intermediate university students are "stuck" in a particular epistemic frame. Within this frame, the value of a given mathematical procedure is given by the authority from

which the formulation is obtained; thus, they do not consider the physical meaning of the variables involved. These students persist on this frame even when the interviewer tries to hint them into a different framing. After recovering the “correct” formula from an authoritative source, they spend a great amount of time without noticing that the formula is not suitable for that problem in particular. In the second of these studies [20] the authors show how a group of students recover a “correct” formula (an integral for an expectation value) and based solely on its validity they execute a series of correct mathematical procedures. Since in their framing there is no attention to physical considerations, they do not realize that they have inadequately set the integration limits. In this frame, the validity of results is given basically by two factors: the authority from which the formula is obtained, and the correct mathematical manipulation. Since both these conditions are satisfied, the students are convinced that the problem has no solution: the integral they try to find has no solution with those integration limits. The way out of this dead end comes from a shift in their frame, incorporating an analysis of the physical meaning of the quantities involved. One of the students attempts to make physical sense of the computations they have been carrying out and realizes that given the characteristics of the potential at hand, the integral must be computed between different integration limits. These two examples show that epistemic considerations can inform teachers and researchers on why students can get stuck in inadequate, or sterile, solution paths. Also, it illustrates how a shift in their epistemic framing can result in a productive change in their solving strategies. The authors refer to this ability to shift their epistemic framing as an important component of students’ developing expertise, and they call it epistemic sophistication. A more compelling example of epistemic sophistication is reported in that same paper [20]. In this case, it corresponds to a student who already held an undergraduate science degree and had spent several years in the work-place before returning to the university to study for another degree. The data from this student were obtained from an interview on the problems that had been the subject of a recent exam. The data showed that this subject was able to frame the task in three different ways, each of which is dominated by three distinct epistemic goals: to make physical sense of the equations, to recover correct information from authority, and to evaluate the internal consistency of the mathematical representation. What is interesting about this subject’s epistemic sophistication is not only that he can frame the task in these different ways, but he can shift to a new frame without disregarding the previous one. This enables him to seek coherence between the conclusions he obtains in those different frames.

In the present study, we carry out an analysis of three students’ solving session of a Mechanics problem from an epistemic framing perspective. We attempt to show that the epistemic sophistication reported by Bing & Redish in intermediate and advanced university students can be also found in students of a sensibly shorter academic trajectory

such as the high school students in our case study. These 5th year students (approximately 16 years of age) exhibit an epistemic sophistication that allows them to address a problem involving a topic that had not been part of their instruction prior to the interview. We also discuss how these students’ epistemic sophistication enables them to carry out a metacognitive analysis of what they do and do not know.

IV. A THEORETICAL DESCRIPTION FOR PERSONAL EPISTEMOLOGIES

In order to perform our analysis of students’ personal epistemologies, we adopt the theoretical viewpoint given by the Cognitive Resources framework. This is the theoretical framework also used by Bing & Redish [19, 20] to study the use of mathematics in physics problem solving. It approaches cognition from a knowledge-in-pieces perspective, and assumes that people’s cognition is the result of activating Cognitive Resources. An appealing characteristic of knowledge-in-pieces frameworks such as this one is that they incorporate a contextualized view of cognition in a natural way: resources are activated in a context dependent manner. This has two important implications. First, it allows to understand why students sometimes appear not to know things that they are reasonably assumed to know, or in other words, why they are or are not able to transfer knowledge from one situation to another (for a more extensive analysis on the impact of the knowledge-in-pieces framework on transfer see [21, 22, 23]). The second important implication is that this context sensitivity opens the possibility to analyze processes, and not just results of cognitive activity. That is, instead of focusing on the results of students’ reasoning, they are more suitable to understand how students produce those reasoning.

In a first, broad classification, cognitive resources can be either conceptual or epistemic. Conceptual resources are what enable people to make sense of the functioning of physical systems. Epistemic resources, on the other hand, are activated to provide a control structure that allows people to give epistemic sense to the cognitive task at hand, in other words, the activation of epistemic resources provides an answer to the (sometimes implicit) question “what is this about?”/“what am I supposed to do here?” [14, 24, 18, 25].

Since the purpose of our study is to analyze the epistemic component of students’ cognitive activity, we will focus on the epistemic resources activated during a problem solving session. The central assumption in our work is that when confronted with a cognitive task, people activate a particular set of epistemic resources and that this activation constitutes an Epistemic Framing. As an example, consider the following example presented by Bing & Redish [20]. During a problem solving task, a group of students frames the activity as one in which their role is to deliver correct numerical results by means of valid

Coleoni Enrique Andrés, Buteler Laura María, Perea María Andrea mathematical operations. Two resources are activated to build up this frame: calculation and Invoking Authority. The first one, calculation, can be described as “correctly following an accepted calculation algorithm produces valid results”. Invoking Authority implies that “information obtained from a recognized authority, such as the textbook or a teacher is trustable to obtain correct answers”. Once activated, these resources dominate the epistemic framing during the solving activity.

Hutchison & Hammer [19] describe two different epistemic framings that occur within a classroom environment: “making sense of a natural phenomenon” and “playing the classroom game”. Within the first framing, students are engaged in considering ideas and statements about knowledge that are built up from pieces of knowledge originated in diverse sources, such as previous experience, authoritative sources like teachers or textbooks, common sense, previous instruction, etc. What is characteristic of this framing is that subjects’ main task is that of elaborating new knowledge and evaluating it by checking its coherence as compared to what they already know. This overall quest for coherence is what indicates the activation of the resource of “making sense” which dominates the frame.

When framing the task as a classroom game, students assume that their role is that of delivering correct answers. The resource that is activated to build up this frame is basically that of Invoking Authority. This implies that information is regarded as valuable and useful when it coincides with what the authority sanctions as correct. The epistemic criterion provided by this resource is what dominates the activity within this frame.

The present work offers an analysis of students’ activities during a problem solving session, based on the characteristics of their epistemic framings. The framings that we will encounter are characterized mainly by the resources of making physical sense of a natural phenomenon and Invoking Authority, although they are not the only resources that will be described. The results will contribute to the understanding of students’ cognitive activity during problem solving in two ways. First, the shift from one frame to another will inform us on why sometimes students appear to “know” things in one situation and not in another. Second, it will provide an interesting tool to grasp the epistemic sophistication of academically “young” students. In fact, the epistemic sophistication of the students in this report is comparable to the one reported in more advanced (university) students as in the case offered by Bing & Redish [20]. Finally we address the issue of how epistemic sophistication plays a decisive role in these students’ ability to reflect metacognitively on their own productions.

V. THE STUDY

In this report we present a case-study analysis of three students’ productions during problem solving. The participants are three high-school students in a 5th-year

course (16 yr. old). The school is an institution that belongs to the Universidad Nacional de Córdoba, a federal state university in Argentina. Data were collected by means of a semi-structured interview. It consisted of a mechanics problem presented in a sequence, and students were asked to discuss their approach to its solution. The atmosphere was that of a peer interaction in order to favor their communication of ideas. Students agreed to participate in the interviews after a call made to them by the researchers and their Physics teacher.

These students’ instruction prior to the interview had covered the topic of kinematics in one dimension, and in particular, the description of motion with constant speed and constant acceleration. The example of bodies moving vertically near the Earth’s surface had been used to illustrate constant acceleration motion. Dynamics had not been a topic in their instruction, although they were familiar with the idea of weight as a measure of an interaction that pulls bodies to the center of the Earth.

Interviews were audio-video recorded and then analyzed. The analysis performed focused on the identification of the epistemic resources activated and the overall epistemic framing, in terms of those resources that dominate the framing. We focused on how students’ reasonings were supported by particular framings, and also on the epistemic abilities that students exhibit. These, as pointed out by Bing & Redish [20] are a component of their developing expertise. Throughout the results we will also point out certain metacognitive actions enabled by this epistemic sophistication: students become aware of the limits of certain idealized kinematic models, they understand why they are changing their minds about the behavior of the physical system, and they conciliate two different descriptions of a system.

Two balls, a bowling ball and a soccer ball, are the same size but different weight. They are both released at the same time from a rooftop that is 4 m above the ground. Choose the right answer and give your reasons for it:

Upon hitting the ground the speed of the bowling ball is:

- a) greater than
- b) less than
- c) equal to

the speed of the soccer ball

The acceleration of the bowling ball is:

- a) greater than
- b) less than
- c) equal to

the acceleration of the soccer ball

The time it takes the bowling ball to hit the ground is:

- a) greater than
- b) less than
- c) equal to

the time it takes the soccer ball to hit the ground

FIGURE 1. The problem discussed during the interview.

VI. RESULTS

We have chosen 5 excerpts to illustrate the nuances in students' framing observed during the interview, and to provide the basis for our analysis.

A. Framing the task as a sense-making activity

Immediately after reading the problem statement the three students (S1, S2 and S3) recall an episode in which a teacher had talked to them about an experiment in which a feather and a rock, falling in vacuum, did so at the same time and with the same speed. They clearly distinguish that episode from the present one, and the point is that their activity consists of seeking coherence between the present ideas and other things that they already know.

Interviewer: *Can you tell me what you're thinking?*

S1: *... some time ago, there was this teacher, not our regular teacher [a substitute], and she told us this story about someone who had done this experiment... with a feather and a rock...*

S2: (interrupts) *...a rock and a feather, in vacuum, and they both fell at the same time, and with the same speed... it's like... weight had nothing to do with the speed that they fall...*

S1: *yeah, but to do that, they had to do something special, 'cause if you drop... like, here, or anywhere, a rock and a feather, the rock is gonna fall first!*

S2: *and here [in the problem statement] it doesn't say if you have to take into account the friction with air... so we're supposing that there is air, and there is friction with air, it's not like, in vacuum, so they won't fall at the same time.*

S3: *I think they will... 'cause they have the same volume... and the same shape...*

Int: *So, are you saying that even if you take friction into account, it's the same for both bodies, because they have the same shape?*

S3: *well... yes, that's what I'm guessing... I mean... the bowling ball, it's got more mass, so maybe then the air won't affect it as much...*

S1: *but, if you have two balls, with the same shape, and one is heavier than the other...*

S2: (interrupts) *to me... the heavier one will fall first...*

S1: *right!*

Int: *and... why do you think that's how it is? Someone taught you that? you read it somewhere?*

S1: *No! We just KNOW because we've dropped a... two... bodies that are alike, but of different weight... and, well... the heavier one falls before the other one!*

S2: *... it's like we're backing up what we think with what we're studying.*

Physical Sense-Making is the resource that dominates the framing, because it can account for what they are taking the task to be about. The answer to the unspoken question "what is this about?" is precisely "this is about making sense of what would happen in that situation". A distinctive trait of Physical Sense-Making is that it does not place restrictions on the valid sources of knowledge. In this case,

we see students evoking previous knowledge from previous classroom examples ("there was this teacher who told us about an experiment"), and from their personal experience ("we just KNOW because we've dropped bodies that are alike"). All sources of knowledge are valid as long as they can serve the purpose of providing elements to carry out the task of making sense of the situation. The fact that one of those sources is a teacher, an authoritative source, indicates that Invoking Authority has also been activated, but it is not dominating the frame. This resource is not guiding their reasoning, it is part of the framing because it feeds into their present sense-making.

B. Sense making as a fruitful framing: a useful analogy

So far, students are confident in the idea that, in the presence of air, the heavier ball will hit the ground with a greater speed. They arrived at this conclusion within a sense-making frame, in which they have analyzed the present situation in relation to their previous ideas of falling objects. The following excerpt illustrates how, as they attempt to make sense of the situation, they make an analogy. They recall a classroom example, in which two crowns were submerged in water in order to find out which of them was made of gold and which from a lighter metal. The analogy consists of comparing the case of two crowns of same size and different weights, submerged in water, with the present one of two balls, also of the same size and different weights, submerged in another fluid: air. This analogy allows them to validate their sense making reasoning. Also, this sense-making involves a description of the physical interaction between a fluid and an object falling in it. In any case, having the same size and shape, both bodies have to face the same resistance from the fluid. The body with the larger mass (and weight) will be pulled down with a greater force and thus arrive at the ground with a greater speed.

S2: *...the math teacher had brought up that example, with a crown... that this king wanted to know if it was made of pure gold, or if...*

S3: *oh... you mean that example... the two crowns were put in water, and they had the same volume, but gold was...*

S1: *yeah, I mean... gold had more mass!*

S2: *that's right, more mass, and therefore more density, and that's why it sunk more*

S3: *it could push more water, right! It had to do with the mass!*

S1: *Sure, it had to do with the mass... if the body had more mass, it could push... whatever was in front of it... faster!*

Int: *oh... let me see if I understand... You're trying to make an analogy with what happens when you put a body in water? Because water and air are alike?*

S2: *Well, yeah... I mean, we know water and air are not the same, but...*

S1: *like it's two identical bodies, but of different weight*

Int: *so, if bodies have different masses, different things happen?*

S1, S2, S3: *yes*

S3: *probably because one is more attracted by Earth.*

S2: *but... I mean... gravity is the same everywhere, but the weight of the body, the attraction on it towards the center of the Earth, that depends on its mass, of course*

Int: *ok, ok, so you remember that example that the teacher told you about and you're saying: "the force that air does on things must have the same characteristics as the force that water does on things", is that it?*

S2: *(dubious, smiles) they don't have the same characteristics... we're just... based on something that they explained to us, and which we know is right because it was a teacher who told us, we're trying to solve this problem because we're not completely sure that what we're thinking is right or not... we're just trying to back up the fact that...*

S1: *that it does have to do with mass, that mass does matter for the speed with which it reaches the ground.*

Making Sense of the Phenomenon is still dominating the frame. Recalling a classroom example, although enabled by the activation of Invoking Authority, is clearly a part of the overall sense-making. It allows students to seek coherence between a prediction, constructed on the basis of everyday experience, and trustable knowledge stemming from an authoritative source. This is a particularly interesting point: Invoking Authority is activated, but does not take over the frame, it is incorporated into the frame already established and productively adds to the sense-making activity already in process.

C. Analyzing acceleration: Invoking Authority takes over the frame

Upon addressing the following question (regarding the acceleration of the two balls) students show no hesitation in answering that they are equal. The interviewer asks them why they believe so, their answer shows that they have retrieved a piece of information from authority and that alone accounts for its reliability: "because its moving on Earth". This clear shift in framing triggers an intervention in the interviewer aimed at nudging them into their previous (productive) framing, and thus she asks if this is their answer considering the presence of air, or not, as this had been an important issue that they had been thoroughly discussing up to this point; they had even explicitly stated that their answers would change in vacuum or in air. S1's utterances clearly indicate that their epistemic frame has abruptly been taken over by Invoking Authority: without even hearing the complete question from the interviewer an almost automatic answer is cited from authority, "on Earth, acceleration is 10 m/s^2 ". This answer is offered again, in the same manner, when the interviewer asks once again to clarify the question, emphasizing the unquestionable validity of the statement; that IS the value of acceleration on Earth. This answer is supported by a piece of information that has been recovered from an authoritative source, and is thus unquestionable. The frame is dominated by Invoking Authority, and making sense of the phenomenon is no longer activated.

S1: [Reading out loud] *then it says, the acceleration of the bowling ball is greater than / less than / equal to the acceleration of the soccer ball.*

S1, S2, S3: [immediately] *Equal!*

Int: *why do you think they are equal?*

S1, S3: *because it is on Earth. / S2:* [at the same time] *because it's gravity.*

Int: *In vacuum? Or in air?*

(Pause)

S1: *(seems puzzled by the question)*

Int: *I'm asking this because you told me that if you considered air you would give one answer and that you would give a different answer in vacuum...*

S1: (interrupts) *on Earth, acceleration is 10 m/s^2 , or... well... -10 m/s^2 , depending on... the direction of the axis, the system that you choose, but here, on Earth, acceleration would be the same.*

Int: *considering the balls moving in air or in vacuum...*

S1: (still seems puzzled) *Pardon?*

Int: *considering vacuum or air?*

S1: *no! I mean, if here we have the bowling ball and the soccer ball, we drop them, acceleration is just the same! ... on Earth, gravity... acceleration, it's just the same!*

There are several clues that indicate that the frame is dominated by Invoking Authority. Their first answer, given immediately and with great resolution, has the form of a "mantra" that is quoted unquestionably: on Earth, acceleration IS equal to that of gravity, and is the same for all bodies. The second clue is that, even when questioned by the interviewer ("I'm asking this because you told me that if you considered air you would give one answer and that you would give a different answer in vacuum") the students' answer is once again to provide an unquestionable statement, quoting a piece of authority-supported information as sufficient warrant for its validity. They are no longer attempting to make sense of the interviewer's question. This answer in no way attends to the issue regarding the presence or absence of air: they are providing an answer that is simply correct because it is thus sanctioned by an authoritative source. The third clue involves the uneasy, puzzled reaction of S1 to the interviewer's question. This uneasiness is understood if we assume that, as making sense of the phenomenon is no longer activated, and the frame is dominated by Invoking Authority, S1 perceives the questioning about the presence of air as an unnecessary and uncalled for task. Finally, there is a strong indication of a frame shift in the tone of S1's voice during this portion of his speech. There is a marked shift in demeanor in his voice. From a tentative, facilitating tone in their prior utterances, it goes to a sharp, directing one.

D. Negotiating frames

The following excerpt shows the effect of the interviewer's epistemic "nudge" on S2, who activates Making Sense of the phenomenon once again and promotes a negotiation between two frames, one dominated by Invoking Authority

and the other one dominated by Making Sense. This negotiation enables them to perform certain metacognitive activities. They are able to detect important issues about the problem itself and about their solving approach: a) they are solving a problem that is different from all the ones that have been part of their instruction in class; b) their answers on speed and acceleration are not consistent with each other (if accelerations are equal, and both balls are dropped from rest at the same height, their speed will be the same upon hitting the ground), c) what they know about the physics of falling bodies is not enough to account the fall of bodies in the presence of air.

S2: *but... I mean, we were so careful considering if there was air or not when they ask about speed, and now we're not a bit bothered about that when they ask about acceleration, I mean, if there is air or vacuum. How come?*

S3: *because, [in class] acceleration is always the same.*

S2: *... according to what we've been doing, it's always like, it's like there is no air... when that other teacher came that day [a substitute] remember she said "oh, ok, in all these problems you went like there is no air" and we said "well, no..." and she said "well, never mind, that's ok, 'cause you don't have to take air into account", because otherwise, everything changes. All the time we've been doing things [in class] like there's no air!*

S1: *yeah... the thing is that we never... problems like this one... we never analyzed them in class, we never did problems like these.*

Int: *like this one, how?*

S1: *Like this, that we have to ask ourselves if things are falling in air or in vacuum...*

S2: *Sure we did! The thing is that we just pretended that there was no air... If we had to do this problem like we've been doing so far [in class], I'd say that the speed is the same for both, and that the acceleration is also the same...*

S3: *well, of course! I mean, if we say that the speed of one of them will be greater than the other one, and they start off with the same... from zero I mean... acceleration has to be greater for one than for the other! What I'm not sure now is what we said about their speeds, that one would be greater than the other... but, well yes, I think that's ok! If the speed of the bowling ball, like we said, will be greater, then its acceleration has to be greater and it will take less time for it to hit the ground than for the soccer ball.*

S1: [back to a reflective tone] *the thing is that here it says "the acceleration of the soccer ball"... but when? Just as they start to fall? No... I mean, if we had to do this the way we do it in class, we'd have to say that the speeds are the same, that the accelerations are the same, and that it takes the same time for both...*

Int: *do you two agree with that?...*

S1: [interrupts, using an emphatic tone] *If we did it like we were in class, but... that's not the way things really happen...*

S2: *Right!... if I drop this pencil case, full of pencils, and I drop it when it's empty, the filled case will get to the ground first...*

In this excerpt, we can observe that, questioned by S2, S1 activates Making Sense once again. Moreover, upon realizing that their analysis, which have occurred within different framings (Making Sense, to reason about speeds, and Invoking Authority to answer about accelerations) are not coherent with each other, they engage in a frame-negotiating process. Both Making Sense and Invoking Authority remain activated (this last resource provides a "correct" piece of information, i.e. acceleration of gravity is equal to 10 m/s^2). Thus, they are enabled to detect and analyze the limits of a particular kinematic description that they have learned in class. One particular indication of this negotiation is S1's doubt as to the moment the question on acceleration is referring to ("the acceleration of the soccer ball"... but when? Just as they start to fall?) In fact, another study performed on the basis of these data analyses the variety of explanations that these students provide on the phenomenon at this point, and shows how suitable their analysis is to address the problem of real bodies falling in air [27]. Their approach even includes the attempt to obtain experimental evidence on the matter by dropping similarly shaped objects of different weights and analyzing the validity of their observations.

In sum, this negotiation between frames is a fruitful epistemic move on their part, because it enables them to make the most of both epistemic stances. They take reliable information from authority, and feed it into their sense making activity. This not only lets them have a more accurate understanding of the phenomenon, but also starts them off in the activity of questioning the physical models that they accept in the classroom. The next excerpt shows the continuation of this process.

E. Establishing limits for instructional physical models

So far, the activation of Making Sense has enabled students to engage in a productive analysis: they are questioning the validity of the reasoning that led them to believe that the heavier ball hits the ground first and with a greater speed. They also understand that this is inconsistent with another result produced within the frame dominated by Invoking Authority: all bodies near the surface of the Earth fall with an acceleration of 10 m/s^2 .

In the previous excerpt, we were able to see how students started of a frame-negotiation process. Thus, both Making Sense and Invoking Authority are activated. This new negotiated frame enables them to not only make a more accurate description of the physical phenomenon, but also to understand nuances of the physical models they have been using that had not been apparent to them up to now.

S1: *what I think is that... if there's two bodies here, of the same volume, and different mass, the heavier one falls faster ...I DON'T KNOW WHY THAT HAPPENS... acceleration is supposed to be the same for both, at first*

Coleoni Enrique Andrés, Buteler Laura María, Perea María Andrea at least, but then, there must be something in the heavier body that that accelerates it more... I mean, acceleration is the same for both, its 10 m/s^2 , but there's got to be something that makes the heavier one go faster, something that we haven't seen [meaning something they haven't been taught in class]

S3: *but if you say that happens, then at some point one must have a larger acceleration than the other...*

S1: *I don't know... but there's got to be something that makes the heavier one fall faster... and the only thing I can think of is that about having to push the air in front of it, and the heavier body can do that more easily than the lighter one.*

Making Sense is seen to be the resource that dominates the frame. It is the one that guides the cognitive task, and defines “what this task is about”. However, the fact that Invoking Authority is activated, also leads him to accept, without question, that acceleration of falling bodies IS 10 m/s^2 . The activation of both resources at the same time calls for a negotiation. Within this negotiation, S1 makes statements not only regarding the behavior of the physical system, but also regarding what they know and don't know: heavier objects will fall faster + acceleration is that of gravity implies that “there's got to be something that makes the heavier one go faster, something that we haven't seen [in class]” This negotiation, which is a fruitful epistemic move, is once again evidenced when S1 imagines what he would do with a problem like this one (of a non-instructional type, that invited them to make physical sense) in a classroom situation (an environment presumably more akin to epistemic frames dominated by Invoking Authority):

S1: *If they gave us a problem like this in class, the first we'd have to do is say [the bowling ball's speed is] greater, [acceleration is] greater, [time is] less... And ask the teacher: how do we deal with this thing about air?... because in our classroom problems we just solve them like... we never cared about friction with air... they never asked things like this “but different weight”... we did things without ever caring about weight.*

The negotiation between two originally different frames, characterized by two different resources (Making Sense and Invoking Authority) has allowed S1 to do more than just detect an inconsistency. He first realizes that the simplified kinematic model they know is limited, and too simplified to address problems such as the present one. From the beginning, these students addressed the problem as a “real one”, in which the presence of air plays an important role, although this was not stated anywhere in the problem, and no problems such as these had been analyzed in class. S1 also has identified the locus of this limitation and is able to pose a clear question that he could make to his teacher in a hypothetical classroom situation. This negotiation, which involves the activation of “new” resources without deactivating the present ones, is what has been previously described as epistemic sophistication or epistemic flexibility [19, 20].

VII. DISCUSSION

The present case study shows the epistemic sophistication of these 5th year high-school students. This sophistication enables them to adopt a particular epistemic stance: any description they produce of the phenomenon must account for the fact, based on their experience, that, in the presence of air, heavier objects fall faster to the ground. In that first part of the interview, although their frame is dominated by making sense, Invoking Authority is activated to let them back up what they are thinking with what they have been taught. In the second moment of the interview, it can also be observed how this frame enables them to make a fruitful analogy (two crowns in a liquid) as a proxy to think about how the two different balls will fall in air. Invoking Authority, although not dominating the frame, allows the articulation of their reasoning with ideas that are worthy of trust due to the fact that they have been obtained from an authoritative source. They can, for example, reaffirm their hypothesis that “mass does have to do” with the speed, because this is consistent with the crowns-in-water analogy, which they “know is right because it was what the teacher said”. A note worthy of mention is that these students had not been instructed in topics of dynamics, and the crown example had come up during a math lesson. They had only covered idealized kinematic models (constant accelerations, bodies falling in vacuum) in one dimension. This productive frame thus puts them in a powerful starting point to address contents of dynamics.

Students' epistemic sophistication is also manifested in the way they negotiate two epistemic frames dominated by different resources. After a sudden shift to a frame dominated by Invoking Authority (Analyzing acceleration, third excerpt) a nudge from the interviewer through a question hints one of the students (S2) to propose a negotiation between frames, which is accepted by her peers. This negotiation continues until the end of the interview. The fourth excerpt (Negotiating frames) shows the usefulness of this negotiation, since students are able to detect inconsistencies in their reasoning and realize that their kinematic model has limitations. Furthermore, in the fifth excerpt (Establishing limits...), they are able to pinpoint those characteristics of the motion of falling bodies that they are unable to describe with the physical tools they have been taught (*if there's two bodies here, of the same volume, and different mass, the heavier one falls faster ...I DON'T KNOW WHY THAT HAPPENS... acceleration is supposed to be the same for both, at first at least, but then, there must be something in the heavier body that that accelerates it more... I mean, acceleration is the same for both, its 10 m/s^2 , but there's got to be something that makes the heavier one go faster, something that we haven't seen*). Right after this, they are able to construct a query for their teacher in a hypothetical classroom situation. (¿how are we supposed to deal with this when there's air?) Thus, this negotiation process has enabled them to benefit from the reasoning they are able to make in a sense-making frame, and at the same time to profit from the trustworthy

source of information that is the teacher's voice. They have been able to obtain the "best from two worlds".

These students' epistemic sophistication is comparable to a case already reported by Bing & Redish [20]. The interesting point in this comparison is that the subject in that case had already obtained a degree and had a considerable instructional history, as compared to the subjects in the present case, who are high-school students. These epistemic tools are an important part of the overall set of previous knowledge and abilities that these students have available for their future learning. In this sense, we believe it is important for instructors to be alerted of their existence, in order to be better prepared to detect them and to make a productive use of them during teaching.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (Argentina) and by Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (Argentina). Partial results were presented at the XI Simposio de Investigación en Educación en Ciencias, held in Esquel, Chubut, Argentina, October 24-26, 2012.

REFERENCES

[1] Salinas, J. J., Gil, D. & Cudmani, L. C., *La elaboración de estrategias educativas acordes con un modo científico de tratar las cuestiones*, Memorias de la Novena Reunión Nacional de Educación en Física, Salta, Argentina, 336-348 (1995).

[2] Guridi, V. M., *¿Puede vincularse la comprensión conceptual en Física con el perfil epistemológico de un estudiante?*, Tesis de Maestría en Epistemología y Metodología de la Ciencia, Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina, 1999.

[3] Campanario, J. M. & Otero, J., *Más allá de las ideas previas como dificultades en el aprendizaje: las pautas de pensamiento, las concepciones epistemológicas y las estrategias metacognitivas de los alumnos de ciencias*, Enseñanza de las Ciencias **18**, 154-169 (2000).

[4] McComas, W. F., *The nature of science in science education. Rationales and strategies*, (Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 2000).

[5] Staphopoulou, Ch. & Vosniadou, S., Exploring the relationship between epistemological beliefs and physics understanding. Journal of Educational Psychology (2005, Author's copy)
<http://www.cs.phs.uoa.gr/el/staff/vosniadou/YCEPS1208.pdf> Accessed 9 May 2013.

[6] Wainmaier, C. O. & Salinas, J. J., *Incomprensiones en el Aprendizaje de la Mecánica Clásica Básica*, Revista de Enseñanza de la Física **18**, 39-54 (2005).

[7] Wainmaier, C. O., Speltini, C. & Salinas, J., *Conceptos y relaciones entre conceptos de la mecánica newtoniana en estudiantes que ingresan a la universidad*, Revista

Electrónica de Enseñanza de las Ciencias **10**, 133-152 (2011).

[8] Khishfe, R. & Abd-El-Khalick, F., *Influence of explicit and reflective and reflective versus implicit inquiry-oriented instruction on sixth graders' views of nature of science*, Journal of Research in Science Teaching **39**, 551-578 (2002).

[9] Sandoval, W. A. & Morrison, K., *High-School Students' Ideas About Theories and Theory Change After a Biological Inquiry Unit*, Journal of Research in Science Teaching **40**, 369-392 (2003).

[10] Sandoval, W. A., *Understanding Students' Practical Epistemologies and their Influence on Learning Through Inquiry*, Science Education **89**, 634-656 (2005).

[11] Leach, J., Millar, R. & Séré, M. G., *Epistemological Understanding in Science Learning: The Consistency of Representations Across Contexts*, Learning and Instruction **10**, 497-527 (2000).

[12] Elby, A., *Coherence vs. Fragmentation in student epistemologies: reply to Smith & Wenk*, Electronic Journal of Science Education **14**, 1-22 (2010).

[13] Hogan, K., *Exploring a process view of students' knowledge about the nature of science*, Science Education **84**, 51-70 (2010).

[14] Hammer, D. & Elby, A., *Tapping Students' Epistemological Resources*, Journal of the Learning Sciences **12**, 53-91 (2003).

[15] Russ, R. S., Scherr, R. E., Hammer, D. & Mikeska, J., *Recognizing Mechanistic Reasoning in Student Scientific Inquiry: A Framework for Discourse Analysis Developed from Philosophy of Science*, Science Education **92**, 499-525 (2008).

[16] Sandoval, W. A. & Çam, A., *Elementary Children's Judgements of the Epistemic Status of Sources of Justification*, Science Education **95**, 383-408 (2011).

[17] Lising, L. & Elby, A., *The Impact of Epistemology on Learning: A Case Study from Introductory Physics*. American Journal of Physics, PER Section **73**, 372-382 (2005).

[18] Hutchison, P. & Hammer, D., *Attending to Student Epistemological Framing in a Science Classroom*, Science Education **94**, 506-524 (2009).

[19] Bing, T. J., Redish, E. F., *Analyzing problem solving using math in physics: Epistemological framing via warrants*, Physical Review Special Topics - Physics Education Research, (2009). DOI: 10.1103/PhysRevSTPER.5.020108

[20] Bing, T. J.; Redish, E. F., *Epistemic Complexity and the Journeyman-Expert Transition*, Physical Review Special Topics - Physics Education Research. (2012) DOI: 10.1103/PhysRevSTPER.8.010105

[21] Hammer, D., Elby, A., Scherr, R. & Redish, E., *Resources, framing and transfer*. In Mestre, J. (Ed.), Transfer of learning from a modern multidisciplinary perspective, (Information Age, Greenwich, 2005), pp. 89-119.

[22] diSessa, A. & Wagner, J. F., *What coordination has to say about transfer*. In: Mestre, J. (Ed.), Transfer of learning

Coleoni Enrique Andrés, Buteler Laura María, Perea María Andrea from a modern multidisciplinary perspective, (Information Age, Greenwich, 2005), pp. 121-154.

[23] Wagner, J., *Transfer in Pieces*, Cognition and Instruction **24**, 71 (2006).

[24] Redish, E., *A theoretical framework for physics education research: modeling student thinking*. In Redish, E.; Vicentini, M. (Eds.) *Proceedings of the Enrico Fermi Summer School, Course CLVI*, (Società Italiana di Física, Bologna, 2004), pp. 1-63.

[25] Bing, T. J., *An Epistemic framing Analysis of Upper Level Physics Students' Use of Mathematics*. Ph. D. thesis. University of Maryland, 2008. Available in <http://www.physics.umd.edu/perg/dissertations/Bing/BingDissertation.pdf> (last accessed 17 September, 2013).

[27] Coleoni, E. A., Buteler, L. M. & Moyano, M. T., *Alumnos que resuelven, alumnos que explican: análisis de explicaciones durante la resolución de un problema de Física*, Revista de Enseñanza de la Física **22**, 7-16 (2009).

Organization and realization of the experimental cycle of scientific cognition at Physics study



Natalia Podoprygora

Faculty of Physics and Mathematics of Kirovohrad Volodymyr Vynnychenko State Pedagogical University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Shevchenko Street 1, CP 25006, Kirovograd, Ukraine.

E-mail: npodoprygora@ukr.net

(Received 22 July 2013, accepted 13 January 2014)

Abstract

The article is dedicated to the methodology of educational activity of Ukrainian pupils during physics study. There are presented the authors' methodical developments of organization and realization of the experimental cycle of scientific cognition in the process of arrangement of experimental Physics problems (research of elastic properties of solids, research of strain gauge action, definition of the liquid surface tension, and determination of Quality factor (Q factor) of a simple pendulum. The laboratory equipment includes simple digital measuring devices and author's home-made equipment that makes possible realization of the offered problems in an educational physics experiment.

Keywords: Scientific method of cognition, theoretical and experimental methods of physics, educational physics experiment.

Resumen

El artículo está dedicado a la metodología de la actividad educativa de los alumnos de Ucrania durante el estudio de la física. Se presentan los desarrollos metodológicos de los autores que tratan acerca de la organización y realización del ciclo experimental del conocimiento científico en el proceso de arreglo de problemas experimentales de Física (investigación de las propiedades elásticas de los sólidos, la investigación de la acción del calibrador de tensión, la definición de la tensión superficial del líquido, y determinación del factor de calidad [factor Q] de un péndulo simple). El equipo de laboratorio incluye dispositivos de medición digitales y equipos sencillos hechos en casa del autor, que hacen posible la realización de los problemas que se ofrecen, en un experimento de física educativa.

Palabras clave: Método científico de la cognición, métodos teóricos y experimentales de la física, experimento de física educativa.

PACS: 01.40.gb, 01.40.Fk, 01.50.Pa

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCTION

Methodology of educational-cognitive activity is one of the basic sources of development and modernization of physics teaching methods. It is based on the modern scientific methods of cognition of the physics phenomena and processes. A scientific method is an instrument of cognitive and creative initiative development of pupils; it encourages their independent thinking and activity. At the same time, a scientific method of cognition is a top of achievements of human culture; it has a long historical way of development and has become the basis of culturological approach to physics study.

Improvement of teaching methods aimed at personal development, easy orientation in informatization society, formation of adaptable abilities to overcome difficulties is an important issue of teaching physics methods. Physics study is aimed to independent intellectual ability creating, knowledge obtaining and application, activities appropriate consideration and organization, the tasks solution seeking; it requires alternative forms and ways of activity implementation in the educational process where essential

role is assigned to the research activities of learners. This activity is designed to promote their skills through the world cognition as vital quality of every person.

However, when planning such activities, we should take into account the differences between scientists' research activities and research activities of pupils. The model of research methodology for pupils is taken from the methods that are developed and adopted in science over the last few centuries. This model is characterized by several standard phases; they are present in any scientific study regardless of a field of activity. Thus, from a functional point of view, the main aim of educational research is fundamentally different from the aim of scientific research. The main aim of science is to produce absolutely new knowledge; the aim of education is to build pupils' functional skills of research as universal way of understanding of reality through increase of motivation of learning activity and activation of pupils' personal positions in the learning process; it is based on a gaining subjective new knowledge (i.e., self-obtained knowledge that is new and personally meaningful for a particular learner). Founding on our own experience of organization of pupils research activity during physics

study, we present how this activity can be a tool for developing pupils' learning motivation and a powerful regulator of the education quality.

In part II, we show how physics was developed as a science in its modern sense relative to methods of nature cognition. In part III, we present a brief discussion of modern methods of teaching physics as for their coordination with the cycle of scientific understanding of nature. We offer our vision of the solution for the problem of organization of pupils' research activity coordination with the cycle of scientific understanding of nature. We present versions of the relevant experimental tasks: study of elastic properties of solids; study of a strain gauge; liquid surface tension; determination of the simple pendulum quality factor. A characteristic feature of these problems is the fact that the identification of the observed physical parameters is aimed to their direct measurements by digital instrumentation developed as a part of our experimental settings. In part IV, we present our conclusions that point to the need for approximation of the methods of scientific knowledge for methods of teaching physics. Therefore, we confirm priority of pupils' research activities at solving physics experimental problems, which puts pupils into position of the researcher, scientist, and discoverer. The article is concluded by the presentation of prospects of development of the problematic of future teachers of physics education.

II. REVIEW OF PROBLEMS AT PRESENT STAGE

The development of physics as a science in nowadays understanding has been founded in XVII century and firstly associated with the name of G. Galileo, who in contradistinction to predecessor considered that the cause of the phenomena can differ from imagined during an observation. Among many expressions of Galileo, it is possible to distinguish basic one concerning methodology of scientific cognition: "Perceptible experiment, working hypothesis, mathematical development, and experiment verification – these are four phases of the phenomena of nature research; it has begun with experiment and completed them, but cannot develop without an application of mathematics" [1].

Follower of G. Galileo, I. Newton not only successfully used the scientific method of cognition; it acquired further development in his works. Newton saw in methodology of physics as a science not only the stages of cognition but also a strategy of research of nature; he wrote in the work "Philosophiae Naturalis Principia Mathematica" by Sir Isaac Newton (1686) that "All difficulty of physics, as will be seen, is to recognize forces of nature in the phenomenon of motion and then explain other phenomena by these forces" [2].

The most complete and definite opinion of essence of modern scientific method of cognition, in our opinion, belongs to A. Einstein (1952): "(1) the known quantity "E" – there are directly data of perceptible experiment. (2)

Quantities "A" - are axioms from which we output the results. Psychologically "A" is based on "E". But there is no logical explanation that "E" leads to "A". There is only intuitive (psychological) link which never stops to renovate. (3) Statements "S" are derived from axioms "A", and can pretend on rigorous determination. (4) Statements "S" are compared with "E" (test experiment). Consequently, this procedure refers to the illogical (intuitive) areas, because the ratio of concepts of "S" concerns directly data of sensory experiment "E" [3].

Thus, A. Einstein determined that the process of scientific cognition is a cycle that begins and ends with an experiment. The cycle of cognition consists of four phases: 1) collection of experimental data and formulation of the problem; 2) proposition of the hypothesis-axiom; 3) mathematical interpretation of the hypothesis, logical conclusion from its consequences; 4) experimental testing the hypothesis and its consequences.

In the didactics of physics, a cycle of scientific cognition must be adapted to the requirement of modern pedagogic; that is why a problem of approximation of theoretical and experimental methods of physics to the theoretical methods of studies and methodology of physics study of is very relevant.

III. AN ANALYSIS OF KEY PEDAGOGICAL METHODS AND MEANS OF MODERN PHYSICAL EDUCATION

In 70th of past century in methodology of physics study of soviet union' general school an academician V. Razumovskiy succeeded to find for the first time a principle of recurrence - an universal methodological instrument for organization of process of educational cognition. It was presented by logical chain of organization of educational-cognitive activity: "facts, a problem – a supposition, a model - consequence - experiment, practice" [4]. Principle of recurrence in an obvious and non-obvious form is the norm of cognition that is specified for two leading types of educational activity - experimentation and design that are approximated from the methods of scientific cognition of the physics phenomena and processes - experimental and theoretical, which are equal and complementary in physics.

The theoretical cycle of scientific cognition (Fig. 1a) begins with the study of facts, which have proved experimentally or in theory. The examination of facts leads to considerations and bringing up guesswork about physical nature of the investigated phenomenon. Facts are explained by the theoretical model of the phenomenon. The basis of the model consists of qualitative physical and quantitative mathematical models. A model is a hypothesis that is impossible to direct justify by experiment. That's why according to a model and logically reasoning, consequences should be determined. Those consequences are both quality and quantitative values and need experimental verification. If an experiment confirms that the consequences of model correspond to reality, a model is considered to be reasonable within its applicability.

Scientific cognition is provided not only in theoretical cycle, but also in the experimental one (Fig. 1b). An experiment consists of several stages. First of all, it is needed to create conditions of the experiment. The results of experiment are analyzed and interpreted. These give new information about the investigated object, and new facts complement the existent system of knowledge.

Therefore, the complete cycle of scientific cognition in physics consists of two equivalent components: theory and experiment. Moreover, the theories include facts, models, and consequences; experiment includes conditions, result, and interpretation, Fig. 1.

There are several key points of the scientific cognition cycle teaching methodology. Firstly, a transition from facts to the model should be carry out in joint activities of the teacher and the pupil without references to authorities, in every way encouraging their independently putting forward true hypothesis. Secondly, when transiting from the consequences of theory to the terms of experiment, pupils must be acquainted with modern possibilities of experimentation. Thirdly, the system of experiments that describes a physical theory must consist of the demonstration, laboratory forms of educational experiment, and implementation of additional experimental problems that provides effective organization of educational-cognitive activity, also including researching work.

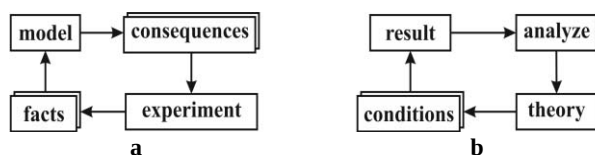


FIGURE 1. Experimental (a) and theoretical (b) cycles of scientific cognition.

There are several key points of the scientific cognition cycle teaching methodology. Firstly, a transition from facts to the model should be carry out in joint activities of the teacher and the pupil without references to authorities, in every way encouraging their independently putting forward true hypothesis. Secondly, when transiting from the consequences of theory to the terms of experiment, pupils must be acquainted with modern possibilities of experimentation. Thirdly, the system of experiments that describes a physical theory must consist of the demonstration, laboratory forms of educational experiment, and implementation of additional experimental problems that provides effective organization of educational-cognitive activity, also including researching work.

Optimally is when an educational experiment is closely related with the theoretical bases of the physical process or phenomenon that are investigating. It means that such experiment is not illustrative, but evidential, and its result gives full explanation. It accentuates the importance of a question of providing of sufficient teachers of physics training and provision of experimental devices that are necessary because of hard requirements of presence of educational experiment practically at each lesson [5].

In the process of scientific cognition, a transition from facts to the model and from consequences to the experiment carries intuitional character that is why these facts determine essence of thinking of pupils.

A. Experimental physics problems

Solving of physics problems leads to development of pupils' thinking. However, computational problems can investigate only the theoretical models of the phenomenon and do not penetrate deep in processes that form physics thought. In other words, it is possible to learn how to solve problems, but do not learn physics.

Another situation is experimental problems solving where the first thing is facts searching about formulation of data of the problem and then a theoretical model creating. The other case is when the result of theoretical solving confirms an experiment. Every of the problems can be realized by demonstration or frontal variant or be a part of the research work in accordance with the types of educational experiment. The question of development and adjustment of experimental problems is very actual one.

Installation and fulfillment of educational physics experiment requires special conditions for its realization; the equipment must be prepared, the experimental installations must be collected and finally an experiment must be properly conducted. When getting a result in the process of observation of the phenomenon, the attention must be paid to its basic features. If it is possible, quantitative description of the investigated phenomenon should be determined. In the process of analyzing, it must be held comparison between the received result and the results of other experiments. Also, it is necessary to explain received result and predict the new phenomena. Set of experiments for explanation of the theoretical models of the physics phenomena, problematic and interesting experiments, and also experimental problems must be presented at almost every lesson and should be realized, if it is possible, by one of the variant.

Nowadays, standard classification of physics educational experiment according to forms of its realization (demonstration, laboratory work) needs detailed presentation of scientific methods of cognition of nature: fundamental, testing, applied, phenomenological, functional, natural, estimated, virtual, real, speculative, imaginary [5].

This article presents content of scientific cognition cycle using the examples of educational theory and educational experiment that is characterized by implementation of forms and methods of measuring by modern digital devices and by prompting variants of experimental problems creation. In this case, necessity of such implementations is characterized by the number of requirements in relation to initial equipment accessories in cabinets of physics and laboratories, in particular, principles of "minimum creates maximum", "increasing of the coefficient of usage of equipment", "integration of studying devices", "quantitative measuring in a demonstrative experiment" and others [6].

We offer the experimental installation that is collected on the base of digital measuring devices: electronic balance of SEJ Series and digital calipers; home-made equipment and typical equipment of physics cabinet.

B. Making the home-made equipment

A plate (1) with sizes of 4x50 cm is the durable foundation to fix the following: the pulleys (2) near the left and right edges; stretching mechanism (3) at the right edge; U-shaped holder (4) for fixation of the end of immobile part of calipers at the distance of 15 cm from the right edge, Fig. 2.

A bar 3x4 cm and 7 mm of thickness (5) is cut out from metal or textolite. It is made a cut on the bar, as a result, a ruffle appears; and the left part of calipers is fixed on it by a clamp of tin. A pulley (6) is fixed to the top part of the bar, with its help the calipers is based on the upper bound of the plate. A hole is making and cutting the thread of M 5 at the distance of 1 cm from the top edge of the bar. A screw (7) with a corresponding thread presses two rectangular pucks (8). The left edges of specimen (wire strands, sensors), which are investigated in the experiment, are clamping between the pucks. The right edge of movable part of calipers is clamped between the low edges of two metallic plates (9) with size of 1 x 2.5 cm. A hole with the thread of M 5 is made through the upper edges of the plate. A screw (10) with a corresponding thread presses two pucks to the bar; the right edges of specimen are clamped between the pucks.

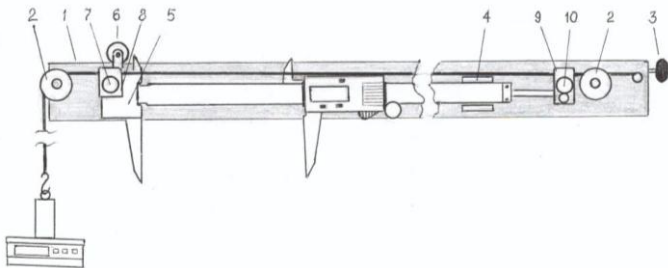


FIGURE 2. Installation collected on the base of digital measuring devices.

Metal rods 5-10 cm long are fixing to inverse side of the plate (1) at the distances of 5 cm from its edges; with their help, the plate with details is fixing horizontally on the racks of two tripods.

C. Examples of physical experimental Problems

Problem 1. Research of resilient properties of solids.

Equipment: 1) Installation collected on the base of digital measuring devices; 2) Micrometer; 3) Electronic scales; 4) Ruler; 5) Wires made from different materials, rubber band.

Contents and the problem processing.

Stiffness k of the deformed sample is related to its initial length l_0 and to cross-section area S by:

$$k = E \frac{S}{l_0}, \quad (1)$$

where E is elastic modulus calculated by a formula

$$E = \frac{Fl_0}{S \cdot |\Delta l|}, \quad (2)$$

where F is a force of elasticity determined by law of Hooke as

$$F = -k\Delta l, \quad (3)$$

where Δl is a linear elongation of the sample.

Measuring the elastic modulus of the investigated sample (homogeneous thin cylindrical form wire) using offered by us device allows doing it with the adequate accuracy. The obtained results of measuring are similar to the table values, which are given in the special reference book.

Straightened section of the wire is fixed between pucks 8 and 10 as shown on Fig. 2. The left end is attached to the weight on the scales by means of the hook; right end of the wire is attached to the clamp mechanism 3. The general view of the installation is presented on Fig. 3.



FIGURE 3. The experimental installation for research of resilient properties of solids.

The experiment fulfillment is following: turn on measuring devices; indications of electronic scales set on zero; stretch a wire until the indications on the panel of scales will differ from zero; set indications on the panel of scales and electronic calipers at zero again.

Begin measuring with length of the investigated sample l_0 between pucks 8 and 10. Stretch out the sample with the help of mechanism 3 and measure indications of F (electronic scales) and Δl (electronic calipers) several times. The cross-section of the wire S is measured by a micrometer.

If we replace a metallic wire in the offered experimental installation by the rubber band of considerable thickness, it will be possible to investigate elastic properties of rubber. We can formulate corresponding experimental problem where the process of linear stretch of rubber band will be investigated depending on change of the rubber band cross-section during its deformation. Measuring of the rubber band diameter or thickness can be done by micrometer with accuracy up to hundredths of a millimeter.

Offered by us implementations of the problems of research of properties of solids during their deformation in mechanics acquire further development in classic electrodynamics. In particular, conductivity (resistance) of wires depends on their shape and geometrical sizes.

Problem 2. Research of action of strain gauge.

Equipment: 1) Installation collected on the base of digital measuring devices; 2) Micrometers; 3) Ruler; 4) Bridge for resistance measure; 5) the metallic strip with stuck strain gauge transducer.

Contents and the problem processing.

We used strain gauge transducer with resistance of 100 Ω stuck on a metallic (duralumin) strip. The length of the strip allows fixing its ends between pucks 8 and 10. Also the edges of steel wires are fixed to these pucks. Other edges of the steel wires are attached to the left block and to the tension mechanism.

Contacts of the strain gauge are connected to the ohmmeter or, for more exact measuring, to the resistance bridge.

The main objective of the problem is to research qualitatively the dependence of resistance of a sample on its geometrical sizes. In the problem, the size of the sample is a size of the strip with the stuck strain gauge transducer. Because of a size of the strain gauge transducer is less than the strip, the change of the transducer length and width depends on changes of the strip. Therefore, the change of the transducer length

$$\Delta l_t = \frac{l_t}{l_s} \cdot \Delta l_s. \quad (4)$$

The results of measuring depend on selection of a material of high quality and sizes of the strip. If received values are qualitative, it is possible to determine the coefficient of sensitiveness of the strain gauge transducer that is determined by the formula:

$$K = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l}. \quad (5)$$

At the same time, by means of our experimental installation, it is possible to make implementation of other experimental problems: measuring of coefficients of deformations of different types; determination of transfer coefficient of strain gauge transducer, determination of structure and action of electronic scales.

Problem 3. Determination of surface-tension of liquids.

Equipment: 1) Installation collected on the base of digital measuring devices; 2) Electronic scales; 3) lifting unit from the device for "Demonstration of surface-tension" (DST); 4) Ruler; 5) Calipers.

Contents and the problem processing.

This installation is analogical to the installation that we made for determination of surface-tension DST. In the new installation, the left end of a thread is thrown over the block and attached to the load on the electronic scales; the thread right end is attached to the ring or to wire framework those contacts with the surface of the liquid in a glass. The glass is placed on a stand, which is slowly lowered or lifted by means of the screw at the bottom of the holder rotation, Fig. 4.

The problem is to measure a ring or framework size and determine the length of connection of the ring with the liquid where the force of surface tension F acts. For relatively small thickness of the framework or ring, the length equals the double length of the ring or to perimeter of the frame.

When the installation is compiled, scales should be switched on and the stand with the glass should be lifted to the complete contact of the ring (framework) with the surface of the liquid. Then, the stand is slowly lowered and we can watch readings of the scales. When readings begin change, we set the previous display value of the scales and set zeros on the indicator board. Then we begin slowly lower the stand with the glass filled by a liquid, watching readings of the scales. Maximum value when the ring unstuck from the surface of the liquid are measured. Experiment is repeated several times and the average value of surface tension of the liquid is determined.



FIGURE 4. The experimental installation for determination of surface tension of liquids.

It is worth to notice that quality of the experimental data is sufficient for implementation of research problems for determination of surface tension of different liquids. In particular, researches of dependence of surface tension of solutions (for example, solutions of sugar) on its concentration with the graphic image of corresponding

experimental dependence. Experimental curves allow the calculation of sugar concentration in the test solution.

Problem 4. Determination of Quality factor (Q factor) of a simple pendulum.

Equipment: 1) Installation collected on the base of digital measuring devices; 2) Electronic scales; 3) Laboratory tripod with couplings; 4) Ruler; 5) Starting electromagnet; 6) DC power source; 7) button switches; 8) conductors.

Contents and the problem processing.

If an oscillating system (simple pendulum, elastic pendulum, oscillating circuit, etc.) performs free oscillations (moving only under the action of internal forces), its oscillations are harmonic. But almost any oscillating system actually performs damped oscillations when its deviation from the equilibrium is gradually reduced. Such oscillations are inharmonic (an amplitude loses meaning in a literal sense as well as a frequency). However, when weakly damped oscillations (eg, friction force is much less than the elastic force), the damped oscillations are considered close to sinusoidal, they have a variable amplitude and a conditional period.

Variable amplitude is the maximum deviation from the equilibrium position value, which depends on time by a downward exponential progression.

Conditional period is a time interval between two successive maximum deviations from the equilibrium position in the same way. Then:

$$x(t) = A_0 e^{-\beta t} \cos(\omega t + \alpha_0), \quad (6)$$

where A_0 is the initial amplitude ($t = 0$); β is a damping factor; ω is a conventional frequency of damped oscillations, wherein:

$$A = A_0 e^{-\beta t}; \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \beta^2}; \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad \beta = \frac{c}{2m},$$

where c is a coefficient of friction. $F_F = -cv$ is a viscous friction force, which is proportional to the oscillation point linearity.

What do we need to understand under the expression "weak damping"? A quantitative characteristic of the oscillations damping degree (Q factor) is introduced for the aim. The main reason for oscillations disturbance is a quasi elastic force $F_E = -kx$, and the main reason of damping is a friction force $F_F = -cv$.

Quality factor of a system is a characteristic of the system and the environment, which is numerically equal to the ratio of maximum elastic force to the maximum friction force, i.e.:

$$Q = \frac{F_E}{F_F} = \frac{kx_{\max}}{cv_{\max}}. \quad (7)$$

But $x_{\max} = A$; $v_{\max} = \omega_0 A$. (Here we consider that β is small and, therefore, $\omega \approx \omega_0$). As a result:

$$Q = \frac{k}{c\omega_0} = \frac{m\omega_0^2}{c\omega_0} = \frac{m\omega_0}{c} = \frac{\sqrt{km}}{c}. \quad (8)$$

Thus, experimental measurement of an oscillating system Q factor requires indirect measurements; therefore, it is not simple and clear for educational experimentation in physics. We propose another approach and choose as a basis a different definition of a damped oscillatory system.

For a simple pendulum, is defined as the ratio of the total energy W to the value of the energy loss for the quarter period W_1 due to its dissipation (loss of energy due to friction). Then, Q factor for the damped oscillatory system can be written as

$$Q = \frac{W}{W_1}. \quad (9)$$

Performing the experiment consists in the following. First, we have to find the total mechanical energy of the pendulum, which it has at the beginning of oscillations, then, to find loss of part of this energy for a quarter of its period.

The idea of the experiment is to study the oscillatory motion of the simple pendulum. The active part of the experimental setup is a tripod with a rod; a string with a metal ball hung up to the rod. Below the first rod, a second rod fastens so that the thread in the upright position (balance of the pendulum) just touches the lower rod, Fig. 5.

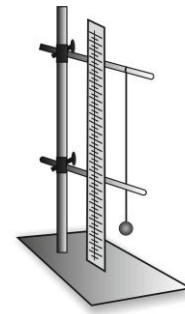


FIGURE 5. Schematic representation of the active part of the experimental setup for determination of the simple pendulum Q factor: tripod with fixed rods, the upper rod fixes the position of the pendulum; the lower rod adjusts its length.

In the initial position of the pendulum, the thread is horizontally stretched. Accordingly, the ball height for initial deflection of the pendulum is equal to its length l . The released ball moves to equilibrium; when it is reached, the pendulum will have a limit of the lower rod (thread catches on the lower rod), and oscillations continue but the pendulum length becomes less (it decreases by the distance between the rods on the tripod, for example, by $l_1/2$),

Fig. 6. Changing this distance, you can expect several consequences: the ball can describe a circle or circles around the lower rod; the ball can reach a top position with a vertically stretched thread and stop for a moment then fall vertically downward under the force of gravity until it compensates by the thread tension force. The latter result is interesting because complete loss of mechanical energy of the pendulum can be calculated without regard to its kinetic energy.

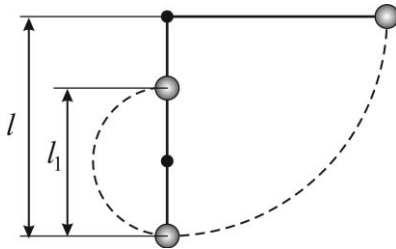


FIGURE 6. Schematic representation of the trajectory of the simple pendulum: l is the length of the pendulum at the beginning of the motion; $l_1/2$ is the length of the pendulum at the end of the motion.

Initial mechanical energy of the system is calculated by the formula

$$W = mgl, \quad (10)$$

where l is the entire length of the pendulum.

The value of energy when the ball reaches the upper vertical position second time:

$$W = mgl_1, \quad (11)$$

where l_1 is the height to which the pendulum rises reaching the vertical position second time.

Taking into consideration that the underlying oscillatory process lasts half the period of the pendulum (two quarter of the period), then the loss of energy by a quarter of the period can be written as

$$\Delta W = \frac{mg(l - l_1)}{2}. \quad (12)$$

Thus, according to the proposed conditions of the experiment, the quality factor of the oscillating system is defined as

$$Q = \frac{W}{\Delta W} = \frac{2mgl}{mg(l - l_1)} = \frac{2l}{l - l_1}. \quad (13)$$

Therefore, the performance of the experiment consists in finding the position of the lower rod when the ball does not continue a circular motion after the ball reaches the vertical position.

The experimental part of the work can be realized using an experimental setup based on the digital instrumentation (problem 1), involving an additional device for holding and starting the pendulum ball, Fig. 7. A launcher electromagnet is fixed on the tripod; an electromagnet from a lab kit for the preparation of an electromagnetic relay is used for this case. As a power supply, we can use any DC source of 4-6 V. As a convenient, a switch button with free closed contact can be used.



FIGURE 7. Experimental setup to determine Q factor of a simple pendulum.

End of the pendulum thread is attached to a load placed on a balance. The other end of the thread is thrown over a pulley on the installation; a metal (iron) ball is attached to the other end of the thread.

A horizontal rod is attached to the tripod. An electromagnet is attached to the rod so it supports the declined pendulum ball and the thread in horizontal position. A second rod is attached below to the tripod so that, when the pendulum is in equilibrium, the middle of the vertically oriented thread touches the second rod at the right side. Another thread is attached to the same end of the rod; it is taut and fixed by other end to the slider calipers (between washers by means of the screw 10).

Performing the experiment consist in finding the total mechanical energy of the pendulum, which it had at the beginning of oscillations, and loss of part of this energy for a quarter of its period.

The initial position of the pendulum is position of the horizontally stretched thread, where the ball is held by the electromagnet. Accordingly, height for initial deflection equal to the pendulum length l , which is carefully measured by the ruler. When the ball is released after the switch button pressing, the pendulum begins to oscillate and, after reaching the equilibrium position, the pendulum oscillation continues with smaller length $l/2$. Changing the distance l and measuring its change using calipers, we explore the consequences when the ball describes: circle, circles around the lower rod, the top position with vertically oriented and stretched thread, stopping for a moment to fall vertically downward under the influence of gravity. The last case is

interesting in that the loss of total mechanical energy of the pendulum can be calculated without regard to its kinetic energy according to the formula (13).

So, experimental part is to measure with appropriate precision values of shift of the rod against which the thread catches relative the position of the half-length of pendulum that is provided using digital calipers.

Otherwise the experimental problem is performed by measuring the force exerted to the ball when passing the equilibrium position at half period time, $3/2$ period time, etc. This force is measured by the electronic scales deflection, the initial set of the scales has to be zero. The experiment is repeated several times fixing the maximum value of the force and determining the average value for each experiment.

The proposed variant of the experimental display of damped mechanical oscillations is also available and appropriate to complement the formation of oscillation-wave concentrers in physics course for specialized schools.

IV. CONCLUSIONS

The above-mentioned samples of organization of development and implementation of experimental problems are the examples of providing of quality of scientific cognition of pupils in the area of determination of physical essence of the investigated properties of solids and liquids. At the same time, there are examples of realization of conclusions about the necessity of introduction into the educational physics experiment of research and applied contents, phenomenological, functional and constant experiments that justify corresponding theoretical information and make possible the realization of the problematic and interesting experiments in the contents of corresponding experimental problems at physics study.

The analysis of methodological aspect of physics in its historical development shows its cultural value, educational and developing potential. Physics study must form a valuable relationship not only to the scientific discovery but also to the methods of scientific cognition, to the research methods, to methodology of science. Systematization of the scientific discoveries promotes the reflection of the world scientific picture and forming the scientific world view. The scientific methods of cognition and methods of research of the phenomena of nature in the education contents must orientate pupils to independent cognitive activity and to enable developing their cognitive and creative flairs. Authors executed an attempt of realization of these ideas creating manuals for the future teachers of physics [7, 8, 9, 10].

High level of systematization of physics knowledge obtained and tested by the experimental methods of physics, logical completeness of basic theories, deep penetration of mathematics in it allow considering physics as a standard of knowledge of the nature, inaccessible to majority of sciences. At the same time, the extreme latitude of practical physics applications allowed physics to become the basic instrument of technical progress; inextricable links

of physics with technique that mutually enriches these two industries that have tendency to merger is one of the main features of modern physics. The teachers of physics, scientists-teachers, psychologists, teaching methods specialist search ways of creation of the integral system of physics education that satisfies the modern society scientific development.

In spite of rather high estimation of the achievements of scientists, it is worth to notice that the process of providing of pedagogical universities students by modern knowledge and newest scientific methods of physics is associated with the presence of certain contradictions between: methodology of physics based on the experimental and theoretical methods of research of its objects and the experimental and theoretical methods of physics study in the didactics of physics; the modern level of education of teachers and lecturers of physics and state of realization of fundamental physics education in a pedagogical university; the modern demand of society for the professional level of the future teachers of physics and actual level of their professionally-methodical education.

These contradictions stimulate to settle a number of problems related to physics study at a pedagogical university: by freshmen adaptation to the system of physics teaching at higher school; by the scientific level of complex presentation of experimental and theoretical methods of physics in the corresponding system of teaching; by realization of the sequence between subjects on different educationally-qualifying levels (bachelor, specialist, master's degree, that exist at higher school of Ukraine); by realization of recurrence in studying the experimental and theoretical methods of physics; by interdisciplinary integration of subjects of fundamental, professional-practical and methodical education of students; modernizations of control and evaluations of educational achievements of students studying physics in the conditions of the credit-module system of organization of educational process; organizations of independent work of students et cetera.

REFERENCES

- [1] Locci, M., *History of physics*, (World, Moscow, 1970), pp. 80-81.
- [2] Newton, I., *Mathematical beginnings of natural philosophy*, (Science, Moscow, 1989), p. 3.
- [3] Einstein, A., *About the Method of Theoretical Physics*, Collected works in 4 volumes, Vol.4, (Science, Moscow, 1967), pp. 569-570.
- [4] Razumovskiy, V. G., *Development of creative capabilities student in the process of teaching physics*. Manual for teachers, (Inlightening, Moscow, 1975), p. 272.
- [5] Mayer, V.V., *Against formalism in teaching of physics*, Physics at School 7, 51-60 (2011).
- [6] Razumovskiy, V. G., Bugayov, A. I. and Dick, Yu. I. *Bases of method of teaching of physics are at middle school*, (Inlightening, Moscow, 1984), pp. 336-339.

- [7] Podoprygora, N. V., *The use of electronic facilities for the design of physical experiments*, Physicist and Astronomy at School **4**, 18-19 (2002).
- [8] Vovkotrub, V. P., Koval'ov, I. Z. and Podoprygora, N. V., *Uniting of Olympiads them tasks from physics*, (Advance-guard, Kirovograd, 2007), p. 234.
- [9] Podoprygora, N. V., Sadoviy, M. I. and Tryfonova, O. M., *The Mathematical methods of physics*, (Kirovohrad Volodymyr Vynnychenko State Pedagogical University, Kirovograd, 2012), p. 300.
- [10] Volchanskiy, O. V., Podoprygora, N. V. and Gur'evska O.M., *Thermodynamics and statistical physics*, (Kirovohrad Volodymyr Vynnychenko State Pedagogical University, Kirovograd, 2012), p. 428.

Actividad de Investigación Científica en ambiente universitario: un estudio de sus contribuciones para estudiantes de la Enseñanza Media



Ariane Baffa Lourenço¹, Pedro Donizete Colombo Junior², Marcello Rubens Barsi Andreeta³, Juan Julián Guíllarón⁴, Antonio Carlos Hernandes¹

¹*Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo. Av. Trabalhador São-carlense, 400, CEP 13566-590, São Carlos-SP, Brasil.*

²*Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ensino de Ciências, Universidade de São Paulo, Caixa Postal 66318 CEP 05314-970, São Paulo-SP, Brasil.*

³*Departamento de Engenharia de Materiais Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos, CEP 13565905 - São Carlos-SP, Brasil*

⁴*Departamento de Física, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.*

E-mail: arianebaffa@gmail.com

(Recibido el 22 de Julio de 2013; aceptado el 2 de Febrero de 2014)

Resumen

Presentamos la experiencia obtenida por un grupo de investigación de la Universidad de São Paulo, con la ejecución de Proyectos de Actividad de Investigación Científica (PAICs). Los proyectos fueron realizados por estudiantes de la enseñanza media de escuelas públicas, durante un período de cuatro años, donde el foco de los mismos lo constituyó la actividad experimental de carácter investigativo. Los resultados indican cambios experimentados por los estudiantes, relacionados con lo cognitivo y lo actitudinal. Se evidenció que las actividades desarrolladas por los estudiantes juegan un papel activo, que colabora con el proceso de aprendizaje de los contenidos y con el desarrollo de habilidades durante las actividades experimentales. El desarrollo de proyectos en ambiente universitario, además de las contribuciones en el aprendizaje del contenido de la actividad experimental y de una mejor comprensión del trabajo científico, ayudó a que los estudiantes desmitificasen la concepción que tenían de la universidad proporcionándoles nuevas perspectivas para sus futuras vidas profesionales. Los resultados muestran que nueve de los participantes ingresaron a programas de enseñanza superior de instituciones acreditadas del Estado de São Paulo.

Palabras clave: Proyectos; Investigación Científica; actividad experimental; enseñanza media.

Abstract

This work describes the experience obtained by research group at a university, during the execution of four different Scientific Research Activities Projects (PAICs). These projects were conducted by high school students from public schools, in a period of four years, where they focused their attention in the experimental activities of the scientific research. The results obtained indicate changes in the students' cognitive and attitudinal development. Due to the nature of the proposed activities, the students played an active roll which improved the learning of scientific concepts and also the hand skills involved in the experimental activities. The development of the projects inside the university environment helped the students to demystify the work of the scientists and the sometimes misconceptions about the university. In this way, the projects allowed the students to develop and improve their skills and to get new perspectives for their future professional lives, and as a result, 9 of the students entered in the most renowned universities in São Paulo State, Brazil.

Keywords: Projects; Scientific Research; Experimental activity; High school teaching.

PACS: 01.40.gb, 01.50.Pa, 01.40.ek

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

La actividad experimental es una estrategia que puede traer muchos beneficios a los estudiantes y profesores, tales como ayudar en la comprensión y reflexión de las características del trabajo científico, colaborar en el

aprendizaje de los contenidos científicos, posibilitar las explicaciones de los fenómenos que expresan las leyes, desarrollar habilidades científicas y facilitar que los estudiantes exploren y reflexionen sobre sus opiniones en la explicación de los fenómenos de la actividad experimental [1]. Desde hace décadas en un número significativo de

trabajos se viene discutiendo acerca de la actividad experimental en la enseñanza de las ciencias [2-4]; una de las manifestaciones de estas discusiones fue el volumen especial de *International Journal of Science Education*, publicado en 1996, y destinado a esta temática.

No obstante, la enseñanza de las ciencias en el nivel básico (fundamental o medio) ha estado basada, en muchas ocasiones, en la transmisión de contenidos ya elaborados sin mostrarles el proceso de su construcción, situación que en nada contribuye a los beneficios mencionados anteriormente. Es por ello que es fundamental desarrollar actividades con los estudiantes, adecuadas para la formación de un ciudadano más preparado para asumir una carrera profesional y desempeñar un papel más activo en la sociedad. Para contribuir con esta finalidad, presentamos, el estudio realizado. Describimos las etapas de desarrollo y los resultados obtenidos de la experiencia de integración entre un grupo de investigación de Física de una universidad pública y estudiantes de la enseñanza media de escuelas públicas del Estado de São Paulo. La integración ocurrió en un período de cuatro años en el marco de los Proyectos de Actividad de Investigación Científica (PAICs), promovidos por este grupo cuyo objetivo fue realizar actividades experimentales con esos estudiantes siguiendo la metodología de investigativa científica.

Los proyectos fueron desarrollados en nuestro Grupo de Investigación (www.ccmc.ifsc.usp.br), el cual se dedica al estudio y desarrollo de materiales cerámicos y de crecimiento de cristales. Desde el año 2000, cuando pasa a ser integrante de uno Centro Multidisciplinar para el Desarrollo de Materiales Cerámicos, empezó también a desarrollar e implementar acciones que tienen el objetivo de la divulgación científica buscando, entre otros propósitos, mejorar la enseñanza de las ciencias, en especial en las escuelas públicas brasileiras.

En los PAICs, los estudiantes de la enseñanza media frecuentaban la universidad y participaban en un contexto de actividades similar al que vive un científico, con el objetivo de que, además de aprender los conceptos relacionados con la investigación científica, tuvieran una visión coherente del trabajo que realizan los científicos y se aproximaran al ambiente universitario. Es en este contexto que se desarrolló esta investigación, la cual tiene un enfoque del tipo cualitativo-interpretativo siguiendo como metodología de investigación el estudio de casos, con la cual se describen los resultados obtenidos durante los cuatro años de ejecución de los PAICs con estudiantes de escuelas públicas.

II. MARCO TEÓRICO

La enseñanza de las ciencias en los diferentes niveles escolares se reduce, con mucha frecuencia, a la presentación de conocimientos ya elaborados, en la cual no se proporciona a los estudiantes la oportunidad de aproximarse a las actividades que les posibiliten reflexionar y comprender las características del trabajo científico. Esto hace que tengan una visión empobrecida y distorsionada de

la ciencia, y que genere un desinterés en relación a esta temática, lo que se convierte en un obstáculo didáctico y epistemológico para el aprendizaje [5], promoviendo una situación de baja demanda de los estudiantes para ingresar a los cursos de ciencias exactas en la enseñanza superior [6, 7].

En el caso de la enseñanza de la Física en el nivel básico es común que ocurra, también, lo que se puede denominar la “matematización de la Física” que la torna aún más abstracta por el aún insuficiente desarrollo de las habilidades lógicas de los estudiantes en esos niveles de enseñanza. Algunos profesores tienen el criterio de que para aprender Física es necesario resolver muchos ejercicios abusando de un gran número de fórmulas lo que distancia a los estudiantes del conocimiento y los entrenan para resolver los problemas utilizando modelos matemáticos sin un análisis crítico de sus teorías [8], es decir, se constituye en un proceso de enseñanza-aprendizaje mecanizado, donde el estudiante asume una postura pasiva frente a la construcción del conocimiento.

La Física abordada con ese enfoque no posibilita las explicaciones de los fenómenos que expresan las leyes y se reduce al uso de ecuaciones o fórmulas para resolver el problema. Además, generalmente no se realiza una interpretación de su resultado, lo que colabora a que los estudiantes “vean” la Física desvinculada de la vida y de sus experiencias cotidianas, trayendo como consecuencia el desinterés y rechazo en relación con esa área del conocimiento. Esta distancia entre el currículo que se le ofrece al estudiante y el entorno en el que se desarrolla es considerada como una de las hipótesis que explica el desinterés al que se hace referencia [9].

Lo anterior contribuye a que prevalezca, en los estudiantes de la enseñanza básica, el conocimiento intuitivo de la ciencia en detrimento del desarrollo del conocimiento científico; ambos tipos de conocimientos presentan características implícitas diferentes que conllevan a dos modos sustancialmente distintos de conocer e interpretar el mundo. La aspiración de la enseñanza media debe ser fomentar el desarrollo del conocimiento científico caracterizado por: principios ontológicos donde los fenómenos se interpretan en función de sus relaciones complejas, principios epistemológicos centrados en el constructivismo y principios conceptuales donde las propiedades de los cuerpos y los fenómenos se interpretan como un sistema de relaciones de interacción [10].

Se conoce que, para muchos estudiantes de la enseñanza fundamental o media, la mejor manera para que comprendan la construcción del conocimiento científico y se motiven hacia la ciencia es mediante el uso frecuente de actividades prácticas de carácter investigativo, en las que ellos asumen papeles activos frente a la construcción del conocimiento utilizando procedimientos relacionados con el trabajo de laboratorio, de campo o la resolución de problemas científicos. Esto último implica el desarrollo de un conjunto de procesos y actividades a partir del cual los estudiantes generan nuevos conocimientos, considerados fundamentales para que se conviertan en sujetos competentes, lo que hace que la resolución de problemas

científicos en clase sea totalmente distinta de una simple resolución de tareas y se convierta en una actividad científica verdadera [11].

Los estudiantes cuando se familiarizan con procesos que caracterizan la actividad científica, desarrollan sus capacidades intelectuales, un pensamiento más abstracto y la adquisición adquieren un lenguaje más preciso, de manera tal que acercan los fenómenos cotidianos a los modelos científicos [12]. Una estrategia que posibilita que los estudiantes participen de estos procesos de aprendizaje, es resolviendo problemas que no tienen soluciones inmediatas y que no son resueltos por la simple aplicación de una fórmula, es decir, involucrándolos en lo que se denomina “Actividad de Investigación Científica” (AIC) [13, 14] Borges, 2002).

Los conocimientos obtenidos en este tipo de actividad pueden estar relacionados con tres ámbitos de la capacidad intelectual, siendo estos: a) El conceptual: con la finalidad de reforzar y profundizar la teoría, comprender mejor la aplicación concreta de las leyes científicas y/o construir nuevos conceptos; b) El procedimental: con la finalidad de desarrollar habilidades intelectuales y de comprender y utilizar una metodología científica de la investigación y c) El actitudinal: con la finalidad de incrementar la creatividad, la toma de decisiones científicas y socio-científicas, entre otros aspectos.

En la AIC, los estudiantes deben observar e investigar el fenómeno, proponer preguntas, hipótesis y respuestas para el problema, confrontar sus ideas con las de sus colegas y comunicar los resultados a los pares y, cuando sea posible, a la comunidad en general [15], estos son momentos esenciales para el proceso de enseñanza-aprendizaje y el trabajo de Investigación Científica. El profesor en este tipo de actividad actúa como un orientador, realizando discusiones para desarrollar el pensamiento crítico de los estudiantes y sus capacidades de fundamentación y de argumentación [16]. Los problemas a ser propuestos a los estudiantes en este tipo de actividad deben proporcionar la realización de una profunda y consistente actividad cognitiva y práctica.

Además de lo anterior, la solución de estos problemas debe generar una situación en que los conocimientos y los procedimientos utilizados ocasionen estados de contradicciones e incertidumbres en los estudiantes involucrándolos en un proceso de búsqueda que los conduzcan a la construcción de conocimientos y al descubrimiento de nuevos procedimientos que los ayuden a aprender y a pensar basándose en la teoría. Todo ello contribuye al desarrollo del pensamiento científico de los estudiantes como resultado de la combinación de conocimientos, habilidades, valores, responsabilidades y actitudes [11].

Precisamente, la realización de la AIC contribuye a desarrollar en los estudiantes una actitud de responsabilidad en relación a la investigación, a adquirir actitudes de curiosidad, realizar cambios conceptuales, metodológicos, y actitudinales en general, y aprender sobre la naturaleza de la ciencia [17]. Por ser una actividad que involucra investigaciones científicas semejantes a las hechas en los

laboratorios de investigación por profesionales, los estudiantes pueden comprender que el conocimiento científico se somete a un proceso dinámico y logran desarrollar mejor sus habilidades conceptuales y de raciocinio, características que hacen de la AIC una eficaz herramienta en la enseñanza de la Física y de las ciencias [13, 18].

III. METODOLOGÍA

Los participantes de los PAICs fueron estudiantes de enseñanza media seleccionados por el profesor de Física de cada una de sus escuelas. La selección se realizó tomando en cuenta el interés de los estudiantes por la Física y por las actividades extra-escolares relacionadas con las ciencias. Cada Proyecto tuvo una duración mínima de 12 meses y la posible participación máxima era de cuatro estudiantes que trabajarían con el mismo tema y frecuentarían semanalmente el grupo para el desarrollo de las actividades.

Durante los cuatro años participaron doce estudiantes de tres escuelas públicas del estado de São Paulo, realizando un total de cuatro Proyectos que versaban sobre los siguientes temas: Cama de faquir (involucrando conceptos de presión y fuerza), Superconductividad (involucrando conceptos de electromagnetismo), Polímeros (involucrando las características estructurales de los polímeros) y Las dimensiones macro y micro (involucrando conceptos de escala).

Se pretendió con cada Proyecto que los estudiantes se aproximaran al proceso de construcción del conocimiento realizado por los investigadores en la universidad. Para lograrlo se siguió para cada Proyecto una metodología general de trabajo con la siguiente secuencia: a) familiarización de los estudiantes con la universidad; b) definición del problema de investigación y de la hipótesis; c) revisión de la literatura y planeamiento de las actividades experimentales (tesis para comprobar o no la hipótesis) a ser desarrolladas; d) ejecución y discusión de la metodología experimental y e) presentación de las conclusiones a los pares y a la comunidad en general. Para el desarrollo de esta metodología, cada Proyecto fue dividido en cuatro etapas, las cuales tenían tiempos de duración distintos, determinados por el desarrollo de cada grupo de estudiantes.

Primera etapa: El primer día que los estudiantes asistieron a la universidad se realizó una reunión con los coordinadores, los cuales eran investigadores de la universidad, y se inició su familiarización con la referida institución donde conocieron sus dependencias, visitaron la biblioteca donde aprenderán y harán búsquedas bibliográficas y visitaron el restaurante universitario al cual tuvieron acceso en los días que asistieron a la universidad.

Segunda etapa: En esta etapa se definió el problema de investigación de acuerdo a los intereses de los estudiantes conjuntamente con los coordinadores y el profesor de Física de la escuela. Fueron propuestos los fenómenos físicos en

correspondencia con el problema y fueron formuladas las hipótesis. Una vez determinada la temática en que iban a investigar, los estudiantes hicieron una búsqueda bibliográfica sobre la misma y desarrollaron una charla con la orientación de los coordinadores y su profesor. Es en esta etapa que los estudiantes realizaron el planeamiento inicial de los experimentos a ejecutar con el propósito de responder al problema de investigación aplicando el método científico. Los profesores se reunieron con los estudiantes para orientarlos en relación a los conceptos abordados y la estructura de la presentación. La finalidad de esta etapa fue proporcionar a los estudiantes un primer contacto con el tema de investigación y sus métodos y aprender o perfeccionar la habilidad de hacer presentaciones. Estas presentaciones fueron el inicio del entrenamiento para que los estudiantes pudieran transmitir sus conocimientos adquiridos a la comunidad y a sus colegas de escuela usando recursos audio-visuales constituyendo una parte fundamental del método científico.

Tercera etapa: En esta etapa los estudiantes hicieron los experimentos, discutieron los datos con los coordinadores y profesores de las escuelas y obtuvieron las conclusiones finales. A continuación los estudiantes realizaron presentaciones con el objetivo de divulgar sus resultados, como se procede en el proceso de investigación científica. Estas presentaciones fueron las siguientes:

- a) En sus respectivas escuelas realizaron una presentación, en la que explicaron a los demás estudiantes sobre la temática estudiada y el experimento hecho. Esta presentación ocurrió durante los recreos o recesos entre clases o en las ferias de ciencias.
- b) En los Talleres de “Actividad de Investigación Científica” organizados anualmente por el grupo de investigación, los estudiantes realizaron la segunda presentación. Participaron de estos eventos los integrantes del grupo, familiares de los estudiantes y profesores de sus escuelas.
- c) En eventos científicos universitarios en los cuales algunos estudiantes tuvieron la oportunidad de presentar sus resultados.

Cuarta etapa: Al final de cada Proyecto los estudiantes hicieron un informe que constaba de las siguientes partes: introducción, objetivos, metodología, resultados y discusiones, conclusiones y las perspectivas de trabajos futuros.

El enfoque para este trabajo fue cualitativo y se utilizaron los siguientes instrumentos para la recolección de los datos: los testimonios escritos por los estudiantes al inicio y al final de cada Proyecto, los testimonios de los familiares y coordinadores de las escuelas, los informes elaborados por los estudiantes al final de los Proyectos y las encuestas aplicadas a los estudiantes al inicio y final de los mismos sobre las concepciones que tenían sobre la investigación científica y sobre el proceso de desarrollo de cada Proyecto. Los datos obtenidos fueron analizados teniendo en cuenta los siguientes aspectos:

- a) la concepción de los estudiantes sobre la investigación científica,
- b) la construcción del conocimiento,
- c) el desarrollo de habilidades esenciales para la construcción del conocimiento científico en el área de las ciencias exactas,
- d) la divulgación de los resultados a la comunidad en general y a la comunidad científica en particular y
- e) la desmitificación de la universidad.

Como el objetivo de este trabajo es presentar la metodología general que se utilizó para desarrollar los cuatro Proyectos, se discuten a continuación los resultados generales correspondientes a los mismos y el impacto provocado en los estudiantes. A modo de ejemplificación, se muestran los pasos seguidos en el Proyecto de *Superconductividad* y los resultados relacionados con el mismo.

IV. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En los resultados obtenidos en los cuatro años de realización de los diferentes PAIC se observó que, al inicio de cada Proyecto, los estudiantes tenían la concepción de que la investigación es sencilla de hacer y presenta resultados instantáneos, demostrando que poseen una visión ingenua de las ciencias. Con la realización de los Proyectos, los estudiantes empezaron a cambiar su concepción comprendiendo que el conocimiento científico transita por un proceso de construcción. En sus expresiones se pone de manifiesto de manera interrelacionada lo anterior, como se observa en las siguientes afirmaciones de los estudiantes 1 y 2:

“Antes de empezar a desarrollar una investigación, pensaba que ésta era más sencilla, más fácil de hacer, dando resultados instantáneos. A partir del momento que desarrollamos nuestra investigación, comencé a observar que no es tan sencillo y que no se obtienen resultados instantáneos. [...] una investigación es un desafío mucho mayor y emocionante, pues cada día descubrimos nuevas cosas” (Estudiante 1 – Proyecto Cama de faquir).

“Muchas veces presenciaba las entrevistas de investigadores hablando que sus proyectos tardaban años para concluir y no entendía el porqué de tanta demora. Después de mi pre-iniciación comencé a entender cómo debe ser el proceso científico. Éste requiere mucho trabajo y dedicación del investigador llevando años de estudio hasta la conclusión del proyecto” (Estudiante 2 – Proyecto Cama de faquir).

El tema de estudio de cada Proyecto fue siempre presentado en forma de una observación de algún fenómeno físico, seguido de un problema y su hipótesis en correspondencia con ese fenómeno, lo que sirvió como punto de partida para la construcción del conocimiento. Este problema no tenía una respuesta inmediata, con esto los estudiantes fueron incitados, inicialmente, a sistematizar el conocimiento que

Lourenço, A. B.; Colombo Jr, P. D.; Andreeta, M. R. B.; Guíllarón, J. J.; Hernandes, A. C.

ya tenían sobre física, química y matemática. Proponer una situación problema posibilitó que los estudiantes empezaran a tener una concepción preliminar de la tarea a ser desarrollada [19].

A partir de este momento los estudiantes comenzaron a trabajar con sus concepciones previas y los nuevos conocimientos necesarios para la resolución del problema encontrados en la bibliografía consultada, con ello delimitaron el problema y propusieron la hipótesis. En este proceso se constató que los estudiantes lograron la construcción y reconstrucción del conocimiento científico. En el caso del proyecto de *Superconductividad*, la observación del fenómeno de levitación magnética llevó a la hipótesis siguiente: ¿El origen del campo magnético contrario necesario para que ocurra levitación está relacionado con el hecho de que en el estado superconductor no hay resistencia eléctrica?

Con base a la hipótesis generada en los diferentes Proyectos, los estudiantes, en general, empezaron el proceso de elaboración de estrategias posibles para la resolución del problema donde, además de los nuevos conocimientos, usaron contenidos enseñados en la escuela. Tal aspecto posibilitó que los estudiantes percibieran que estos contenidos no debían ser interpretados como fragmentados y que, en ocasiones, para resolver un problema de física era necesario el trabajo simultáneo con diferentes áreas del conocimiento poniéndose de manifiesto el carácter sistémico del conocimiento científico. Una vez que ya poseían una base de conocimientos sobre el tema, los estudiantes planearon y ejecutaron una metodología experimental (Figura 1).



FIGURA 1. Alumnos durante el desarrollo de sus proyectos.

En el proyecto *Superconductividad*, (hecho por una estudiante), la estudiante realizó la síntesis y sinterización de cerámicas del compuesto $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (material cerámico compuesto de óxidos de itrio, bario y cobre). Para esto, la misma tuvo que realizar cálculos estequiométricos y también realizar la síntesis y sinterización de la cerámica a diferentes temperaturas hasta 950°C [20]. De esta forma integró en la investigación la Química, la Matemática, la Física y la Ciencia de los Materiales.

De manera general en el desarrollo de los PAIC, una vez obtenidos los datos de los experimentos, los estudiantes, los coordinadores y los profesores de las escuelas pasaron a discutir, explicar y relatar los fenómenos que habían observado durante los mismos. Esas discusiones fueron hechas, tanto en reuniones con profesores de la universidad como en charlas que los estudiantes impartían en la institución (Figura 2).



FIGURA 2. Investigadores del grupo discutiendo la ejecución del experimento en el tema *Superconductividad* con una estudiante participante del PAIC.

Lo observado en el desarrollo de los Proyectos está de acuerdo con Campanario y Moya [19] ya que a partir de este momento se puso de manifiesto un conflicto cognitivo entre las diferentes concepciones, lo cual llevó a replantear el problema y a emitir nuevas hipótesis. En el caso que se analiza como ejemplo (*Superconductividad*), las discusiones promovieron que la hipótesis debería ser comprobada mostrando que a temperatura ambiente (donde el material es un semiconductor) y donde la resistividad eléctrica no es nula, el magneto debería quedarse sobre el material sin flotar. Pero, con el decrecimiento en la temperatura por medio del nitrógeno líquido, el material debería transitar al estado donde la corriente eléctrica debería ser cero (estado superconductor). En este momento el magneto iniciaría su levitación. Con esta predicción de un resultado basado en la hipótesis se hizo el montaje del experimento y se realizó la comprobación de la hipótesis.

A continuación se estudió y se discutió por qué ocurre el comportamiento del material en las condiciones del experimento, y se verificó en la literatura que son creadas regiones de vórtices de corriente eléctrica en la superficie del material superconductor, creando un campo magnético contrario al campo magnético del imán. Estos campos

solamente pueden sustentarse cuando la resistividad eléctrica es cero pues, de lo contrario, los electrones pierden energía y el campo magnético sería eliminado (lo que ocurre en el mismo material a temperaturas elevadas). Tal situación está en pleno acuerdo con lo que preconiza Campanario y Moya [19] *“Los nuevos conocimientos se manejan y aplican a nuevas situaciones para profundizar en los mismos y afianzarlos. Éste es el momento más indicado para hacer explícitas las relaciones entre ciencia, tecnología y sociedad”* (p. 186).

Con los resultados obtenidos de los diferentes Proyectos, los estudiantes construyeron instalaciones experimentales sencillas y confeccionaron presentaciones para las demostraciones en las escuelas y en los encuentros científicos. En el caso del Proyecto sobre *Superconductividad* fue necesario proyectar un sistema de enfriamiento con nitrógeno líquido para poder hacer las presentaciones del fenómeno en la escuela. Este sistema consistió de un recipiente de poliestireno, una base de cobre metálico y una webcam.

El recipiente con nitrógeno líquido enfrió el cobre metálico proporcionando la temperatura necesaria para que la pastilla de cerámica superconductora permaneciera a una temperatura por debajo de la temperatura crítica (por debajo de la cual el compuesto se convierte en superconductor). La webcam fue utilizada para ampliar la imagen del efecto de levitación del magneto colocado sobre la pastilla en la pantalla del computador. Con este sistema alimentado por una cantidad aproximada de un litro de nitrógeno líquido fue posible realizar el experimento por más de treinta minutos (Figura 3).

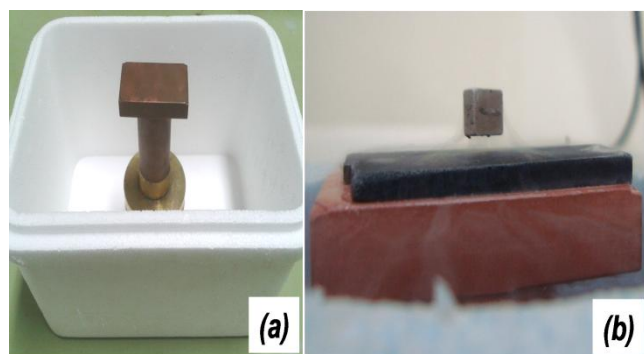


FIGURA 3. Fotos del experimento diseñado para estudiar el fenómeno de la superconductividad. (a) Una parte del sistema de refrigeración del superconductor cerámico que muestra el soporte de cobre metálico sin la tapa superior de poliestireno y (b) imagen obtenida por la cámara de un imán cerámico superconductor flotando sobre el sistema completo.

Se observó que las presentaciones hechas por los estudiantes de los diferentes Proyectos fueron importantes para el desarrollo cognitivo de los estudiantes, pues posibilitó que aprendiesen a relacionar los datos experimentales con la teoría y, también, que mejorasen su desempeño para hablar en público contribuyendo con ello al desarrollo del lenguaje científico y del lenguaje natural,

los que poseen características específicas y diferencias sutiles, pero que pueden ser identificadas cuando se habla, lee y escribe sobre un tema científico [21].

Lo anterior está en correspondencia con la importancia que se le concede en las investigaciones sobre Didáctica de las Ciencias al papel del lenguaje en la construcción de explicaciones científicas y del conocimiento en general, considerando a la argumentación como una importante tarea de orden epistémico y discursivo por excelencia en las ciencias [4]. Propiciarla en las clases de ciencias permite a los estudiantes aprender a interpretar y razonar. Mediante la externalización del razonamiento se procura la evaluación y el mejoramiento permanente de los estudiantes [22].

Después que los estudiantes de los distintos proyectos tenían los resultados consistentes y profundizados, para discutir sobre el tema, hicieron el informe y dos presentaciones finales en sus escuelas y en la universidad (Figura 4), y en algunos casos los trabajos fueron presentados en eventos científicos universitarios. La importancia de estas actividades se muestra en los fragmentos de los textos de los estudiantes 2, 3 y 4 a continuación:

“[...] las presentaciones hechas en la universidad nos aportan mucho conocimiento y experiencia, pues con cada presentación aprendemos todavía más y observamos dónde podemos mejorar y corregir. Con estas presentaciones conseguimos ser más desinhibidos y mejoramos nuestra expresión [...] (Estudiante 2 – Proyecto Cama de faquir)”

“[...] las presentaciones en la universidad son muy importantes, porque por medio de ellas estoy aprendiendo cómo expresarme en público, y a través de las críticas podemos ver dónde estamos acertando y dónde erramos, pero principalmente estoy aprendiendo cómo presentar un proyecto para las personas, lo que puede ayudarme en el futuro como, por ejemplo, en una presentación de un trabajo en una facultad [...] (Estudiante 3 – Proyecto Cama de faquir)”

“[...] además de todo el conocimiento, el proyecto me enseñó a estudiar de verdad, me motivó, y también hizo que perdiera el miedo a hablar en público [...]” (Estudiante 4 - Las dimensiones macro y micro)”



FIGURA 4. Estudiantes presentando su trabajo en su escuela.

Las actividades de comunicación de los resultados fueron fundamentales para que los estudiantes hiciesen una síntesis del trabajo realizado y dio la posibilidad de elaborar nuevos problemas a partir del problema ya resuelto. Las presentaciones hechas por los estudiantes presentaron características muy cercanas a las que se realizan en el ámbito científico propiciando a los estudiantes una percepción de la naturaleza de la ciencia y de la comunidad científica. Los estudiantes de los diferentes proyectos en estos momentos manifestaron ideas adecuadas en situaciones de carácter contra-intuitivo propias del conocimiento científico que se producen en las presentaciones [23]. Esto se evidenció en las afirmaciones de los estudiantes 5 y 1:

“La experiencia con la presentación fue muy interesante, pues posibilitó la interacción del trabajo con los oyentes pudiendo transmitir lo aprendido y mi comprensión del tema. Aunque se trataba de un asunto de poco conocimiento general, hubo agrado y sensación de comprensión por parte de los oyentes que en algunos casos generaron discusiones sobre el tema. Por tanto sirvió como una buena experiencia e integración al trabajo” (Estudiante 5 – Proyecto Cama de faquir)

“Lo aprendido fue elaborado de forma clara y concisa, no tan rebuscada. La presentación promovió, además de la diseminación del trabajo, una experiencia divergente con el público asistente a la presentación. Lo interesante fue que la presentación posibilitó una exposición del trabajo hecho, pero también discusiones sobre el mismo, sus etapas y sobre los estudios realizados relacionados con el tema de la superconductividad” (Estudiante 1 – Proyecto Cama de faquir).

Un aspecto interesante que ocurrió cuando las presentaciones fueron hechas en las escuelas fue que los estudiantes sintieron la necesidad de cambiar su discurso para que los colegas de otros niveles escolares pudiesen entender el trabajo. Es decir, demuestra que aprendieron el significado de lo estudiado durante los PAIC ya que pudieron expresar el conocimiento de diferentes maneras hasta hacerse entender, lo que se encuentra en estrecha armonía con la teoría del Aprendizaje Significativo [24].

Un carácter importante de los PAIC fue el hecho de que fueron desarrollados en el ambiente universitario, esto produjo que los estudiantes, además de aproximarse a lo cotidiano del trabajo de los científicos, desmitificasen la universidad pues, en general los estudiantes de escuelas públicas, foco de este trabajo, la ven muy distante de su realidad [13], como se observa en el fragmento del texto escrito por el padre del estudiante 2 y por el texto del estudiante 3:

“[...] apruebo y valoro la participación de mi hijo en este proyecto, pues a partir de las visitas a la universidad cambió la forma de pensar de él, empezó a tener respuestas de “para qué hacer esto”, de “para qué estudiar aquello”. Entiendo que es de fundamental importancia, pues además de tener más responsabilidad con los horarios, él está

viendo que el universo de la universidad, a pesar de aparentar ser un monstruo, no lo es. Esta frecuente participación está haciendo que él piense en su formación [...]” (Padre del Estudiante 2 – Proyecto Cama de faquir)

“[...] inicialmente yo tenía una percepción menos real de lo que ella de verdad es. Al principio yo veía a la facultad como un sitio que tú ibas después del colegio para profundizar en un área, y posteriormente, obtener un buen empleo, con muchas clases teóricas y una serie de libros que serían indicados para la lectura de los alumnos. Ahora yo veo el mundo universitario como un sitio que permite tener experiencia y un gran aprendizaje” (Estudiante 3 - Proyecto Cama de faquir).

Además, el hecho de que los estudiantes usaron conceptos enseñados en la escuela para desarrollar sus Proyectos posibilitó que relacionasen y aplicasen los conocimientos escolares en la resolución de problemas, como se observa en el testimonio de la directora de una de las escuelas:

“Estos proyectos sin dudas tienen repercusión muy positiva en nuestros alumnos, pues hacen una revisión del saber escolar y con su participación se les muestra la importancia de la comprensión de la realidad cultural y tecnológica del mundo actual. Así, estos proyectos dan sentido al conocimiento, que van además de la compartimentación escolar a favorecer a los estudiantes en la adquisición de capacidades y a la integración al mundo circundante” (Directora de una de las escuelas).

La realización de los proyectos posibilitó también que los estudiantes se preocuparan más con su futuro profesional, conocieran mejor el curso de Física que reciben en sus escuelas y tuvieran una mejor orientación profesional. Otro indicio del éxito del desarrollo de los Proyectos es que nueve estudiantes, participantes de los PAIC fueron aprobados en la prueba de ingreso en las universidades públicas, escogiendo carreras en áreas científicas, como: Matemática Aplicada y Computación Científica, Ingeniería de Computación, Licenciatura en Física, Ingeniería civil y Física Computacional.

V. CONCLUSIONES

En las actividades de investigación expuestas en este trabajo es notable que los estudiantes tuvieron un papel activo en el proceso, lo que les confirió mejores posibilidades de un aprendizaje significativo. Los PAIC proporcionaron a los estudiantes la oportunidad de discutir los problemas propuestos, proponer hipótesis, elaborar y ejecutar experimentos, coleccionar y analizar los datos entre ellos y con los investigadores de la universidad; y relacionar los conceptos de Física con otras áreas del conocimiento. Los estudiantes se familiarizaron con la investigación científica y sus procesos, proporcionando un cambio de la visión simplista que tenían de la ciencia.

El hecho de desarrollar el trabajo en el ambiente universitario ayudó a que los estudiantes desmitificasen la universidad, proporcionándoles nuevas perspectivas para sus futuras vidas profesionales; logrando inclusive que nueve estudiantes ingresasen en la enseñanza superior en instituciones renombradas del estado de São Paulo. El contacto directo con la universidad y la realización de los proyectos provocó que los estudiantes se preocupasen más de su futuro profesional, conociesen mejor el curso de las actividades científicas y mejorasen su comportamiento y su responsabilidad en el ambiente familiar y escolar.

Con los resultados obtenidos se observó que los PAIC posibilitaron a los estudiantes desarrollar un proceso de construcción del conocimiento científico, de manera que no solamente aprendieron conceptos nuevos, sino que modificaron los ya existentes en su estructura cognitiva. Además, desarrollaron habilidades en relación con el trabajo experimental utilizando una metodología científica de investigación; trabajaron en grupo; tomaron y autorregularon sus decisiones; desarrollaron creatividad en la realización de los experimentos y también maduraron sus proyectos de vida profesional futura.

La experiencia expuesta en este trabajo mostró que es posible involucrar la universidad por medio de sus investigadores en la formación de estudiantes de enseñanza media, contribuyendo a la alfabetización científica, o sea, proporcionando conocimientos sobre la construcción de la Naturaleza de la Ciencia y sus conceptos científicos, además de ayudar en la aproximación de la escuela y la universidad.

REFERENCIAS

- [1] Pereira, B. B., *Experimentação no ensino de ciências e o papel do professor na construção do conhecimento*. Cadernos da FUCAMP **9**, 1-9 (2010). <<http://www.fucamp.edu.br/editora/index.php/cadernos/article/view/176/170>>. Consultado el 13 de Marzo de 2014.
- [2] Gabel, D. L., *Handbook of Research on Science Teaching and Learning*, (Macmillan Pub Co., New York, 1994).
- [3] Fraser, B., Tobin, K. G., *International Handbook of Science Education*, (Kluber Academic Publishers, London, 1998).
- [4] Colombo Jr., P., Lourenço, A. B., Sasseron, L. H., Carvalho, A. M. P., *Ensino de física nos anos iniciais: análise da argumentação na resolução de uma atividade de conhecimento físico*, Investigações em Ensino de Ciências **17**, 489-507 (2012).
- [5] Bachelard, G., *A Formação do Espírito Científico: contribuições para uma psicanálise do conhecimento*, (Contraponto, Rio de Janeiro, 1996).
- [6] Arroio, A., Honório, K. M., Weber, K. C., Homem-demello, P., Gambardella, M. T. P., Silva, A. B. F., *O show de química: motivando o interesse científico*, Química Nova **29**, 173-178 (2006). <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v29n1/27876.pdf>>. Consultado el 13 de Marzo de 2014.

- [7] Cachapuz, A., *A necessária renovação do ensino das ciências*, (Cortez, São Paulo, 2005).
- [8] Vettori, M., Moraes, R., *Pesquisa em sala de aula: uma experiência no ensino de Física*, V Encontro Nacional de Pesquisa em Educação em Ciências, Associação Brasileira de Pesquisa em Educação em Ciências **1** (2005). <<http://www.nutes.ufrj.br/abrapec/venpec/conteudo/artigos/1/pdf/p404.pdf>>. Consultado el 13 de Marzo de 2014.
- [9] Barreras, M.L., Sanmarti, N., *Aplicación de un proyecto curricular de Física en contexto (16-18 anos): Valoración de los profesionales implicados*, Enseñanza de las Ciencias, **30**, 89-102. <http://www.ige.unicamp.br/site/aulas/119/Blanco2_es_v30_n1_2012.pdf>. Consultado el 13 de Marzo de 2014.
- [10] Bravo, B., Pesa, M., Pozo, J. I., *La enseñanza y el aprendizaje de las ciencias. Un estudio sobre "Qué, Cuándo y Cuánto" aprenden los alumnos acerca de la visión*, Enseñanza de las Ciencias **30**, 109-132 (2012).
- [11] Quintanilla, M., Joglar, C., Jara, R., Camacho, J., Ravanal, E., Labarrere, A., Cuellar, L., Izquierdo, M., Chamizo, J., *Resolución de problemas científicos escolares y promoción de competencias de pensamiento científico. ¿Qué piensan los docentes de Química en ejercicio?*, Enseñanza de las ciencias **28**, 186-188 (2010). <<http://ddd.uab.es/record/60788?ln=ca>>. Consultado el 13 de Marzo de 2014.
- [12] Banet, E., *Finalidades de la educación científica en educación secundaria: aportaciones de la investigación educativa y opinión de los profesores*, Enseñanza de las Ciencias **28**, 203-204 (2010). <<http://ddd.uab.es/pub/edlc/02124521v25n1p5.pdf>>. Consultado el 13 de Marzo de 2014.
- [13] Baffa, A., Gomes, G., Hernandez, A., *Actividad de investigación científica con alumnos de nivel medio: un estudio de caso*, Enseñanza de las Ciencias, Número Extra, 2013-2018 (2009). <http://ice.uab.cat/congresos2009/eprints/cd_congres/proposets_html/propostes/art-2026-2031.pdf>. Consultado el 13 de Marzo de 2014.
- [14] Borges, A. T., *Novos rumos para o laboratório escolar de ciências*. Caderno Brasileiro Ensino de Física, **19**, 219-313 (2002). <<http://www.fsc.ufsc.br/cbef/port/19-3/artpdf/a1.pdf>>. Consultado el 13 de Marzo de 2014.
- [15] Keys, C.W., Kennedy, V., *Understanding Inquiry Science Teaching in Context: A Case Study of an Elementary Teacher*, Journal of Science Teacher Education **10**, 315-333 (1999). <<http://link.springer.com/article/10.1023%2FA%3A1009406511999?LI=true>>. Consultado el 13 de Marzo de 2014.
- [16] Carvalho, A. M. P., *Ensino de ciências: unindo a pesquisa e a prática*, (Pioneira Thomson Learning, São Paulo, 2006).
- [17] Lewin, A. M. F., Lomáscolo, T. M. M., *La metodología científica en la construcción de conocimientos*, Revista Brasileira de Ensino de Física **20**, 147-154 (1998).
- [18] Azevedo, M. C. P. S., *Ensino por investigação: problematizando as atividades em sala de aula*, (Pioneira Thomson Learning, São Paulo, 2006).

Lourenço, A. B.; Colombo Jr, P. D.; Andreeta, M. R. B.; Guillarón, J. J.; Hernandes, A. C.

[19] Campanario, J. M., Moya, A., *¿Cómo enseñar ciencias? Principales tendencias y propuestas*, Enseñanza de las Ciencias **17**, 179-192 (1999).

[20] Cava, R. J., Batlogg, B., Van Dover, R. B., Murphy, D. W., Sunshine, S., Siegrist, T., Remeika, J. P., Rietman, E. A., Zahurak, S., Espinosa, G. P., *Bulk Superconductivity at 91 K in Single-Phase Oxygen-Deficient Perovskite $Ba_2YCu_3O_{9-\delta}$* , Physical Review Letters **58**, 1676-1679 (1987).

[21] Souza, S., Drumond, R., *Contribuições e limites do padrão de argumento de Toulmin aplicado em situações argumentativas de sala de aula de ciências*, Revista Brasileira de Ensino de Física **8**, 1-20 (2008).

[22] Henao, B., Stipcich, M., *Educación en ciencias y argumentación: la perspectiva de Toulmin como posible respuesta a las demandas y desafíos contemporáneos para la enseñanza de las Ciencias Experimentales*, Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias **7**, 47-62 (2008).

[23] Campanario, J. M., *El desarrollo de la metacognición en el aprendizaje de las ciencias: estrategias para el profesor y actividades orientadas al alumno*, Enseñanza de las Ciencias **18**, 369-370 (2000).

[24] Ausubel, D. P., Novak, J. D., Hanesian, H., *Psicología Educacional*, (Interamericana, Rio de Janeiro, 1980).

Conceptos y preconcepciones de cinemática y dinámica en ingresantes a carreras de ingeniería



Gloria E. Alzugaray, Claudio M. Enrique, Carlos R. Esterkin

*Facultad Regional Santa Fe- Universidad Tecnológica Nacional,
Grupo de Investigación en Enseñanza de la Ingeniería –GIEDI,
Lavalse 610, 3000 Santa Fe- Argentina.*

E-mail: galzugar@frsf.utn.edu.ar

(Recibido el 22 de Noviembre de 2013; aceptado el 16 de Marzo de 2014)

Resumen

Este trabajo centra su atención en el enunciado de situaciones problemáticas y aseveraciones en Cinemática y Dinámica básicas, presentadas a estudiantes ingresantes a las carreras de ingeniería en la Facultad Regional Santa Fe de la UTN. La discusión de un enunciado involucra, en primer lugar, comprenderlo cabalmente y finalmente determinar la veracidad o no del mismo. Esto le exige a los ingresantes poner de manifiesto preconcepciones y conceptos en Física Básica, luego de haber asistido a un curso introductorio de Física. Se realizó el estudio de las relaciones entre las respuestas y los conceptos científicamente correctos. La muestra involucró a 187 estudiantes, que respondieron el cuestionario, provenientes de escuelas medias de gestión pública y privada de la ciudad de Santa Fe y área de influencia. La evaluación se realizó el primer día de clases sin previo aviso. El análisis de las respuestas detectó debilidades importantes que requieren de una revisión de las estrategias didácticas utilizadas en la enseñanza aprendizaje de conceptos básicos de Física.

Palabras clave: Física, ingresantes, aprendizaje.

Abstract

This work focuses on problematical situations and statements on basic Kinematics and Dynamics, presented to incoming students in engineering careers at the Facultad Regional Santa Fe - UTN. The discussion of a statement involves understanding it, and also if it is correct. This requires students to reveal preconceptions and concepts in basic physics, after attending an introductory course in physics. A study between the responses and scientifically correct concepts was analyzed. The sample involved 187 students from middle schools from public and private management, from Santa Fe city and surrounding areas, which answered the questionnaire. The evaluation was performed the first day of classes without anticipating them. The analysis of the responses identified important weaknesses that require a review of the teaching strategies used in the learning of basic concepts in physics.

Keywords: Physics, freshmen, learning.

PACS: 01.40.Fk, 01.40.-d

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

La resolución de problemas es para el sujeto cualquier actividad en la que la representación cognoscitiva de la experiencia previa como los componentes de una situación problemática, son reorganizados para alcanzar un objetivo predeterminado. En la resolución de problemas hay aprendizaje por descubrimiento y éste es significativo cuando el estudiante relaciona en forma intencionada y sustancial una proposición potencialmente significativa del planteamiento de un problema a su estructura cognitiva, con el propósito de obtener una solución que también sea potencialmente significativa. Por otra parte, la enseñanza de la Física tiene la particularidad de requerir el empleo de las operaciones mentales de mayor complejidad. Es decir, la apropiación de los conocimientos debe evidenciarse

mediante procedimientos tales como la resolución de problemas.

El objetivo central del trabajo es poner la atención en el enunciado de situaciones problemáticas en Cinemática y Dinámica básicas, presentadas a estudiantes ingresantes a las carreras de ingeniería en la Facultad Regional Santa Fe de la UTN. La discusión de un enunciado involucra, en primer lugar, comprenderlo cabalmente y finalmente determinar la veracidad o no del mismo. Esto le exige a los ingresantes poner de manifiesto sus representaciones en Física Básica, luego de haber asistido a un curso introductorio de Física. Se realizó el estudio de las respuestas y los conceptos científicamente correctos, dados por los alumnos a un cuestionario con preguntas y actividades de resolución de situaciones problemáticas.

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La resolución de problemas así como la creatividad son, para Ausubel, formas de aprendizaje significativo que exigen la transformación y la reintegración del conocimiento existente para adaptarse a las demandas de una meta específica o de una relación medio-fines.

En el proceso de enseñanza-aprendizaje se actúa intencionalmente para producir la organización de esta estructura hacia el modelo conceptual consensuado científicamente. Esta conceptualización implica la comprensión de los significados impartidos por el docente. 'La enseñanza se consume cuando el significado del material que el alumno capta es el significado que el profesor pretende que ese material tenga para el alumno.' [1]

El lenguaje facilita la resolución de problemas así como la adquisición de conceptos, por lo tanto, la capacidad verbal y la disposición cognitiva general ayudan a explicar tanto las tendencias de nivel de edad como las diferencias individuales en la capacidad de resolver problemas.

La resolución de problemas es para el sujeto cualquier actividad en la que la representación cognoscitiva de la experiencia previa como los componentes de una situación problemática, son reorganizados para alcanzar un objetivo predeterminado. En la resolución de problemas hay aprendizaje por descubrimiento y éste es significativo cuando el estudiante relaciona en forma intencionada y sustancial una proposición potencialmente significativa del planteamiento de un problema a su estructura cognitiva, con el propósito de obtener una solución que también sea potencialmente significativa. Por otra parte, la enseñanza de la Física tiene la particularidad de requerir el empleo de las operaciones mentales de mayor complejidad. Es decir, la apropiación de los conocimientos debe evidenciarse mediante procedimientos tales como la resolución de problemas.

Las estrategias de la resolución de problemas muestran las mismas características que la formación de conceptos, reflejan la influencia del tipo de problema en cuestión y de las condiciones en que ocurre la resolución del mismo, así como aspectos idiosincrásicos de desempeño cognoscitivo [2].

A. Diferentes enfoques en resolución de problemas en ciencias

La literatura sobre la resolución de problemas muestra diferentes enfoques para su análisis e interpretación. Entre éstos cabe mencionar los trabajos orientados a estudiar las acciones desarrolladas por los sujetos al resolver. En esta línea se sitúan los estudios comparativos sobre la resolución de problemas de los expertos (investigadores, científicos y profesionales) y los novatos (en general, estudiantes o adultos en contextos nuevos). En estos estudios se busca detectar las diferencias sobre los modos de abordaje y de resolución de los problemas propuestos.

Este trabajo se sitúa dentro de una orientación que considera que el aprendizaje es básicamente un proceso de

construcción de conocimientos, en el que las representaciones de los alumnos juegan un papel importante, y se ponen de manifiesto cuando se razona, se explica y se desarrollan actividades que comprometen respuestas para resolver una situación problemática. En este sentido, la resolución de problemas tiene lugar en cualquier nivel del proceso de enseñanza-aprendizaje donde el estudiante encuentra una dificultad que se le presenta como un desafío y que lo incentiva para superarla y entenderla.

La resolución de problemas reúne tareas extremadamente diversas según se ha establecido anteriormente, de la cual dan cuenta los resultados emergentes desde la investigación [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Algunos de estos trabajos han señalado que, más allá de la existencia de algunos procedimientos generales, se evidencia una marcada dependencia del contenido en las tareas de resolución que demandan estudiar los procesos realizados por el sujeto que resuelve en distintos entornos de trabajo.

La resolución de problemas se ha considerado como parte esencial de la enseñanza de la Física. Los problemas son entendidos como situaciones que plantean, a la persona que quiere resolverla, dificultades para las cuales no posee soluciones hechas o no conoce medios o caminos evidentes para obtenerla [11, 12]. Gil los llama 'problemas abiertos' y Garret los denomina 'verdaderos problemas'.

Sin duda existe un amplio consenso en reconocer que uno de los fines educativos deseables en cualquier institución educativa, es la preparación de los estudiantes para que sean capaces de resolver gran parte de los problemas que surgen, no sólo en las asignaturas que estudian, sino también los problemas de la vida cotidiana cada vez más dependiente de la tecnología [13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21].

Esos problemas cotidianos se acercan más a las situaciones problemáticas abiertas que a los ejercicios tradicionales [22, 23, 24, 25, 26, 27, 28]. Otro aspecto a considerar es el momento de la enseñanza en que se resuelven las situaciones problemáticas en el aula. A este respecto, los distintos investigadores han expuesto el interés que presenta en el aprendizaje la resolución de estas situaciones inmersas en el propio proceso de enseñanza-aprendizaje. Estas situaciones sirven, entre otras cosas, como un proceso de construcción entre la teoría y la práctica –que aparecen perfectamente interrelacionadas y mediando una sobre otra– hasta el punto que se argumenta destruir la distinción entre ambas [29].

Distintos autores [30, 31, 32, 33] que han investigado en resolución de problemas proponen modelos de resolución, que se puede denominar como de investigación, con procedimientos que se asemejan a lo que se considera el modo de proceder en la ciencia. Lo presentan como una alternativa para el desarrollo de desempeños más complejos y creativos frente a la resolución de problemas cerrados, en la que el alumno se limita a aplicar procedimientos conocidos y aprendidos, fundamentalmente de tipo matemático, que llevan a la obtención de la solución.

En esta línea, Gil Pérez (1993) y Ramírez Castro, Gil Pérez y Martínez Torregrosa (1994) fundamentan el modelo

de resolución de problemas por investigación, considerando que el alumno sigue pasos que se acercan al trabajo de un científico novel: partir de un problema, acotarlo, emitir hipótesis, buscar formas de dar respuesta a las mismas, etc. Aunque esta forma de proceder se planteaba únicamente para los denominados “problemas de lápiz y papel”, en posteriores trabajos Gil Pérez y Valdés Castro, 1996 unifican la resolución de estos problemas con la realización de trabajos prácticos, llevando a cabo los alumnos un proceso que incluye partir de situaciones problemáticas abiertas, reflexionar sobre el interés de las mismas, potenciar el análisis cualitativo de esas situaciones, plantear hipótesis, elaborar diseños que permitan dar respuesta a esas hipótesis, analizar los resultados obtenidos, reflexionar sobre el proceso llevado a cabo, etc.

Otros autores que siguen esta misma línea de investigación son Perales Palacios (1993) y Martínez Aznar (1990). El primero habla de resolución como “del proceso seguido para clarificar el problema planteado, implicando dicha resolución la aplicación de conocimientos y procedimientos y de un aprendizaje por parte de quien resuelve” [34] (Cabrera Rodríguez y Bordas Alsina, 2003, p. 29).

La resolución de problemas abiertos supone un proceso de aprendizaje significativo de los conceptos y teorías científicas [35, 36] y también un entrenamiento en habilidades que, sin duda, influyen en esa mejor resolución [37] tales como plantear hipótesis, poner en cuestión resultados, comparar entre resultados o soluciones, separar variables y elaborar modelos.

Al plantearse la resolución de un problema, el sujeto pone en juego una serie de habilidades o capacidades intrínsecas a la persona y de carácter general. En este sentido, la psicología provee de investigaciones que buscan conocer cuáles son estas habilidades, si existen diferencias notables entre expertos y novatos a la hora de resolver qué mecanismos cognitivos se ponen en juego en la resolución, etc. [38, 39, 40, 41].

En el contexto universitario de las carreras de ingeniería, la resolución de problemas en Física es un tema siempre presente en la enseñanza, ya sea como metodología aplicada, como objetivo a conseguir o, simplemente, como actividad puntual de fijación de conceptos.

III. METODOLOGÍA

La muestra involucró a 187 estudiantes, que respondieron el cuestionario, provenientes de escuelas medias de gestión pública y privada de la ciudad de Santa Fe-Argentina y área de influencia. La evaluación se realizó el primer día de clases sin previo aviso.

La alumnos de la muestra, son ingresantes a las carreras de Ingeniería Industrial, Ingeniería en Sistemas de Información e Ingeniería Civil, pertenecientes a la cohorte 2012 que respondieron el cuestionario.

Los ingresantes han realizado previamente un curso introductorio que incluye tópicos de Cinemática y Dinámica, habiéndose realizado una evaluación del mismo

y no siendo condición necesaria haberlo aprobado para comenzar el cursado del primer año. El cuestionario consta de 4 ítems, el mismo fue entregado el primer día del comienzo del dictado de la asignatura Física I (Mecánica).

A. Cuestionario

1- Indique en que institución completó sus estudios secundarios

2- Justifique si las siguientes afirmaciones son verdaderas o falsas:

- a) La velocidad y aceleración de un objeto representan conceptos distintos.
- b) En el vacío, se sueltan dos cuerpos de distinto peso desde una misma altura llegando primero al suelo el más pesado.
- c) Si la velocidad de un objeto es nula, la aceleración también lo es.
- d) Si la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre un cuerpo es nula, su velocidad instantánea es nula.

3- Resuelva las siguientes situaciones problemáticas fundamentando sus respuestas.

- a) Un auto se desplaza en una carretera horizontal con aceleración constante no nula. ¿La gráfica de velocidad en función del tiempo será una recta horizontal, una con pendiente o una curva?
- b) Un péndulo puesto a oscilar realiza oscilaciones de amplitudes decrecientes hasta detenerse. ¿Cómo explica este comportamiento con claros argumentos físicos?

4- Mora y Benito se encuentran en la línea de largada de una carrera de 100m llanos. Mora le termina ganando a Benito por 10m y ella le propone repetir la carrera para darle una ventaja, arrancando Mora a una distancia de 10m antes de la línea de largada.

- 1) Haga un esquema de las dos situaciones planteadas utilizando un sistema coordinado
- 2) Obtenga la relación entre las velocidades de ambos con la información que tienen
- 3) Se anima a determinar quién gana la carrera?

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

A. Análisis de los resultados del cuestionario

Ítem 1

Respecto al ítem 1 del cuestionario referido a la institución de donde provienen los alumnos, se han clasificado en cinco categorías: Escuelas Técnicas, Escuelas Secundarias Públicas, Escuelas Secundarias Privadas, Escuelas de Enseñanza Media Para Adultos (EMPA) y Recursantes. En la figura 1 se muestran los resultados, sólo uno de los alumnos no respondió a la consigna.

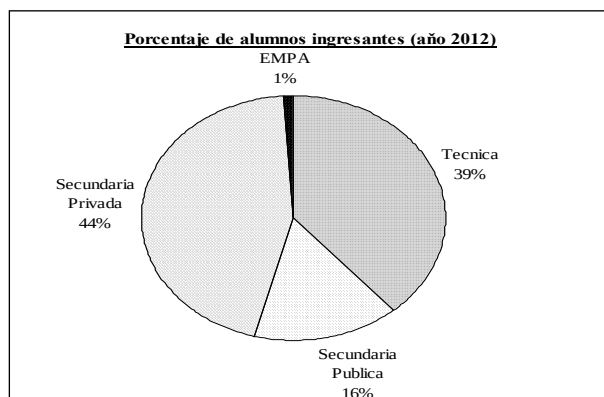


FIGURA 1. Cantidad vs. Procedencia de alumnos de la muestra en porcentajes.

De acuerdo al procesamiento de los datos el 54% proviene de escuelas secundarias y técnicas de gestión pública y el 44% de escuelas secundarias de gestión privada. Habiéndose elevado en un 10% la cantidad de ingresantes de escuelas de gestión privada en relación a años anteriores.

Ítem. 2

Respecto al análisis de las preguntas que corresponden al ítem. 2, los resultados de todas las comisiones se clasificaron de acuerdo al siguiente código de colores: gris oscuro, respuesta correcta; gris claro, respuesta incorrecta (Figura 2).

Las opciones correctas a los incisos correspondientes al ítem 2 del cuestionario son: a) V (verdadero); b) F (falso); c) F (falso); d) F (falso).

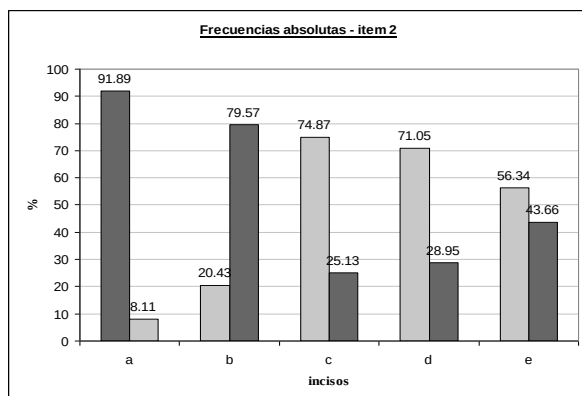


FIGURA 2. Frecuencias relativas a respuestas correctas e incorrectas

El análisis indica que la respuesta correcta con mayor cantidad de aciertos es la correspondiente al inciso a) y representa casi un 92%. Luego la b) con casi un 80%. Por el contrario, la d) fue respondida de manera acertada sólo por casi el 30%, y la c) con un 25%.

Se puede inferir de los resultados que los alumnos ingresantes correspondientes a las carreras de Ingeniería Industrial, Ingeniería en Sistemas de Información, e Ingeniería Civil, tienen asumido mayoritariamente que la

velocidad y la aceleración de un objeto representan conceptos distintos y que no es correcto que en el vacío, si se sueltan dos cuerpos de distinto peso desde una misma altura, llega primero al suelo el más pesado. No obstante ello, les resulta dificultoso a la mayoría interpretar la situación de que es falso que *si la velocidad de un objeto es nula, la aceleración también lo es*. Lo mismo ocurre respecto con la pregunta d), donde es falso que *si la resultante de todas las fuerzas que actúan sobre un cuerpo es nula, su velocidad es nula*.

En las respuestas de los alumnos ingresantes se observa escasa reflexión sobre los conceptos físicos implicados y científicamente aceptados e insuficiente empleo de estrategias lectoras para contribuir a la comprensión del enunciado que se evidencia en una falta de interpretación de las consignas.

La tendencia en los alumnos es la de eludir argumentaciones implicando el significado físico de velocidad, aceleración y fuerza observándose una pobre conceptualización de los mismos aún cuando se lo pueda expresar adecuadamente en forma simbólica.

Ítem 3

En el ítem 3-a, de la figura 3 un 53,70%, respondió correctamente. Más de un 46% lo hizo de manera incorrecta, considerando la gráfica de la recta horizontal y la curva.

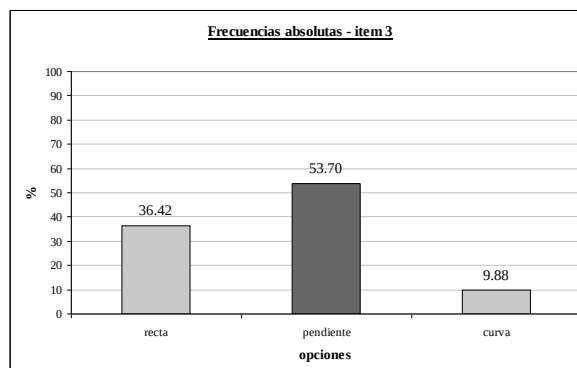


FIGURA 3. Representa las frecuencias absolutas ítem 3-a.

En la consigna de la pregunta se pide la gráfica de la velocidad en función del tiempo para el caso de un movimiento de un objeto con aceleración constante. Esta conceptualización implica la comprensión de los significados impartidos previamente, ya que los conocimientos previos son el puente y la organización para la incorporación, comprensión y fijación de nuevos conocimientos.

En el ítem 3-b la mayoría de los estudiantes no responden, se transcriben a continuación algunas de las respuestas de los alumnos que manifiestan desorientación y desconcierto, no obstante algunos alumnos hacen un análisis correcto de la situación:

“La velocidad comienza a disminuir, al no ejercer fuerza el péndulo”

“Tuvo una aceleración al principio pero luego desapareció, en ese momento la fuerza de gravedad actúa en una parte. Al no haber aceleración, la velocidad disminuye”

“La inercia”

“El péndulo tendería a detenerse por la fuerza de la gravedad y como oscila se pierde fuerza al rozamiento del aire”

“Las amplitudes son decrecientes y luego se detienen por la fuerza de rozamiento”

“Esto se podría explicar por el movimiento circular uniforme: $V = 2\pi r/\Delta T$ ”

“No lo sé explicar”

“El péndulo se detiene ya que cuando oscila, la altura máxima adonde llega su velocidad es nula. Partiendo con $v_i = 0$ el péndulo comienza su viaje de regreso, no llegando a su x_0 sino a una distancia menor por el efecto de la gravedad que lo desacelera poco a poco. Al continuar con este ciclo de desaceleramiento el péndulo se detendrá inevitablemente”

“El radio de las oscilaciones, depende de la velocidad tangencial, al disminuir ésta, las oscilaciones se van achicando hasta llegar a un punto central con una velocidad cero”

“Esto se explica debido a que el rozamiento del aire produce una disminución de la fuerza y la velocidad del péndulo”

La variedad de explicaciones muestran la falta de conceptualización para la explicación correcta de la situación problemática.

Ítem 4

En este último ítem se formula un enunciado de problema, el mismo fue respondido por 137 alumnos de los 187 de la muestra, en el procesamiento de la información se tomó en cuenta si usaron gráficas, ecuaciones y argumentaciones para su solución. Se detalla en la tabla I las categorías y las modalidades asociadas.

TABLA I. Categorías y modalidades en la resolución del ítem4.

Categoría	Modalidad
Uso de ecuaciones	Correctamente
	Parcialmente
	No usa
Representación gráfica	Avanzada (en una y dos dimensiones)
	Parcial (en una y dos dimensiones)
	Incompleta
	No representa
Usa argumentaciones	Correctamente
	No argumenta
	Incorrectamente

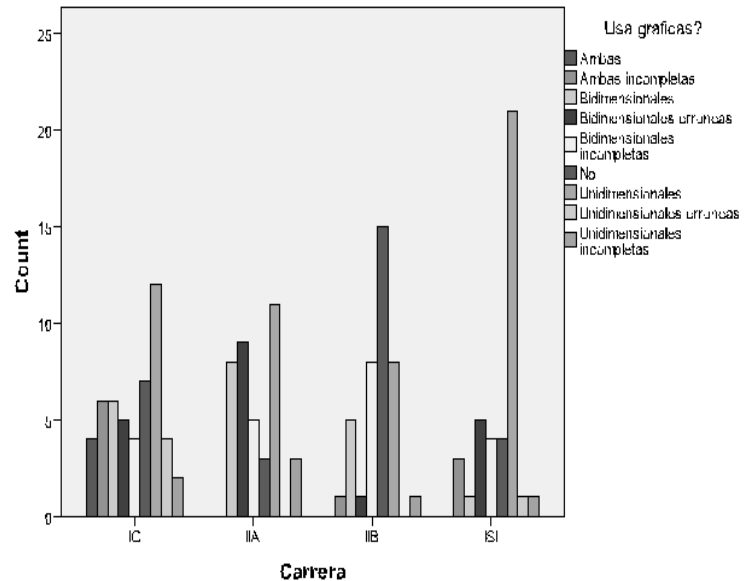


FIGURA 4. Categoría "Usa Gráficas?".

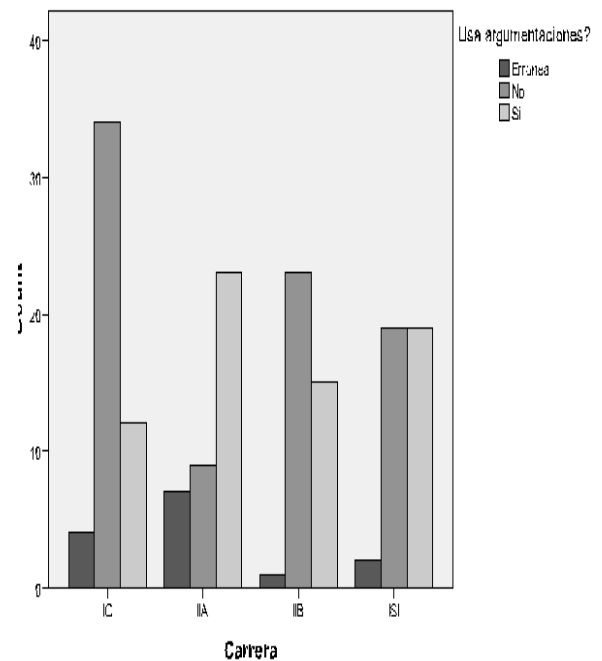


FIGURA 5. Categoría "Usa argumentaciones?".

Del procesamiento de la información surgen los siguientes resultados explicitados en las Figuras 4, 5 y 6

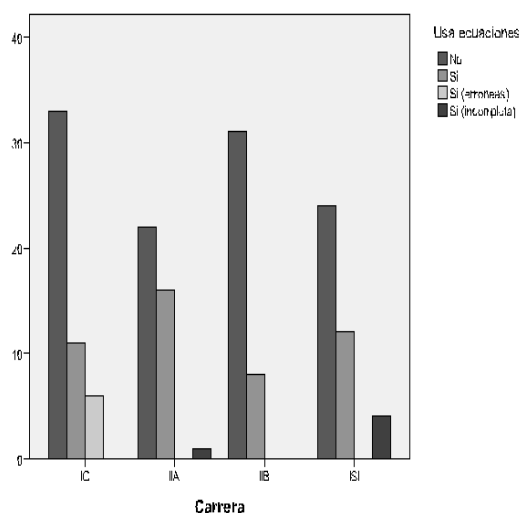


FIGURA 6. Categoría "Usa ecuaciones?".

Se consideró en el análisis el uso de texto escrito en la resolución del problema como argumentación de los alumnos. De la figura 4 se aprecia que sólo el 2,9% resuelve el problema usando las gráficas en una y dos dimensiones, mientras el 23,4% no respondió. En cuanto a las argumentaciones el 33,6% están fundadas en un modelo científico adecuado (Figura 5). El 23% usa las ecuaciones correctamente para su solución mientras el 43,1% lo hace parcialmente (figura 6).

Teniendo en cuenta que estos alumnos han realizado un curso de nivelación los resultados son un llamado de atención ya que hay que ahondar en los mecanismos de la comprensión de las situaciones físicas. Se manifiesta una integración débil e incompleta denotando procedimientos y argumentaciones incompletos.

Se otorga reducido espacio para la construcción del significado físico de los conceptos y de expresiones simbólicas asociadas. Los procedimientos en las clases de resolución de problemas en el curso introductorio se orientan básicamente al cálculo, sin atender a la comprensión de la situación física. La resolución de problemas-tipo aparece, como modelo didáctico hegemónico, sin embargo aquellos alumnos que estructuraron el conocimiento adquirido en forma significativa, en el curso introductorio, dan cuenta del modo en que estructuraron el conocimiento adquirido, favoreciendo el aprendizaje significativo de los conceptos de cinemática y dinámica básicas.

V. CONCLUSIONES

La enseñanza – aprendizaje de la Física en los cursos básicos a nivel universitario demanda la atención de docentes e investigadores.

Siendo la resolución de problemas, para el estudiante una actividad en la que la representación cognoscitiva de la experiencia previa debe ser organizada para que el estudiante reflexione junto al docente y pueda resolver la

situación problemática; y de esa manera apropiarse de los conocimientos científicos.

El análisis de las respuestas detectó debilidades conceptuales que demandan de una revisión de las estrategias didácticas utilizadas en la enseñanza aprendizaje de conceptos básicos de Física.

En las carreras de ingeniería, los cursos básicos de Física, como el de Física Mecánica, dictado en los primeros años de formación, tienen una importante función en el desarrollo de las habilidades cognitivas implicadas en los procesos de conceptualización y formalización requeridos en la resolución de problemas.

En particular en este análisis se han detectado debilidades importantes que requieren la implementación de una propuesta didáctica, en especial con la formación y actualización de los docentes del área de ingreso y una revisión de las estrategias didácticas utilizadas, sobre todo en relación con aquellos conceptos físicos básicos que constituyen modos de razonamientos de mayor nivel de abstracción.

REFERENCIAS

- [1] Gowin, D. B., *Educating*. Ithaca, (Cornell University Press., Nueva York, Trad. cast., 1985). *Hacia una teoría de la educación*, (Ediciones Aragón, Argentina, 1981).
- [2] Ausubel, D., Novak, J., Hanesian H., *Psicología educativa: un punto de vista cognoscitivo*, (Trillas, México, 1991).
- [3] Buteler, L. y Coleoni, E., *Una estrategia de enseñanza para la resolución de problemas en Física a partir de lo que los estudiantes sí saben*, 92ª Reunión de la Asociación Física Argentina, Salta, Argentina, (2007).
- [4] Cabral da Costa, S y Moreira, M. A., *Resolução de problemas IV: Estratégias para Resolução de problemas*, *Investigações em Ensino de Ciencias* **3**(2), (1997)
- [5] Cabral da Costa, S. y Moreira, M. A., *A resolução de problemas como um tipo especial de aprendizagem significativa*, *Cad. Cat. Ens. Física* **18**, 263-277 (2001).
- [6] Cabral da Costa, S., *Modelos Mentais e Resolução de Problemas em Física*. Tesis realizada bajo la dirección del Dr. Marco Antonio Moreira para la obtención del título de doctor en Ciencias. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, (2005).
- [7] Favero, M. H y Soares Gomes de Sousa, C. M., *A resolução de problemas em Física: revisão de pesquisa, análise e proposta metodológica*, *Investigação em Ensino de Ciencias* **6** (2) (2001).
- [8] Gangoso, Z., *Resolución de problemas en Física y Aprendizaje significativo (primera parte: revisión de estudios y fundamentos)*, *Enseñanza de la Física* **12**, 5-21 (1999).
- [9] Massa, M., Sánchez, P., Llonch, E., D'amico, H., *Modos de comprensión lectora de enunciados de problemas*, *Actas del III Encontro Internacional sobre Aprendizagem Significativa*, 379-382 (Portugal) (2000).
- [10] Scancich, M., Yanitelli, M., Massa, M., *De los problemas de lápiz y papel a las situaciones*

experimentales: obstáculos que se pueden presentar durante su resolución, Memorias Noveno Simposio de Investigación en Educación en Física – SIEF 9 Rosario, Argentina (2008).

[11] Garrett, R. M., *Resolver Problemas en la enseñanza de las Ciencias*, Alambique **5**, 6-15 (1995).

[12] Gil Pérez, D., *Contribución de la historia y filosofía de la ciencia al desarrollo de un modelo de enseñanza-aprendizaje como investigación*, Enseñanza de las Ciencias **11**, 197-212 (1993).

[13] Campanario, J. M. y Otero, J., La comprensión de los libros de texto. En Perales, F. J. y Porlan, R., (Eds.) *Didáctica de las ciencias experimentales*, (Editorial Marfil, Alcoy, 2000), pp. 323-338.

[14] Furió Mas, C. J., Iturbe Barrenetxea, J., Reyes Martín, J. V., *Contribución de la resolución de problemas como investigación al paradigma constructivista de aprendizaje de las ciencias*, Investigación en la Escuela **24**, 89-100 (1994).

[15] Jiménez-Liso, M. R., Sánchez, M. A. y De Manuel, E., *Química cotidiana para la alfabetización científica: ¿realidad o utopía?*, Educación Química **4**, 259-266 (2002).

[16] Jiménez-Liso, M. R. y De Manuel, E., *El regreso de la química cotidiana: ¿regresión o innovación?*, Enseñanza de las Ciencias **27**, 257- 272 (2009).

[17] Oliva, J. M. y Matos, J., *La ciencia recreativa como recurso para la enseñanza de las ciencias y el desarrollo profesional docente*, Perspectiva CEP **1**, 89-102 (2000).

[18] Perales, F. y Cañal, P., *Didáctica de las Ciencias Experimentales*, (Editorial Marfil, España, 1999).

[19] Sánchez, I., y Flores, P., *Influencia de una metodología activa en el proceso de enseñar y aprender Física*, Journal of Science Education **2**, 77-83 (2004).

[20] Sánchez, I., *Aprendizaje Significativo a través de resolución de problema integradores y contextualizado por investigación* (ASARPIC), Panorama Científico: Conicyt, **21**, (2007).

[21] Sánchez, I., *Influencia de la resolución de problemas por investigación; en el pensamiento crítico, estrategias y calidad del aprendizaje*, Enseñanza de las Ciencias, Número Extra VIII Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias, Barcelona, 503-3507 (2009).

[22] Cañal, P. y Porlán, R., *Investigando la realidad próxima: Un modelo didáctico alternativo*, Enseñanza de las Ciencias **2**, 89-96 (1987).

[23] Gallego, A., *Imagen popular de la ciencia transmitida por los cómics*, Rev. Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias **4**, 141-151 (2007).

[24] Jiménez-Liso, M. R. y De Manuel, E., *El regreso de la química cotidiana: ¿regresión o innovación?*, Enseñanza de las Ciencias **2**, 257- 272 (2009).

[25] Manrique Del Campo, M. J., *Noticias para plantear problemas*, Alambique **5**, 59-65 (1995).

[26] Membiela, P., (Ed.) *Enseñanza de las ciencias desde la perspectiva CTS*, (Narcea, Madrid, 2001).

[27] Tárraga, P., Bechtold, H., Pro, A., El uso de las prácticas de laboratorio en Física y Química en dos contextos educativos diferentes: Alemania y España”. En *Educatio Siglo XXI*. Universidad de Murcia, Murcia, **25**, 145-166 (2007).

[28] Gil-Pérez, D. y Valdés Castro, P., *La orientación de las prácticas de laboratorio como investigación: un ejemplo ilustrativo*, Enseñanza de las Ciencias **14**, 155-164 (1996).

[29] Carrascosa, J., Gil-Pérez, D. y Vilches, A., *Papel de la actividad experimental en la educación científica*, Cad. Bras. Ens. Fis. **23**, 157-181 (2006).

[30] Ibañez Orcajo, M. T. y Martínez Aznar, M., *Solving problems in Genetics II: Conceptual restructuring*, International Journal in Science Education **27**, 1495-1519 (2005).

[31] Martínez Aznar, M. M., Bárcena, A. I., Ibañez, M. T. y Varela, M. P., *Herencia, Biomasa y energía. Tres campos para investigar resolviendo problemas*, VI Congreso Internacional sobre investigaciones en la Didáctica de las Ciencias, 133-134 (2001).

[32] Villarreal Hernández, M. E., Salcedo Torres, L. E., Zapata Castañeda, P. N., Colmenares, E., Moreno, S. P. y Rivera Rodríguez, J. C., *Incorporación de NTIC en prácticas de laboratorio de química desde la enseñanza y aprendizaje por investigación*, Enseñanza de las Ciencias, 2005, número extra. VII Congreso, 1-5 (2005).

[33] Cabrera Rodríguez, F. A., Bordas Alsina, M. I., *Estrategias de evaluación de los aprendizajes centradas en el proceso*, Revista Española de Pedagogía **59**, 25-48 (2003).

[34] Lopes B. y Costa, N., *Modelo de enseñanza-aprendizaje centrado en la resolución de problemas: fundamentación, presentación e implicaciones educativas*, Revista Enseñanza de las Ciencias **14**, 45-61(1996).

[35] Garret, R., *Resolución de problemas y creatividad: Implicaciones para el currículum de ciencias*, Enseñanza de las Ciencias **6**, 224-230 (1988).

[36] Garrett, R. M., *El resolver problemas y la creatividad*, Enseñanza de las Ciencias **6**(3) (1989).

[37] Lock, R., *Open-ended, problem-solving investigations*, School Science Review **71**, 63-72 (1990).

[38] Dufresne, R., Gerace, W. J., Hardiman, P. T. and Mestre, J. P., *Constraining novice to perform expert-like problem analyse: effect on schema acquisition*, Journal of the Learning Science **2**, 307-331(1992).

[39] Chi, M., Feltovich, P. J. and Glaser, R., *Categorization and representation of physics problems by experts and novices*, Cognitive Science **5**, 121-152. (1981).

[40] Kindfield, A. C. H., *Understanding a basic biological process: Expert and novice models of meiosis*, Science Education **78**, 255-283 (1994).

[41] Snyder, P. J., *Evolutionary bases for cerebral localization of higher cognitive functions*, Brain Lang **73**, 127-131 (2000).

Questões interdisciplinares com enfoque CTS: uma proposta para o ensino médio



Edmundo Rodrigues Junior¹, Adriana G. Dickman², Cassiana B. Hygino¹,
Marília P. Linhares¹

¹Universidade Estadual Norte Fluminense Darcy Ribeiro,

Centro de Ciências e Tecnologia, CEP 28013-602 Campos, RJ, Brasil.

²Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Programa de Mestrado Profissional
em Ensino de Ciências e Matemática CEP 30535-901 Belo Horizonte, MG, Brasil.

E-mail: edmundo.cruzeiro@gmail.com

(Recibido el 5 de Septiembre de 2013, aceptado el 10 de Febrero de 2014)

Resumo

Apresentamos nesse trabalho sete questões interdisciplinares envolvendo os temas: radiação ultravioleta e radiação microonda emitida pelo celular. Essas questões foram construídas com o objetivo de diminuir a escassez de materiais que articulam as disciplinas da ciência da natureza e a matemática. Elas foram elaboradas para o professor trabalhar com os alunos do ensino médio na abordagem Ciência, Tecnologia e Sociedade (CTS) e foram construídas a partir de um questionário de sondagem feito com professores do ensino médio. A análise desse questionário mostrou a dificuldade dos professores sobre o tema, o que reforçou a necessidade de construir questões interdisciplinares para ser trabalhada numa proposta diferenciada em relação ao ensino tradicional.

Palavras chave: Questões interdisciplinares, CTS, ensino médio.

Abstract

This work shows seven interdisciplinary issues involving two subjects: ultraviolet radiation and microwave radiation emitted by cell phone. These issues were made in order to reduce the shortage of materials that articulate the disciplines of natural science and mathematics. These questions were designed for the teacher working with High school students in a perspective of Science, Technology and Society (STS). These issues were constructed from an investigative questionnaire made by secondary school teachers. The analysis of the questionnaire showed the difficulty of teachers to understand the subjects, which reinforced the need to build interdisciplinary issues to be worked in a different proposal in relation to traditional teaching.

Keywords: interdisciplinary issues, STS, secondary school.

PACS: 01.40.-d, 01.40.ek, 01.40.Fk, 01.40.gb

ISSN 1870-9095

I. INTRODUÇÃO

A forma como são ministrados os conteúdos de ciências da natureza e matemática no ensino médio ainda é muito propensa à fragmentação. Geralmente, o professor não apresenta uma visão global desses conteúdos e não proporciona, ao discente, contextualização sociocultural dos conteúdos ministrados, não os reconhecendo, portanto, como uma construção humana num contexto cultural, social, político e econômico. Se isso ocorre dentro de uma mesma área, mais intensamente acontece entre as várias disciplinas que compõem o currículo escolar. As palavras de Salem elucidam a ideia contida neste parágrafo.

De modo geral, na atual estrutura educacional brasileira, desde os primeiros anos na escola primária, até os cursos superiores, o ensino se dá de modo extremamente fragmentado. As matérias são frequentemente ensinadas como se constituíssem campos isolados de conhecimentos,

sem relação uns com os outros, acarretando uma forte compartimentalização na mente dos estudantes [1].

Embora o texto acima tenha sido escrito na década de 80, as análises nele contidas aplicam-se fortemente aos dias atuais. Nas escolas particulares, devido à exigência do vestibular, que, muitas vezes, requer dos candidatos conhecimentos isolados, com a teoria distante da realidade dos mesmos, o professor assume somente a função propedêutica da educação básica, isto é, a de preparar os alunos para o ingresso no ensino superior. Na escola pública, o professor possui maior autonomia para selecionar os conteúdos de uma determinada disciplina. Entretanto, por insuficiência de formação, ou mesmo devido ao número excessivo de aulas que precisa lecionar para garantir sua sobrevivência, ele finda por não exercer tal autonomia no que se refere à realização de um trabalho de qualidade. Dessa forma, os professores não estabelecem objetivos a serem alcançados, não favorecem aos alunos visão geral dos conteúdos, considerando os aspectos tecnológicos,

sociais e culturais da disciplina, e nem inovam suas estratégias de ensino, tendendo a conceber, conforme Hosoume: *objetivos principais, como sendo o aprendizado de leis gerais em nível abstrato e, complementariamente, o desenvolvimento da capacidade de aplicação de tais leis* [2].

A abordagem fragmentada dos conteúdos não consegue responder aos vários questionamentos provenientes do desenvolvimento tecnológico como, por exemplo, o que é ressonância magnética, ou, quais são os efeitos biológicos das radiações no corpo humano. Uma resposta mais abrangente exige conhecimentos cada vez mais articulados entre várias disciplinas como Física, Química, Biologia e Matemática. Giusta comenta a importância da abordagem interdisciplinar para responder a perguntas complexas, afirmando que: *“Cada vez mais, há insatisfação com o isolamento e a insuficiência das abordagens disciplinares para responder aos desafios da complexidade do mundo atual. Isto tem feito com que se retome seriamente o discurso da fragmentação do saber e que se procurem meios para a sua superação.”* (pág. 1, [3]).

É importante salientar que é comum tratar-se superficialmente ou tangenciar conteúdos diversos, apenas para dizer que se está fazendo uma abordagem interdisciplinar. Neste sentido, o conhecimento da disciplina é essencial para a aprendizagem, como podemos perceber nas citações de Giusta e Japiassu. *“Não se contesta a complexidade do real, nem o fato de que o ponto de vista das ciências é indiscutivelmente particular e restritivo. Entretanto, evita-se o idealismo de decretar o fim das disciplinas ou subestimar as competências próprias delas. A interdisciplinaridade surge como saída com base no emprego de estratégias que conciliem essa competência própria dos diferentes domínios com a necessidade de aliança entre eles, no sentido de produzir uma visão menos mutiladora do real”* (pág. 2, [3]). *“O ensino interdisciplinar se apresenta como o remédio mais adequado à cancerização ou à patologia geral do saber. No entanto, na medida em que a maioria das análises permanece superficial, os remédios propostos também não atingem o fundo das coisas”* (pág. 31, [4]).

Infelizmente, muitas escolas de ensino médio ainda valorizam apenas a transmissão de conteúdos estáticos e fragmentados e a consequente repetição de tais conteúdos pelos estudantes. Com essa atitude, torna-se mais difícil para o aluno interagir com o conteúdo, relacioná-lo ao seu cotidiano, e analisar as dimensões sociais e tecnológicas do conhecimento. Para que a aprendizagem do aluno seja significativa, é recomendável considerar os seus conhecimentos prévios, levando-os a ressignificá-los e a estabelecer conexão com os novos conhecimentos. Muitas vezes, a cultura ou tradição da cidade ou da escola limitam na busca de alternativas para a melhoria do ensino. Por exemplo, muitas instituições escolares mantêm a carga horária de 50 minutos por aula, em turno único, reduzindo, dessa forma, a oportunidade do professor em realizar atividades que respeitam o tempo de aprendizagem do discente. Assim sendo, o professor prepara sua aula de acordo com esse tempo restrito, utilizando constantemente

uma pedagogia diretiva, não interativa, que prioriza a transmissão de conteúdos desconexos e provenientes, apenas, de resultados ou teorias já consagradas. Na maioria dos casos, o aluno não é conduzido a perceber, por exemplo, o caráter dinâmico e incompleto da ciência. Conforme as palavras de Nóvoa: *“A burocracia de uma escola está organizada à volta do modelo do saber escolar. Isto pode ser verificado se considerarmos, por exemplo, o plano de aula, ou seja, uma quantidade de informação que deve ser cumprida no tempo de duração da aula. Mais tarde o aluno será testado para saber se a quantidade de informação foi transmitida de forma adequada”* (pág.87, [5]).

Observa-se também a escassez de oportunidades do professor para apresentar suas propostas de ensino de qualidade, com aliança entre as áreas, o que requer tempo maior para sua efetivação. De acordo com minha experiência profissional essas propostas ocorrem geralmente aos sábados letivos, não sendo garantida a participação de todos os alunos.

Com o objetivo de reduzir o ensino fragmentado das disciplinas de física, química, biologia e matemática, fomos motivados a propor algumas questões interdisciplinares que envolvem os possíveis efeitos biológicos das radiações não ionizantes (microondas proveniente da telefonia celular e radiação ultravioleta) no corpo humano. A escolha do tema aconteceu a partir de questionário de sondagem e seminário, ambos realizados com professores do ensino médio. Segundo Porlan e Rivero, os conteúdos escolares devem ser integrados a outros conhecimentos de natureza epistemológicos distintos como, por exemplo, o conhecimento social e cotidiano [6]. Ainda segundo esses autores os conteúdos integrados são fundamentais para a aprendizagem do aluno. Assim, busca-se através das questões interdisciplinares com abordagem CTS (Ciência, Tecnologia e Sociedade), subsidiar o professor de um instrumento para promover a integração entre as disciplinas de biologia, física, matemática e química.

II. ABORDAGEM CTS

A década de 60 do século XX ficou marcada como um período no qual a sociedade começa a questionar os problemas políticos, e ambientais, decorrentes do desenvolvimento tecnológico. A guerra do Vietnã e o Projeto Manhattan propiciaram um olhar mais nevrálgico da sociedade em relação ao poder supremo da Ciência e Tecnologia. Esta reação buscava desenvolver uma consciência ambiental, ética e de qualidade de vida. Nesse sentido, enquanto uma corrente se preocupava com as consequências sociais provenientes do desenvolvimento tecnológico, outra defendia uma ideia da não neutralidade da ciência, dizendo que esta é repleta de valores. Nesta mesma época, autores como Carson e Kuhn mostram um desconforto com o avanço da ciência e suas implicações para a sociedade: Carson se preocupa com os efeitos biológicos do inseticida DDT [7] e Kuhn [8] critica o modelo tradicional de ciência vigente na época. De acordo

com este modelo, o desenvolvimento da ciência, tecnologia e sociedade apresentava uma sequência linear e independente. Assim, o desenvolvimento da ciência propiciava o desenvolvimento da tecnologia, que era a responsável pelo desenvolvimento econômico, que por sua vez era o responsável pelo bem estar social. Após este período de críticas, ainda na década de 60 surgem os primeiros movimentos sociais, preocupados com os impactos ambientais decorrentes dos avanços da Ciência e Tecnologia, dentre os quais se podem citar o “Greenpeace”, a “Environmental Protection Agency” (EPA) e a instrução de discentes universitários.

Nesta mesma época, as universidades de Cornell e do Estado da Pensilvânia são as pioneiras em oferecer currículos interdisciplinares. Nestes currículos os conteúdos eram direcionados para a compreensão do trabalho científico e tecnológico, e procuravam alternativas para contenção dos impactos gerados por este avanço. A busca por novas formas de compreender o progresso científico e tecnológico estava presente em várias partes do mundo. Assim, é comum dividir a origem das discussões sobre ciência, tecnologia e sociedade nas tradições europeia e americana.

A primeira era constituída por acadêmicos, de diversas áreas do conhecimento, e procurava averiguar as influências da sociedade sobre o progresso científico e tecnológico, por meio de estudos teóricos sobre a origem e o desenvolvimento da ciência. Já a tradição americana (ou social) era formada por pacifistas, ativistas dos direitos humanos, associação de consumidores e estavam preocupados com os efeitos do desenvolvimento científico e tecnológico na sociedade e no meio ambiente. Atualmente, esta divisão está superada. Os estudos de CTS abrangem inúmeros programas filosóficos, sociológicos e históricos, e têm como objetivos combater a imagem da ciência como atividade pura e neutra, criticar a concepção neutra e aplicada da tecnologia e provocar a participação pública nas tomadas de decisões. Estas dimensões científica, tecnológica e social encontram respaldo no Projeto de Desenvolvimento Profissional de Educadores (PDP), uma proposta curricular de física para o ensino médio: *O sucesso científico e tecnológico de uma nação é um indicador do seu prestígio e de seu poderio no cenário internacional* (pág. 6, [9]).

Assim de acordo com a citação do parágrafo anterior, deve-se capacitar indivíduos, técnica e cientificamente para que eles participem do desenvolvimento econômico do seu país. Observe que a dimensão científica e tecnológica revela-se através de propósitos econômicos, não sendo, portanto neutra. O caráter social da ciência de acordo com os estudos atuais do CTS revela-se também no PDP: *Com frequência os parlamentos e órgãos executivos tomam decisões sobre temas tais como a construção de usinas termonucleares, instalação de antenas de telefonia, barragens, sistemas de transporte, destino de resíduos radioativos* (pág. 6, [9]).

O PDP sugere que as comunidades emitam suas opiniões sobre decisões que envolvem temas científicos. Nesse sentido, verifica-se que a participação da população

em debates ou entrevistas, por exemplo, implica na necessidade de um entendimento mínimo de ciências. Deve-se salientar também que a abordagem CTS possui caráter mutável, ele deve modificar-se para adequar-se ao desenvolvimento científico, tecnológico e social de uma determinada localidade. A abordagem CTS, na sociedade rural, geralmente se apresenta de forma diferente da abordagem na sociedade urbana, pois geralmente eles estão em contato com tecnologias diferentes.

No que se refere a relação da abordagem CTS e a educação, a orientação educacional CTS permite inovações nos currículos de Ciência e Tecnologia em todos os níveis de ensino, de acordo com as novas finalidades educacionais e propostas de ensino para o século XXI. Sua implantação real e efetiva é possível pela modificação da prática docente e discente por meio de estratégias de ensino/aprendizagem que permitam uma análise, por exemplo, das possíveis consequências biológicas da instalação de antenas para telefonia celular próxima a áreas residenciais. Esta abordagem educacional CTS não pode contemplar apenas um relato de fatos, deve promover a atitude das pessoas, perante as questões tecnológicas. Assim defende-se o uso do CTS no âmbito educacional como uma forma de entendimento dos efeitos relacionados ao uso indiscriminado da tecnologia pela sociedade. Segundo Aikenhead [10], os primeiros autores a conceber a abordagem CTS na educação foram Jim Gateher em 1971 e Paul Hurd em 1975. Em 1977, o Projeto Synthesis, mapeou as escolas americanas, com o objetivo de estabelecer uma visão global da educação em ciências nestas unidades de ensino. Para isso, foram realizadas entrevistas com professores e administradores de escola, e foram feitas observações em aula. A análise das respostas da pesquisa realizada contemplou quatro diretrizes para o ensino de Ciências: Ciência para a necessidade pessoal, Ciência para resolução de questões sociais, Ciência para escolha da carreira e Ciência para formação de cientistas. O resultado deste mapeamento do ensino de Ciências nos EUA, revelado pelo Projeto Synthesis, mostrou que gestores, professores e alunos concebiam o estudo da ciência apenas para a formação de cientistas. Segundo Cruz, este resultado despertou a necessidade dos educadores estabelecerem diretrizes para que o ensino no país atingisse as outras três abordagens [11].

As pesquisas educacionais CTS se expandiram, a partir desse período, para outras partes do mundo. No final dos anos 70 e início da década de 80, era consenso entre os educadores em ciência acreditar na necessidade de criar mecanismos para modificar o ensino tradicional de ciências. O lema CTS foi inserido após reunião da IOSTE (sigla em inglês de International Organization for Science and Technology Education) em 1982. Esta organização era constituída basicamente por educadores europeus. Pinheiro [12] destaca a existência de três abordagens CTS no âmbito educacional. O primeiro tipo “Enxerto CTS” é caracterizado pela inserção de temas CTS nas disciplinas de Ciências, discutindo e questionando a definição de ciência e tecnologia. Na abordagem “Ciência e tecnologia por meio de CTS” (segundo tipo), o conteúdo científico é estruturado

por meio do CTS. Essa estruturação pode acontecer numa só disciplina ou por meio de trabalhos interdisciplinares. No terceiro tipo, “CTS puro” ensina-se ciência, tecnologia e sociedade, tendo o conteúdo científico papel subordinado.

No que se refere a abordagem CTS na formação de professores, o Parecer CNE/CP 9/2001 institui as Diretrizes Curriculares Nacionais para a Formação de Professores da Educação Básica. Esse documento estabelece as orientações gerais para a formação dos professores, mas não se referem à contribuição de nenhuma disciplina específica neste sentido.

Para solucionar esse problema Ferreira e Meirelles [13], apresentam um artigo ao VIII Encontro Nacional de Pesquisa em Ensino de Ciências (ENPEC), no qual elas fazem uma análise do parecer Conselho Nacional de Educação e os demais pareceres posteriores a essa data. As autoras identificam nesses documentos algumas características que remetem indiretamente ao ensino de ciências. Essas características estão relacionadas à importância do ensino de ciências para a formação geral do cidadão, o conteúdo curricular de ciências, a importância da pesquisa para a compreensão da ciência, a interação das especificidades entre os professores, a prática no ensino de ciências, a organização curricular e a carga horária dedicada ao ensino de ciências.

A abordagem CTS nesse contexto aparece relacionada às propostas interdisciplinares, conforme palavras de Ferreira e Meirelles (2011): *“Para exercer a interdisciplinaridade exigida no documento (CNE/CP 2005) é necessário ter uma vivência considerável em ciências. Ser cientificamente culto envolve simultaneamente aprender ciências (conceitos), aprender sobre ciências (métodos, evolução, história da ciência, atitude de abertura e interesse por relações complexas entre ciências, tecnologia, sociedade e ambiente) e aprender a fazer ciência (pesquisa e resolução de problemas) (Hodson, in [13]).*

No que se refere a abordagem CTS no ensino médio, segundo Medina e Sanmartín (in [12]), quando se pretende incluir a abordagem CTS no contexto educacional é importante questionar constantemente as formas herdadas de estudar e atuar sobre a natureza. Sua legitimação deve ser feita por meio do sistema educativo, pois só assim é possível contextualizar permanentemente os conhecimentos em função das necessidades da sociedade. Ainda de acordo com estes autores, a abordagem CTS deve combater a segmentação do conhecimento, em todos os níveis de educação e promover uma autêntica democratização do conhecimento científico e tecnológico, de modo que este não só se difunda, mas que se integre na atividade produtiva das comunidades de maneira crítica. O objetivo do ensino médio anterior aos Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (PCNEM) era direcionado, na maioria das vezes, para o vestibular. Desta forma, o foco educacional era para uma educação propedêutica voltada para o curso superior, com conteúdos muitas vezes descontextualizados, não considerando suas dimensões sociais, políticas e econômicas. Atualmente as diretrizes curriculares, propostas nos PCNEM, fornecem subsídios para promover

a construção de um ensino integrado à sociedade, estabelecendo novos objetivos para o ensino médio, que reforça e não exclui os objetivos do CTS: *“Tínhamos um ensino descontextualizado, compartimentalizado e baseado no acúmulo de informações. Ao contrário disso buscamos dar significado ao conhecimento escolar, mediante a contextualização; evitar a compartimentalização, mediante a interdisciplinaridade; e incentivar o raciocínio e a capacidade de aprender”* (pág. 13, [14]).

Os conteúdos do ensino médio devem atender a população geral, fornecendo uma formação ampla, preparando indivíduos comprometidos a inserir-se e modificar a sociedade em que atua: *“O ensino médio é a etapa final de uma educação de caráter geral que situa o educando como sujeito produtor de conhecimento e participante do mundo do trabalho”* (pág. 20, [14]). A oferta de condições iguais de ensino para as pessoas, não é suficiente para despertar atitudes críticas nos discentes, principalmente em relação ao que se é ensinado. Muitos alunos se encontram em condições de passividade perante o ensino, em geral, por não perceber que a educação pode transformar a sua vida. Sabe-se, atualmente, que o mundo moderno necessita de profissionais dinâmicos, capazes de exercer ações integradoras, participando de equipes interdisciplinares. Um bom profissional deve apresentar facilidade de comunicação e saber dialogar com várias áreas do saber científico. Assim, não basta ao aluno adquirir somente o conhecimento técnico de um determinado assunto específico, é necessário aprender a discernir sobre suas aplicações, para conseguir coerência com o conteúdo estudado. A Lei de Diretrizes e Bases reforça esta ideia, quando estabelece que: *“A educação escolar deverá vincular-se ao mundo de trabalho e à prática social”* [15]. É preciso, portanto, apostar no professor mediador do conhecimento e em um currículo integrado que ofereça ao docente uma metodologia que provoque a inclusão dos alunos na sociedade, e não a sua exclusão. Um dos caminhos para resolver esta questão é a inserção de temas integradores no currículo das escolas, seja no núcleo comum ou por meio da parte diversificada. Esses temas integradores buscam alertar a sociedade, por exemplo, sobre as consequências econômicas, políticas e sociais do uso exagerado da tecnologia. A construção desse conhecimento articulado ocorre por meio de um ensino que integre várias disciplinas, de preferência a partir de temas da realidade do discente. Supõe-se que o assunto escolhido possíbeis efeitos biológicos causados pelo telefone celular e pela radiação ultravioleta funcionem como elementos catalisadores do interesse dos estudantes, uma vez que os mesmos fazem parte de seu cotidiano.

III. METODOLOGIA

Elaboramos um questionário de sondagem com o objetivo de verificar as dificuldades dos professores sobre o tema radiação e ajudá-los a trabalhar esse tema de forma diferenciada. O questionário foi respondido por 13 professores de física e três de biologia, ambos do ensino

médio. A aplicação do questionário ocorreu no ano de 2007 na cidade de Belo Horizonte-MG, enquanto estava cursando mestrado. O questionário de sondagem contém onze questões, sendo que as cinco primeiras possuem questões gerais sobre radiação e as seis últimas contêm questões sobre a radiação ultravioleta e a radiação microonda emitida pelo celular. A escolha da radiação ultravioleta e da radiação emitida pelo celular ocorreu porque esses tipos de radiação estão presentes no cotidiano dos professores. O Brasil é um país onde temos uma grande incidência de raios solares e o aparelho de celular é uma tecnologia muito utilizada no dia-a-dia das pessoas.

A técnica utilizada para categorizar as respostas dos professores foi a análise de conteúdo, definida por Bardin (2010): *“Um conjunto de técnicas de análise das comunicações visando obter por procedimentos sistemáticos e objetivos de descrição do conteúdo das mensagens, indicadores, quantitativos ou não que permitem a inferência de conhecimentos relativos às condições de produção/recepção (variáveis inferidas) destas mensagens”* (Bardin, pág. 44 in [16]).

Segundo a autora, a análise de conteúdos é constituída de três fases: 1) A pré análise; 2) exploração do material, 3) tratamento dos resultados, as inferências e a interpretação.

A pré-análise é a fase de organização do material, que pode utilizar vários procedimentos, tais como: leitura flutuante (estabelecer contato com os documentos: no nosso caso, leitura das respostas dos professores e decisão sobre quais delas estão de acordo com os objetivos do trabalho); codificação (estabelecer um código que possibilite identificar rapidamente cada elemento da amostra, de depoimentos ou documentos a serem analisados: no nosso caso, as questões do questionário foram identificadas como Q1, Q2,...Q11)

Na exploração do material os dados são codificados a partir das unidades de registro entendida como o elemento unitário de conteúdo a ser submetido posteriormente à classificação. Toda categorização ou classificação necessita definir o elemento ou indivíduo unitário a ser classificado [17]. No nosso trabalho as unidades de registro são os conhecimentos prévios dos professores sobre o tema radiação. Para Bardin (1977): *A categorização é uma operação de classificação de elementos constitutivos de um conjunto, por diferenciação e, seguidamente, por reagrupamento segundo o gênero (analogia), com os critérios previamente definidos. As categorias são rubricas ou classes, aos quais reúnem um grupo de elementos (unidades de registro, no caso da análise de conteúdo) sob um título genérico, agrupamento esse efetuado em razão dos caracteres comuns destes elementos* [18].

A categorização pode ser definida *a priori* (sugerida pelo quadro teórico) ou *a posteriori* (que aparecem após a análise do material). No nosso caso, as categorias foram definidas *a posteriori*, uma vez que elas emergiram a partir da análise do questionário de sondagem. A terceira etapa consiste no tratamento dos resultados, as inferências e a interpretação dos resultados. Sobre essa fase, Bardin comenta que: *Os resultados em bruto são tratados de*

maneira a serem significativos (falantes) e válidos. Operações estatísticas simples (percentagem), ou mais complexas (análise fatorial), permitem estabelecer quadros de resultados, diagramas, figuras e modelos, os quais condensam e põem em relevo as informações fornecidas pela análise [...]. O analista tendo a sua disposição resultados significativos e fiéis, pode então propor inferências e adiantar interpretações a propósito dos objetivos previstos, ou que digam respeito a outras descobertas inesperadas [18].

A seguir mostra-se o questionário aplicado e a análise das respostas fornecidas pelos professores. As categorias emergentes foram agrupadas em tabelas.

IV. INTERPRETAÇÃO DO QUESTIONÁRIO DE SONDAÇÃO

O questionário, composto por onze questões (Tabela I), foi respondido por 16 professores, sendo treze físicos e três biólogos:

TABELA I. Questionário respondido pelos professores.

Questionário
*Q1) O que você entende por radiação?
*Q2) Desenhe três coisas que você acredita estarem relacionadas à radiação. Explique seu desenho.
*Q3) Desenhe três coisas que você acredita não estarem relacionadas à radiação. Explique seu desenho.
*Q4) Você conhece alguma forma de se proteger das radiações? Como? Desenhe e Justifique.
*Q5) Indique as disciplinas escolares (Física, Química, Biologia, Matemática, Geografia, outras) que você considera melhor relacionar com os fenômenos que envolvem radiação. Explique sua(s) escolha(s).
Q6) Qual a diferença entre radiação ionizante e não-ionizante?
Q7) Cite três tipos de radiação ionizante e não-ionizante.
Q8) O que é radiação ultravioleta? Quais as principais fontes de emissão?
Q9) Quais os tipos de radiação ultravioleta?
Q10) Existe algum malefício ou benefício para a saúde humana em receber doses de radiação ultravioleta? Se sim, quais são os efeitos para o organismo?
Q11) O uso do telefone celular pode causar câncer?

*Foi baseado no trabalho de Ferreira [19].

Em relação a Q1: O que você entende por radiação? Observou-se que treze professores responderam que são ondas eletromagnéticas, correspondendo a 81% do total. Quatro mencionaram emissão de partículas (alfa e beta) e ondas eletromagnéticas, mostrando ter uma visão mais completa do conceito. Um professor de Física respondeu *energia emitida por uma fonte de luz*, resposta que restringe o termo radiação à faixa em torno da luz visível, podendo

englobar radiação infravermelha e ultravioleta. Um professor de Biologia disse que é *emissão de partículas radioativas por elementos radioativos*. Outro não soube conceituar radiação, embora tenha citado exemplos de fontes de radiação. Abaixo mostramos a resposta dada por esse professor. É interessante observar que ele menciona o telefone celular como fonte de radiação, e confessa não saber qual tipo de radiação está associada a esse aparelho.

Em relação à Q2: sobre coisas relacionadas à radiação. Observou-se entre os mais citados: o Sol e o telefone celular, conforme mostra a Tabela 1. Apenas três professores, dois de Física e um de Biologia, mencionaram radiações ionizantes núcleos radioativos, como exemplo. A maioria dos exemplos, como se pode constatar, é de radiações não-ionizantes.

TABELA II. Exemplos de coisas relacionadas à radiação, segundo os docentes.

Categoria: coisas relacionadas à radiação	Frequência dos exemplos nas respostas
Sol	10
Telefone celular	6
Microondas e seres vivos	4
Antenas de rádio, vela, lâmpadas, desintegração e bombardeamento nuclear.	3
Televisão, luz visível.	2
Descargas atmosféricas, linhas de transmissão, radiação infravermelha e carvão vegetal.	1

Em relação à Q3: sobre coisas não relacionadas à radiação (Figura 1).



FIGURA1. Exemplos de coisas relacionadas à radiação, segundo os professores. Fonte: Arquivo pessoal, 2008.

Sete professores, sendo um de Biologia, afirmam que não existem contraexemplos tudo que existe emite radiação. Cinco professores mencionaram objetos, água, roupa, plantas, madeira, papel, casa, balde, moeda, bola etc. Um professor de Física mencionou a atração gravitacional como contraexemplo e outro explicou que seriam *todos os*

Questões interdisciplinares com enfoque CTS: uma proposta para o ensino médio elementos ou substâncias não radioativas, que não se desintegram por emissão de radiação. Dois professores de Física deixaram a questão em branco. É interessante observar a resposta de um professor de Física que afirmou que *os objetos não emitem calor*, como mostrado abaixo. Concepção errônea, uma vez que todos os objetos a uma temperatura acima do zero absoluto emitem radiação infravermelha.

Uma professora de Biologia hesita ao responder a questão e apesar de indicar três objetos que não emitiriam radiação, ela confessa a dúvida:

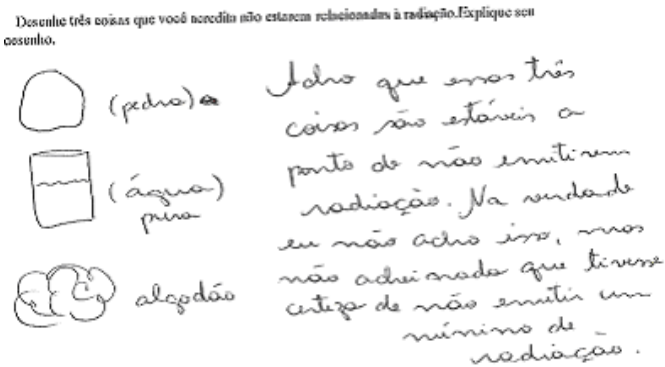


FIGURA 2. Coisas que não se relacionam à radiação, segundo os professores. Fonte: Arquivo pessoal, 2008.

Em relação à Q4: sobre formas de se proteger das radiações?

Dentre as formas de se proteger das radiações, a mais citada foi vestimenta de chumbo (9) contra os raios-X e raios gama, seguido pelo uso de protetor solar (8) contra a radiação ultravioleta (RUV). O número entre parênteses indica a frequência do item nas respostas. O uso de materiais para blindagem, como abrigo com paredes de concreto, apareceu três vezes. Dois citaram o uso de óculos escuros com filtro. E, com um voto cada, aparecem: uso de roupas claras contra a radiação infravermelha, distância de fontes emissoras de radiação, salas com paredes metálicas (rádio e TV), embora, neste último item, o professor afirme que não é necessária proteção contra a radiação em que o rádio e TV operam. Três deixaram em branco. A Tabela III ilustra as respostas fornecidas pelos professores.

TABELA III. Respostas dos professores sobre as formas de proteção contra radiação.

Categoria: formas de proteção	Frequência
Salas com paredes metálicas	1
Manter distância de fontes emissoras	1
Usar roupas claras	1
Usar óculos com filtro	1
Em branco	3
Blindagem	3
Usar protetor solar	8
Usar vestimenta de chumbo	9

Em relação à Q5: os professores indicaram as disciplinas escolares que estão relacionadas com os fenômenos envolvendo radiação na seguinte ordem: Biologia (13); Física e Química (12); Matemática (8); Geografia (7); História (1); todas (1) e em branco (1). O número entre parênteses indica a frequência do item nas respostas. A Tabela IV mostra os resultados.

TABELA IV. Disciplinas que se relacionam com radiação na visão dos professores.

<i>Categoria: disciplinas</i>	<i>Frequência</i>
Física	12
Química	12
Biologia	13
Geografia	7
História	1
Todas	1
Branco	1

81% dos professores consultados acreditam que a Biologia é a disciplina que melhor se relaciona com os fenômenos que envolvem radiação por estudar o seu uso na medicina, mutações genéticas e os seus efeitos sobre os seres vivos. Em segundo lugar vem a Física e a Química empatadas (75% cada). A Física é importante, na visão dos professores, por explicar os efeitos e as fontes de radiação, estudar modelos para a emissão de radiação, além de definir radiação, estudar ondas eletromagnéticas, estrutura da matéria e interação da matéria com radiação. A Química é importante por estudar desintegração de elementos químicos, estrutura dos átomos, fontes de emissão e elementos radioativos. Alguns professores percebem uma sobreposição entre a Física e a Química, principalmente no estudo da emissão e fontes, estrutura da matéria e definição de radiação. Segundo os professores, a matemática é utilizada na manipulação das equações, cálculo de dosagem em tratamentos, determinação da meia-vida, decaimento. A Geografia, com 44% das indicações, sobressai-se na localização de regiões que contenham rochas com elementos radioativos, *global positioning system* (GPS), no estudo dos danos ao meio ambiente e à camada de ozônio, regiões afetadas pela radiação. As respostas “todas” e História que foram fornecidas por apenas um professor (6% dos casos), ficaram sem explicação. A resposta “todas” é meio confusa, pois não se sabe se o professor quis se referir a todas as disciplinas da grade curricular do ensino médio, ou se a todas as disciplinas sugeridas na própria pergunta.

Prosseguimos agora com a análise das respostas dos professores às questões mais específicas do questionário aplicado, questões 6, 7, 8, 9, 10 e 11. Enquanto nesta primeira parte não fizemos nenhuma restrição quanto ao tipo de radiação abordado, as perguntas subsequentes foram elaboradas no sentido de explorar as diferenças entre as radiações ionizantes e não-ionizantes e a discriminação desses tipos de radiação. Explorou-se, também, o conhecimento dos professores em relação a alguns tipos específicos de radiação não-ionizante, como radiação ultravioleta, microondas, radiação infravermelha, luz visível etc. Outro ponto discutido nesta sondagem foi a

possibilidade das radiações não-ionizantes causarem algum tipo de benefício ou malefício à saúde humana. Em particular, a pergunta polêmica se o uso do telefone celular causa câncer, foi elaborada com o objetivo de estabelecer os conhecimentos prévios dos professores a respeito do assunto, uma vez que é muito comum o uso dessa tecnologia e pouco se conhece a respeito de seus possíveis efeitos biológicos, sinalizando para também possíveis proteções contra a radiação emitida por esse aparelho.

Em relação à Q6: Qual a diferença entre radiação ionizante e não-ionizante. As respostas mais citadas pelos professores, ao caracterizarem radiações ionizantes, são apresentadas na Tabela 3:

TABELA V. Caracterização de radiação ionizante segundo os professores.

<i>Categoria: radiação ionizante</i>	<i>Frequência das respostas dos docentes</i>
Produz ionização de moléculas/substâncias, produzindo íons, cátions, radicais livres.	7
Interage com a matéria provocando modificações	3
Não sabe	3
Pode retirar elétrons dos átomos formando íons	2
Radiação ionizante possui maior comprimento de onda	1

De acordo com os dados da pesquisa, apenas dois professores, um de Física e outro de Biologia, caracterizaram completamente a radiação ionizante. Sete professores, sendo apenas um de Biologia, disseram que a radiação ionizante é aquela que produz íons ou ioniza o meio no qual se propaga, sem especificar o que significa produzir íons. Três professores disseram que a radiação ionizante interage com a matéria provocando alterações em sua estrutura, sem especificar quais. Apenas um professor de Física respondeu incorretamente, dizendo que o comprimento de onda da radiação ionizante é maior. Na verdade, quanto menor o comprimento de onda, maior a energia da radiação e maior a possibilidade dessa radiação ser ionizante em um dado meio.

Analisando as outras respostas dadas à radiação não-ionizante, percebemos a presença de vários conceitos errôneos, como, por exemplo, um professor de física acredita que este tipo de radiação não interage com a matéria. Ele disse que a radiação não-ionizante possui um comprimento de onda menor, o que não corresponde à verdade, pois radiações ionizantes possuem frequências maiores e consequentemente comprimentos de onda menores se comparados às não-ionizantes. Finalmente, outro professor de física disse que a radiação não-ionizante é aquela que se propaga no vácuo sem quebrar moléculas em íons. Os dois tipos de radiação podem propagar-se no vácuo caso sejam ondas eletromagnéticas. De uma forma geral, podemos afirmar que os professores encontraram maior dificuldade em definir radiações não-ionizantes.

Em relação à Q7: Os exemplos de radiação ionizante e não-ionizantes citados pelos professores são mostrados na Tabela VI. O número entre parênteses indica a frequência de respostas. Constatou-se que cinco professores não souberam indicar exemplos de radiação ionizante e sete não souberam indicar exemplos de radiação não-ionizante, dentre estes, dois professores da Biologia. Apenas um professor de física citou erradamente *partícula alfa* como exemplo de radiação não-ionizante.

TABELA VI. Exemplos de radiações ionizantes e não-ionizantes segundo os professores.

<i>Categoria: exemplos de radiação ionizante</i>	<i>Categoria: radiação não ionizante</i>
Raios gama (9)	Radiação térmica (9)
Raios x (7)	Luz visível (6)
Ultravioleta (5)	Microondas (4)
Raios cósmicos (2)	Ondas de rádio (3)
Partículas alfa (2)	Ultravioleta (2)
Partículas beta (2)	TV, UHF (2)
Descargas atmosféricas (1)	Partículas alfa (1)
Campos elétricos altos (1)	Não sabe/em branco (7)
Lâmpada fluorescente (1)	
Plasma (1)	
Não sabe/em branco (5)	

Os professores indicaram a radiação ultravioleta tanto como ionizante e não ionizante, mas não especificaram o meio. A classificação ionizante e não-ionizante dependem do meio de propagação. A radiação ultravioleta é capaz de ionizar a ionosfera, sendo considerada como ionizante em relação à atmosfera, e classificada como não-ionizante em relação ao tecido biológico. É interessante observar, de acordo com a Tabela 3, que nenhum professor indicou o telefone celular como exemplo de radiação não-ionizante, embora ele tenha sido bastante citado nas respostas sobre coisas relacionadas com a radiação.

Em relação à Q8: O que é radiação ultravioleta? Quais as principais fontes de emissão?

Ao serem questionados sobre o conceito de radiação ultravioleta (RUV), nove professores de Física disseram que ultravioleta é uma radiação com frequência maior que a luz visível. Dentre esses, dois disseram que são ondas eletromagnéticas com frequência maior do que a luz visível. Dois professores de Física caracterizam radiação ultravioleta a partir do comprimento de onda, dizendo que este é menor do que o comprimento de onda da luz visível. Os conceitos estabelecidos por esses dois grupos de docentes, estão parcialmente corretos, pois existem outros tipos de radiação ou ondas eletromagnéticas que possuem uma frequência acima (ou comprimento de onda abaixo) da luz visível e da radiação ultravioleta, como por exemplo, os raios X e raios gama. Outras respostas obtidas: *radiação com frequência aproximadamente igual à luz solar e radiações emitidas por ondas eletromagnéticas* dos professores de Biologia; *radiação com comprimento de onda pequeno e radiação com frequência entre 10^{15} Hz < f < 10^{17} Hz* dos professores de Física. Com exceção da última resposta, que situa corretamente a faixa de

frequência da radiação ultravioleta, as outras respostas não caracterizam, completamente, esse tipo de radiação pela generalidade da definição, podendo ser aplicada a outros tipos de radiação. Um professor de Biologia não soube conceituar. Uma síntese das respostas é mostrada na Tabela VII.

TABELA VII. Definição de radiação ultravioleta segundo os professores.

<i>Categoria: definição de radiação ultravioleta.</i>	<i>Frequência das respostas</i>
Radiação com frequência maior do que a luz visível	9
Radiação com comprimento de onda menor do que a luz visível	2
Radiação com comprimento de onda muito pequeno	1
Radiação com frequência entre 10^{15} Hz e 10^{17} Hz	1
Radiação com frequência da ordem da luz solar	1
Radiação emitida por ondas eletromagnéticas	1
Não sabe conceituar	1

Em relação à Q9:

Sobre as fontes de radiação ultravioleta, os professores mencionaram principalmente o Sol (12); luz branca artificial (6); lâmpadas incandescentes (1); estrelas (1); corpos extremamente aquecidos (1); bombas atômicas (1); luz negra de neônio. Três professores de Física não citaram exemplos de fontes de RUV. Veja a Tabela VIII.

TABELA VIII. Fontes de radiação ultravioleta (RUV) segundo os professores.

<i>Categoria: fontes de radiação ultravioleta</i>	<i>Frequência das respostas</i>
Luz negra de neônio	1
Bombas atômicas	1
Corpos extremamente aquecidos	1
Estrelas	1
Lâmpadas incandescentes	1
Em branco	3
Luz branca artificial	6
Sol	12

Ao serem perguntados sobre os tipos de radiação ultravioleta, oito professores mencionaram os tipos UVA e UVB; cinco professores afirmaram que não conhecem nenhum tipo de radiação ultravioleta, e apenas três professores de Física responderam corretamente à pergunta, mencionando os três tipos UVA, UVB e UVC, classificados segundo o seu poder de penetração na pele.

Em relação à questão 10:

Os professores acreditam que os malefícios causados pela radiação ultravioleta são caracterizados, principalmente, por lesões no tecido epitelial: câncer de pele, queimaduras, insolação e necrose. Um professor citou a possibilidade de formação de íons no organismo, classificando-a como

radiação ionizante. Apenas três professores citaram os benefícios da radiação ultravioleta, além de mencionar que pode provocar câncer de pele e causar danos ao material genético provocando tumores. Dentre esses, dois professores, um de Biologia e um de Física, explicaram que a radiação ultravioleta promove a ativação da pró-vitamina D e da melanina. Outro professor citou que a radiação ultravioleta é necessária para suprir algumas funções do corpo, mas não especificaram quais. Na Tabela VI são mostradas as respostas a essa questão, note que o número entre parênteses indica a frequência de respostas dos docentes.

TABELA IX. Benefícios e Malefícios da radiação ultravioleta segundo os professores.

<i>Categoria: benefícios da RUV</i>	<i>Categoria: malefícios da RUV</i>
Promover a ativação da pró-vitamina D e da melanina (2)	Câncer (14)
Necessárias para algumas funções (1)	Queimaduras (4); Insolação (1); necrose do tecido epitelial (1).

Em relação à Q11: Indagados se a telefonia celular causa câncer, seis professores responderam apenas não, dois acreditam que não, exceto se houver exposição por longo tempo; três professores disseram que não há comprovação científica e quatro disseram que não sabiam. Apenas um professor de Física afirmou que sim: *o celular provoca câncer em qualquer situação*. O resultado pode ser visualizado na Tabela a seguir:

TABELA X. Resposta dos professores sobre a possibilidade da radiação emitida pelo celular provocar câncer.

<i>Categoria: celular causa câncer?</i>	<i>Frequências</i>
Não	6
Não, exceto longa exposição.	2
Não há comprovação	3
Não sabem	4
Sim	1

A partir das respostas dos docentes, pode-se inferir de maneira geral, que não há consenso entre os professores sobre os conceitos e exemplos das radiações ionizantes e não ionizantes (Tabelas 5 e 6). Os malefícios das radiações ultravioleta na visão dos professores estão relacionados apenas ao câncer de pele, queimaduras, insolação ou necrose do tecido epitelial. Não aparece nenhuma resposta sobre os malefícios desse tipo de radiação no olho humano (Tabela 9). A diversidade das respostas dos professores está presente também na Tabela 10, onde percebemos que não existe consenso se a radiação emitida pelo celular desenvolve o câncer.

Essa dificuldade dos professores para responder às perguntas do questionário de sondagem, nos motivou a construir questões interdisciplinares sobre os temas, radiação ultravioleta e a radiação microonda emitida pelo celular, com o objetivo de auxiliar o professor a trabalhar esse tema na abordagem CTS de forma diferenciada ao

ensino tradicional. Para a elaboração das questões interdisciplinares foi preciso conversar também com um professor de química e um de matemática. Devido à indisponibilidade de tempo desses docentes não foi possível aplicar o questionário de sondagem para esses dois professores, no entanto a colaboração do professor de química foi necessária para compreensão de alguns compostos orgânicos e a participação do professor de matemática ajudou no entendimento de alguns gráficos.

V. QUESTÕES INTERDISCIPLINARES COM ABOR-DAGEM CTS

As questões interdisciplinares foram criadas para subsidiar o professor a iniciar uma prática diferenciada de ensino, que diverge do ensino tradicional. Estas questões foram elaboradas tendo como base a abordagem CTS dos temas: radiação ultravioleta e radiação microonda emitida pelo celular. O conteúdo delas envolvem os conceitos de física, química, biologia e matemática. Pretende-se que elas auxiliem o professor a relacionar e discutir esses conhecimentos disciplinares no contexto social dos seus alunos, conforme orienta Delizoicov: *“Levar para a sala de aula a realidade que cerca o aluno e discuti-la não será simplesmente motivação para iniciar um determinado tópico do programa; a finalidade é a própria discussão dessa realidade, a sua compreensão e a sua transformação, sendo as informações científicas um meio para tanto”* (Delizoicov, pág. 26, in [20]). A explicação e resolução das questões interdisciplinares é apenas uma etapa do processo de “Problematização no Ensino de Ciências”. Esse processo envolve dimensões epistemológicas e pedagógicas. A primeira se baseia em Bachelard segundo o qual *“para um espírito científico, todo conhecimento é resposta a uma questão. Se não houve questão, não pode haver conhecimento científico. Nada é dado. Tudo é construído* (pág. 148, [21]). Assim, o aluno chega à aula de física com conhecimento empíricos já construídos, provenientes de sua interação com o meio em que está inserido. É tarefa do professor obter o conhecimento prévio do estudante e não apenas saber de sua existência.

Em relação a dimensão pedagógica, Freire ressalta que a problematização precisa fazer sentido para o estudante, sendo necessário trabalhar com situações que se aproximem do seu conjunto de conhecimentos [22]. Assim, é fundamental que o professor esteja familiarizado com o universo dos estudantes para que, a partir dele, possa problematizar situações que apresentam contradições locais. As abordagens tradicionais na maioria das vezes levantam questões descontextualizadas com o universo dos estudantes (pág. 25, [20]). A abordagem da dimensão pedagógica na sala de aula ocorre, em três momentos: A problematização inicial, organização do conhecimento e a aplicação do conhecimento (pág. 28, [20]).

Na problematização inicial são discutidas situações reais, que possam fazer parte do universo temático dos estudantes. No nosso caso, o professor pode levantar os conhecimentos prévios dos estudantes sobre o tema radiação buscando

resposta, por exemplo, para as seguintes questões: O que é radiação? Quais os efeitos biológicos provocados pelos raios ultravioleta? O aparelho de celular provoca o desenvolvimento do câncer? O professor pode sugerir que os alunos façam um cartaz com suas respostas. Essa problematização poderá despertar no estudante a necessidade de adquirir outros conhecimentos que ainda não possui [23].

Na organização do conhecimento, o professor pode explicar os conteúdos necessários para que o aluno adquira o conhecimento científico a partir da problematização inicial. No nosso caso, o conteúdo sobre o tema radiação pode ser explicado com a utilização de dois ou mais professores, trabalhando simultaneamente na sala de aula. A aula deve ser dinâmica, com a participação dos alunos.

Na etapa de aplicação do conhecimento, o professor pode interpretar e apresentar respostas para os problemas levantados na problematização inicial. No nosso caso, o aluno pode apresentar o mural construído na etapa de problematização inicial, e o professor pode ajudá-lo na transição das suas ideias de senso comum para o conhecimento científico. Essa transição pode ser viabilizada através da resolução das questões interdisciplinares que estão relacionadas às questões levantadas na problematização inicial.

Questões interdisciplinares

Questão 1

Um estudo realizado na Dinamarca relacionou o número de assinantes de celulares com os casos ocorridos de câncer no olho (melanoma ocular), ao longo do período compreendido entre 1943 e 1996. Responda as questões propostas de acordo com o gráfico mostrado na Figura 3.

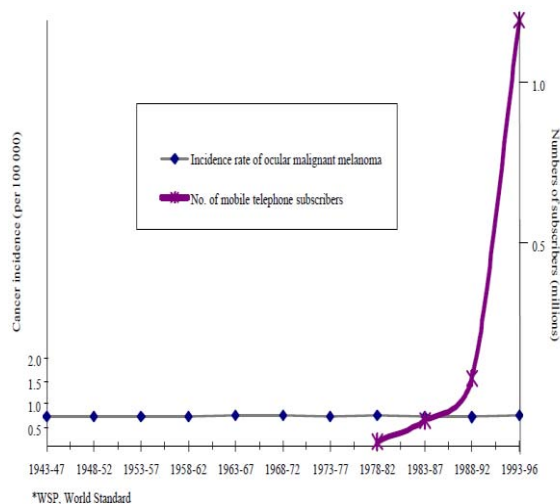


FIGURA 3. Gráfico do número de assinantes de celulares em função do câncer no olho [24].

- O número de casos de câncer no olho, aumentou, diminuiu ou permaneceu constante, no período entre 1943 e 1996? E o número de assinantes de celulares? Explique.
- Qual o tipo de função matemática que representa a linha azul? Explique.
- Qual o tipo de função matemática que poderia representar a linha vermelha? Explique.
- Em que período de tempo (em anos) o número de casos de câncer no olho foi igual ao número de assinantes de celulares?
- De acordo com esta pesquisa, a radiação emitida pelo celular causa câncer no olho? Justifique.

Questão 2

Procure em um manual de instruções de um aparelho de celular, informações sobre a saúde e segurança do usuário em relação à exposição da radiação microonda do celular.

TABELA XII. Níveis de referências de SAR, recomendados pela ANATEL [25].

Característica da Exposição	Faixa de radiofrequência	SAR média do corpo inteiro (w/kg)	SAR localizada (cabeça e tronco) (w/kg)	SAR localizada (membros) (w/Kg)
Exposição ocupacional ou controlada (trabalhadores da área)	10 MHz a 10 GHz	0,4	10	20
Exposição da população em geral ou não controlada	10MHz a 10 GHz	0,08	2	4

Responda as seguintes questões:

- Qual o valor do SAR, do aparelho celular, referente a esse manual? Esse valor está de acordo com as normas regulamentadas pela ANATEL? (veja Tabela XII).
- Ainda de acordo com esse manual, verifique se a radiação emitida pelo celular pode interferir no funcionamento dos marca passos, aparelhos de surdez ou outros dispositivos. Descubra também, se essa radiação pode provocar incêndio em áreas explosivas, como postos de gasolina.
- Apresente o resultado de sua pesquisa para a turma apontando soluções para resolver ou minimizar os riscos de problema (caso existam).

Questão 3

Um número decomposto em seus fatores primos pode ser escrito na forma de potência de 10. Assim o número 60 pode ser representado por $10^{1,778}$. Sabe-se que o tempo

máximo de exposição solar, para que não ocorra queimadura na pele, depende do tipo de pele de cada pessoa (figura 4).



FIGURA 4. Quadro comparativo entre índice UV, tipos de pele e tempo de exposição [26].

A Tabela a seguir reúne esses tempos, já transformados em segundos, para a pele negra. Complete os espaços vazios deste quadro com as potências de 10 correspondentes.

TABELA XIII: Tempo máximo de exposição solar para que não ocorra queimadura na pele negra.

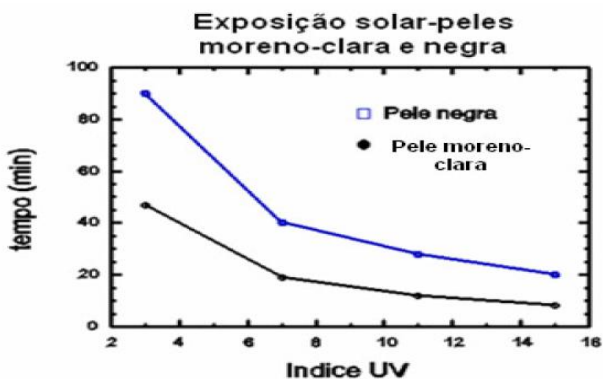


FIGURA 5: Gráfico da exposição solar das peles negra e moreno-clara.

Índice (UVB)	Tempo em segundos	Potência de 10
0 a 3	5400	
4 a 7	2400	
8 a 11	1620	
12 a 15	1200	

Questão 4

O gráfico abaixo representa a relação entre o índice UV de radiação ultravioleta e o tempo de exposição ao sol, sem se queimar, para indivíduos com a pele branca e negra, sem o uso de protetor. De acordo com esse gráfico e os conceitos de Matemática e Biologia contidos no glossário desta cartilha, responda as seguintes questões:

a) À medida que o índice UV cresce o tempo que a pessoa moreno-clara ou negra pode ficar ao sol sem se queimar, aumenta ou diminui? Explique

- b) Esta função pode ser descrita por uma função exponencial crescente ou decrescente? Explique.
 c) Qual desses dois tipos de pele pode ficar mais tempo ao sol sem se queimar? EXPLIQUE de acordo com o gráfico e relacione sua resposta com conceitos de Biologia.
 d) Faça um mural estabelecendo os vários tipos de proteção contra as radiações UVB.

Questão 5

O surgimento de novas modas e tendências pode ter efeitos muitas vezes imprevisíveis. No início do século XX, as mulheres primavam pela brancura da pele e tomavam banhos de mar, praticamente vestidas. Com o passar do tempo os trajes passaram a cobrir cada vez menos o corpo e atualmente, há pessoas que pensam que um corpo bem bronzeado é sinal de saúde. Forme um grupo com seus colegas e investiguem a opinião de médicos dermatologistas sobre o bronzeamento e sua relação com o aumento da incidência de câncer de pele no decorrer do século XX. Pesquisem como essa doença se relaciona com profissões, como a de agricultores e pescadores, pessoas que ficam mais expostas ao sol (pág. 132, [27]).

Questão 6

O pterígio é uma membrana vascularizada que cresce na conjuntiva em direção à córnea. O crescimento desta membrana pode ocorrer devido à exposição excessiva da radiação ultravioleta no olho, provocando astigmatismo.

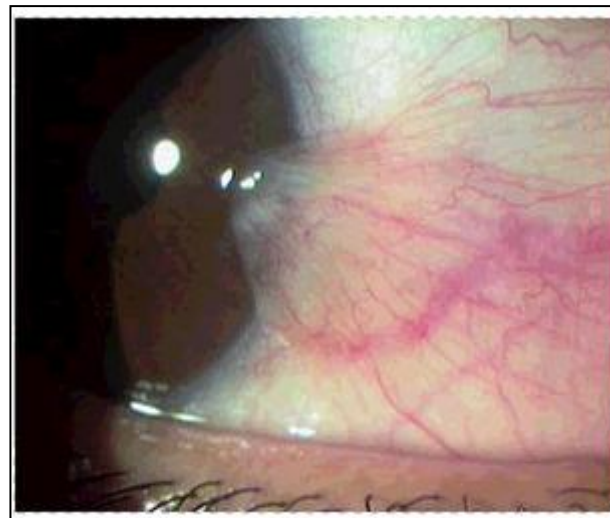


FIGURA 6. Pterígio no olho humano [28].

- a) Assinale na figura a membrana que representa o pterígio.
 b) Qual a parte do olho humano afetado pela radiação ultravioleta e que gera o astigmatismo?
 c) Pergunte a um oftalmologista ou pesquise na internet ou em livros, sobre o tipo de lente usado para corrigir o astigmatismo. Quais são as características da imagem formada por essa lente?

Questão 7

Os queratinócitos são células do tecido epitelial responsáveis pela formação da queratina (proteína da pele e unhas). O quadro abaixo mostra alguns produtos, usados como tratamento de cabelo, e que contêm queratina e outras substâncias. A queratina desses produtos não é incorporada ao cabelo. Para formar sua queratina, é melhor fazer uma dieta rica em proteínas!

TABELA XIV. Composição química de alguns produtos farmacêuticos.

Nome	Marca	Composição
Creme para cabelos "Esthetic e hair". Restaura e define os cabelos	x	Queratina, Cloreto de cetil-trimetil amônio, metilparabeno, outros.
Recarga de queratina. Vitamina A	y	Queratina, ácido cítrico, aminoácidos, outros.
Quitina líquida, loção de spray para cabelos.	z	Queratina, dimeticose, propileno glicol, outros

De acordo com a fórmula estrutural do ácido cítrico, e os conceitos básicos de Química, identifique os grupos funcionais deste composto orgânico.

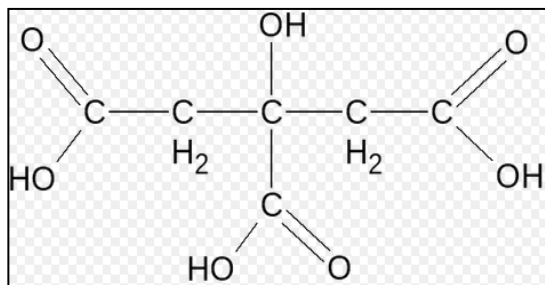


FIGURA 7. Fórmula estrutural do ácido cítrico.

b) A cisteína é um dos aminoácidos que formam a queratina, sua fórmula estrutural pode ser vista a seguir:

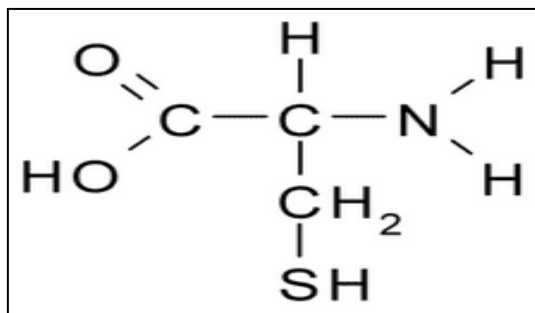


FIGURA 8. Fórmula estrutural da cisteína.

Identifique os grupos funcionais da cisteína na fórmula estrutural do ácido cítrico.

c) Qual a importância da queratina para o ser humano?

d) Pesquise nas farmácias outros produtos que contenham queratina.

Respostas das questões interdisciplinares

A seguir encontram-se as respostas de algumas questões interdisciplinares.

Resposta da questão 1

- Permaneceu constante... Variou.
- Função constante, gráfico paralelo ao eixo x.
- Variável. Algo parecido com uma função exponencial.
- entre 1983 e 1987
- Não é possível afirmar

Resposta da questão 3

Tabela XV. Resposta da questão 3.

Índice (UVB)	Tempo em segundos	Potência de 10
0 a 3	5400	$10^{3,732}$
4 a 7	2400	$10^{3,380}$
8 a 11	1620	$10^{3,209}$
12 a 15	1200	$10^{3,079}$

Resposta da questão 4

- Diminui
- Decrescente
- A pessoa negra, pois a queda do gráfico é menos acentuada. O indivíduo de pele negra possui uma quantidade maior de melanina nos melanócitos, o que oferece uma maior proteção ao núcleo celular contra os efeitos biológicos produzidos pela radiação ultravioleta solar.

Resposta da questão 6

a)

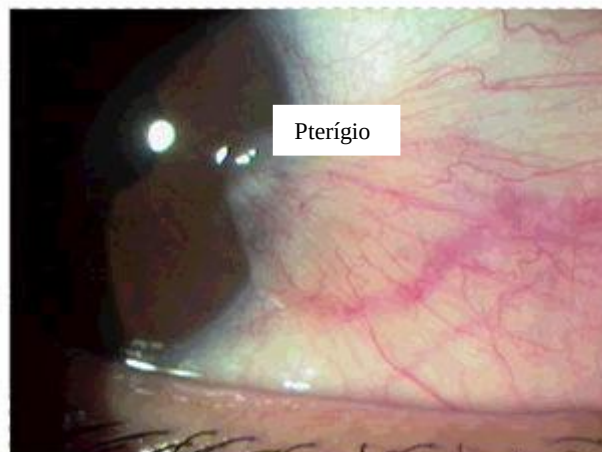


FIGURA 9. Pterídio humano invadindo a córnea.

c) Lentes divergentes. Imagem virtual, direita e menor.

Resposta da questão 7

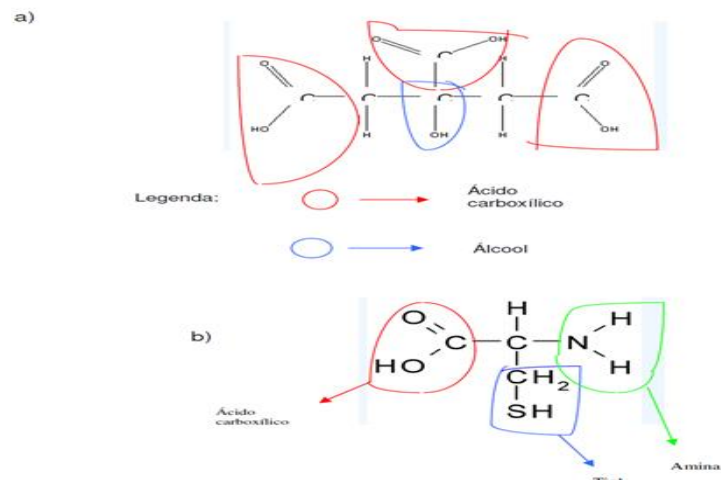


FIGURA 11 (letras a e b). Identificação dos grupos funcionais do ácido cítrico e cisteína, c função.

c) Proteger as células epiteliais da chuva, vento e sol.

VI. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho mostra algumas questões interdisciplinares construídas através da abordagem CTS. A escassez de materiais que favoreça a articulação entre as disciplinas e a falta de relação dos conteúdos escolares com o cotidiano do estudante, nos motiva a construir onze questões interdisciplinares para servir de apoio ao professor.

O tema das questões interdisciplinares envolve os possíveis efeitos biológicos em seres humanos provenientes da radiação ultravioleta e da radiação microonda emitida pelos aparelhos de celulares. Com o objetivo de verificar as dificuldades dos professores sobre o tema e ajudá-los a trabalhar de forma diferenciada, utilizando as questões interdisciplinares propostas nesse artigo, realiza-se um questionário de sondagem com treze professores de física e três de biologia, ambos do ensino médio. Para analisar os dados desse questionário, utiliza-se a técnica de análise de conteúdo, proposta por Bardin [18].

Além da construção das questões interdisciplinares, foi sugerida uma proposta para o professor trabalhar essas questões na sala de aula. A proposta de baseia nos três momentos pedagógicos descritos por [20]: A problematização inicial, organização do conhecimento e a aplicação do conhecimento.

As questões interdisciplinares são apenas um instrumento que auxilia o professor a integrar as disciplinas que constituem a ciência da natureza e matemática. Assim essas questões são um guia para se trabalhar com os alunos do ensino médio não sendo, portanto, uma forma única para abordar os aspectos relacionados à CTS.

REFERENCIAS

- [1] Salém, S., *Estruturas conceituais no ensino de física*: dissertação de Mestrado. Instituto de física e faculdade de educação da universidade de São Paulo. São Paulo (1986).
- [2] Hosoume, Y., Menezes, L., *A Universidade e o Aprendizado Escolar de Ciências - Formação em Serviço de Professores de Física do 2º grau*. Universidade de São Paulo. São Paulo (1993).
- [3] Giusta, A. S., *Por uma nova concepção de currículo*. In: *Diretrizes Curriculares da escola sagarana*. (SEE/MG, PROCAD, Belo horizonte, 2001).
- [4] Japiassu, H., *Interdisciplinaridade e patologia do saber*. (Imago, Rio de Janeiro, 1976).
- [5] Nóvoa, A., *Os professores e sua formação*, (Lisboa, São Paulo, 1997).
- [6] Porlan, R., Rivero, A., *El conocimiento de los profesores*, (Díada, Sevilla, 1998).
- [7] Carson, R., *Chemical Heritage Foundation*. <<http://www.chemheritage.org/discover/online-resources/chemistry-in-hi.aspx>>, consultado em 05 de julho de 2013.
- [8] Kuhn, T S., *A Estrutura das Revoluções Científicas*. (Perspectiva, São Paulo, 2009).
- [9] Minas Gerais, Secretaria de Educação do Estado de Minas Gerais, *Projeto de desenvolvimento profissional (pdp)* (2004).
- [10] Aikenhead, G. S. Research into STS Science Education. *Educación Química*, 16, 384-397. <http://www.usask.ca/education/people/aikenhead/research_sts_ed.pdf> consultado em 23 de maio de 2008.
- [11] Cruz, S. *Aprendizagem Centrada em Eventos: uma experiência com enfoque ciência, Tecnologia e sociedade no ensino fundamental*. Tese de doutorado em educação – centro de Educação, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis-SC (2001).
- [12] Pinheiro, N. A. e Silveira, R. M., Bazzo, W. A., *Ciência, tecnologia e sociedade: a relevância do enfoque CTS para o Contexto do Ensino Médio*, *Ciência & Educação* **13**, 71-84 (2007).
- [13] Ferreira, C. Meirelles, R., <<http://www.nutes.ufrr.br/abrapec/viiienpec/resumos/r0932-1.pdf>>. Consultado em 20 de abril de 2013.
- [14] Brasil, *Parâmetros Curriculares Nacionais do Ensino Médio (PCNEM)- Ciência da Natureza*. <www.mec.gov.br>, consultado em 25 de abril de 2008.
- [15] Brasil, *Lei de Diretrizes e Bases*. Consultado em <www.mec.gov.br>, consultado em 05 de julho de 2008.
- [16] Hernandez, J. S., Martins, M. I., *Categorização de questões de física do novo ENEM*, *Caderno Brasileiro de Ensino de Física* **30**, 58-83 (2013).
- [17] Moraes, R., *Análise de Conteúdo*, *Revista Educação* **22**, 7-32 (1999).
- [18] Bardin, L., *Análise de Conteúdo*, (Edições 70, São Paulo, 1977).
- [19] Ferreira, A. A., *Ensino de Física das Radiações na Modalidade EJA uma Proposta*. Dissertação (mestrado). Instituto de Física e Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo. São Paulo (2005).

- [20] Marengão, L. S. L., Os Três Momentos Pedagógicos e a elaboração de problemas de Física pelos estudantes. *Dissertação de mestrado*. Mestrado em Educação em Ciências e Matemática - Universidade Federal de Goiás, Goiás (2012).
- [21] Bachelard, G., *O racionalismo aplicado*, (Zahar, Rio de Janeiro, 1977).
- [22] Freire, P., *Pedagogia do oprimido*, (Paz e Terra, Rio de Janeiro, 2005).
- [23] Delizoicov, D., Angotti, J. A. P., Pernambuco, M. M., *Ensino de Ciências: Fundamentos e Métodos*, (Cortez, São Paulo, 2002).
- [24] Boice, J. & McLaughlin, J. K., *Epidemiologic Studies of Cellular Telephones and Cancer Risk*, <http://www.ssi.se/ssi_Rapporter/pdf/ssi_rapp_2002_16.pdf>, consultado em 21 de janeiro de 2007.
- [25] Anatel, Agência Nacional de Telecomunicações. Resolução nº 303 de 2 de julho de 2002.
- [26] Veja, <abril.uol.com.br>, consultado em 31 de julho de 2008.
- [27] Penteado, N., Torres T., *Física- Ciência e Tecnologia*, (Moderna, São Paulo, 2001).
- [28] Parente, D. R. <<http://www.danielparente.com.br>>. Acessado em 28 de janeiro de 2007.

Enseñanza de la Física y desarrollo del Pensamiento Crítico



Antonio Lara-Barragán Gómez^{1,2}, Guillermo Cerpa Cortés²

¹*Facultad de Ingeniería, Universidad Panamericana Campus Guadalajara, Circunvalación Poniente No. 49, Cd. Granja, Zapopan, Jalisco, México.*

²*Departamento de Física, Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías, Universidad de Guadalajara, Av. Revolución 1500, Sector Reforma, Guadalajara, Jalisco, México.*

E-mail: alara@up.edu.mx

(Recibido el 5 de Diciembre de 2013; aceptado el 28 de Marzo de 2014)

Resumen

Se propone una estrategia didáctica para el desarrollo del Pensamiento Crítico. Tal estrategia surge de tres fuentes: dos fuentes teóricas, una basada en las sugerencias de Arnold Arons y otra que toma al constructivismo como paradigma educativo. La tercera, empírica, fundamentada en la propia experiencia de los autores. Se describe el Pensamiento Crítico de acuerdo con características conductuales y habilidades relacionadas con tales características. Con base en ello, se hace una descripción detallada de la estrategia didáctica y, finalmente, se presenta una evaluación de su aplicación en cuatro grupos de estudiantes de primer ingreso a carreras de ciencias e ingenierías.

Palabras clave: Pensamiento crítico, enseñanza de las ciencias, habilidades intelectuales, constructivismo.

Abstract

A didactical strategy to foster critical thinking is proposed. It was developed following three kinds of sources: a theoretical one based on suggestions by Arnold Arons and another one taking constructivism as an educational paradigm. The third one is the empirical expertise of authors. Critical thinking is described in terms of conduct characteristics and some intellectual skills associated to them. Based on all of these elements the didactical strategy was developed and is described with detail. Finally, the strategy was applied to four groups of freshmen majoring in science and engineering. Results of evaluation of the strategy are presented.

Keywords: Critical thinking, science teaching, intellectual skills, constructivism.

PACS: 01.30.lb, 01.40.Di, 01.40.gb

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Heráclito de Éfeso (553 a.C.-484 a.C.), a pesar de que los amantes de la sabiduría supiesen muchas cosas, afirmaba que la acumulación de conocimiento no educaba la mente. Estas palabras tienen una evidente actualidad como podemos constatar con la mayoría de nuestros alumnos. Es indudable que, en nuestro sistema educativo, todo egresado del nivel medio superior posee más conocimientos que, por ejemplo, Arquímedes o Galileo, pero es poco probable que estos estudiantes pudieran realizar descubrimientos análogos a los que aquellos protocietíficos realizaron, aún con las limitaciones de sus épocas. Este hecho concuerda con la aseveración de Heráclito, pues en estos casos vemos que la posesión de conocimientos no educa la mente. En otras palabras, saber muchas cosas es condición necesaria pero no suficiente para desarrollar la habilidad de pensar. Surgen entonces las dos preguntas: ¿Cómo puede educarse la mente? Esto es, ¿cómo puede desarrollarse la habilidad

de pensar? Y la segunda, todavía de mayor trascendencia: ¿es posible enseñar a pensar?

La respuesta a la última pregunta ha sido afirmativa en nuestro medio –con o sin razón–, por lo que en los niveles educativos elementales, primaria y secundaria, se ha privilegiado la enseñanza de las matemáticas con la idea de que su aprendizaje lograría que la población que accede a la educación básica fuese más “inteligente”. Con ello se plantea la premisa de que aquellos educandos que “supieran” matemáticas razonarían mejor que quienes no las hubiesen estudiado [1]. Sin embargo, Los resultados de las pruebas internacionales PISA y las nacionales ENLACE [2] se han encargado de desmentirla. La experiencia en esas evaluaciones muestra que tales habilidades tampoco pueden incrustarse o implantarse en el cerebro humano en forma de un conjunto de reglas, fórmulas y algoritmos. Y de acuerdo con lo que escribe Pérez [1] y los fundamentos teóricos de la prueba ENLACE, el ser humano no es ni puede transformarse en una simple máquina.

Por otro lado es aceptado que la capacidad de razonamiento, esto es, la habilidad de pensar siguiendo una línea de razonamiento lógico, no son *dones* ni es genética [3]. Creemos que la idea del origen *congénito* o *natural* de la habilidad de pensar es simplemente una consecuencia del poco entendimiento de las complejas circunstancias y condiciones sociales y pedagógicas que rodean el desarrollo del pensamiento, aunque existan, en efecto, algunos condicionantes genéticos como el caso del síndrome de Down. Creemos, junto con Dowling [3], que la habilidad de pensar debería ser el resultado del desarrollo natural de todo cerebro biológicamente normal bajo condiciones humanas normales. Para nuestros propósitos, entendemos que un cerebro normal es aquel que se encuentra libre de lesiones, y con ello queremos decir que el cerebro puede lesionarse de dos maneras: física e intelectual. La primera casi siempre es resultado de un accidente o una agresión directa, mientras que la segunda es consecuencia de condiciones anormales, las cuales no son otra cosa que prácticas pedagógicas coercitivas y restrictivas [4]. De entre una amplia variedad, las dos más comunes de estas últimas son: la memorización como un fin de aprendizaje en sí misma, y la práctica común de los estudiantes de estudiar solamente el día (o la noche) anterior al examen.

De acuerdo con Ilyenkov [4] la memorización, como único fin del aprendizaje, y su consecuente saturación del cerebro puede lesionar el intelecto. Aprender física, con referencia al cerebro como órgano del aprendizaje [5], supone que éste no necesita repeticiones innecesarias cuando el material bajo estudio, o la manera como se maneja en el aula, es accesible, interesante en sí mismo, y útil con aplicaciones a la vida diaria. De acuerdo con estas discusiones, proponemos nuestra hipótesis de trabajo: *para enseñar a pensar se necesita organizar el proceso de asimilación del conocimiento y su dominio, de manera que el aprendiz ejercite no sólo la memoria, sino también –y quizás con mayor énfasis– la habilidad de realizar tareas que requieran pensar.*

El tipo de pensamiento a que nos referimos es el llamado *Pensamiento Crítico* (PeCr), el cual ha sido discutido y analizado desde muchas perspectivas [6] e inclusive existen asociaciones como *The Critical Thinking Community* (<http://www.criticalthinking.org/>) dedicadas a la investigación y difusión de todo tipo de información relacionada con el tema. Aparte de diversos materiales encontrados en el sitio de esta comunidad, existen pocos trabajos encaminados a desarrollar habilidades de pensamiento crítico en el área de la física [7], de donde surge la idea del presente trabajo cuyos objetivos son: 1. Contribuir a las ciencias de la educación en el área de las ciencias y, 2. Proponer un modelo pedagógico para las nuevas generaciones de estudiantes que ingresan al nivel superior.

II. REFERENTES TEÓRICOS

¿Qué es el PeCr? ¿Podríamos conceptualarlo de tal manera que tuviera una utilidad inmediata en el salón de clase? Una

respuesta adecuada a ambas preguntas fue dada hace varias décadas por Ennis [8]: el PeCr “es un pensamiento razonado y reflexivo encaminado a decidir en qué creer y qué hacer”. El punto de vista de Ennis indica, además, que el PeCr está formado por conjuntos de habilidades que involucran aclarar términos y aspectos controvertidos, identificar componentes de argumentos, valorar la credibilidad de evidencias, utilizar razonamiento inductivo y deductivo, manejar argumentos y emitir juicios de valor.

Para nuestros propósitos, el concepto de Ennis puede resumirse diciendo que el PeCr es el camino para utilizar la información en forma lógica y racional con el propósito primordial de resolver problemas. El término *problemas* lo entendemos de una forma amplia y no solamente a enunciados en los que se proporcionan datos numéricos o algebraicos y se pide encontrar el valor de una incógnita por medio de manipulación algebraica rutinaria, sino también al análisis de casos en los que han de evaluarse situaciones para una toma de decisiones. Por otro lado, creemos relevante que tal forma de utilizar la información ha de llevarse a situaciones nuevas, e incluso a otros campos del conocimiento tradicionalmente alejados de las ciencias físicas. En la situación actual de la sociedad de la información esta es la forma como han emergido nuevas ciencias transdisciplinarias, tales como la Nanociencia y la Genómica. Así, creemos que formar el PeCr en nuestros estudiantes es un gran servicio, ya que con la enseñanza tradicional solo aprenden a memorizar o a repetir información que muchas veces no comprenden, y a resolver problemas numéricos de manera mecánica [7, 9]. Finalmente, en nuestra concepción, el PeCr tiene un valor que va más allá del aula: está relacionado con el cómo una persona ve y se relaciona con el mundo.

Por otro lado, Arons [10] afirma que el PeCr se refiere a una serie de procesos de razonamiento lógico abstracto, los cuáles sólo pueden desarrollarse en la práctica. Como ejemplos de ellos se tiene la habilidad de poner atención, seguir un argumento, detectar una ambigüedad o una inferencia falsa, organizar y administrar el tiempo para el estudio. La cuestión es que, como se escribió unas líneas antes, tales habilidades no pueden enseñarse “en el aire”, sino sólo a través de las dificultades y problemas de una asignatura concreta, y lo más importante, no pueden enseñarse ni aprenderse en un curso, sino deben adquirirse gradualmente a lo largo de varios ciclos de aprendizaje.

Siguiendo a Arons [10], inferimos que el comienzo para el desarrollo del pensamiento crítico relacionado con la enseñanza de la Física se da cuando, a su vez, desarrollamos la habilidad de preguntarnos: ¿Cómo sabemos qué algo es válido?, ¿qué evidencias debemos tener para creerlo?; si estamos en un error, ¿cómo saberlo? En seguida, también tiene que ver con darse cuenta de que llamar a una cosa por su nombre no significa entenderla; ha de recordarse que entendemos muchas cosas y que tenemos nombres y etiquetas para ellas, pero que también hay otras cosas que no entendemos y, sin embargo, también tienen nombres y etiquetas. La educación no es cuestión de aprender nuevos nombres, sino de distinguir cuáles entendemos y cuáles no. Por ejemplo, ¿continúa un cuerpo

moviéndose sin cambio debido a la inercia? Hablando con todo rigor, no. No sabemos por qué los cuerpos se comportan así; simplemente, a la tendencia de comportarse de esa manera la llamamos inercia. Los cuerpos en caída libre no aumentan su rapidez porque aceleran; la aceleración es el nombre dado a ese comportamiento, pero no la razón de él.

Otra de las razones para que una de nuestras metas en la formación de estudiantes sea el desarrollo del PeCr tiene que ver con la calidad de vida, la competencia profesional, el progreso de la cultura y la sociedad en general, y la formación de ciudadanos responsables. Esta idea no es nueva, pues fue planteada a mediados del siglo XX por Bernal [11], quien escribió que uno de los propósitos de la enseñanza de las ciencias es “dotar al ciudadano de un entendimiento técnico suficiente del método científico para aplicarlo a los problemas con lo que debe enfrentarse en su vida social e individual”, por lo que un reto de la formación del PeCr es lograr la transferencia de aprendizajes de física a otros campos fuera del ámbito natural de la ciencia.

III. UNA ESTRATEGIA DIDÁCTICA PARA EL DESARROLLO DEL PENSAMIENTO CRÍTICO (EDPC)

De la discusión anterior, concluimos que definir el PeCr no es una tarea fácil y que, además, no parece existir una única definición [6]. Nuevamente, de acuerdo con Arons, creemos que el PeCr solamente puede *caracterizarse* contextualmente. Por consiguiente, para los propósitos de este trabajo sostenemos que una persona ha desarrollado y posee PeCr si muestra las características conductuales y sus correspondientes habilidades que presentamos en la tabla I. Además, otra habilidad esencial dentro de la EDPC, no considerada en la tabla 1, es la de comunicación oral. La verbalización, por parte de los estudiantes, es una manera de evaluar sus aprendizajes, su forma de pensar y el orden intelectual interno (pensamientos organizados y estructurados).

De acuerdo con lo anterior, la EDPC requiere que, en cada ocasión pertinente, el docente:

- Procure que sus estudiantes expliquen un concepto o idea. Si tienen problemas para explicar, entonces se evidencia una falta de claridad y/o comprensión del concepto. Esta situación requerirá que el docente ayude al aprendiz a aclarar sus ideas para expresarlas adecuadamente.
- Ponga en práctica alguna técnica grupal (aprendizaje colaborativo/cooperativo) y proporcione un problema. El docente ha de asegurarse que los integrantes de los grupos (equipos) sigan lineamientos lógicos y empleen términos y palabras correctamente.
- Evalúe el vocabulario básico. Para ello es recomendable proporcionar una lista de términos y palabras a usarse rutinariamente en el curso; En

TABLA I. Características conductuales del Pensamiento Crítico y sus habilidades correspondientes.

Característica Conductual	Habilidad
CC1. Puede diferenciar entre fuentes de información confiables (de personas o instituciones con autoridad académica o moral) y no confiables (de personas o instituciones sin autoridad académica o moral)	H1. Apertura a nuevas ideas H2. Aprender términos y hechos, conceptos y teorías de la materia en cuestión H3. Buscar, interpretar y utilizar información científica
CC2. Reconoce afirmaciones carentes de sentido; esto es, afirmaciones que no son definiciones, que no son verificables por observación directa o indirecta, o que no son proposiciones lógicas o matemáticas	H4. Desarrollar argumentaciones válidas en el ámbito de la física (en el nivel de aprendizaje pertinente)
CC3. Evita definiciones circulares; distingue entre un mero nombre o etiqueta y el concepto que lo caracteriza o lo define	H5. Describe y explica fenómenos naturales y procesos tecnológicos en términos de conceptos, principios y teorías físicas
CC4. Selecciona datos relevantes o pertinentes para la solución de un problema	H6. Destreza algebraica y analítica H7. Destreza para resolver problemas H8. Habilidad para aplicar principios y generalizaciones aprendidas a problemas y situaciones nuevas
CC5. Critica inferencias obtenidas de observaciones, lo que significa que puede reconocer si las inferencias se obtienen directamente de las observaciones, si no están relacionadas con éstas, o si las inferencias y las observaciones se contradicen	H9. Demostrar una comprensión adecuada de los conceptos y principios fundamentales de la física (en el nivel de aprendizaje pertinente) H10. Habilidad para sintetizar e integrar información e ideas H11. Habilidad para distinguir entre observación e inferencia y entre hecho y opinión
CC6. Selecciona una hipótesis de entre un conjunto de ellas para explicar adecuadamente los resultados de observaciones	H12. Habilidad para aplicar principios y generalizaciones aprendidas a problemas y situaciones nuevas

Nuestra experiencia con estudiantes de nuevo ingreso a la universidad durante los últimos cinco años [12] nos muestran que, en los cursos que consiste principalmente de sesiones de pizarrón (o presentaciones en Power Point) con exámenes periódicos, el 57% de los estudiantes de segundo a cuarto semestre solamente estudian al menos dos días antes del examen de periodo, el 31% lo hace la tarde o noche anterior, mientras que el 8% “estudia” una o dos horas antes del examen. Quienes están en este último caso, faltan a las clases anteriores al examen. El 4% restante dedican más de seis días a preparar sus exámenes.

Para nosotros este hecho significa que el 96% del estudiantado no ha adquirido, durante sus dos primeros años en la universidad, un hábito de estudio adecuado. Esta deficiencia presenta un obstáculo para la aplicación de la EDP. Sin embargo, también creemos que parte de la aplicación del esquema implica dotar a los estudiantes de formas adecuadas para que desarrollen el hábito de estudiar continua y sistemáticamente.

La EDP, basada en el paradigma constructivista [13, 14] consta de seis momentos (Figura 1), pero su soporte es el conocimiento, esto es, el éxito o fracaso relativos del modelo –así como de cualquier otro modelo didáctico– depende de que los estudiantes hayan *guardado* en su memoria una cantidad mínima de conocimientos. Esto se conecta con el párrafo anterior, en el que aseveramos que para comprender algo primero se necesita conocerlo, y que razonar sobre el vacío intelectual conduce al sofisma. Así, el primer momento del EDP consiste en verificar los conocimientos mínimos que han de tenerse para abordar el análisis de cualquier concepto o situación por medio de la detección de preconcepciones, cuando se comienza un nuevo tema, o la activación o reactivación de conceptos cuando se continúa con el mismo tema general o con nuevas aplicaciones y extensiones del mismo tema o concepto. En el primer caso, el uso del diálogo socrático [15] es de gran ayuda, mientras que en el segundo la aplicación de un examen corto (quizz) y la solución de las tareas es la estrategia a seguir. Es importante recordar que la primera pregunta que debe hacerse toda persona que desea desarrollar el PeCr es: “¿Cómo se sabe que...?”, ya que involucra tanto la característica conductual CC1, como la CC2 y sus respectivas habilidades (Tabla I).

Enseguida ha de notarse que en el esquema de la figura 1 aparecen dos actividades en el mismo nivel del primer momento, un *quizz* y una *tarea*. Ambas tienen la función de desarrollar el hábito del estudio continuo y sistemático. En el caso del *quizz* se recomienda aplicarlo en cada clase, y forma parte esencial de la evaluación. El *quizz*, como examen corto puede constar de tres a cinco preguntas que verifiquen conocimiento memorístico; por ejemplo, que enuncie la Segunda Ley de Newton o que proporcione las definiciones de aceleración, fuerza o cantidad de movimiento. Por su parte la tarea deberá cumplir con el desarrollo de la característica conductual 4 y sus tres habilidades asociadas. Para esto, nuestra experiencia muestra que la retroalimentación sistemática es de gran ayuda para alcanzar tal objetivo. No es suficiente recoger la tarea, revisarle y regresarla sin comentarios; lo más recomendable es tomar algunos minutos de la sesión de aula para resolver los problemas y hacer ver cómo pueden superarse los errores cometidos.

El segundo momento consiste en la presentación y/o construcción de nuevos conceptos donde, nuevamente, el diálogo socrático es la piedra angular del proceso. La exposición o clase magisterial es recomendada sólo para el caso en que se presentan conceptos con los que el estudiante no ha tenido contacto con el contenido que se va a tratar durante la sesión, o para testimonios históricos.

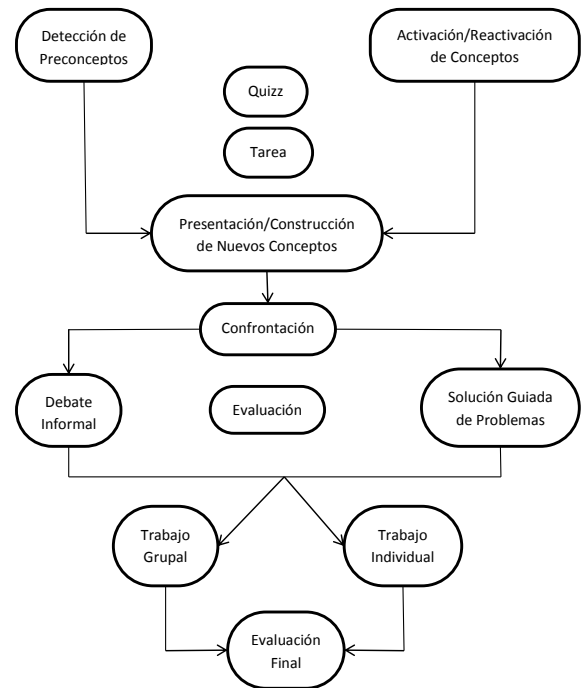


FIGURA 1. Estrategia Didáctica para el Desarrollo del Pensamiento Crítico.

El tercer momento, la *confrontación*, se realiza también con el diálogo socrático y su importancia para la aceptación y asimilación de los nuevos conceptos es crucial. Aquí es conveniente aclarar que *confrontación* se refiere a comparar los nuevos conceptos (del segundo momento) con los preconcepciones (del primer momento). Generalmente, los preconcepciones son errores conceptuales arrastrados de los niveles educativos previos al nivel superior que. Por ejemplo, en una sesión de aula sobre el tema de temperatura, al investigar los preconcepciones encontramos que el error conceptual más común en nuestro medio es: “La temperatura es la medida del calor”. El siguiente extracto del diario de campo de un observador ejemplifica la manera en que hemos llevado a cabo la confrontación:

Profesor.- “y, ¿qué es el calor?”

Estudiante.- “una forma de energía”

Profesor.- “en qué unidades sabemos que se mide la energía?”

Estudiante.- “joules”

Profesor.- “¿y en qué unidades se mide la temperatura?”

Estudiante.- “grados”

Profesor.- “¿Cómo puede, entonces, una cantidad cuyas unidades son grados, medir algo cuyas unidades son joules? ¿Acaso joules y grados son lo mismo?”

La confrontación anterior entre temperatura y calor por medio de sus unidades les da los elementos necesarios para concluir que la temperatura no puede medir el calor. Por consiguiente, este momento lleva de inmediato al *cuarto momento*, en el que se pueden realizar dos tipos de acciones: un debate informal o una solución guiada de problemas. En el primer caso, varios estudiantes exponen sus ideas sobre el concepto o situación, las cuales se

critican o analizan por otros estudiantes, con el profesor como moderador. La actividad tiene un alto valor para evaluar el desempeño de estudiantes en cuanto a las características conductuales CC2 y CC3, y para detectar a aquellos o aquellas que no participan de la actividad. Para con ellos habrá que instrumentar alguna estrategia que los invite a participar activamente poco a poco.

El quinto momento consiste en permitir la aplicación de los conceptos en diversas situaciones que pueden ser el análisis de casos o la solución de problemas. Las formas de trabajo que hemos ensayado son individual y grupal, ésta última por medio de grupos cooperativos [16, 17]. Con estas actividades es posible desarrollar las características 4 y 5 del PeCr.

El sexto momento consiste en una evaluación global final, tanto del proceso como de los aprendizajes. Generalmente se aprovechan los resultados de los trabajos en equipo o individuales o se plantean preguntas abiertas. Es de notar que la evaluación se lleva a cabo a lo largo de todo el proceso (Figura 1). Los *quizzes* y las tareas conforman los primeros aspectos a evaluar, mientras que los desempeños en clase durante las etapas de confrontación y de trabajo grupal o individual dan lugar a otras tantas evaluaciones. La evaluación global final es la que proporciona una calificación numérica, la cual contribuye a la calificación final del ciclo escolar correspondiente.

La evaluación entre los momentos dos al cinco se realiza, esencialmente, de acuerdo con una rúbrica conocida como *Matriz de Pensamiento Crítico* (<http://www.criticalthinking.org/pages/critical-thinking-testing-and-assessment/594>) en la que se evalúan ocho aspectos del PeCr de acuerdo con una escala de cuatro niveles: Sobresaliente, Satisfactorio, Regular, Insatisfactorio de acuerdo con los siguientes criterios: 4 – Sobresaliente; hábil, se distingue por excelencia en claridad, exactitud, precisión, relevancia, profundidad, amplitud, lógica e imparcialidad; 3 – Satisfactorio; competente, efectivo, preciso y claro, pero le falta la profundidad, exactitud y la perspicacia del sobresaliente; 2 – Regular; inconsistente e inefectivo; muestra falta de competencias consistentes: con frecuencia es poco claro, impreciso, inexacto y superficial; 1 – No satisfactorio; incompetente, se distingue por imprecisión, falta de claridad, superficialidad, ilógica, inexactitud y parcialidad. (Anexo 1). Resumimos en la tabla 2 siguiente los ocho aspectos del PeCr que se evalúan y su relación con las Características Conductuales propuestas en la tabla I.

IV. RESULTADO DE UNA APLICACIÓN DE LA EDPC

La EDPC se ha aplicado como experiencia piloto en cuatro grupos de la unidad de aprendizaje *Introducción a la Física* que se imparte, con el mismo *syllabus*, en el primer semestre de carreras de ciencias e ingenierías en dos universidades de la zona metropolitana de la ciudad de

Enseñanza de la Física y Desarrollo del Pensamiento Crítico Guadalajara, Jalisco, México. Los grupos se identifican simplemente con los números 1, 2, 3 y 4, dos de cada universidad. Los grupos tienen la característica común de tener un número de alumnos similar, los tres primeros de 28 alumnos y el número 4 de 27 alumnos.

TABLA II. Relación de aspectos del PeCr a evaluar y sus características conductuales.

Aspecto del PeCr que se evalúa	Característica Conductual
Propósito	Puede explicar satisfactoriamente lo que se pide en la tarea y enunciar correctamente los objetivos que se persiguen.
Pregunta clave, o problema	CC3. Evita definiciones circulares; distingue entre un mero nombre o etiqueta y el concepto que lo caracteriza o lo define. CC4. Selecciona datos relevantes o pertinentes para la solución de un problema.
Punto de vista	CC2. Reconoce afirmaciones carentes de sentido; esto es, afirmaciones que no son definiciones, que no son verificables por observación directa o indirecta, o que no son proposiciones lógicas o matemáticas.
Información	CC1. Puede diferenciar entre fuentes de información confiables (de personas o instituciones con autoridad académica o moral) y no confiables (de personas o instituciones sin autoridad académica o moral).
Conceptos	CC3. Evita definiciones circulares; distingue entre un mero nombre o etiqueta y el concepto que lo caracteriza o lo define.
Asunciones (hipótesis)	CC4. Selecciona datos relevantes o pertinentes para la solución de un problema.
Interpretaciones, inferencias	CC5. Critica inferencias obtenidas de observaciones, lo que significa que puede reconocer si las inferencias se obtienen directamente de las observaciones, si no están relacionadas con éstas, o si las inferencias y las observaciones se contradicen.
Implicaciones, consecuencias	CC6. Selecciona una hipótesis de entre un conjunto de ellas para explicar adecuadamente los resultados de observaciones.

Cabe señalar que en una de las universidades se presentó un fenómeno de deserción por el que, al final del semestre, los grupos 3 y 4 tuvieron la presencia de 22 y 19 alumnos, respectivamente.

La metodología utilizada corresponde a un diseño longitudinal panel [18], en la cual, los mismos individuos se observan a lo largo de un semestre, en cuanto a sus cambios de actitud y participación, de acuerdo con las características conductuales de la tabla I, evaluadas con la Matriz de Pensamiento Crítico. La forma de proceder fue la siguiente. En las dos primeras sesiones del semestre se dividió cada grupo en dos subgrupos de observación; en el primero, que denominamos SG1 se incluyeron cinco alumnos que destacaron por sus primeras participaciones, mientras que el subgrupo SG2 lo representan el resto de los estudiantes. Un observador externo (un prestador de servicio social, quien no forma parte del grupo, ni es el profesor) se encargó de llevar el diario de campo con las observaciones clasificadas en categorías de observación que correspondieron a las características conductuales y la Matriz de Pensamiento Crítico. Las evaluaciones, de acuerdo con los criterios numéricos de la Matriz, se llevaron a cabo en tres momentos del semestre: en la segunda semana (cuarta sesión, e inicio de la aplicación de la EDPC), en la semana 7 y en la semana 14 (dos semanas antes de finalizar el semestre). Debido a la deserción escolar en dos de los grupos, los resultados de las semanas 7 y 14 son promedios sobre el número total de estudiantes presentes.

La escala de calificación del PeCr se especifica en la Matriz de Pensamiento Crítico del Anexo 1, de donde resumimos: 4 para Sobresaliente, 3 para Satisfactorio, 2 para Regular y 1 para Insatisfactorio. La tabla III siguiente sistematiza los resultados.

TABLA III. Puntuaciones de desarrollo de Pensamiento Crítico.

	Grupo 1 Media (Desviación estándar)		Grupo 2 Media (Desviación estándar)		Grupo 3 Media (Desviación estándar)		Grupo 4 Media (Desviación estándar)	
	SG 1	SG 2	SG 1	SG 2	SG 1	SG 2	SG 1	SG 2
Sem 1	2.2 (0.447)	2.0 (0.674)	2.6 (0.548)	2.174 (0.576)	2.2 (0.837)	2.087 (0.596)	2.6 (0.548)	2.045 (0.575)
Sem 7	2.8 (0.837)	2.174 (0.65)	2.8 (0.837)	2.217 (0.6)	2.6 (0.894)	2.238 (0.768)	2.8 (0.837)	2.3 (0.865)
Sem 14	3.2 (0.837)	2.609 (0.891)	3.0 (1)	2.609 (0.941)	3.0 (1)	2.882 (0.697)	3.2 (0.837)	3.071 (0.73)

Por el uso de la *ganancia normalizada* $g = (\text{Calificación final}) - (\text{Calificación inicial}) / [1 - (\text{calificación inicial})]$ [19, 20], donde las calificaciones inicial y final se obtienen considerando que 5, la calificación máxima, es el 100%. Este factor puede tomar valores entre 0 y 1, donde 0 significa que no se lograron aprendizajes, mientras que 1 corresponde al máximo aprendizaje posible. Los resultados de este cálculo se resumen en la tabla IV.

TABLA IV. Valores de Ganancia Normalizada.

Grupo 1 Ganancia Normalizada		Grupo 2 Ganancia Normalizada		Grupo 3 Ganancia Normalizada		Grupo 4 Ganancia Normalizada	
SG1	SG2	SG1	SG	SG1	SG2	SG1	SG2
0.556	0.255	0.2	0.182	0.4	0.375	0.333	0.532

V. DISCUSIÓN

Los números de la tabla III muestran una mejoría en cuanto al desarrollo de las características conductuales (y sus respectivas habilidades) relacionadas con el PeCr. En el caso de los subgrupos SG1, compuestos con los cinco alumnos que se mostraron más abiertos a la participación grupal desde la primera sesión áulica, el aumento de calificación parece ser más notorio en todos los grupos, aunque la dispersión mostrada por la desviación estándar es mayor que en los casos de los subgrupos SG2 compuestos por el grueso de los estudiantes de cada grupo.

Los valores de la tabla IV son más significativos. Puede observarse que le subgrupo SG1 del grupo 1 y el subgrupo SG2 del grupo 4 presentan los mayores valores de ganancia normalizada, mientras que en los grupos 2 y 3, sus subgrupos presentan valores de ganancia normalizada semejantes. Si se comparan los subgrupos SG2 del grupo 1 y el subgrupo SG1 del grupo 4 con sus respectivas contrapartes, se aprecian diferencias. En el grupo 1, el subgrupo SG1 obtuvo un valor de ganancia normalizada mayor al doble del valor de ganancia normalizada del subgrupo SG2, mientras que para el grupo 4, la ganancia normalizada del subgrupo SG2 es algo menos del doble del valor respectivo para el subgrupo SG1.

El mayor valor encontrado es 0.556 para el subgrupo SG1 del grupo 1 y el menor valor es de 0.182 para el subgrupo SG2 del grupo 2. El promedio de los valores de la ganancia normalizada es de 0.354. Este valor nos indica ratifica, en promedio, lo que se afirmó al inicio de la discusión, respecto a que las características conductuales mejoraron satisfactoriamente.

VI. CONCLUSIONES

Desarrollar el Pensamiento Crítico no es una tarea fácil, puesto que requiere elementos que, generalmente, se oponen a las prácticas tradicionales imperantes en nuestro medio. El rol del profesor ha de cambiar dramáticamente y, como requisito, el profesorado ha de haber desarrollado las características propias de un pensador crítico, lo cual puede ser un proceso relativamente largo, intencionado y con metas definidas. Con respecto al estudiantado, resulta una tarea doblemente difícil, pues además el profesor o la profesora deberán enfrentarse a los vicios adquiridos durante los años previos a la educación superior. Sin embargo, nuestra experiencia muestra que, una vez superado el obstáculo de la formación o autoformación docente, el trabajo con el alumnado se facilita enormemente. Cuando existe una guía apropiada, los estudiantes cooperan y se entusiasman ante los nuevos retos que se les proporcionan. Todos aquellos profesores que han utilizado estrategias didácticas centradas en el alumno y su aprendizaje, o métodos de enseñanza activos, saben que la situación mencionada es cierta.

El Modelo Didáctico que hemos utilizado y descrito en este trabajo nos ha dado resultados satisfactorios. Creemos

que las preguntas planteadas en la introducción, las que a su vez determinaron el desarrollo del presente trabajo pueden ser contestadas de manera igualmente satisfactoria: Si puede desarrollarse la habilidad de pensar críticamente con la EDPC, por lo que podríamos asegurar que si se desarrolla otra estrategia análoga, también podría utilizarse con el mismo fin. La respuesta a la segunda pregunta es igualmente afirmativa: De acuerdo con nuestro estudio, sí es posible enseñar a pensar críticamente.

Finalmente, se alcanzaron los objetivos planteados. Nuestro trabajo contribuye a las ciencias de la educación en el ámbito de la enseñanza de las ciencias, y hemos propuesto un modelo pedagógico para las nuevas generaciones de estudiantes que ingresan al nivel superior.

REFERENCIAS

[1] Pérez Gómez, R. *Tres Razones para Estudiar Matemáticas*, <www.oei.es/oim/xviiiioimperezgomez.htm>; consultado el 12 de enero de 2010.

[2] SEP, Secretaría de Educación Pública, <www.enlace.sep.gob.mx/>; consultado el 3 de septiembre de 2011.

[3] Dowling, J.E., *The Great Brain Debate. Nature or Nurture?* (Joseph Henry Press, USA, 2004).

[4] Ilyenkov, E.V., *Our Schools Must Teach How to Think!*, Journal of Russian and East European Psychology **45**, 9-49, (2007).

[5] OECD, *Understanding the Brain: The Birth of a Learning Science*, <www.sourceoecd.org/education/9789264029125>, consultado 30/03/2009.

[6] Behar-Horenstein, L. S. and Niu, L., *Teaching Critical Thinking Skills In higher Education: A Review Of The Literature*, Journal of College Teaching & Learning **8**, 25-41 (2007).

[7] Laiton Poveda, I., *¿Es posible desarrollar el pensamiento crítico a través de la resolución de problemas en física mecánica?*, Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias **8**, 54-70 (2011).

Enseñanza de la Física y Desarrollo del Pensamiento Crítico

[8] Ennis, R. H., *A concept of critical thinking*, Harvard Educational Review **32**, 81-111 (1962).

[9] Castiblanco, O. y Vizcaino, D., *Pensamiento Crítico y Reflexivo desde la Enseñanza de la Física*, Revista Colombiana de Física **38**, 674-677 (2006).

[10] Arons, A. B., *Teaching Introductory Physics* (John Wiley & Sons, Inc., USA, 1997)

[11] Bernal, J. D., *Science teaching in general education*, Science Education **29**, 233-246 (1945).

[12] Martínez González, R. C. y Lara Barragán Gómez, A., *Dos o Tres Exámenes Parciales, ¿qué es mejor?*, Reporte Interno, Facultad de Ingeniería, Universidad Panamericana campus Guadalajara (2011).

[13] Martínez Delgado, A., *Constructivismo Radical*, Enseñanza de las Ciencias **17**, 493-502 (1999).

[14] Sewell, A., *Constructivism and student misconceptions. Why every teacher needs to know about them*, Australian Science Teachers' Journal **48**, 24-28 (2002).

[15] Julian, G.M., *Socratic dialogue –With how many?*, The Physics Teacher **33**, 338-339 (1995).

[16] Andre, K. M., *Cooperative Learning: An Inside Story*, The Physics Teacher **37**, 356-358 (1999).

[17] Crouch, C.H. and Mazur, E., *Peer Instruction: Ten years of experience and results*, American Journal of Physics **69**, 970-977 (2001).

[18] Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., Baptispta Lucio, M.P., *Metodología de la Investigación*, (McGraw-Hill/Interamericana Editores, S. A. de C. V., México, 2010)

[19] Alarcón Opazo, H. R. y De La Garza Becerra, J. E., *Influencia del Razonamiento Científico en el Aprendizaje de Conceptos en Física Universitaria: Comparación entre Instrucción Tradicional e Instrucción por Modelación*, (2009). <http://www.comie.org.mx/congreso/memoriaelectronica/v10/pdf/area_tematica_05/ponencias/1189-F.pdf> consultado el 12 de enero de 2012.

[20] Redish, E. F. and Steinberg, A., *Teaching Physics: Figuring Out What Works*, Physics Today **52**, 24-30 (1999).

ANEXO 1. Matriz de Pensamiento Crítico.

	Sobresaliente	Satisfactorio	Regular	No satisfactorio
Propósito	Demuestra un claro entendimiento del propósito de la tarea	Demuestra un entendimiento del propósito de la tarea	No tiene completamente claro el propósito de la tarea	No entiende el propósito de la tarea
Pregunta clave, o problema	-Define claramente el problema; identifica con precisión los aspectos centrales del problema -Percibe la profundidad y el alcance del problema -Demuestra objetividad e imparcialidad respecto al problema	-Define el problema; identifica los aspectos centrales pero no explora la profundidad y alcance del problema -Demuestra objetividad e imparcialidad	-Define el problema, pero de manera superficial o reducida; puede pasar por alto algunos aspectos centrales -Tiene problemas para mantener un enfoque objetivo e imparcial del problema	-No define claramente el problema; no reconoce los aspectos centrales -No mantiene un enfoque objetivo e imparcial del problema
Punto de vista	-Identifica y evalúa puntos de vista relevantes y significativos -Muestra empatía; es	-Identifica y evalúa puntos de vista relevantes -Es imparcial al examinar esos puntos de vista	-Puede identificar otros puntos de vista, pero le cuesta trabajo ser imparcial; puede enfocarse hacia puntos	-Ignora o evalúa superficialmente puntos de vista alternativos -No puede separar sus propios

	imparcial al examinar los puntos de vista relevantes		de vista irrelevantes o no significativos	intereses y sentimientos al evaluar otros puntos de vista
Información	-Acopia suficiente información, creíble y relevante: observaciones, afirmaciones, datos, preguntas, gráficas, temas, descripciones, etc. - Incluyen información que refuta tanto como que apoya la posición argumentada -Distingue entre información e inferencias obtenidas de la información	Acopia suficiente información creíble y relevante -Incluye alguna información que refuta su posición -Distingue entre información e inferencias obtenidas de la información	-Acopia alguna información creíble pero no suficiente; parte de la información puede ser irrelevante -Omite alguna información significativa, incluidos algunos contrargumentos -Puede confundir algo de la información con inferencias	-Se apoya en información irrelevante, poco confiable e insuficiente -No identifica o rápidamente descarta contrargumentos relevantes -Confunde información e inferencias obtenidas de la información
Conceptos	Identifica y usa/explica con precisión conceptos clave relevantes	Identifica y usa/explica conceptos clave relevantes	Identifica algunos (no todos) conceptos clave relevantes, pero su uso es superficial y en ocasiones impreciso	-Mal interpreta conceptos clave relevantes, o los ignora por completo
Asunciones (hipótesis)	-Identifica con precisión las asunciones (lo que se da por hecho) -Hace asunciones consistentes, razonables y válidas	-Identifica asunciones -Hace asunciones válidas	-Se equivoca al identificar asunciones o al explicarlas, o las asunciones identificadas son irrelevantes, no están enunciadas claramente, y/o son inválidas	-Se equivoca al identificar asunciones -Hace asunciones inválidas
Interpretaciones, inferencias	-Sigue el camino que marcan la evidencia y el razonamiento para obtener conclusiones o soluciones pensadas, defendibles y lógicas -Hace inferencias profundas más que superficiales -Hace inferencias consistentes unas con otras	-Sigue el camino que marcan la evidencia y el razonamiento para obtener conclusiones justificables y lógicas -Hace inferencias válidas	-Sigue algo de la evidencia para obtener inferencias las que pueden ser ilógicas, inconsistentes, poco claras, y/o superficiales	-Usa razonamientos simplistas, superficiales o irrelevantes y/o afirmaciones injustificadas -Hace inferencias ilógicas o inconsistentes -Muestra cerrazón de pensamiento o rechazo a razonar; a pesar de la evidencia, mantiene o defiende puntos de vista basados en el interés personal
Implicaciones, consecuencias	-Identifica las implicaciones o consecuencias del razonamiento (ya sean positivas o negativas) -Distingue las implicaciones probables de las improbables	-Identifica implicaciones o consecuencias significativas y distingue las implicaciones probables de las improbables (en menor grado de profundidad)	-Tiene problemas para identificar implicaciones o consecuencias significativas; identifica implicaciones improbables	-Ignora implicaciones y consecuencias significativas del razonamiento

El aprendizaje significativo de la mecánica considerada como una estructura compleja



Mateo Barkovich

Academia de Física, Universidad Autónoma de la Ciudad de México, Prolongación
San Isidro 51, Col. San Lorenzo Tezonco, Del. Iztapalapa, México, D. F.

E-mail: mateobarkovich@gmail.com

(Recibido el 24 de Septiembre de 2013, aceptado el 7 de Febrero de 2014)

Resumen

En este artículo vamos a discutir las implicaciones que tiene en la enseñanza/aprendizaje de la mecánica de Newton el hecho de considerarla como una estructura compleja.

Palabras clave: didáctica de la ciencia, mecánica de Newton, filosofía de la ciencia.

Abstract

In this paper, we are going to discuss the implications in teaching and learning Newtonian Mechanics when we consider this subject as a complex structure.

Keywords: Physics education, Newtonian Mechanics, Philosophy of Science.

PACS: 01.70._w, 01.40.Ha, 01.40.Fk.

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existe un gran consenso en la necesidad de transmitir a los estudiantes una visión correcta de la metodología científica. Tal es así que el tema de las concepciones epistemológicas de los profesores y las visiones deformadas transmitidas a los estudiantes es una de las líneas prioritarias de investigación en la didáctica de las ciencias [1]. Entre estas visiones deformadas se encuentra la de *visión acumulativa o lineal* [2], en la cual los conocimientos científicos aparecen como fruto de un crecimiento lineal, ignorando las crisis y reconstrucciones profundas. Muy por el contrario, el cuerpo de conocimiento de la mecánica debe ser considerado como una estructura compleja [3,4], donde la producción de conocimiento dista mucho de ser lineal (sobre todo en la etapa de consolidación del paradigma, que es la que nos interesa desde el punto de vista de la didáctica). El objetivo de este artículo es el de resaltar algunas de las consecuencias que tiene el considerar el carácter estructural en la enseñanza de la mecánica. Muy a menudo estas consecuencias no son tomadas en cuenta. La razón de esto no estriba necesariamente en un desconocimiento de la metodología y naturaleza de la ciencia por parte de los docentes, sino más bien al hecho de que poseer concepciones válidas acerca de la naturaleza de la ciencia no implica necesariamente que el comportamiento docente sea coherente con esas concepciones [5]. Antes de abordar este tópico es oportuno comenzar por una breve descripción de lo que entendemos por aprendizaje significativo, ya que usaremos este concepto recurrentemente a lo largo del presente trabajo.

La teoría del aprendizaje significativo es la propuesta que hizo Ausubel [6] cuando se planteó el modelo de enseñanza basado en descubrimiento como alternativa al modelo conductista imperante. Si bien el término, aprendizaje significativo, viene de esta teoría, podemos decir que en la actualidad es compatible con otras teorías de corte constructivista y subyacentes a ellas [7].

Ausubel definió el aprendizaje significativo como el proceso a través del cual una nueva información se relaciona de una manera *no arbitraria* y *sustantiva* con la estructura cognitiva de la persona que aprende. En esta definición hemos resaltado las palabras *no arbitraria* y *sustantiva* ya que constituyen las características básicas del aprendizaje significativo. La *no arbitrariedad* quiere decir que el nuevo conocimiento se relaciona con ciertos conocimientos relevantes (no con cualquiera) de la estructura cognitiva del que aprende. Estos conocimientos previos específicos funcionan como “anclaje” para el nuevo material y se llaman subsumidores. Por su parte, *sustantividad* se refiere al hecho de que lo que se incorpora es el significado (o sustancia) del nuevo conocimiento; y no la frase usada para explicarlo.

La consecución del aprendizaje significativo requiere de dos condiciones:

- i) Que haya una disposición del que aprende para hacerlo de manera significativa.
- ii) Que el material sea potencialmente significativo. Esto supone que el material sea potencialmente relacionable con la estructura cognitiva del estudiante o, en otras palabras, que existan los subsumidores indispensables para interactuar con el mismo.

Es muy común, y de hecho lo haremos en las secciones siguientes, que se usemos la palabra *significado* a secas.

Este término puede tener diferentes connotaciones dependiendo del contexto en que se use. En particular, no debe confundirse el *significado psicológico* con el *significado potencial* de un material didáctico. El primero se refiere al aprendizaje significativo incorporado en el esquema cognitivo del sujeto que aprende en forma de nuevos subsumideros para el anclaje de una futura información. El segundo corresponde al significado que podrían adquirir los estudiantes cuando se involucran en el estudio del material. Si bien los libros no tienen significado (esto es algo de carácter cognitivo), podemos afirmar que tienen un significado potencial o implícito. Por otro lado el cuerpo de conocimiento de la mecánica también tiene un conjunto de significados potenciales. Estos son los que poseen los profesores/investigadores y que van más allá de los del libro de texto usado en el curso, ya que provienen de diversas fuentes bibliográficas, de conexiones con otras áreas del conocimiento, de su experiencia en el trabajo científico, etc. En este sentido es útil la distinción entre la teoría de los científicos y la teoría enseñada por el profesor y, en última instancia, la teoría aprendida por los estudiantes [8].

II. LA CIENCIA COMO UNA ESTRUCTURA COMPLEJA

Chalmers [9] presenta dos argumentos para considerar a la ciencia como totalidades estructurales de algún tipo. Uno de ellos se basa en el estudio histórico del desarrollo de la mecánica a lo largo del tiempo. En este se puede apreciar con claridad que concepciones como las inductistas y falsacionistas son muy pocas sistemáticas para describir su evolución y progreso. El otro argumento es que los enunciados observacionales deben formularse en el marco de una teoría y en consecuencia los conceptos solamente adquieren un significado preciso cuando forman parte de una teoría coherentemente estructurada. En otras palabras, el significado (o, por lo menos parte del mismo) de los conceptos provienen del papel que desempeñan en la teoría. Así, Strike y Posner [10] afirman que capturar el significado de cualquier concepción particular es dependiente de cómo esta se relaciona con el todo.

El hecho de considerar a las teorías científicas como estructuras tiene implicaciones importantes en la enseñanza de la mecánica. Algunas de estas son:

i) Todo el campo de conocimiento de la mecánica tiene una coherencia interna basada en un complejo entramado entre sus elementos constitutivos (conceptos, enunciados, hipótesis, aproximaciones, etc.) de tal manera que debe ser vista como una entidad única.

Desde el punto de vista de la mente del profesor/investigados, la mecánica puede ser considerada como un único esquema mental (dinámico), complejo y robusto, que sirve como herramienta para abordar todos los problemas de su campo de acción. Los estudiantes, por otro lado, sometidos por ejemplo a una instrucción tradicional de transmisión de conocimientos, van construyendo esquemas mentales aislados de cada contenido que les permiten

resolver los problemas de ese contenido particular. En este sentido, el objetivo de la enseñanza es vincular y fusionar estos esquemas para consolidar esquemas cada vez más abarcativos.

ii) Cuando se entiende a la mecánica como una estructura compleja, donde sus partes están vinculadas entre sí y los conceptos toman un significado más preciso cuando se los analizan desde su función dentro de la teoría, es muy claro que no hay ni un principio ni un fin natural para iniciar y terminar la instrucción. En consecuencia, hay diferentes secuencias lógicas posibles que pueden plantearse para introducir los contenidos a los estudiantes. Pero, evidentemente, la diagramación de un curso no debe remitirse únicamente a establecer una secuencia lógica de los temas en un sentido lineal. Más bien debe introducirse sistemáticamente la recapitulación o revisión de los temas pasados, para que los conceptos vistos al principio puedan ser reinterpretados desde una perspectiva más amplia, desde un esquema mental más elaborado que incluya los contenidos posteriores y así poder facilitar la asimilación de los significado que surgen de su función dentro la teoría. En otras palabras, el nivel de significatividad de un tema/concepto aumenta cuando se han incorporados en la estructura mental del estudiante nuevos subsumideros provenientes de temas posteriores. Y, obviamente, en este proceso también aumenta el nivel de significatividad de los temas posteriores, mostrando el carácter cíclico que debe tener el mecanismo de enseñanza de la mecánica cuando es vista como una estructura.

Un ejemplo que ilustra este punto es el del concepto de aceleración, el cual se introduce tradicionalmente a los estudiantes por primera vez en el contexto de la cinemática. En particular, el signo de la aceleración en un movimiento acelerado en una dimensión está dado por el sentido del vector cambio de velocidad. Si este punto es retomado luego de estudiar la segunda ley de Newton, donde la aceleración se vincula con la fuerza aplicada a un objeto (que tiene un referente sensorial más fuerte que el del cambio de velocidad), ahora el signo de la aceleración puede vincularse también con el sentido del vector fuerza. Esto aporta nuevos significados al concepto de aceleración, mostrando su función dentro de la teoría.

Por esta razón hay que ser cuidadosos en la diagramación de un curso de corte constructivista, para no caer en el error de que hay que ver pocos temas pero de manera significativa, o, en otras palabras, antes de pasar a otro tema es importante que los estudiantes logren un aprendizaje significativo del actual. De acuerdo a lo visto antes, y reforzando lo afirmado por otros autores [11], el aprendizaje significativo es algo que lleva tiempo y dedicación. Incluso el hecho de aislar un tema para pretender enseñarlo significativamente realmente carece de sentido cuando se considera a la mecánica como una estructura compleja. Su separación en temas es más bien por una cuestión de orden y no debe confundirse con un carácter lineal, asociado a una construcción por acumulación de conocimiento. Hay conceptos que necesitan de numerosas conexiones, incluso con conceptos fuera del ámbito de la mecánica, para que puedan establecerse en la estructura

mental del aprendiz de manera significativa. Una enseñanza constructivista de la mecánica debe asignar un espacio (temporal) importante dentro de la clase para la vinculación de temas y el favorecimiento y fortalecimiento de la unificación de los esquemas mentales fragmentados por contenidos que puedan tener los estudiantes [12, 13, 14].

Aunque implícito en lo dicho antes, es importante aclarar que los estudiantes pueden avanzar exitosamente en el estudio de la mecánica aunque algunos conceptos no hayan sido comprendidos profundamente, por lo menos al principio. Un ejemplo histórico puede ilustrar este punto. Cuando Galileo estudió la caída libre de los objetos no tenía una definición de velocidad. Solo se maneja con la idea intuitiva de la misma y, adoptando un principio de simplicidad, postuló que la velocidad de un objeto en caída libre era proporcional al tiempo transcurrido. Esta hipótesis resultó correcta y se acopla coherentemente con las definiciones posteriores más precisas de velocidad. De esta manera, la falta de una definición de velocidad no le impidió a Galileo avanzar en sus investigaciones sobre el movimiento de los cuerpos. Es por eso que Chalmers [9] afirma que la historia de un concepto inicia con una idea vaga del mismo, seguido de su aclaración gradual a medida que la teoría en la que desempeña un papel toma forma más coherente y precisa. Lo mismo podemos esperar que ocurra con los estudiantes, pero no en el sentido de que vayan reproduciendo toda la historia de la mecánica en la clase (lo cual es imposible), sino más bien en el sentido de que su estructura cognitiva vaya descubriendo y asimilando nuevas conexiones entre la información recibida. En este contexto las definiciones precisas surgen como una necesidad del estudiante que avanza y no como una imposición del profesor. Citando textualmente a Hempel [15]: en la investigación científica, la formación de conceptos y la formación de teorías deben ir de la mano.

iii) En general, cuando se habla de aprendizaje significativo se lo hace en referencia a algún tema o contenido. Sin embargo, una de las características del carácter estructural de una teoría es que tiene propiedades que no poseen sus partes por separado. Las propiedades como universalidad, coherencia lógica y capacidad predictiva (en un sentido amplio, es decir, más allá de la capacidad predictiva de sus temas) son algunos ejemplos de propiedades que emergen al considerar a la mecánica como una estructura y que deberían ser significativamente incorporados en el esquema cognitivo de los estudiantes.

Volviendo al ejemplo de la aceleración, cuando se da al estudiante la oportunidad de vincular los significados provenientes de la cinemática con los de la dinámica, lo que se está enseñando, entre otras cosas, es la coherencia lógica entre los diferentes elementos de la mecánica.

III. SIGNIFICADOS ADICIONALES

El cuerpo de conocimiento de la mecánica no es una teoría aislada y autocontenida. Además de poseer conexiones entre sus partes, posee numerosas conexiones con otras áreas. Por ejemplo, muchos de los significados de sus conceptos están

estrechamente vinculados con conceptos matemáticos. El dominio de las leyes de Newton requiere de un dominio previo del análisis vectorial. O el complejo concepto de velocidad instantánea requiere, además de conocimientos de cálculo diferencial, un enorme esfuerzo integrador por parte del estudiante. En este sentido tampoco debe confundirse el aprendizaje significativo con lo que habitualmente se (mal) entiende con “aprender la parte conceptual de la teoría” (menospreciando el manejo matemático). La matematización es una parte crucial de la mecánica, ya que está íntimamente vinculada con el carácter predictivo de la misma. Por ejemplo, luego de concluir (probablemente matemáticamente) que en un movimiento uniformemente acelerado la posición es una función cuadrática del tiempo, y conociendo las propiedades de las parábolas, es muy fácil entender el por qué en este tipo de movimiento solo puede haber un único retorno en el sentido del movimiento del objeto.

Esta serie de conexiones con otras disciplinas tiene como consecuencia que el nivel de significatividad de la mecánica sea potencialmente infinito. El límite de este nivel es personal y es fijado por cada individuo que se involucra en su estudio. Veamos a continuación un ejemplo para aclarar lo que pretendemos decir con esta afirmación.

Tomemos el caso del estudio del movimiento de un objeto en una dimensión. El nivel de significatividad de este tema aumenta cuando el alumno estudia movimientos generales en tres dimensiones. En este último surge necesidad de usar la notación vectorial, que da pie a una nueva reinterpretación del movimiento en una dimensión como caso límite de aquel. Es claro que el estudio de un solo tema aislado no favorecen los significados que surgen de la comparación de diferentes contextos problemáticos. El nivel de significatividad sigue aumentando cuando se estudia la dinámica, y, más aún, la relación entre cinemática y dinámica. Un caso olvidado en los libros de texto tradicionales [16, 17, 18], y cuya presentación después de introducir la segunda ley de Newton resulta muy lógica, es el del tratamiento general del movimiento de un objeto cuando se le aplica una única fuerza constante. Las características de este movimiento dependen de las condiciones iniciales (tiempo, posición y velocidad) del mismo, y, en particular, la trayectoria del objeto puede ser una recta o una parábola, dependiendo del valor del ángulo entre los vectores fuerza y velocidad inicial. El tiro parabólico, que tradicionalmente se enseña en cinemática, es un caso particular de este problema. El estudio de la gravitación, como el gran tema unificador de la mecánica celeste con la terrestre, más el análisis de diferentes aplicaciones (movimientos armónicos, choques, etc.) ayudan a consolidar no solo el tema original, sino también las propiedades de la ciencia mencionadas previamente en el inciso iii) del apartado anterior. Para que esto último ocurra es indispensable que la enseñanza sea acompañada por experiencias de laboratorio significativas.

Las conexiones planteadas en el párrafo anterior se encuentran dentro del ámbito de la mecánica. Pero, como dijimos antes, existen múltiples vínculos con otras áreas del conocimiento. El nivel de significatividad continúa en

aumento cuando el estudiante incorpora las técnicas matemáticas adecuadas y, aún más, cuando incorpora los formalismos Lagrange y Hamilton. Otra gama de significado, referente a la naturaleza y metodología de la ciencia, surgen en el esquema cognitivo del estudiante (a esta altura probablemente ya sea un estudiante avanzado) cuando se estudia historia de la ciencia y filosofía de la ciencia. Y, si continúa con mecánica estadística, electromagnetismo, relatividad, mecánica cuántica, etc., adquiere más significados, como por ejemplo el del límite de validez del, ahora modesto, tema inicial del movimiento de un objeto en una dimensión.

Este ejemplo pone en evidencia uno de los aspectos del fracaso de la enseñanza tradicional en la enseñanza de la ciencia. Al estar ésta completamente desvinculada del esquema cognitivo del estudiante se asume que con una exposición clara y lógicamente estructurada se pueden transmitir al estudiante todos los significados que el profesor pretende sin, en general, analizar el complejo camino que han recorrido esos significados para establecerse en su esquema cognitivo.

IV. ¿QUE ES LO QUE HAY QUE ENSEÑAR?

Quizás parezca muy obvia la cuestión, pero el análisis de su respuesta nos plantea una serie de puntos interesantes que pueden enriquecer la práctica docente. Si le preguntásemos a algún profesor/investigador universitario qué va a impartir un curso de mecánica en qué consiste esta materia, probablemente nos dará una lista estructurada y secuenciada de temas o contenidos. Pero, ¿es la mecánica el conjunto de temas que aparece en el índice de algún libro de texto? Evidentemente no, por alguna de las siguientes razones: a) Los libros tienen diferentes secuencias y los temas pueden variar, b) los temas deben ir acompañados de sus significados potenciales, que son los que le imprime el autor, y c) a su vez está el matiz que da el profesor, tanto incorporando temas adicionales como significados adicionales a través de una variada serie de actividades. Adicionalmente, podemos citar textualmente a Kuhn [3], refiriéndose a los libros de texto: *...es inevitable que el objetivo de tales libros sea propagandístico y pedagógico, de manera que la idea de ciencia que de ellos se desprende no tiene más probabilidades de describir adecuadamente la empresa que los ha producido de lo que tiene la imagen de la cultura nacional extraída de un folleto turístico....* Esta metáfora aclara lo que se está intentando explicar en este apartado y, a su vez, reafirma una importante diferencia entre la enseñanza tradicional y la enseñanza constructivista. La diferencia consiste que mientras en la enseñanza tradicional se enseña mecánica (entendida como un conjunto de temas), en la enseñanza constructivista se enseña ciencia usando los temas de la mecánica. De aquí se desprende el gran interés de los investigadores en didáctica de las ciencias en el estudio de la metodología científica, la historia de la ciencia, los procesos de razonamiento crítico, etc.

Con todo, podemos afirmar que el cuerpo de conocimiento de la mecánica tiene las siguientes características:

i) No es definido. Hay situaciones que son difíciles de decir si pertenecen o no a la mecánica y, en general, carece de importancia un debate sobre tal asunto. Por ejemplo, el estudio detallado (no meramente descriptivos) de los experimentos de Galileo sobre la caída de los cuerpos son, en general, ignorados en los cursos universitarios de mecánicas y más bien hay que buscarlo en los textos de historia de la ciencia. Por esta razón podríamos concluir que no pertenecen a la mecánica, aunque la gran mayoría de los docentes estarían en contra de este argumento. En otras palabras, no existe algo así como “la biblia de la mecánica”, donde todo lo que está en ella es mecánica y todo lo que no está no es mecánica.

Retomando una parte de lo analizado en la sección anterior, cada profesor tiene una visión única y personal de lo que comprende la mecánica y lo que debe comprender un curso sobre ella. Aunque, evidentemente, muchos de los significados son compartidos por la comunidad científica.

ii) No es estático. Los libros, en particular los de difusión masiva [16, 17, 18], contienen diversos contenidos universalmente aceptados de lo que conocemos como mecánica más una serie de significados potenciales. Sin embargo, estos libros no han existido desde los inicios de la mecánica y, de hecho, algunos han ido cambiando con el paso del tiempo. Por ejemplo, hoy en día es muy normal que los textos incluyan problemas que deben resolverse con el ordenador o que hagan énfasis en las aplicaciones tecnológicas de la ciencia.

iii) Es infinito. Cuando hablamos de la mecánica nos referimos tanto a los contenidos en sí como a los significados que los acompañan. Por ello resulta muy difícil encontrar un límite definido para su campo de acción cuando se consideran los múltiples significados derivados de sus conexiones con otras áreas afines. La inclusión de los significados adicionales hace que su cuerpo de conocimiento sea infinito.

Por lo que acabamos de expresar resulta claro que para impartir un curso de mecánica se necesita una diagramación minuciosa que no solamente incluya una elección lógicamente secuenciada de temas, sino también los significados que se pretenden de ellos, como fortalecer estos significados a través de sus conexiones con otros temas y como impartir al estudiantes los significados más generales no vinculados a un tema específico, como por ejemplo aquellos relacionados con la epistemología de la ciencia. Como señala Osborne [19], el conocimiento y la comprensión de la metodología científica es un objetivo esencial de cualquier educación científica, ya que si no se corre el riesgo de producir estudiantes que no reconocen las concepciones científicas como racionales.

V. CONCLUSIONES

En este artículo revisamos algunos aspectos relacionados a la naturaleza de la ciencia y su impacto en la enseñanza de

la misma. Para tal fin usamos el concepto de aprendizaje significativo, introducido por Ausubel y usado ampliamente en el contexto de las metodologías constructivistas. Dos características que definen este término son la sustancialidad y la no arbitrariedad. Estas características son muy adecuadas para la entender algunos mecanismos que deben ser considerados en la enseñanza de mecánica, cuyo cuerpo de conocimiento debe considerarse una estructura compleja. Según Hempel [15], la mecánica es un conjunto de conceptos que conforman los nudos de una red compleja cuyos hilos son las leyes y principios y donde también, podemos agregar, hay hilos de conexión a conceptos de otras áreas. Así, el número de conexiones de un concepto (no arbitrariedad) favorece la sustancialidad del mismo. Y la sustancialidad del concepto ayuda a favorecer y fortalecer sus múltiples conexiones. Por esta razón la definición de aprendizaje significativo de Ausubel es muy acorde a la metodología científica y, ambas cosas combinadas, nos permite entender la dificultad muchas veces reportada acerca de lograr aprendizajes significativos en el estudio de la mecánica.

Finalmente, queremos resaltar que hemos considerado más adecuado hablar de nivel de significatividad de un concepto, más que de aprendizaje significativo del mismo. Esto se debe a que el significado aumenta indefinidamente a medida que se fortalecen las conexiones, lo cual puede lograrse de formas muy variadas, como el estudiar los temas posteriores del curso, a través de recapitulaciones (como presentar una clase o un examen final) e incluso durante el estudio de otros cursos. Lo que sí es definitivamente un gran error es pretender transmitir a los estudiantes todos los significados que tiene el profesor de la mecánica en un único curso.

VI. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Claudia López, Marco Noguez y Alexandra Carreño por sus valiosos comentarios y sugerencias.

VII. REFERENCIAS

[1] Desautels, J., Larochelle, M., Gagnee, B. y Ruel, F., *La formation á l'enseignement des sciences: le virage épistémologique*, Didaskalia **1**, 49-67 (1993).
 [2] Gil, D., *Contribución de la Historia y la Filosofía de las ciencias al desarrollo de un modelo de*

enseñanza/aprendizaje como investigación, Enseñanza de las Ciencias **11**, 197-212 (1993).
 [3] Kuhn, T., *The structure of scientific revolutions*, (University of Chicago Press, Chicago, 1970).
 [4] Lakatos, I., *Criticism and the growth of knowledge*, (Cambridge University Press, Cambridge, 1974).
 [5] Hodson, D., *Philosophy stance of secondary school science teachers, curriculum experiences, and children's understanding of science: some preliminary findings*, Interchange **24**, 41-52 (1993).
 [6] Ausubel, D., *The psychology of meaningful verbal learning*, (Grune and Stratton, New York, 1963).
 [7] Moreira, M., *Aprendizaje significativo: un concepto subyacente*, Actas del encuentro internacional sobre el aprendizaje significativo, Burgos, España, 19-44 (1997).
 [8] Paruelo, J., *Enseñanza de las ciencia y filosofía*, Enseñanza de las Ciencias **21**, 329-335 (2003).
 [9] Chalmers, A., *¿Qué es esa cosa llamada ciencia?*, (Siglo XXI editores, México, 2008).
 [10] Strike, K., Posner, G., *A conceptual change view of learning and understanding*. En Pines & West (Eds) *Cognitive Structures and Conceptual Change*, (Academic Press, Orlando, 1985).
 [11] Carretero, M., Limon, M., *Problemas actuales del constructivismo: de la teoría a la práctica*, Constructivismo, ecos del debate (Rodrigo, M y Annay I, compiladores), (Paidós, Barcelona, 1996).
 [12] Koch, A., *Training in metacognition and comprehension of physics text*, Science Education **85**, 758-768 (2001).
 [13] Hand, B., Prain, V., *Teachers implementing writing-to-learn strategies in junior secondary science: a case study*, Science Education **86**, 737-755 (2002).
 [14] Osborne, J., Simons, S., Collins, S., *Attitudes towards science: a review of the literature and its implications*, International Journal of Science Education **15**, 83-93 (2003).
 [15] Hempel, K., *La filosofía de la ciencia natural*, (Alianza, Madrid, 1973).
 [16] Sears, F., Zemansky, M., Young, H., Freedman, R., *Física Universitaria*, Vol. 1, (Pearson Educación, México, 2004).
 [17] Serway, R., *Física*, Vol. 1, (Thomson, México, 2005).
 [18] Tipler, P., *Física*, Vol. 1, (Editorial Reverté, Madrid, 2004).
 [19] Osborne, J., *Beyond Constructivism*, Science Education **80**, 53-82 (1996).

Adaptación y validación del Scale of Attitudes Towards Physics (SAP) en una muestra de estudiantes chilenos de ingeniería

EDVCATIO PHYSICORVM



Jorge Pinochet¹, Maximiliano Rivera²

¹Facultad de Educación, Pontificia Universidad Católica de Chile, Vicuña Mackenna 4860, Macul, Santiago, Chile.

²Departamento de Física, Universidad Técnica Federico Santa María, Casilla 110-V, Valparaíso, Chile.

E-mail: japinochet@gmail.com

(Recibido el 29 de Noviembre de 2013; aceptado el 16 de Marzo de 2014)

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados del proceso de adaptación y validación de un cuestionario para medir actitudes hacia la física (SAP), que puede ser utilizado por docentes e investigadores latinoamericanos para estudiar y mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje de la física en la educación superior. El cuestionario fue aplicado a una muestra de 206 estudiantes de ingeniería de la ciudad de Santiago, Chile. El proceso de adaptación y validación comprendió las siguientes etapas: (1) Traducción y adaptación de la escala; (2) Análisis estadísticos generales; (3) Análisis de reactivos; (4) Estudio de confiabilidad; (5) Análisis factorial. Los resultados evidencian excelentes propiedades psicométricas. La confiabilidad de la escala completa, calculada mediante el coeficiente Alfa de Cronbach, alcanza el valor 0,942. El análisis factorial de componentes principales sugiere la existencia de cuatro dimensiones que explican el 52,763% de la varianza. Como conclusión, se establece que la escala satisface los criterios de confiabilidad y validez de un instrumento de calidad para medir actitudes hacia la física en estudiantes de educación superior.

Palabras clave: Actitudes hacia la física, medición de actitudes, confiabilidad, análisis factorial.

Abstract

In this paper we present the results of the process of adaptation and validation of a questionnaire to measure attitudes toward physics (SAP), which can be used by teachers and latinamerican researchers to study and improve the teaching and learning of physics in higher education. The questionnaire was administered to a sample of 206 engineering students from the city of Santiago, Chile. The adaptation and validation process comprised the following steps: (1) Translation and adaptation of the scale; (2) General statistical analysis; (3) Analysis of items; (4) Study of reliability; (5) Factor Analysis. The results show excellent psychometric properties. The reliability of the full scale, measured by Cronbach's alpha coefficient, reaches the value 0.942. The principal components factor analysis suggests the existence of four dimensions that explain 52.763% of the variance. In conclusion, it is established that the scale meets the criteria of reliability and validity of a quality scale to measure attitudes toward physics in higher education students.

Keywords: Attitude towards physics, attitude measurement, reliability, factor analysis.

PACS: 01.40. Fk; 01.40. gf.

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Desde hace décadas, el problema de la influencia de las actitudes sobre el aprendizaje ocupa un lugar importante en la agenda de la investigación educativa. Los resultados en esta línea parecen confirmar que las actitudes positivas favorecen el aprendizaje y el rendimiento académico, mientras que las actitudes negativas lo obstaculizan [1]. Los estudios también revelan negativas actitudes de los estudiantes hacia la ciencia, así como una falta generalizada de interés hacia el trabajo científico en la escuela [2]. Incluso algunos autores han sugerido que el problema principal que enfrenta la educación científica son las actitudes desfavorables de los alumnos hacia la ciencia [3].

Durante los últimos años, el tema de las actitudes de los alumnos hacia la ciencia ha adquirido tal relevancia educativa, que incluso fue incorporado como una de las temáticas centrales de la versión 2006 de la evaluación PISA, que estuvo focalizada en las ciencias. El informe internacional de resultados de la evaluación PISA 2006 sostiene que: «Las cuestiones de motivación y actitud son especialmente relevantes en las ciencias... La actitud de las personas desempeñará un papel significativo en su interés, atención y respuesta a la ciencia y la tecnología». Un análisis pormenorizado de los resultados de PISA 2006 con estudiantes chilenos, revela que entre las tres ciencias tradicionales (física, química y biología) la que en promedio despierta menor interés entre los estudiantes es la Física [4].

Desde esta perspectiva resulta evidente que el estudio del aprendizaje de las ciencias en general, y de la física en particular, exige prestar especial atención a las actitudes de los estudiantes, tanto en la enseñanza secundaria como superior. La literatura presenta una gran cantidad de trabajos focalizados en estudiar las actitudes de los estudiantes hacia las ciencias en general [5, 6, 7, 8, 9, 10]. También se han desarrollado diversos cuestionarios para medir las actitudes de los estudiantes hacia las ciencias naturales [11, 12, 13, 14]. Sin embargo, en términos comparativos, el problema de las actitudes de los estudiantes hacia la física ha sido poco explorado, especialmente desde una óptica cuantitativa [15]. Más aun, los estudios orientados a abordar esta temática en la educación superior han sido tan escasos, que un reciente informe elaborado para el National Research Council de los EE.UU. [16] reconoce que la investigación en este campo presenta un importante déficit, y sugiere que los investigadores dediquen mayores esfuerzos a estudiar las actitudes y creencias de los alumnos hacia la Física. Esta sugerencia es respaldada por estudios con estudiantes universitarios, como el efectuado por Coletta y Phillips [17], donde se constata una fuerte correlación estadística entre los resultados de comprensión y de actitud hacia la física.

Con el propósito de mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje de la física, se requiere contar con instrumentos de medición válidos y confiables, que permitan monitorear las actitudes de los estudiantes. Los instrumentos que presenta la literatura sobre actitudes hacia la física son comparativamente escasos, y cada uno de ellos presenta fortalezas y debilidades, dependiendo de los objetivos que se persigan. Algunos de los instrumentos más reconocidos, como el Maryland Physics Expectations [18], el Colorado Learning Attitudes about Science Survey [19], han sido construidos para evaluar actitudes principalmente en la educación superior, y dan importancia a temas como la resolución de problemas o el uso de la matemática en física, lo que desaconseja su aplicación en estudiantes de secundaria o de primeros cursos de física universitaria. Otras escalas otorgan gran importancia a las actitudes hacia el trabajo en laboratorio [20, 21, 22], lo que desaconseja su aplicación con aquellos estudiantes que no han tenido cursos de laboratorio, situación habitual en establecimientos educacionales de secundaria, o en cursos introductorios de física universitaria. También existen algunos instrumentos cuya aplicabilidad es transversal; tal es el caso del Scale of Attitudes Towards Physics, que se focaliza en la medición de actitudes generales hacia la física, sin considerar aspectos específicos cuya medición no siempre resulta pertinente.

El objetivo de este trabajo consiste en poner a disposición de investigadores y docentes latinoamericanos del área de educación en ciencias, un instrumento válido y confiable para medir actitudes hacia la física, que permita estudiar y mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje de esta ciencia en la educación superior. Para alcanzar este objetivo, el artículo comienza introduciendo la metodología del estudio, para después describir las características de la

muestra, los procedimientos de recolección de información, así como los métodos de análisis de datos. Luego se presentan y discuten los resultados empíricos, y finalmente se extraen las conclusiones pertinentes.

II. METODOLOGÍA

A. Participantes

La muestra estuvo conformada por 206 estudiantes, 165 hombres (80%) y 41 mujeres (20%), lo que constituye un tamaño muestral apropiado para la validación de escalas, pues alcanza un valor de 5,15 unidades muestrales por reactivo [23, 24, 25]. Los estudiantes encuestados pertenecían al plan común del primer año de la carrera de ingeniería civil, quienes participaron en un curso introductorio de física impartido el año 2013 por la Universidad Técnica Federico Santa María en la ciudad de Santiago, Chile. La edad promedio de los encuestados fue de 18,44 (DS=0,804). El procedimiento de muestreo fue no probabilístico; específicamente, se utilizó un muestreo por conveniencia [26, 27].

B. Recolección de datos: SAP

El SAP es un cuestionario desarrollado para medir actitudes hacia la física [15], y consta de 40 reactivos en formato Likert de cinco niveles (5=muy de acuerdo; 4=de acuerdo; 3=neutro; 2=en desacuerdo; 1=muy en desacuerdo). La puntuación teórica de SAP fluctúa entre un mínimo de 40 puntos (1 punto promedio) y un máximo de 200 puntos (5 puntos promedio); 23 reactivos tienen direccionalidad positiva, y los 17 restantes tienen direccionalidad negativa, es decir, se codifican en sentido inverso para determinar el puntaje (ver Apéndice B). Los autores de SAP reportan una confiabilidad (alfa de Cronbach) para la escala completa de 0,97. También se reporta un análisis factorial que arrojó dos dimensiones que fueron designadas como «Sentido de Interés» y «Sentido de Atención». La primera dimensión (Sentido de Interés) consta de 25 afirmaciones que describen la percepción emocional de los alumnos hacia la física mediante afirmaciones como: "No estoy interesado en la física excepto cuando estoy en clase", o "Estoy interesado en todo lo relacionado con la física". Respecto de la segunda dimensión (Sentido de Atención), está compuesta por 15 afirmaciones que incluyen declaraciones como: "Creo que la física es importante" y "Creo que es necesario aprender física". Para la primera dimensión se reporta una confiabilidad de 0,96, mientras que la segunda dimensión arrojó un valor de 0,90.

Con el propósito de conservar el sentido original de las afirmaciones de SAP, los ítems fueron traducidos del inglés al español mediante el procedimiento de traducción inversa [28], donde una persona bilingüe especialista en ciencias tradujo al español la versión original en inglés, y luego, en forma independiente, otro especialista en ciencias tradujo al inglés la versión en español, constatando un excelente acuerdo entre el original y la retraducción al inglés.

C. Análisis de datos

Se calcularon los estadísticos descriptivos para la muestra según edad y sexo. Se analizó cada reactivo considerando el índice de Discriminación (correlación ítem total corregida) y el índice de Confiabilidad (coeficiente alfa si se elimina el ítem). La consistencia interna se determinó mediante el coeficiente Alfa de Cronbach. Para estimar posibles diferencias según sexo se utilizó el estadístico t , considerando los resultados de la prueba de Levene. Se efectuó un análisis factorial de componentes principales (AFCP), considerando los requisitos del test de esfericidad de Bartlett y de la prueba de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin. El número de componentes o factores fue establecido mediante la aplicación conjunta de tres criterios de selección: el gráfico de sedimentación (scree test), el criterio de la raíz latente (regla de Guttman-Kaiser), y el criterio del porcentaje de varianza; para el segundo criterio, se incorporaron los autovalores superiores a la unidad, y para el tercero se incluyeron aquellos factores que explicarían al menos un 50% de la varianza de puntajes obtenidos por los sujetos. Para la interpretación de las cargas factoriales, se utilizó el método de rotación VARIMAX. La información fue procesada mediante el paquete estadístico SPSS 17. No se presentaron valores perdidos. Cuando corresponde, en los análisis estadísticos se ha asumido un nivel de confianza de un 95 por 100.

III. RESULTADOS

A. Resultados estadísticos generales

La prueba de bondad de ajuste de Kolmogorov-Smirnov sugiere que la media de resultados obtenidos con SAP provienen de una población distribuida normalmente ($D_{(125)}=0,651$; $p=0,791$, bilateral). La media de puntajes fluctúa entre un mínimo de 2,28 y un máximo de 4,98; la media de la puntuación total fue de 3,45 ($DE=0,508$).

TABLA I. Estadísticos descriptivos para la muestra.

Descriptivo	Sexo		Total
	Hombres	Mujeres	
N	165	41	206
Mínimo	2,28	2,23	2,28
Máximo	4,98	4,48	4,98
Media	3,50	3,26	3,45
DE	0,504	0,48	0,508

Los resultados sugieren que los hombres tienen actitudes más favorables hacia la física que las mujeres. Así, se observan diferencias estadísticamente significativas entre la media del puntaje de las mujeres ($M=3,26$; $DE=0,48$) y el de los hombres ($M=3,50$; $DE=0,504$; $t_{(204)}=2,804$; $p=0,006$, bilateral); la prueba de Levene revela que las varianzas son

Adaptación y validación del Scale of Attitudes Towards Physics (SAP) ... homogéneas ($F_{(1,204)}=0,099$; $p=0,754$). El detalle de los estadísticos descriptivos aparece en la Tabla I.

La Tabla II presenta las frecuencias de respuesta para cada uno de los cinco niveles de la escala Likert, así como los porcentajes correspondientes. Se aprecia que la frecuencia más alta la obtuvo el nivel 4, con un 34,11% de las preferencias, en tanto la frecuencia más baja corresponde al nivel 1, con un 4,94% de las preferencias.

TABLA II. Frecuencias de respuesta para los cinco niveles de la escala likert.

Nivel	Frecuencia	Porcentaje
1 = Muy en desacuerdo	407	4,94
2 = En desacuerdo	1.229	14,92
3 = Neutro	2.308	28,01
4 = De acuerdo	2.811	34,11
5 = Muy de acuerdo	1.485	18,02
Casos perdidos	0	0
Total	8.240	100

B. Análisis de reactivos y estudio de confiabilidad

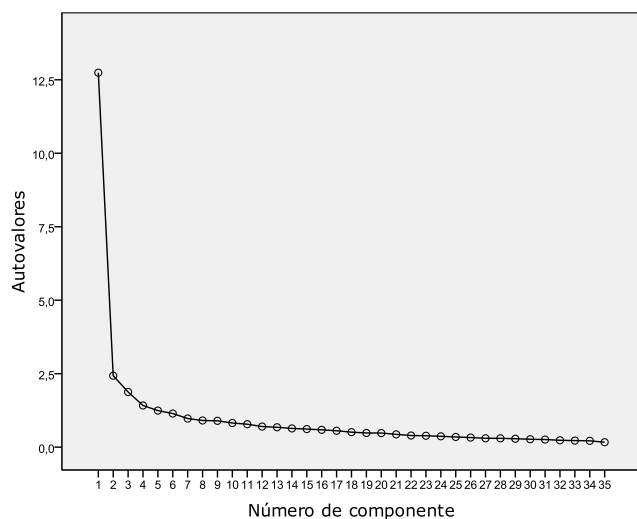
Como se ha mencionado antes, los análisis de reactivos comprenden el índice de confiabilidad y el índice de discriminación. La consistencia interna fue calculada mediante el coeficiente alfa de Cronbach, resultando un valor 0,938 para la escala completa. Al separar los resultados según el sexo de los estudiantes, se obtiene un valor 0,937 para los hombres, y 0,933 para las mujeres.

En el Apéndice A (Tabla V) figuran los resultados del análisis de reactivos para los 40 ítems que conforman el cuestionario. En el extremo derecho de la tabla se ha incorporado una columna que consigna la decisión métrica respecto a la eventual eliminación o mantención de cada reactivo, de acuerdo a los resultados de los análisis. Se observa que, en general, los ítems presentan propiedades psicométricas dentro de rangos adecuados. Efectivamente, 35 reactivos presentan una correlación ítem total corregida cuyo valor es superior a 0,30; no obstante, cinco reactivos presentan correlaciones inferiores a este valor (afirmaciones 13, 20, 24, 34, 36), lo que constituye una cifra baja para considerar que discriminan de forma adecuada. Además, ninguno de estos cinco ítems disminuye la confiabilidad cuando son excluidos, y dos de ellos la aumentan. Estos cinco ítems han sido descartados de los cálculos efectuados en el próximo capítulo, donde se presentan los resultados del análisis factorial. De todas formas, en el Apéndice B aparece el cuestionario completo (los 40 reactivos originales).

Al excluir los ítems 13, 20, 24, 34 y 36, el valor del coeficiente alfa de Cronbach ajustado alcanza el valor 0,944, que es la misma cifra a la que se eleva la consistencia interna para el segmento de los hombres. El valor de alfa para el grupo de mujeres se mantiene en 0,933.

C. Análisis factorial

La prueba de adecuación muestral de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y el test de esfericidad de Bartlett evidencian que la muestra es apropiada para efectuar un AFCP ($KMO=0,928$; $\chi^2_{(595, N=206)}=3719,996$, $p<0,05$). El análisis factorial evidencia una estructura subyacente de mayor complejidad que la reportada en [15]. En efecto, el AFCP sugiere la existencia de cuatro factores o componentes que explican un 52,763% de la varianza total de resultados obtenidos por los sujetos (Tabla IV). Una primera aproximación a esta solución factorial proviene del análisis del gráfico de sedimentación para los resultados obtenidos en SAP, donde se aprecian dos puntos de inflexión con una clara atenuación de la pendiente (Figura 1); el primer punto de inflexión (el más perceptible) se presenta a partir del componente 2, y el segundo punto aparece a partir del componente 4.

**FIGURA 1.** Gráfico de sedimentación.

Al aplicar el criterio de raíz latente al AFCP (seleccionando los autovalores superiores a la unidad), aparecen 6 factores o componentes que explican un 59,587% de la varianza total, tal como se muestra en la Tabla III, donde por simplicidad sólo aparecen los primeros diez factores. Se aprecia que los primeros dos componentes explican solo un 43,349% de la varianza total, de modo que se descarta la solución factorial de dos componentes, sugerida por el gráfico de sedimentación. En lo que respecta a la segunda solución sugerida por dicho gráfico, se aprecia que los primeros cuatro factores explican un 52,763% de la varianza total, superando el 50% impuesto por el criterio del porcentaje de varianza. Por lo tanto, se acepta la solución de cuatro componentes sugerida por el gráfico de sedimentación. La Tabla VI del Apéndice A muestra la matriz de componentes (no rotados), donde se observan las cargas factoriales para los distintos reactivos, en cada uno de los cuatro factores seleccionados.

TABLA III. Varianza Total explicada.

Componente	Autovalores iniciales			Suma de las saturaciones al cuadrado de la extracción		
	Total	% de la varianza	% acumulado	Total	% de la varianza	% acumulado
1	12,741	36,402	36,402	12,741	36,402	36,402
2	2,432	6,947	43,349	2,432	6,947	43,349
3	1,877	5,364	48,713	1,877	5,364	48,713
4	1,418	4,050	52,763	1,418	4,050	52,763
5	1,244	3,555	56,318	1,244	3,555	56,318
6	1,144	3,269	59,587	1,144	3,269	59,587
7	0,974	2,782	62,369	-	-	-
8	0,907	2,592	64,961	-	-	-
9	0,896	2,560	67,521	-	-	-
10	0,822	2,348	69,869	-	-	-

Para la interpretación de los cuatro factores seleccionados, se utilizó el método de rotación VARIMAX. La redistribución de las cargas factoriales luego de la rotación se presenta en la Tabla IV, donde se aprecia que el primer componente explica un 19,095% de la varianza, mientras que el último explica un 7,997% de la varianza total.

Para seleccionar las cargas factoriales que resultan significativas a un nivel de confianza del 95%, se consideró que para un tamaño muestral del orden de 200 sujetos, una carga es significativa cuando alcanza una cifra mayor o igual a 0,40 [29]. En la Tabla VII del Apéndice A aparece la matriz de componentes rotados, donde se observan los pesos sobre cada factor, para cada uno de los reactivos. El reactivo 26 no figura en la tabla debido a que su carga factorial es inferior a 0,40. Se observa que el primer componente agrupa 15 reactivos, el segundo agrupa 9, el tercero agrupa 7, y el cuarto componente agrupa 3 reactivos, de manera que el instrumento definitivo consta de 34 reactivos distribuidos en 4 dimensiones.

TABLA IV. Varianza total explicada luego de la rotación.

Componente	Suma de las saturaciones al cuadrado de la rotación		
	Total	% de la varianza	% acumulado
1	6,683	19,095	19,095
2	4,765	13,614	32,710
3	4,220	12,057	44,766
4	2,799	7,997	52,763

Para atribuir una significación sustantiva al patrón de cargas factoriales, consignado en la Tabla VII (Apéndice A), se observa, en primer lugar, que el factor 1 está asociado únicamente a afirmaciones que aluden a actitudes personales positivas hacia el estudio de la física, tales como «La física es uno de mis cursos favoritos». El factor 2, en cambio, se compone exclusivamente de reactivos que describen actitudes personales negativas tales como «Temo a los cursos de física». Por tanto, se sugiere la etiqueta

«Actitudes personales positivas» para el factor 1, y «Actitudes personales negativas» para el factor 2; la expresión «personales» busca enfatizar el carácter individual y particular de las actitudes aludidas, es decir, se trata de actitudes que no son generalizables a otros estudiantes. Por el contrario, al observar los 3 reactivos asociados al factor 4, se aprecia que aluden a actitudes generales hacia el estudio de la física, como por ejemplo «Creo que la física es importante». En otras palabras, los reactivos asociados a este factor, se refieren a actitudes que pueden resultar válidas no solo para el alumno que responde la encuesta, sino para cualquier estudiante que curse asignaturas relacionadas con la física. Por consiguiente, se sugiere la etiqueta «Actitudes generales» para designar a este factor. Finalmente, se constata que el factor 3 reúne ítems que aluden a la gestión y el uso del tiempo dedicado al estudio de la física, mediante afirmaciones como «Creo que el tiempo destinado al curso de física es insuficiente». Por lo tanto, se sugiere la etiqueta «Gestión del tiempo» para designar al factor 3.

Finalmente, la consistencia interna para los cuatro factores seleccionados fue de 0,923 para el primero, 0,861 para el segundo, 0,787 para el tercero, y 0,734 para el cuarto factor. El valor del coeficiente alfa de Cronbach para la escala completa fue 0,942.

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La medición de actitudes es un tema que suscita discusión y polémica, con independencia de la naturaleza del constructo medido. Por lo general, las discusiones se centran en la aplicabilidad de procedimientos estadísticos como los que se han utilizado aquí, en variables cuyo nivel de medición es ordinal, que es la situación típica con métodos de escalamiento tipo Likert. Sin embargo, como han señalado diversos especialistas, no existe ninguna relación entre el nivel de medición de las variables y los procedimientos estadísticos utilizados [30, 31]. Aunque los niveles de medición contribuyan a la interpretación psicológica de los resultados experimentales, este aspecto resulta irrelevante para los planteamientos estadísticos [32]. Por tanto, los procedimientos utilizados en este trabajo, así como los resultados empíricos obtenidos, son enteramente válidos, y sugieren que SAP satisface los estándares psicométricos.

En relación al procedimiento de muestreo, es evidente que un diseño no probabilístico debilita la fuerza de los resultados obtenidos, pues cuestiona la representatividad del grupo normativo. Sin embargo, la universidad donde se efectuó la encuesta recibe alumnos cuyos puntajes de ingreso se encuentran cerca de la media de las universidades tradicionales de Chile. Por consiguiente, asumiendo los sesgos derivados de un muestreo no probabilístico, las características de los encuestados sugieren que los resultados obtenidos no se apartan significativamente del que hubiese resultado a partir de un muestreo probabilístico.

Respecto del análisis de reactivos y del estudio de confiabilidad, las cifras obtenidas son satisfactorias, pues

Adaptación y validación del Scale of Attitudes Towards Physics (SAP) ... superan los estándares psicométricos aceptados convencionalmente. No obstante, fue necesario eliminar seis reactivos que en la versión original de SAP exhibieron propiedades métricas adecuadas; esta discrepancia es esperable, considerando que tanto la confiabilidad como otros índices psicométricos, no son atributos intrínsecos del instrumento de medición, sino de la interacción entre éste y la muestra, al menos en el marco de la teoría clásica de medición.

En relación a los resultados del AFCP, es importante enfatizar que la solución encontrada está abierta a discusión, pues una de las características de este procedimiento es, precisamente, el margen de maniobrabilidad que introduce al momento de interpretar los datos, en especial, cuando se busca atribuir una significación sustantiva a los patrones de las cargas factoriales. Por lo tanto, el lector puede encontrar etiquetas distintas de las que se han sugerido para dar cuenta de la significación sustantiva de cada factor. Por otra parte, si bien el presente estudio evidencia que SAP responde en forma adecuada a los estándares psicométricos, es recomendable ahondar en la investigación, efectuando un análisis factorial confirmatorio.

Finalmente, dada la transversalidad de SAP, cabe sugerir su uso tanto con fines de investigación como de evaluación en estudiantes de educación secundaria, pues las deficiencias de algunos establecimientos educacionales de nivel escolar, desaconsejan el uso de instrumentos que evalúen actitudes muy específicas hacia la física en particular y hacia las ciencias naturales en general. Desde luego, ello requiere métodos de validación en base a muestras representativas. Sin embargo, dado que SAP fue validado con una muestra de alumnos recién ingresados al sistema universitario, es esperable que las propiedades psicométricas estimadas a partir de esta muestra, no difieran significativamente de aquellas que se obtendrían al aplicarlo en alumnos de secundaria, especialmente en aquellos que se encuentran cursando su último año de estudios.

En suma, se concluye que SAP satisface los estándares psicométricos de un instrumento de calidad para medir actitudes hacia la física, de modo que puede ser utilizado por docentes e investigadores para estudiar y mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje de la física en la educación superior, y específicamente en estudiantes de primeros cursos universitarios.

AGRADECIMIENTOS

De manera especial se agradece a Daniela Balieiro por sus valiosos aportes y sugerencias durante la elaboración de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] Vázquez-Alonso, A. y Manassero-Mas, M. A., *El descenso de las actitudes hacia la ciencia de chicos y* <http://www.lajpe.org>

chicas en la educación obligatoria, *Ciência & Educação* **17**, 249-268 (2011).

[2] Osborne, J., Simon, S. y Collins, S., *Attitudes towards science: a review of the literature and its implications*, *International Journal of Science Education* **25**, 1049-1079 (2003).

[3] Fensham, P. J., *Beyond Knowledge: Other Scientific Qualities as Outcomes for School Science Education*. En R. M. Janiuk y E. Samonek-Miciuk (Eds.), *Science and Technology Education for a Diverse World - dilemmas, needs and partnerships*. International Organization for Science and Technology Education (IOSTE) XIth Symposium Proceedings (pp. 23-25). (Maria Curie-Skłodowska University Press, Lublin 2004).

[4] OCDE. *Informe PISA 2006: Competencias científicas para el mundo del mañana*. (Santillana, Madrid, 2008).

[5] Ebenezer, J. V. y Zoller, U., *Grade 10 students' perceptions of and attitudes toward science teaching and school science*, *Journal of Research in Science Teaching* **30**, 175-186 (1993).

[6] Gardner, P. L., *Measuring attitudes to science*, *Research in Science Education* **25**, 283-289 (1995).

[7] Jones, G., Howe, A. y Rua, M., *Gender differences in students' experiences, interests, and attitudes towards science and scientists*, *Science Education* **84**, 180-192 (2000).

[8] Marbà-Tallada, A. y Márquez Bargalló, C., *¿Qué opinan los estudiantes de las clases de ciencias? Un estudio transversal de sexto de primaria a cuarto de eso?*, *Enseñanza de las Ciencias* **28**, 19-30 (2010).

[9] Navarro, M. y Förster, C., *Nivel de alfabetización científica y actitudes hacia la ciencia en estudiantes de secundaria: comparaciones por sexo y nivel socioeconómico*, *Pensamiento Educativo* **49**, 1-17 (2012).

[10] Vázquez-Alonso, A. y Manassero-Mas, M. A., *La relevancia de la educación científica: actitudes y valores de los estudiantes relacionados con la ciencia y la tecnología*, *Enseñanza de las Ciencias* **27**, 33-48 (2009).

[11] Kind, P., James, K. y Barmby, P., *Developing attitudes towards science measures*, *International Journal of Science Education* **29**, 871-893 (2007).

[12] Moore, R. W. y Sutman, F. X., *The development, field test and validation of an inventory of scientific attitudes*. *Journal of Research in Science Teaching* **7**, 85-94 (1970).

[13] Schreiner, C. y Sjøberg, S., *Sowing the seeds of ROSE: background, rationale, questionnaire development and datacollection for ROSE (the relevance of science education): a comparative study of students' views of science and science education*, *Acta Didactica* **4**, 1-120 (2004).

[14] Simpson, R. D. y Troost, K. M., *Influences of commitment to and learning of science among adolescent students*, *Science Education* **69**, 19-24 (1982).

[15] Selçuk, G.S.; Sahin, M. y Ün Açıkgoz, K., *The Effects of Learning Strategy Instruction on Achievement, Attitude,*

and Achievement Motivation in a Physics Course, *Research in Science Education* **41**, 39-62 (2011).

[16] Docktor, J. L. y Mestre, J. P., http://www7.nationalacademies.org/bose/DBER_Docktor_October_Paper.pdf. Consultado el 15 de Septiembre de 2011.

[17] Coletta, V., y Phillips, J., <http://myweb.lmu.edu/jphillips/PER/AAPT-summer05.pdf>. Consultado el 15 de septiembre 2011.

[18] Redish, E. F. Saul, J. M. y Steinberg, R. N., *Student expectations in introductory physics*, *American Journal of Physics* **66**, 212-224 (1998).

[19] Adams, W. K., Perkins, K. K., Podolefsky, N. S., Dubson, M., Finkelstein, N. D. y Wieman, C. E., *New instrument for measuring student beliefs about physics and learning physics: The Colorado Learning Attitudes about Science Survey*, *Physical Review* **2**, 1-14 (2006).

[20] Barmby, P. M., Jones, K. y Bush, N., *Evaluation of Lab in a Lorry: Final Report*, (Durham University, CEM Centre of School and Education, UK, 2005).

[21] Boixaderas, N., De la Vila, J. y Sanmartí, N., *Test de actitudes relacionadas con la asignatura de Física y Química*, (Departamento de Didáctica de las Matemáticas y las Ciencias Experimentales, Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, 1990).

[22] Nuhoğlu, H. y Yalçın, N., *The development of attitude scale for physics laboratory and the assessment of preserves teachers' attitudes towards physics laboratory*, *Gazi University Journal of Kırşehir Education Faculty* **5**, 317-327 (2004).

[22] Kline, P., *An Easy Guide to Factor Analysis*, (Sage, Newbury Park, 1994).

[24] Morales, P., Urosa, B. y Blanco, A., *Construcción de Escalas de Actitud Tipo Likert*, (La Muralla, Madrid, 2003).

[25] Nunnally, J. C., *Psychometric Theory*, (McGraw-Hill, New York, 1978).

[26] Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, P., *Metodología de la Investigación*, (5 ed. McGraw-Hill, México, D. F., 2010).

[27] Salkind, N. J., *Métodos de Investigación*, (Prentice Hall, México, D. F., 1998).

[28] Brislin, R. W., *The wording and translation of research instruments*. In W. Lonner & J. Berry (Eds.), *Field methods in cross-cultural research*, (Sage, Beverly Hills, CA, 1986).

[29] Hair, J., Anderson, R., Tatham, R. y Black, W., *Análisis Multivariante*, (5 ed. Pearson, Madrid, 2007).

[30] Gaito, J., *Measurement scales and statistics: Resurgence of an old misconception*, *Psychological Bulletin* **87**, 564-567 (1980).

[31] Lord, F. M., *On the statistical treatment of the football numbers*, *American Psychologist* **8**, 750-751, (1953).

[32] Burke, D. J., *Additive scales and statistics*, *Psychological Review* **60**, 73-75 (1953).

APÉNDICE A

La Tabla V contiene los resultados del análisis de reactivos, donde también se ha incorporado una columna que consigna la decisión métrica sugerida por los análisis. Las tablas VI y VII que aparecen en las siguientes páginas, muestran las matrices de componentes no rotados y rotados, respectivamente. Es importante enfatizar que en las tablas VI y VII no aparecen los reactivos 13, 20, 24, 34 y 36, ya que fueron excluidos del análisis factorial por presentar propiedades métricas deficientes.

TABLA V. Resultados del análisis de reactivos.

Número del ítem en SAP	Discriminación	Alfa si se elimina el ítem	Decisión métrica
1	0,381	0,938	Aceptar
2	0,684	0,935	Aceptar
3	0,743	0,935	Aceptar
4	0,631	0,935	Aceptar
5	0,502	0,936	Aceptar
6	0,656	0,935	Aceptar
7	0,665	0,935	Aceptar
8	0,638	0,935	Aceptar
9	0,439	0,937	Aceptar
10	0,682	0,935	Aceptar
11	0,610	0,935	Aceptar
12	0,505	0,936	Aceptar
13	0,211	0,939	Eliminar
14	0,521	0,936	Aceptar
15	0,635	0,935	Aceptar
16	0,566	0,936	Aceptar
17	0,695	0,935	Aceptar
18	0,307	0,938	Aceptar
19	0,628	0,936	Aceptar
20	0,242	0,938	Eliminar
21	0,473	0,937	Aceptar
22	0,484	0,937	Aceptar
23	0,435	0,937	Aceptar
24	0,291	0,938	Eliminar
25	0,613	0,936	Aceptar
26	0,615	0,935	Aceptar
27	0,590	0,936	Aceptar
28	0,347	0,938	Aceptar
29	0,566	0,936	Aceptar
30	0,424	0,937	Aceptar
31	0,680	0,935	Aceptar
32	0,540	0,936	Aceptar
33	0,349	0,938	Aceptar
34	0,057	0,940	Eliminar
35	0,311	0,938	Aceptar
36	0,270	0,938	Eliminar
37	0,344	0,938	Aceptar
38	0,688	0,935	Aceptar
39	0,768	0,934	Aceptar
40	0,708	0,935	Aceptar

TABLA VI. Matriz de componentes.

Nº del ítem en SAP	Factor			
	1	2	3	4
1	0,405	0,613	-0,233	0,098
2	0,726	-0,035	0,027	0,004
3	0,781	-0,011	-0,012	-0,059
4	0,668	0,227	0,030	0,123
5	0,542	-0,158	-0,084	0,408
6	0,685	-0,006	-0,099	0,032
7	0,708	0,354	-0,118	0,083
8	0,674	-0,117	-0,216	-0,203
9	0,472	-0,219	-0,309	0,212
10	0,722	-0,224	-0,140	0,109
11	0,652	-0,230	-0,149	-0,282
12	0,535	-0,256	0,054	0,285
14	0,548	-0,288	-0,169	-0,121
15	0,678	-0,243	-0,004	-0,014
16	0,606	0,008	-0,079	-0,314
17	0,716	0,074	0,078	-0,034
18	0,327	-0,019	0,712	-0,151
19	0,662	0,178	0,157	0,131
21	0,511	-0,201	0,106	-0,127
22	0,514	0,382	0,350	-0,130
23	0,447	-0,026	0,686	0,057
25	0,654	-0,118	-0,050	-0,354
26	0,663	0,049	-0,074	0,102
27	0,633	-0,215	-0,098	-0,421
28	0,364	0,683	-0,036	-0,087
29	0,615	-0,066	0,117	-0,041
30	0,441	0,603	-0,123	0,000
31	0,707	-0,066	-0,025	0,120
32	0,576	0,194	-0,125	0,365
33	0,376	-0,348	-0,082	0,155
35	0,336	-0,381	0,011	0,368
37	0,350	-0,103	0,597	0,183
38	0,719	0,190	0,001	0,207
39	0,803	0,016	-0,031	-0,236
40	0,752	-0,050	0,002	-0,060

TABLA VII. Matriz de componentes rotados.

Nº del ítem en SAP	Factor			
	1. Actitudes personales positivas	2. Actitudes personales negativas	3. Actitudes generales	4. Gestión del tiempo
27	0,782			
11	0,720			
25	0,715			
39	0,695			
8	0,663			
16	0,625			
3	0,571			
14	0,567			
40	0,561			
15	0,541		0,419	
2	0,493			
17	0,468			
21	0,467			
6	0,463			
29	0,439			
1		0,765		
28		0,750		
30		0,744		
7		0,670		
38		0,536	0,419	
4		0,527		
32		0,513	0,488	
22		0,504		0,479
19		0,465		
5			0,647	
35			0,598	
12			0,570	
10	0,511		0,546	
9			0,530	
31	0,424		0,461	
33			0,458	
26	-	-	-	-
23				0,788
18				0,773
37				0,677
% varianza	19,095	13,614	12,057	7,997
Alfa de Cronbach	0,923	0,861	0,787	0,734

APÉNDICE B. Versión traducida de SAP

A continuación aparecen las 40 afirmaciones que conforman la versión original de SAP. Las afirmaciones en cursiva tienen direccionalidad positiva (5=muy de acuerdo; 4=de acuerdo; 3=neutro; 2=en desacuerdo; 1=muy en desacuerdo), y las demás tienen direccionalidad negativa (se codifican en sentido inverso para calcular los puntajes).

1. Temo a los cursos de física.
2. *Estoy interesado en todo lo relacionado a la física.*
3. *Disfruto de los cursos de física.*
4. No me gustan los cursos de física.
5. *Estudio física voluntariamente.*
6. Los cursos de física me aburren.
7. Tiendo a evitar la física.
8. *Estudiar física me relaja.*
9. *Paso mi tiempo libre realizando actividades relacionadas con la física.*
10. *Si tuviera la oportunidad, tomaría un curso de física extracurricular.*
11. *El más interesante de los cursos es el de física.*
12. Estaría feliz si las horas de clases de física se redujeran.
13. El curso de física es un estudio obligatorio para mí.
14. *Usualmente el tiempo se me pasa volando en clase de física.*
15. *Me interesan los libros relacionados con la física.*
16. *Me agrada responder preguntas o resolver problemas relacionados con la física.*
17. Si yo pudiera decidir, escogería otro curso en lugar de física.
18. *Creo que la física es importante.*
19. Aprender cosas relacionadas con la física es aburrido.
20. Usualmente estoy ocupado con otra cosa en la clase de física.
21. *Estoy pendiente de los nuevos descubrimientos en física.*
22. Tan solo escuchar el término “física” me molesta.
23. *Creo que el curso de física es necesario.*
24. *No me preocupa gastar dinero en libros de física.*
25. *Me siento más feliz en las clases de física que en las otras clases.*
26. No siento ningún entusiasmo por la clase de física.
27. *Entre todos los cursos, el de física es el que me gusta más.*
28. La física me asusta.
29. *Me gusta escuchar conversaciones relacionadas con la física.*
30. Pierdo mi confianza en las clases de física.
31. Asisto a las clases de física sin ganas.
32. No estoy interesado en la física excepto cuando estoy en clase.
33. *Las cosas que aprendo en el curso de física me hacen la vida diaria más fácil.*
34. No presto atención durante el tiempo que paso en las clases de física.
35. *Creo que el tiempo destinado al curso de física es insuficiente.*
36. Creo que física no debería ser un curso obligatorio.
37. *Creo que es necesario aprender física.*
38. Nunca he deseado estudiar física.
39. *Física es uno de mis cursos favoritos.*
40. *Cuanto más aprendo física, más aumenta mi deseo de aprender física.*

Physics courses for non-physicists; what should (and should not) be done



F. A. Horta Rangel¹, T. González Cruz¹ and A. González Arias²

¹Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México.

²Universidad de La Habana, Cuba.

E-mail: anthort@hotmail.com

(Received 27 October 2013, accepted 11 February 2014)

Abstract

Very often, physics becomes an insuperable obstacle to many students attending other sciences or engineering, who perceive physics more than as a nuisance than as a necessity. Sometimes these previously formed negative criteria are encouraged by contents with noticeably omissions and inadequate or inefficient approaches to the subject. Here we discuss some matters considered essential for the normal development of any basic course for non-physicists at university level, with the aim of contribute to a better acceptance and understanding of the subject. They have been extracted from the authors' experiences when teaching physics at university level for years in different countries and faculties such as engineering, biochemistry, pharmacology, foods, chemistry, agronomy and geography. In a condensed form, the mentioned topics are: a) it is important explain to the students the contents of the academic course, and why they must study those topics as a necessity of their specialty; b) the laws of physics work in both ways; c) physics is factual subject, and must be taught as such; d) do not forget the information about the role of models in physics and their reliability range as a limited image of real world; e) optimize the laboratory work (real, not virtual) and f) when explaining microscopic or very complex topics, make use of films or animations to help the student to form a satisfactory mental picture of the studied event, as a previous step to the analytic description.

Keywords: Physics, teaching, time efficiency, teaching aids, content of courses.

Resumen

Muy a menudo la física representa un escollo insuperable para muchos estudiantes de otras ciencias o ingenierías, que perciben la física más como una molestia que como una necesidad. Algunas veces esos criterios negativos, formados con anterioridad, se ven estimulados por contenidos con omisiones notables o un acercamiento a la asignatura inadecuado o ineficiente. Aquí se comentan algunos aspectos considerados esenciales para el desarrollo normal de cualquier curso básico para no físicos de nivel universitario, con el fin de favorecer una mejor aceptación y comprensión de la asignatura. Han sido extraídos de la experiencia de los autores al impartir física de nivel universitario durante años en diferentes países y facultades tales como ingeniería, bioquímica, farmacia, alimentos, química, agronomía y geografía. De forma condensada, los aspectos mencionados son: a) es importante explicar al estudiante el contenido del curso académico y el porqué se deben estudiar esos tópicos como una necesidad su especialidad; b) las leyes de la física funcionan en ambos sentidos; c) la física es una disciplina factual, y debe ser impartida como tal; d) no se debe olvidar la información sobre el papel de los modelos en la física y su rango de validez como representación parcial del mundo real; e) optimizar el trabajo de laboratorio (real, no virtual) y f) al explicar temas microscópicos o complejos, emplear films o animaciones para ayudar al estudiante a formar una imagen mental adecuada del evento estudiado como paso previo a la descripción analítica.

Palabras clave: Enseñanza de la física, eficiencia temporal, medios auxiliares, contenido de los cursos.

PACS: 01.40.gb, 01.40.-d, 01.50.-i, 01.40.G-

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCTION

In meetings and congress about physics teaching is very common to find theoretical schemes about how to teach physics; however, is far less common to find solid arguments explaining why the given proposal is believed to be better than others [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]. Another distinctive feature of those schemes is that the time-efficiency problem is seldom mentioned. Assuming that the number of hours assigned to the course will not change, never becomes clear how the promoters would know if the students will learn more and better using the proposed

scheme instead of another one. As a rule, reports comparing the results obtained in the particular group of students with others that follow different schemes are also missing, as well as the figures evaluating proficiency in tests, or the number of students successfully passing the course.

Quite less common is to find reports discussing what to teach instead of how to do it, which is a clear symptom that no much time is devoted to think about this particular problem; i.e., which are the essential features that must be taught, and their connection with the specific matters the students will have to learn later on [10].

Another unreasonable thing you may find in connection

with physics teaching, and not only in meetings and congress, but also in the planning of education policies, is that some people put all the stress on the pedagogic aspect of the problem, paying little attention to physics. It is very hard to accept that someone, without mastering the complexity of physics, could consider himself competent to state rules about how physics must be taught. The necessity to master basic physics for teach or devise policies on the subject is obvious to physicists, but do not seem to be for people trained in social sciences without physics studies at university level.

Without further mentioning the time-efficiency problem, which extends beyond the scope of this paper, yet with the aim of making the most of the available time, it seems appropriate to comment some experiences related to *what* to teach instead of *how* to do it. These comments are based on experiences collected in a long lapse of time, while teaching physics at university level in different countries and faculties in fields like engineering, biochemistry, biology, pharmacia, foods, chemistry, agronomy and geography.

Many students perceive physics as a nuisance instead of a necessity, and sometimes their previously formed negative criteria are encouraged by contents with noticeably omissions and inadequate or inefficient approaches to the subject. We feel that a good deal of these drawbacks could be overcome with little effort. To our minds, the following remarks could be helpful for easing the acceptance and understanding of physics when the main interest of the students is not focused on it. We hope these comments could have some positive impact in decreasing the academic failure in courses for non-physicists, where physics becomes too often an insuperable obstacle for many students.

II. ESSENTIAL FEATURES TO TAKE INTO ACCOUNT IN UNIVERSITY COURSES

Some features we have considered essential to improve the teacher's performance in any course of basic physics are the following.

1. The students should have information about what is expected from them at the end of the course and in any test (and the teacher what must expect from the students beforehand).
2. Physics laws works in both senses
3. Math and Physics are different kind of sciences. Math is formal; Physics is factual, and must be taught as such.
4. Reality is more complex than any model.
5. Use laboratory works and demonstrations in an adequate form, avoiding defect or excess, beginning with the simpler ones.
6. Include films or moving pictures to assist the visualization of phenomena not accessible to direct observation.

1. The students should have information about what is expected from them at the end of the course and in any test (and the teacher what must expect from the students

beforehand)

a) In the course

In many places is tradition to hand the students the content of the course at the beginning. In others, some explanation is given in class about the necessity of studying each particular topic, mentioning why these topics will be useful to them in the future. However, sometimes physics courses are not presented in a proper way for a number of reasons. The consequence is that the more concerned students repeatedly ask themselves, or to the teacher, why some particular topic must be studied and learned, because in their minds that topic have nothing to do with their specialty.

It seems important to avoid teaching a subject without the students having the least idea why the necessity of do it, and when and how will be useful in the future. That demands from the teacher a minimum knowledge about the students' specialty, which unfortunately sometimes is beyond the teacher's aim. The lack of information may become an important factor for holding back the student motivation for physics at a whole. This fact could also become one of the main factors differentiating 'good teachers' from 'bad teachers' from the students' point of view.

b) In the tests

At the end of each theme or logic unit, it is important for the students to have a clear idea what abilities are they supposed to show. That includes:

- Which analytic expressions the students should memorize, and which not.

There is some tendency in students, and in certain teachers, to give the same value to a fundamental law of physics and to a very particular analytic expression. Therefore, many students get lost at a sea of mathematical formulas, becoming very difficult for them to separate the main equations from the secondary ones. Also happens that there are teachers that prefer to test the secondary, asking for very particular details, under the assumptions that the students must know the important things -never emphasized in class-. This situation is somewhat connected to 'detail' or 'intelligence' questions, where the student must be able to introduce some additional data not directly related to physics. For instance, some geometric or trigonometric formula assumed to be known, without being previously mentioned or warned about in the course.

- Advise the students about expecting theoretical questions in the tests.

What do we consider a theoretical question? These are some examples.

a) Which are the validity limits of Newton's laws? Or of Hooke's law? (Or of any other law).

b) How you could change the kinetic energy of a moving charged particle by means of a static magnetic field? Give a brief explanation of your reasoning.

Nowadays there is a right tendency to add more theoretical or reasoning questions to tests -up to 50%-, and it becomes obvious that the student also needs some training for answering rightly this kind of questions. An example

appears in figure 1, based on a free software that allow preparing groups of questions and other aids in an easy way (<http://hotpot.uvic.ca/>).

- In class, incorporate notions about the complexity of the problems to be solved in tests.

It is always possible to make some type of classification of the complexity of the typical problems showing up in physics courses. For instance:

1. Problems solved by simple substitution in a formula, finding the value of the unknown factor.
2. Those that need the use of two formulas.
 - a. Belonging to the same topic.

Physics courses for non-physicists. What should (and should not) be done

- b. From different topics.

3. Those where three or more formulas are involved from the same or different topics.

4. Problems with the solution involving a simple differential equation, etc.

The students must always be aware of the mathematical features they must dominate: for instance, working with formulas, linear systems of equations, 2nd degree equation, analytic geometry, vector algebra and so on. The teacher must never wait for the test or examination to check if the students know some mathematical aspect not previously recalled in class, since it will lead to unnecessary fails.

ÓPTICA ONDULATORIA. Autoevaluación

Elija una de las opciones haciendo "click" sobre A,B,C, D ó E. Oprima la tecla | => | para continuar. La evaluación aparecerá en la parte superior (10 preguntas total).

<= 1/10 ==>

1 La radiación láser difiere esencialmente de la radiación originada por una fuente monocromática ordinaria en que:

☐	A	Siempre es mucho más intensa
☐	B	Es polarizada y la de la fuente ordinaria no
☐	C	Todos los puntos de la fuente láser son coherentes mientras que los de la fuente ordinaria no
☐	D	No es capaz de formar patrones de interferencia
☐	E	Ninguna respuesta anterior es correcta

FIGURE 1. One page of a self-evaluation theoretical test including 90 similar pages, prepared using the free access software 'hotpot' (<http://hotpot.uvic.ca/>). This particular test is accessible in http://www.fisica.uh.cu/bibvirtual/fisica_aplicada/fisica1y2/index.html.

An important number of academic failures happen because the students do not have the necessary training to solve the mathematical part of the problems. Often they know the physics and are able to recognize, set and connect in the laws and equations involved, but no more. It is impossible for them to use the necessary mathematics for arrive at the solution. An additional problem comes from the fact that, as basic physics is usually taught in the first year of the specialty; the teacher has to confront the differences in the previous knowledge of the students arriving from different sites, both in physics and mathematics. This is clearly beyond the teacher's possibilities, since the learning process depends strongly on the previous history of the student. However, it will do no harms spending a little time reminding matters which are supposed to be known (but which very often are not).

2. Physics laws works in both senses

Students must be aware that physics laws work in both senses. There are teachers that analyze the laws only in the direct way, without ever mentioning inverse examples. However, later on in tests, introduce questions that must be

answered reading the laws in the inverse way, contrary to the usual order of reasoning that the student is used to. In some way, they are also a type of a 'questions of intelligence'. Students must be also trained in these types of questions before arriving at the test, which should depend on knowledge, not on intelligence.

Example 1. The formula $W_R = \Delta E_c$ reads, from left to right, that a resultant or net force working on a particle must always cause a change in its kinetic energy. However, the inverse reasoning is seldom stressed: when the kinetic energy of a particle changes, it is *necessary* the existence of an acting force on it (and not any force, but a net one).

Example 2. In many cases where the time allowed for the course is very limited (very common in basic physics courses) the second Newton's law is presented without emphasize previously the meaning of each parameter; i.e., the concept of mass and its measurement, or the force concept, dynamometers, etc. It is not mentioned that is only valid in inertial reference frames, that must be applied exclusively to particles (or material points), and so on. To make the second law perceptive to the student, the questions in figure 2 should be always explained before presenting the law. Being Newton's laws the foundation of any subsequent

topic of mechanic, a poor knowledge about these laws will be undoubtedly a huge drawback for any common student.

Sometimes it is also omitted the explanation that the vector character of forces do not come from mathematical deductions, but from their physical properties, with an empiric nature. It is common to find much confusion about this topic, because the students take first the mathematical information, and nobody tells them that this kind of mathematics came after the study of the physical properties of forces.

3. Math and Physics are different kind of sciences. Math is formal; Physics is factual, and must be taught as such

In the drawing of figure 3, we show some areas of the human knowledge belonging to the *fields of investigation*, following the classification of Mario Bunge[‡] [11]. Other areas of knowledge belong to the *fields of beliefs* (i.e., theology, politic ideologies). The formal-logic approach of Mathematics must not be confused with the factual-empiric of Physics. Math are deductive, and do not need the experiment nor the interaction with reality, while factual sciences describe the laws governing different real events or processes; they are empiric sciences and need the continuous interaction with the external world (see ref [3]).

However sometimes when teaching physics, the emphasis is directed towards the formal deductions and mathematical training, given very little weight, or none at all, to the factual aspects. Physics has to do with the reasoning to understand and explain the laws ruling the real world. It has to do with how to find and describe the cause-effect connections between different phenomena by means of exact -or near so- analytic expression, both in quality and quantity. It has nothing to do with stating formulas without knowing where they came from, and solving them as some any other pure mathematical problem. That is not physics, at least not of university level.

Another ill conception about the teaching problem in physics is, to our mind, to postulate the theory for later enlighten it with the description of some experiment. This order of things do not show the way science really works, because the reasoning is reversed. Laws come from a long induction process, involving hundreds or thousands experiments carried out from many people; they are not deduced, but induced. To state the laws of physics as a postulate, with the aim of justify them later with some experiment, is contrary to the way that the laws in any science are revealed by means of the scientific method.

Observation and experiment come before than theory. That is the reason why we think that the correct order for presenting any topic in physics should be as follows:

a) Description of the event or outcome and/or experiments on the matter.

[‡] Argentinian-canadian physicist and philosopher. Prince of Asturias prize in 1982 and 16 doctor honoris cause degrees. http://es.wikipedia.org/wiki/Mario_Bunge#Libros_de_Mario_Bunge_en_espa.C3.B1ol

b) Scientific explanation (theory, laws)

c) Confirmation of the theory.

A typical example, suitably presented in most textbooks, is the photoelectric effect. In this order usually appear:

- A description of the effect and the experiments with the photoelectric cell, showing the contradictions with the previously known wave model.
- The photon as a postulate and the corresponding Einstein equation.
- Verification that these equations adjust to the experimental data in quality and quantity.

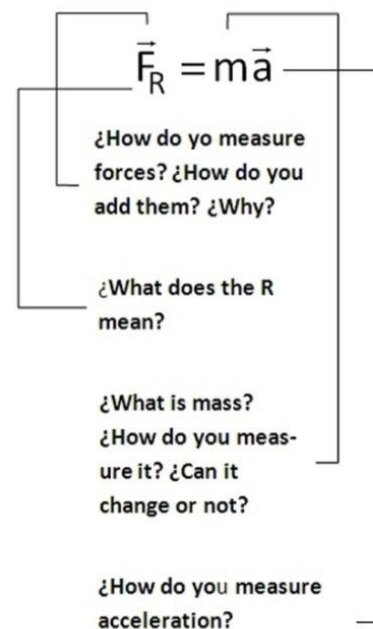


FIGURE 2. Additional matters to discuss about the second law are that the dimensions of the body cannot be taken into account (concept of particle) and that is only valid in an inertial frame of reference.

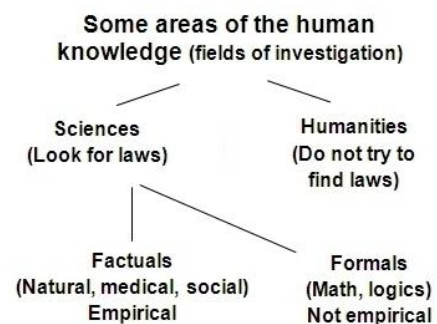


FIGURE 3. Some areas of the human knowledge; other areas belong to the *fields of beliefs*.

4. Reality is more complex than any model

It is important to tell the student that Physics refers to approximations of reality (models). The range of validity of

the model should be stressed to avoid wrong results when trying to apply the model in cases where cannot be valid.

Example. In many basic courses, due to the time factor, the topic ‘System of Particles’ is poorly considered or not considered at all. The proof that, concerning translation, the center of mass behaves as if all mass were concentrated in it, is absent.

When considering the center of mass (without mass changes) the second law keeps his form, but changes its meaning.

$$\mathbf{F}_{\text{Rext}} = M\mathbf{a}_{\text{CM}},$$

M is now the mass of the whole system, and F refers only to forces external to the system, since the sum of all internal forces becomes null due to the third Newton’s law. The particles of the considered system may be united, as in a rigid body, or disperse as in a gas. The existence of the center of mass in the strict justification for the model of particle introduced at the beginning of physic courses (figure 4).

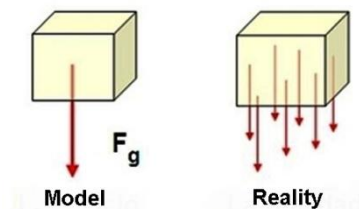


FIGURE 4. A very common and simple model. The mass is assumed condensed at the center of the body. It only can be done in situations where the size of the body, its rotation state or vibrations does not affect the results of the analysis.

5. Use laboratory works and demonstrations in an adequate form (avoiding defect or excess, beginning with the simpler ones)

Advances in informatics have led some people to think the possibility of substitute experiments and measurements with a computer and software representing them. The handling, regulation and adjustment of any instrument in the lab, even the very simple ones, has nothing to do with pressing keys on a keyboard. The use of hands, the interaction of muscles and the sense of touch, smell, hearing, the tridimensional vision of the object and the instruments, all together, provides a way of learning very different to that of watching a screen. The message arrives to the brain in a very different way, and the collected experiences are others; it is not necessary to be a psychologist to reach this conclusion. That are the reasons why, beginning at the first grades, laboratory work is essential, not only in physics, but in any factual science.

Without rejecting informatics as an additional tool for teaching, it is clear enough that pressing keys or watching movies has nothing to do with the experiences gained when handling real objects. There is no difference between leave

Physics courses for non-physicists. What should (and should not) be done out experimental works than in totally substitute them with virtual resources.

In laboratory work, or maybe in class, the operational criteria for the definitions of the fundamental magnitudes should at least be mentioned. Very often this topic is avoided, and the student remains in the dark about how the fundamental magnitudes are defined (time, length, temperature, and so on). Sometimes this leads to students (and sometimes to teachers) to a mental closed loop, trying to define them from other equations, as if magnitudes were words in a dictionary, which are clearly not.

As an additional suggestion, in basic courses it seems essential to make emphasis in direct measurements before than in indirect ones. The first are those which depend on some instrument to get the value of the measured magnitude in a single step (mass, force, time, length). An indirect measurement is that acquired with the help of some analytic expression (energy, moment of inertia, angular moment).

6. Include films or moving pictures to assist the visualization of phenomena not accessible to direct observation

There are many microscopic phenomena where is not possible (or quite difficult) to show a direct observation of the studied event. Examples are a longitudinal wave, the molecular movement in a gas or the electromagnetic wave. Here it becomes important to show the student some image to facilitate the mental picture of the phenomenon talked about.



FIGURE 5. Snapshot from a moving picture depicting a longitudinal wave. Downloaded from http://www.fisica.uh.cu/bibvirtual/fisica_aplicada/fisica1y2/animaciones.htm

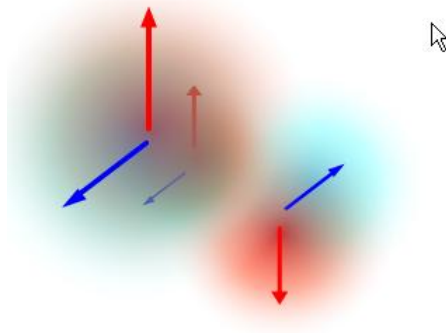


FIGURE 6. Snapshot from a moving picture representing the propagation of a monochromatic and polarized electromagnetic wave. Downloaded from <http://www.fisica.uh.cu/bibvirtual/vida%20y%20tierra/radiacion%20y%20vida/index.htm>.

We are not suggesting the abuse in using pictures or movies either, since usually time is limited enough to spend it in secondary matters, neither the substitution of the necessary analytic description with these aids. We are stressing the importance for the student in having a right mental picture of the phenomenon (something very difficult for some people) before carrying out the mathematics treatment. It is attributed to Einstein the saying that first you must understand the phenomenon and that formulas came later on. Some examples of moving animations appear in figures 5 and 6 (in Spanish).

III. CONCLUSIONS

To our mind, some unavoidable aspects to take into account when teaching basic physics, above all in non-physics university specialties, are the following: a) tell the students the course contents and explain it; b) laws of physics work in both senses; c) physics is a factual subject; do not forget it; d) stress the information about models and their range of use; e) Optimize the laboratory work (real, not virtual) and d) Make use of films or moving pictures whenever necessary, and no more.

REFERENCES

- [1] Alejo, J. A., *La contextualización como alternativa didáctica en el proceso de enseñanza aprendizaje*, VIII Conferencia Interamericana sobre Educación en Física, La Habana, junio 7-11, (2003).
- [2] Barrera, J., *Estrategia pedagógica para la formación de habilidades Investigativas en los estudiantes de ciencias técnicas*, VIII Conferencia Interamericana sobre Educación en Física, La Habana, junio 7-11 (2003).
- [3] Blest, R., Meléndez, R., Álvarez, I., *Ondas, óptica y física moderna: un enfoque interactivo*, Universidad de Santiago de Chile, Santiago, Chile, VIII Conferencia Interamericana sobre Educación en Física, La Habana, junio 7-11, (2003).
- [4] Carnero, M., Llanio, G., *La física general desde el enfoque sistémico. Una experiencia*, VIII Conferencia Interamericana sobre Educación en Física, La Habana, junio 7-11, (2003).
- [5] Ponnambalam, M. J., *Teaching simplifications due to symmetry in introductory physics*, VIII Conferencia Interamericana sobre Educación en Física, La Habana, junio 7-11, (2003).
- [6] III Congreso Internacional Didáctica de la Ciencia, MINED, Editorial Cubasolar, (1989) ISBN 959-7113-12-0.
- [7] V Taller Iberoamericano de Enseñanza de la Física Universitaria, Universidad de La Habana, (2009) ISBN 978-959-16-0964-9.
- [8] VI Congreso Internacional Didácticas de las Ciencias y XI taller Internacional sobre la Enseñanza de la Física, Marzo 16-19 (2010), La Habana, Cuba. ISBN 978-969-18-0541-6.
- [9] VII Congreso Internacional Didácticas de las Ciencias and XII Taller Internacional Sobre la Enseñanza de la Física, 19 al 23 de Marzo (2012) and previous editions. La Habana, Cuba. ISBN 978-959-18-0780-9.
- [10] Baracca, A., *Un programa innovativo de un curso de física básica para estudiantes de ciencias biológicas y medio ambientales*. VIII Conferencia Interamericana sobre Educación en Física, junio 7-11 (2003), La Habana.
- [11] For a more detailed discussion, see Horta, F. A. and González, A., *Rev. Cub. Fis.* **29**, (2012), in <http://www.fisica.uh.cu/biblioteca/revcubfis/index.php/es/2012-06-13-19-06-50/vol-29-no-2-2012?id=74>

El modelo TPACK como encuadre para enseñar electrostática con simulaciones



Garcia, Daiana; Domínguez, Alejandra; Stipcich, Silvia

ECienTec, Facultad de Ciencias Exactas. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, calle Arroyo Seco S/N, Buenos Aires, Argentina.

E-mail: dgarcia@alumnos.exa.unicen.edu.ar

(Recibido el 27 de Septiembre de 2013, aceptado el 11 de Febrero de 2014)

Resumen

Esta comunicación es parte de un trabajo de investigación más amplio que aspira a contribuir en el análisis y reflexión de los procesos de enseñanza y aprendizaje de la ciencia cuando se incorporan estas tecnologías. Las nuevas tecnologías entre las que se destacan los software educativos constituyen una herramienta valiosa, si son acompañadas por una propuesta didáctica especialmente diseñada. Se presenta una revisión de artículos de investigación que abordan la enseñanza y el aprendizaje de la electrostática. Asimismo, se analizan recursos tics disponibles en la web con miras a integrarlos en la enseñanza del mencionado contenido, tomando como referencia el marco interpretativo de la TPACK (Conocimiento del Contenido Pedagógico Tecnológico). Este desarrollo permite reconocer qué es lo que los profesores deben saber y saber hacer cuando incorporan tecnologías a sus propuestas de clases. Se considera el conocimiento disciplinar, tecnológico y pedagógico por separado y las nuevas formas de conocimiento resultantes de las interacciones entre ellos.

Palabras clave: Electrostática, Enseñanza, Nuevas Tecnologías, TPACK.

Abstract

New technologies, particularly educational software, are a valuable tool, if they are accompanied by a didactic proposal specially designed. This communication is part of a broader research project that aims to contribute to the analysis and reflection on the teaching and learning of science when these technologies are incorporated. It conducts a review of research articles that address the teaching and learning of electrostatics. We also analyze tics resources available on the web in order to integrate them in teaching that content, by reference to the interpretative framework of TPACK (Technological pedagogical content knowledge). This development allows us to recognize that what teachers should know and be able to do when their proposals incorporate technologies class. It is considered disciplinary knowledge, technological and pedagogical separately and new forms of knowledge resulting from interactions between them.

Key words: Electrostatic, Education, New Technology, TPACK.

PACS: 01.40.gb, 01.40.Fk

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

La comprensión de los principios básicos de la Física es, en lo relacionado con el aprendizaje de las ciencias, uno de los objetivos que busca el profesor en el interior del aula. Sin embargo, a menudo los estudiantes presentan una incompleta apropiación de los conceptos elementales ya que, en la mayoría de los casos, los mismos quedan en una explicación teórica tan abstracta y alejada de la realidad que carece de interés para ellos.

Actualmente, algunos autores [1, 2, 3, 4, 5] se proponen atender este obstáculo con la incorporación de las nuevas tecnologías en el proceso de enseñanza. Mediante software de simulación, es posible crear un espacio de representación de estos conceptos y a su vez permitir al alumno sumergirse en esta nueva realidad e interactuar con ella, logrando una comprensión a partir de los efectos de su propia manipulación.

Tal y como ocurre en otros campos conceptuales, el aprendizaje de la electrostática presenta grandes dificultades a los alumnos debido a la abstracción que implican, por ejemplo, las nociones de carga, de campo y potencial eléctrico; entre otros. Trabajos que versan sobre el aprendizaje de dichos conceptos [6, 7, 8, 9, 10] dan a conocer que los estudiantes tienen serias dificultades en la utilización del concepto de campo y en su aplicación en situaciones de electrostática, donde deben utilizar nociones básicas de la teoría, como: el principio de superposición, considerar qué papel juega el medio, el concepto de campo-interacción, etc. Se agrega que la imposibilidad de trabajar éstos conceptos mediante experiencias de laboratorio genera una brecha aun mayor con la realidad.

Tomando como base diferentes trabajos de investigación [9, 12, 13, 14], en los cuales se evalúan las dificultades con las que se encuentra el profesor a la hora de

enseñar Electrostática, se pueden reconocer dos aspectos diferentes:

Procedimentales: dificultades relacionadas con la metodología de trabajo de los alumnos, estrategias de resolución de problemas, obstáculos matemáticos, entre otros. Algunos ejemplos:

- Intentan aplicar un algoritmo en la solución de un problema, sin tener en cuenta un análisis previo del mismo, lo cual les genera dificultades en procesos matemáticos sencillos, y provoca gran inseguridad.
- Muestran escasa comprensión del problema, probablemente a causa de una lectura superficial del mismo.
- Desean resolver el problema sin plantear un esquema del mismo e intentan soluciones mentales que los aleja de un proceso lógico.
- Poseen grandes dificultades para realizar despejes en expresiones matemáticas.
- Ponen gran énfasis en cálculos matemáticos.

Conceptuales: dificultades relacionadas con la comprensión del contenido. Por ejemplo:

- Reconocen que los cuerpos se pueden cargar por fricción pero no reconocen cómo.
- Explican de la misma forma las diferentes interacciones. Para ellos no existe diferencia entre atracción eléctrica y atracción magnética.
- Saben que “cargas iguales se repelen y contrarias se atraen” aunque no explican bien su procedencia.
- Entienden que dos cargas de diferente magnitud pueden “sentir” fuerza y la de mayor carga experimentará mayor fuerza que la de menor valor.
- Explican varios fenómenos electrostáticos, de polarización o de carga por inducción con “energía”. Para una gran mayoría de alumnos la carga eléctrica es equivalente a la energía.
- Saben de la existencia de partículas “elementales” en el átomo: electrones, protones y neutrones. Sin embargo, para ellos, los protones se pueden desplazar al igual que los electrones. No asimilan la idea de un núcleo.
- No reconocen la naturaleza neutra de la materia.
- Cuando representan un esquema donde se muestra un objeto cargado con el símbolo más (+) y/o el símbolo menos (-) implica que los protones están en el positivo y los electrones en el negativo.
- Presentan dificultades en la comprensión del concepto de campo eléctrico.
- Conocen la Ley de conservación de la carga pero no la ponen en práctica, creyendo, por ejemplo, que cuando un objeto se carga es porque ésta se ha creado.
- Fundamentan sus nociones previas en la vida cotidiana y muchas veces no son coherentes con el cuerpo de conocimiento de la disciplina.
- Se encuentra un reconocimiento generalizado de la existencia de cargas, pero no de su organización o comportamiento.

- Sus explicaciones se fundamentan principalmente en la utilización de premisas universales que adoptan memorísticamente y sin tener una base conceptual coherente con la teoría formal.
- Los estudiantes no explicitan causalidad y se observa la ausencia de un análisis formal y consistente.

¿Por qué utilizar simulaciones en las clases de electrostática?

La electrostática es un área en la que resulta difícil realizar algunas experiencias en el aula. Particularmente aquellas en las que aparecen distribuciones uniformes de carga, o sistemas de cargas aisladas. El problema no reside sólo en la imposibilidad práctica de conformar esos sistemas, sino en la medición del campo eléctrico y el potencial, dado que cualquier instrumento que se introduzca provoca grandes variaciones de las magnitudes, además de tener en cuenta el contexto de aula.

Una posibilidad que se puede plantear es la de utilizar simulaciones computacionales. Esto permite una mayor flexibilidad para definir el sistema y una incomparable ventaja en cuanto a la obtención de resultados numéricos y gráficos. Como contrapartida podría argumentarse sobre la “artificialidad” del sistema, lo cual constituye siempre la limitación de estas herramientas didácticas. Sin embargo, existen ya muchas pruebas de la eficacia de las simulaciones para la enseñanza, y de la aceptación que esta herramienta tiene entre los alumnos [15].

Las simulaciones no pretenden suplantar las experiencias reales, siempre más ricas en variedad y resultados, sólo constituyen una herramienta de aprendizaje como puede serlo un libro, un apunte o una guía de problemas, y además revisten características propias. Éstas posibilitan la visualización de gráficos que ayudan a formar una imagen más completa de la situación, producen un efecto de motivación en los alumnos y los acerca aún más a una herramienta de trabajo, que es la computadora, indispensable en nuestros días.

Las distintas herramientas utilizadas en el proceso de estudio y construcción del conocimiento condicionan formas de pensamiento diferentes. Así como la regla y el compás fueron los elementos utilizados por los griegos para desarrollar la geometría, hoy la computadora ofrece numerosas posibilidades como herramienta cognitiva, pero es necesario, para aprovecharla correctamente, un análisis adecuado.

Un problema que se observa en muchas situaciones de la Física es la necesidad de utilizar modelos que simplifican la realidad para poder resolver problemas concretos. En este caso, las dificultades matemáticas del cálculo llevan a resolver situaciones que por su simetría facilitan las mismas. Es así que los alumnos pierden muchas veces una visión más completa de la situación, problema que podría abordarse mediante una simulación.

La utilización de la simulación computacional, aprovechando la enorme capacidad de cálculo y las posibilidades gráficas de esta herramienta tecnológica, podría ser de gran utilidad para ampliar el radio de acción del estudio de fenómenos físicos: calcular donde resulte difícil y tedioso hacerlo mediante los métodos tradicionales, y simular los fenómenos donde la experimentación sea inaccesible.

Las simulaciones proveen una representación interactiva de la realidad que permite a los estudiantes probar y descubrir cómo funciona o cómo se comporta un fenómeno, qué lo afecta y qué impacto tiene sobre otros fenómenos. El uso de este tipo de herramienta educativa alienta al estudiante para que manipule un modelo de la realidad y logre la comprensión de los efectos de su manipulación mediante un proceso de ensayo-error.

Las simulaciones computacionales tienen una popularidad creciente y ello obedece a las siguientes cualidades [4]:

- Seguridad: Algunas actividades son tan peligrosas que no serían éticamente posibles sin simulaciones.
- Economía: Es mucho menos costoso producir un modelo digital que construirlo. Se puede evaluar el modelo en una serie de simulaciones antes de construir y probar un prototipo físico.
- Proyección: Una simulación por computadora puede servir como máquina del tiempo para explorar uno o más futuros posibles.
- Visualización: Los modelos por computadora hacen posible la visualización, y ésta permite ver y comprender relaciones que de otra manera podrían pasar inadvertidas.
- Replicación: En el mundo real sería difícil o imposible repetir un proyecto de investigación en condiciones ligeramente diferentes. Si la investigación se lleva a cabo en un modelo por computadora la replicación sólo implica cambiar los valores de entrada y ejecutar otra simulación.

A su vez, es importante destacar que en Internet se encuentran disponibles gran cantidad de simulaciones que se pueden utilizar con fines educativos, en la mayoría de los casos sin costo.

Sin embargo, se debe tener en cuenta que el uso de simulaciones en la enseñanza de la Física, y de interfases conectadas a las computadoras como placas de adquisición de datos, requieren de un soporte pedagógico sustantivo para cumplir su finalidad educativa. Por sí solas no promueven aprendizajes, pero junto a propuestas didácticas basadas en los conceptos más nuevos de la pedagogía posibilitan el desarrollo de niveles de comprensión más profundos, y de las competencias necesarias tal como se expresa en [16].

Este aspecto es de vital importancia a la hora de tomar la decisión de utilizar nuevas tecnologías en el aula, ya que la simulación por sí sola no genera conocimiento. El rol del profesor en la planificación y el diseño de actividades es un aspecto fundamental. Se deben definir claramente cuáles son los objetivos que se proponen, cuáles serán las ventajas

que las simulaciones brindan por sobre otras herramientas y, fundamentalmente, cuáles son las dificultades que podrían surgir, para no transformar una herramienta valiosa en un obstáculo para el aprendizaje.

II. EL TPACK COMO MODELO PARA PLANEAR LA ENSEÑANZA DE LA ELECTROSTATICA CON TECNOLOGIA

Los procesos de enseñanza y el de aprendizaje se entienden como una construcción que resulta de la conjunción del alumno, el profesor y el contexto en el cual tiene lugar la interacción entre ambos. Se concibe al alumno como un sujeto cognoscente activo, con estructuras mentales preexistentes construidas como resultado de sus experiencias previas, tanto en el ámbito educativo, como en el ámbito general. Se entiende que el profesor es quien posee el conocimiento profesional, resultante de la integración de los diferentes saberes disciplinares, didácticos, psicológicos, epistemológicos, tecnológicos, como así también de su propia experiencia personal; necesarios para dar sentido a la práctica educativa. Dicha interacción tiene lugar en un contexto social, en el cual alumno y profesor desarrollan un continuo proceso de negociación en donde se comparten y construyen significados.

La incorporación de las nuevas tecnologías en el ámbito educativo propone una forma diferente de interacción entre los actores, y la necesidad de replantear el rol de cada uno de ellos en este proceso. Esto lleva a pensar en cuál será el papel que debería desempeñar el profesor en esta nueva incorporación.

Un marco teórico que busca identificar aspectos fundamentales del conocimiento que los profesores necesitan para la integración de la tecnología en el aula es el modelo TPACK, [17].

Sostienen que un uso adecuado de la tecnología en la enseñanza requiere del desarrollo de un conocimiento complejo y contextualizado que denominan *Conocimiento tecnológico pedagógico disciplinar* (TPACK acrónimo para Technological pedagogical content knowledge). Consideran, además de los conocimientos disciplinar, pedagógico y tecnológico por separado, los conocimientos resultantes que se generan de las intersecciones entre ellos. (Figura 1).

A. Conocimiento Disciplinar

El conocimiento disciplinar atiende, en este caso, al saber de los contenidos de la Física que se van a enseñar y que los profesores deben conocer y comprender. Se compone de modelos, teorías, leyes, principios, conceptos y procedimientos propios de la disciplina. Por ejemplo: hay dos clases de cargas, cargas del mismo signo se repelen, modelo de acción a distancia para el cálculo de la fuerza electrostática empujando la ley de Coulomb, etc.

D. Conocimiento pedagógico-disciplinar

Al considerar la dimensión pedagógica y la disciplina en forma conjunta e integrada, se desarrolla un conocimiento particular denominado conocimiento *pedagógico-disciplinar*. Este conocimiento refiere a lo que el profesor pone en juego al enseñar un contenido disciplinar dado, reflexionando acerca de cómo sus alumnos construyen conocimiento, cuáles son sus concepciones alternativas, y cómo se planea la enseñanza (organización, secuenciación y evaluación en base a ello). Esta intersección abarca estrategias de enseñanza que incorporan representaciones conceptuales precisas que tengan en cuenta las dificultades de aprendizaje y promuevan una comprensión de los saberes. (Figura 2)

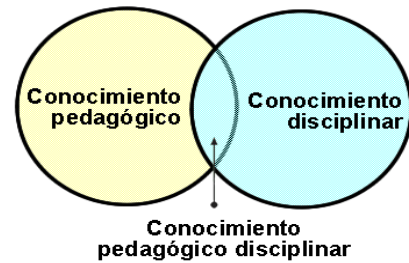


FIGURA 2. Conocimiento pedagógico disciplinar. Fuente: [18].

Por ejemplo, los estudiantes explican varios fenómenos electrostáticos empleando la noción de energía y no de carga. Esto tiene vinculación con el hecho de que construyen visiones sustancialistas de la materia que les resultan menos abstractas que conceptos como el de carga.

E. Conocimiento tecnológico-disciplinar

El conocimiento tecnológico-disciplinar, resulta de la integración de la tecnología con el saber disciplinar, que se influyen mutuamente, limitándose o potenciándose (Figura 3). Este saber incluye el conocimiento de qué tecnología es mejor para enseñar un determinado conocimiento disciplinar y cómo utilizarlas de manera efectiva para abordarlo. Los profesores deben saber de qué modo el contenido disciplinar es transformado por la aplicación de una tecnología y cómo el contenido a veces determina o cambia la tecnología a utilizar.

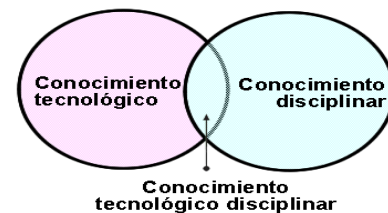


FIGURA 3. Conocimiento tecnológico disciplinar. Fuente: [18].

Por ejemplo, los profesores deben estar en condiciones de reconocer que cuando se trabaja con simulaciones en electrostática, la simulación de cargas que interactúan puede representarse más o menos análogo al modelo teórico

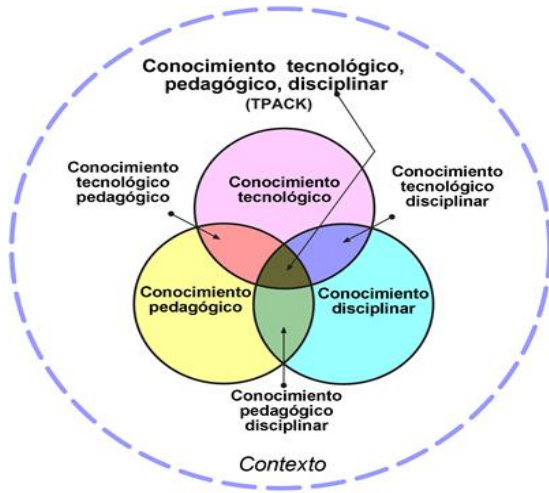


FIGURA 1. Conocimiento tecnológico, pedagógico disciplinar. Los tres círculos: conocimiento disciplinar, conocimiento pedagógico y conocimiento tecnológico, se superponen generando cuatro nuevas formas de contenido interrelacionado. Fuente: [18].

B. Conocimiento Pedagógico

El conocimiento pedagógico refiere al saber de los procesos, metodologías y prácticas de enseñanza y aprendizaje, así como los propósitos y metas de la enseñanza. Es el conocimiento que le permite al profesor comprender como sus alumnos construyen conocimiento, adquieren habilidades y desarrollan hábitos y disposición para el aprendizaje. Incluye también un manejo u organización de la dinámica del aula e implementación de propuestas pedagógicas y la evaluación de las mismas. Por ejemplo, cuando se habla de la carga de una partícula adquieren el hábito de decir que la misma es positiva o es negativa desestimando que la carga de una partícula atiende al signo y a una cantidad que la representa.

C. Conocimiento Tecnológico

El conocimiento tecnológico refiere a dos aspectos, por un lado, las tecnologías tradicionales y por otro, las tecnologías avanzadas. Dentro de las primeras se pueden identificar libros, pizarrones, tiza, etc. Las segundas, incluyen internet y sus aplicaciones, dispositivos digitales, etc. Este conocimiento incluye las habilidades que le permiten al profesor operar con esas tecnologías, entre otros, de qué manera utilizar herramientas informáticas, gestionar archivos, navegar en internet, utilizar el correo electrónico, etc. Estas habilidades deben estar acompañadas por una importante capacidad adaptativa del profesor, debido a los continuos cambios que caracterizan a las tecnologías.

Una verdadera integración de la tecnología a la enseñanza de un contenido disciplinar implica comprender las intersecciones de los tres saberes hasta aquí mencionados.

dependiendo de las restricciones que imponga el lenguaje de programación que se emplee. En ocasiones, dos cargas de igual signo se repelen alejándose pero quedan confinadas en la pantalla visible que ofrece la simulación. Sin embargo, en términos del modelo teórico deberían alejarse indefinidamente una de otra si es que son las dos únicas cargas en ese espacio.

F. Conocimiento tecnológico-pedagógico

El conocimiento de la tecnología disponible, de sus componentes y su potencial para ser utilizada en contextos de enseñanza y de aprendizaje, y el conocimiento de cómo la enseñanza puede cambiar al utilizar una tecnología particular configuran el conocimiento tecnológico-pedagógico (Figura 4). Poseer este tipo de conocimiento implica tener herramientas para realizar determinadas tareas y la habilidad para elegir las en función de sus posibilidades de adaptación a contextos educativos, así como también contar con las estrategias pedagógicas que permitan aprovechar esas herramientas tecnológicas para la enseñanza y el aprendizaje.

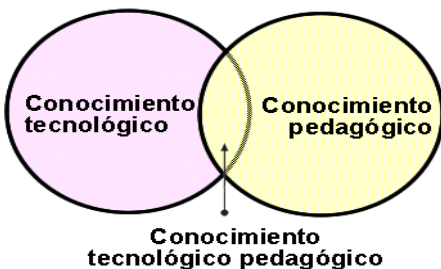


FIGURA 4. Conocimiento tecnológico pedagógico. Fuente: [18].

El núcleo de este modelo es la intersección de los tres tipos de conocimiento, que resulta en el conocimiento tecnológico-pedagógico-disciplinar y representa las complejas relaciones entre los tres tipos de conocimientos. Una verdadera integración de la tecnología requiere comprender y negociar la interrelación entre estos tres tipos de conocimiento. Un profesor capaz de negociar estas relaciones representa un saber experto diferente del de un experto disciplinar (un Físico), o de un experto en tecnología (un ingeniero en Sistemas) o un experto en pedagogía (un licenciado en Educación).

En particular, este trabajo buscará proyectar aspectos de este marco teórico a la enseñanza de la electrostática. Tomando como referencia el modelo, se presentarán algunas consideraciones que el profesor deberá atender para diseñar una propuesta didáctica que integre las nuevas tecnologías. Es decir, cuestiones pedagógicas, tecnológicas y disciplinares, así como la conjunción de tales consideraciones. Para ello se hará una revisión de la oferta de recursos de acceso libre disponibles en la web, y se caracterizarán, identificando posibles implicancias didácticas de los mismos.

III. DISPONIBILIDAD DE RECURSOS EN LA WEB

A continuación se analiza un conjunto de recursos existentes en la web. Para la selección de los mismos se ha procedido incursionando en páginas de acceso libre. Fundamentalmente se ha procurado acceder a simulaciones de fenómenos electrostáticos poniendo énfasis en su posibilidad de incorporación didáctica a las clases de Física.

Este apartado no supone un análisis sistemático, sino más bien mostrativo. Se intentarán identificar cuáles de las potenciales ventajas de estas herramientas, mencionadas en la introducción, se identifican en los mismos. A su vez se analizará la importancia que podrían tener, por sobre otras herramientas educativas, en la búsqueda de una solución ante las dificultades de los estudiantes de nivel secundario. Simulaciones:

- 1) <http://www.gobiernodecanarias.org/educacion/3/usrn/lentiscal/2-CD-Fiisca-TIC/2-2Electrostatica/2-Electrostatica-Applets/EyVpq/EyVpq.htm>

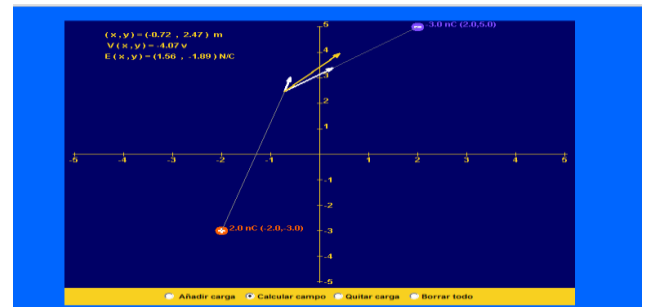


FIGURA 5. Simulación del campo eléctrico resultante cuando se colocan cargas eléctricas en diferentes coordenadas del eje cartesiano. Fuente: [19].

- 2) http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/asi_gnaturas/fisica/animaciones_files/cargas.swf

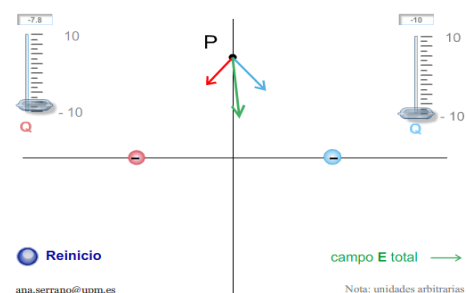


FIGURA 6. Simulación del campo eléctrico generado por dos cargas ubicadas en el eje x, en un punto P del espacio correspondiente al eje y. Fuente: [20].

Estos applets (Figuras 5 y 6) permiten que el alumno trabaje con cargas eléctricas sobre un eje cartesiano y observe el campo eléctrico resultante en diferentes puntos del mismo. El alumno podrá elegir el signo, el valor y la

ubicación de cada carga, y podrá crear los arreglos que desee. Al pulsar la opción “calcular campo”, el simulador realiza el cálculo del módulo y representa el vector resultante correspondiente y el vector de campo eléctrico propio para cada carga en ese punto. Estas consideraciones combinan el conocimiento disciplinar con el pedagógico en cuanto a lo que es esperable que se realice con la simulación. Por ejemplo, estar en condiciones de calcular el campo eléctrico en diferentes puntos del espacio.

La posibilidad de que el alumno establezca las características de las cargas y diferentes arreglos de las mismas, pudiendo generar variedad de situaciones por él mismo, lo convierte en una importante herramienta interactiva. A su vez permite sortear los obstáculos matemáticos que podría acarrear dicha actividad si se quisiera realizar en lápiz y papel, centrando el análisis ya no en los cálculos, sino en los conceptos físicos. El potencial de cálculo de la simulación colabora en la construcción de conocimiento escolar sobre la electrostática. Este aspecto se incluye en la intersección conocimiento tecnológico-disciplinar. El trabajo que podría desarrollarse con estos applets apunta fuertemente al carácter vectorial del campo eléctrico y a su condición de función de cada punto de un espacio. Aquí se evidencia aquello que quien va a hacer uso de la simulación reconoce como posible de aprovechar en sus clases (conocimiento pedagógico tecnológico).

- 3) <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/electrico/cElectrico.html#Actividades>

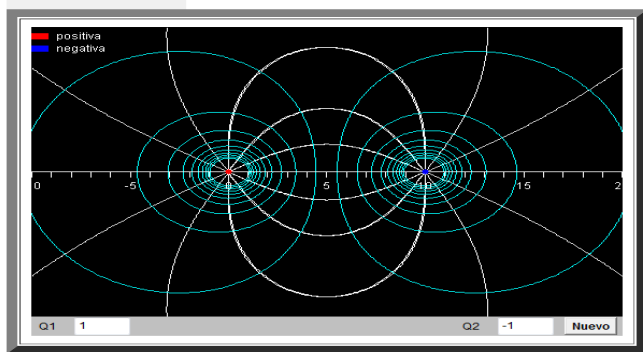


FIGURA 7. Simulación de las líneas de campo eléctrico generadas por dos cargas puntuales, ubicadas en un punto fijo del eje x. Fuente: [21].

A diferencia del applet anterior aquí la interactividad esperada de esta clase de herramientas es limitada. El alumno podrá modificar el signo y el valor de sólo dos cargas, limitándose a observar las consecuencias de esas modificaciones en las líneas de campo eléctrico y equipotenciales. El hecho de que la simulación sólo considere dos cargas (Figura 7), debería ser pensado por el docente para sortear el obstáculo de asociar campo siempre a dos cargas y no a tres o más. Estas consideraciones combinan lo que el applet permite, con las intencionalidades que el docente podría planear con una determinada actividad. De allí que, en términos de TPACK, se estaría en la intersección tecnológico-pedagógico.

Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 8, No. 1, March 2014

Si bien la interactividad de esta herramienta no es amplia, podría ser de utilidad para que el alumno observe cualitativamente cuáles son las consecuencias de, por ejemplo, aumentar o disminuir el valor de la carga, cambiar el signo de una de ellas, trabajar con dos cargas iguales, analizar las zonas donde el campo es más o menos intenso, a partir de la densidad de líneas con diferentes arreglos, etc.

Es probable que, dependiendo de los conocimientos ya construidos sobre el tema, se haga necesario acompañar el trabajo de un conjunto de preguntas orientativas para conceptualizar lo que el gráfico presenta. Aquí estaría integrado el conocimiento pedagógico y el conocimiento disciplinar.

En el análisis anterior están presentes el conocimiento disciplinar, el conocimiento pedagógico y el conocimiento tecnológico de manera integrada, ya que, se consideran las limitaciones de la herramienta, las ventajas en lo que concierne al proceso de construcción del saber por parte del alumno al utilizarla y qué conocimiento se esperaría que construya como producto de esta interacción.

- 4) <http://www.xtec.cat/~ocasella/applets/elect/applet2.htm>

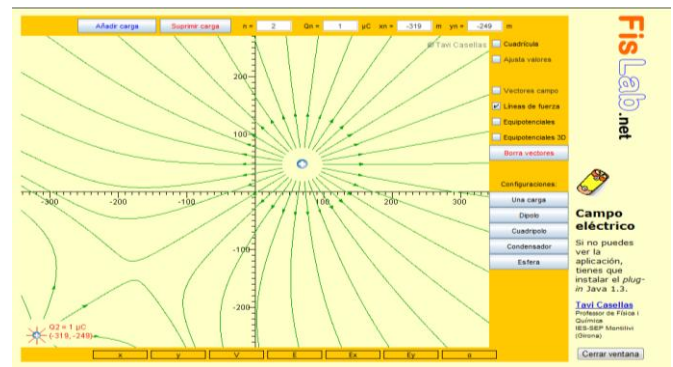


FIGURA 8. Simulación de las líneas de campo eléctrico generadas por cargas puntuales, ubicadas en cualquier coordenada del eje cartesiano. Fuente: [22].

- 5) <http://www.cco.caltech.edu/~phys1/java/phys1/EFfield/EFfield.html>

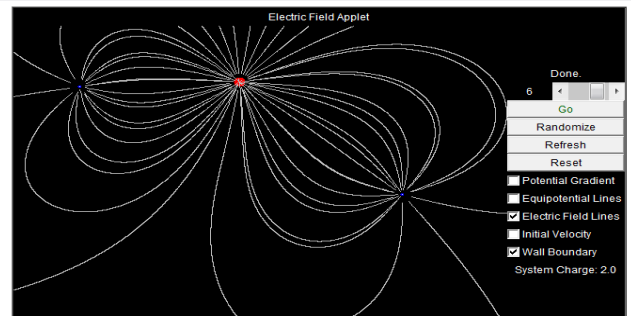


FIGURA 9. Simulación de las líneas de campo eléctrico generadas por tres cargas puntuales. Fuente: [23].

- 6) http://phet.colorado.edu/sims/charges-and-fields/charges-and-fields_es.html

El modelo TPACK como encuadre para enseñar electrostática con simulaciones
estrategias didácticas serían potenciales ante un simulador
con estas características.

- 8) <http://phet.colorado.edu/en/simulations/translated/es>

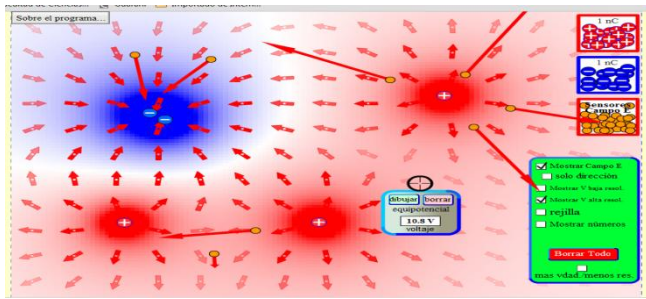


FIGURA 10. Simulación del campo eléctrico y regiones equipotenciales, para un arreglo determinado de cargas eléctricas. Fuente: [24].

Estos applets (Figura 8, 9 y 10) presentan varias de las características mencionadas en los dos ítems anteriores pero en un solo simulador. Permite que el alumno cree sus propios arreglos, al igual que en el primer applet, observe el campo eléctrico en diferentes puntos, y que observe las líneas de campo y las regiones equipotenciales, como ocurría en el segundo applet.

La cantidad de opciones manipulables traducidas en los comandos, requiere que se considere destinar un tiempo importante a que el alumno se familiarice con la herramienta, para que pueda reconocer y utilizar cada una de ellas de manera eficiente. Esta apreciación formaría parte del conocimiento tecnológico-pedagógico, ya que, se estaría considerando dedicar un tiempo a que el alumno se familiarice con la herramienta y de esta manera aprovechar al máximo la interactividad.

- 7) http://acer.forestaes.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/animaciones_files/coulomb.swf

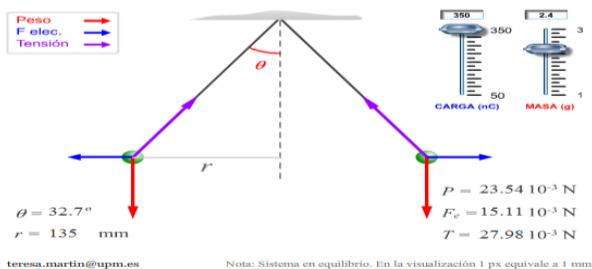


FIGURA 11. Simulación de dos cargas suspendidas de un hilo y representación vectorial de las fuerzas actuantes sobre cada una. Fuente: [25].

Esta simulación está orientada a un problema más específico. Modeliza un caso particular en el que dos cargas son suspendidas de un hilo, y vincula la fuerza de tensión, con la fuerza peso y la fuerza electrostática (Figura 11). Si bien no contribuye a la comprensión de los aspectos más importantes del campo en estudio, podría pensarse como una situación disparadora, que permita relacionar la fuerza gravitatoria con la fuerza electrostática y establecer diferencias y similitudes. De allí que, estaría presente el conocimiento pedagógico-tecnológico, al considerar que

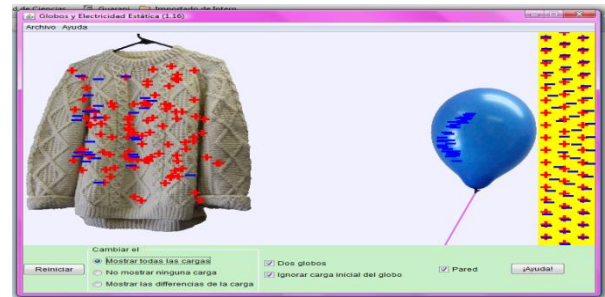


FIGURA 12. Simulación de la carga eléctrica de un globo, un sweater y una pared, en un proceso de electrización. Fuente: [26].

Esta simulación permite trabajar el fenómeno de electrización. La misma dispone de un sweater, un globo y una pared (Figura 12). El alumno podrá frotar el globo contra el sweater y observar la transferencia de carga, y posteriormente podrá analizar qué ocurre cuando se acerca el globo al sweater y a la pared. Otra opción permite incorporar un segundo globo, con las mismas aplicaciones que en la situación anterior, pero a su vez se puede incorporar al análisis lo que ocurre entre los globos.

Presenta tres alternativas interesantes. La primera permite observar las consecuencias de las acciones antes mencionadas pero, sin visualización del comportamiento de las cargas eléctricas, como ocurriría en una situación real. Otra opción permite visualizar solamente la diferencia de cargas, mostrando únicamente la carga neta de los objetos. La tercera permite visualizar todas las cargas, tanto la carga inicial de cada uno, como la carga que va adquiriendo.

Con esta herramienta se podrían atender algunas de las dificultades mencionadas en la introducción, como por ejemplo, que los alumnos no comprenden la electrización por fricción, suponen que los protones se desplazan al igual que los electrones, no reconocen la naturaleza neutra de la materia y no aplican la ley de conservación de la carga. A su vez, puede ser importante para trabajar tanto el principio de conservación de la carga, como el proceso de electrización y polarización. Si bien es una experiencia que podría realizarse en el aula para ver sus efectos, su importancia reside en que el alumno podrá apreciar una representación del comportamiento de las cargas, minimizando la abstracción que dicha actividad implica y cambiando una visualización estática, por otra dinámica del fenómeno. Permitirá construir una explicación microscópica de un fenómeno cotidiano a partir de principios electrostáticos. Al considerar estos aspectos se estaría nuevamente construyendo un conocimiento coherente con el TPACK, ya que se estaría pensando en orientaciones pedagógicas, teniendo en cuenta los contenidos involucrados y las características potenciales del applet para su construcción.

- 9) <http://phet.colorado.edu/en/simulations/translated/es>

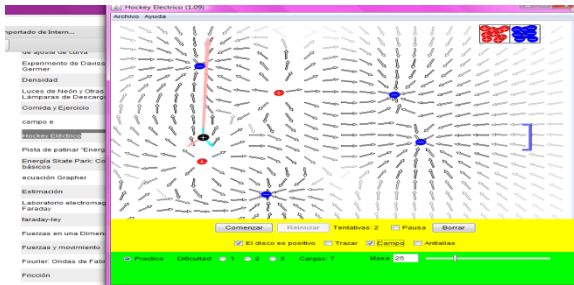


FIGURA 13. Simulación de un juego de hockey con cargas eléctricas. Fuente: [27].

Hockey eléctrico (Figura 13): este applet tiene el carácter de “juego”, en el cual se infiere que los alumnos podrán aplicar los conocimientos adquiridos sobre interacciones eléctricas y ley de Coulomb para poder llevarlo a cabo. Esta apreciación formaría parte del conocimiento pedagógico-disciplinar, ya que supone cuáles conocimientos previos debe poseer el alumno en su estructura cognitiva para poder resolver el problema propuesto en la simulación.

Permite observar el campo debido a cada carga y las fuerzas a la que está sometida. El alumno deberá crear los arreglos que crea convenientes para que el disco (carga positiva) ingrese en el arco. Aquí estaría presente el conocimiento tecnológico disciplinar, ya que, se espera que el alumno aplique sus conocimientos disciplinares, por ejemplo, que cargas de igual signo se repelen y cargas de signos opuestos se atraen, para luego crear con el simulador los arreglos que le permitan ganar el juego.

Esta simulación podría ser interesante para trabajar el principio de superposición y para enfatizar en la importancia de la distancia en la determinación de la fuerza. Su carácter de “juego”, puede ser importante para despertar el interés del alumno, sin embargo sería de esperar que una actividad diseñada para el trabajo con este applet haga explícitos los conceptos que los alumnos ponen en juego, y no simplemente se reduzca a su resolución.

Videos explicativos:

- 10) <http://senderospedagogicos.blogspot.com.ar/p/la-electrostatica.html>



FIGURA 14. Captura de pantalla de un video en donde se describen procesos de electrización. Fuente: [28].

- 11) <http://www.acienciasgalilei.com/videos/electroestatica.htm>



FIGURA 15. Captura de pantalla de una página web que ofrece variedad de videos referentes al campo de la electrostática. Fuente: [29].

Si bien estos sitios no contienen applets, presentan variedad de videos (Figura 14 y 15) con animaciones referentes al campo conceptual. Aunque no responden a la interactividad de la simulación, pueden considerarse como recursos auxiliares para una visualización dinámica de algunos aspectos de la electrostática. Aunque se aleja del propósito de este trabajo, pareció importante mencionar la disponibilidad de recursos audiovisuales ya que, pese a que aquí solo se proporcionan dos ejemplos, es numeroso el material disponible.

IV. CONCLUSIONES

Es importante que el profesor tenga conocimiento de las dificultades que los diferentes trabajos en investigación ponen de relieve sobre el aprendizaje de la electrostática, y que a su vez cuente con herramientas que permitan atenderlos. La incorporación de las nuevas tecnologías, con un trabajo previo de análisis y evaluación de la práctica, en las clases de ciencia, es una de ellas.

La revisión realizada, aunque acotada, ha demostrado que existe disponibilidad de recursos de acceso libre, de los cuales el profesor puede hacer uso y que, por sus características, podrían favorecer el proceso de construcción de conocimiento en este campo conceptual.

Su incorporación en el aula, particularmente en las clases de Física, no es en absoluto una actividad sencilla, sino que requiere un proceso de reestructuración del rol de los actores del proceso de enseñanza y aprendizaje, fundamentalmente en el rol del profesor que será encargado de llevar a cabo tal integración. Hemos hecho uso del modelo TPACK como un encuadre teórico que se ha mostrado de utilidad para el reconocimiento de los espacios que se generan al momento de combinar tecnología con disciplina y con pedagogía. La generación de cada espacio es también una forma de conocimiento que necesariamente debe ser considerada a la hora de planear la enseñanza de la

disciplina, la electrostática en este caso, con uso de tecnologías.

Es necesaria una práctica reflexiva por parte del profesor, ya que las simulaciones no dejan de ser una herramienta como el libro de texto, el laboratorio o el lápiz y papel. Estas adquieren realmente su importancia cuando son acompañadas de preguntas o problemas, diseñados estratégicamente teniendo en cuenta las consideraciones didácticas correspondientes.

Por otro lado, debe tenerse en cuenta que el laboratorio de informática se presenta como un escenario diferente al aula de clase y por lo tanto requiere de un proceso de adaptación. Las simulaciones se convierten en una nueva realidad para el alumno, que requerirá seguramente de un tiempo de familiarización, en el cual se dedique a “investigar” de qué trata, reconozca las variables y el modelo por detrás de la simulación, para luego centrarse en el objetivo de la actividad.

V. REFERENCIAS

[1] Massons, J., Camps, J., Cabre, R., Ruiz, X. y Diaz, F., *Electrostática y EAO: una experiencia de simulación*, Enseñanza de las Ciencias **11**, 179-183 (1993).

[2] Culzoni, C., *Las nuevas tecnologías en la educación presencial, experiencias con simulación en física*, Congreso Interinstitucional de Tecnología Educativa (2003).

[3] Barneto, A., Gil Martin, M., *Entornos constructivistas de aprendizaje basados en simulaciones informáticas*, Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias **5**, 1-19 (2006).

[4] Barco, H., *Simulación de cargas eléctricas en campos electrostáticos y magnéticos*, Trabajo de tesis de Maestría, Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales (2007).

[5] Pineda, L., Arrieta, X. y Delgado, M., *Tecnologías para la enseñanza de la física en educación superior*, Revista Electrónica de Estudios Telemáticos, Volumen 8, No 1 (2009).

[6] Nardi, L. y Carvalho, A., *A genese, a psicogenese e a aprendizagem do conceito de campo: subsídios para a construo do ensino desse conceito*, Caderno Catarinense do Ensino de Física **7**, 46-69 (1990).

[7] Solves, J. y Martin, J., *Análisis de la introducción del concepto de campo*, Revista Española de Física **5**, 34-39 (1991).

[8] Viennot, L y Rainson, S., *Students' reasoning about the superposition of electric fields*, International Journal of Science Education **14**, 475-487 (1992).

[9] Furió, C. y Guisasola, J., *Deficiencias epistemológicas en la enseñanza habitual de los conceptos de Campo y Potencial eléctrico*, Revista Española de Física **7**, 46-50 (1993).

[10] Galili, L., *Mechanics background influences students' conceptions in electromagnetism*, International Journal of Science Education **17**, 371-387 (1995).

[11] Furió, C. y Guisasola, J., *Dificultades de aprendizaje de los conceptos de carga y campo eléctrico en estudiantes de bachillerato y universidad*, Enseñanza de las Ciencias **16**, 131-146 (1998).

[12] Criado, A., Cañal, P., *Obstáculos para aprender conceptos elementales de electrostática y propuestas educativas*, Investigación en la Escuela **47**, 53-62 (2002).

[13] Homer, A. y Clavijo, N., *Ideas previas del estudiante sobre electrostática*, Revista Colombiana de Física **38**, No. 2 (2006).

[14] Pereda Garcia, S. y López Mota, A., *Diseño de una estrategia didáctica para propiciar el cambio conceptual sobre electrostática en alumnos de secundaria*, Enseñanza de las Ciencias, Número Extra VIII Congreso Internacional sobre Investigación en Didáctica de las Ciencias, Barcelona, 3421-3427 (2008).

[15] Kofman, H. Mamprín, J., *Simulando campos y potenciales en dos y tres dimensiones para el aprendizaje en colaboración a nivel universitario*, Memorias del V Congreso Iberoamericano de Informática Educativa (RIBIE 2000 - Viña del Mar. Chile) (2000).

[16] Perkins, D., *La escuela inteligente*, (Gedisa, España, 1997).

[17] Koehler, M., Mishra P., *What happens when teachers design educational technology? The development of technological pedagogical content knowledge*, J. Educational Computing Research **32**, 131-152 (2005).

[18] Página web < <http://www.tpack.org> >, consultada el 15junio 2012.

[19] Página Web <<http://www.gobiernodecanarias.org/educacion/3/usrn/lentiscal/2-CD-Fiisca-TIC/2-2Electrostatica/2-Electrostatica-Applets/EyVpq/EyVpq.htm>> consultada el 8 de enero 2013.

[20] Página Web <http://acer.forestaes.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/animaciones_files/cargas.swf>, consultada 10 de enero 2013.

[21] Página Web <<http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/electromagnet/electrico/cElectrico.html#Actividades>>, consultada el 27 de diciembre 2012.

[22] Página Web <<http://www.xtec.cat/~ocasella/applets/elect/appletsol2.htm>>, consultada el 27 de Diciembre de 2012.

[23] Página Web <<http://www.cco.caltech.edu/~phys1/java/phys1/EField/EField.html>>, consultada el 13 de Diciembre 2012.

[24] Página Web <http://phet.colorado.edu/sims/charges-and-fields/charges-and-fields_es.html>, consultada el 10 de Enero de 2013.

[25] Página Web <http://acer.forestaes.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/animaciones_files/coulomb.swf>, consultada el 8 de Enero 2013.

[26] Página Web <<http://phet.colorado.edu/en/simulations/translated/es>>, consultada el 10 de Enero de 2013.

[27] Página Web

⟨<http://phet.colorado.edu/en/simulations/translated/es>⟩,
consultada el 10 de Enero de 2013.

[28] Página Web

⟨<http://senderospedagogicos.blogspot.com.ar/p/la-electrostatica.html>⟩, consultada el 13 de Enero de 2013.

[29] Página Web

⟨<http://www.acienciasgalilei.com/videos/electroestatica.htm>⟩,
consultada el 13 de Enero de 2013.

La potencialidad de las simulaciones de campo eléctrico desde la perspectiva de la teoría de los campos conceptuales de vergnaud



Gloria E. Alzugaray¹, Marta B. Massa², Marco A. Moreira³

¹Facultad Regional Santa Fe- Universidad Tecnológica Nacional Lavaise 610, 3000 Santa Fe- Argentina.

²Facultad Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura – Universidad Nacional de Rosario- Pellegrini 250, 2000 Rosario-Argentina.

³Instituto de Física – UFRGS- Caixa Postal, 15051 – Campo do Vale.

E-mail: galzugar@frsf.utn.edu.ar

(Recibido el 28 de Octubre 2013; aceptado el 30 de Marzo de 2014)

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio realizado con estudiantes de segundo año de la carrera de Ingeniería Mecánica perteneciente a la Universidad Tecnológica Nacional. El mismo involucra los conceptos de campo eléctrico, potencial eléctrico y magnitudes relacionadas. Teniendo como marco la Teoría de los Campos Conceptuales de Vergnaud, se analizan las actividades cognitivas que ponen en juego los estudiantes al abordar un trabajo práctico a partir de un software de simulación.

Palabras clave: Simulaciones, campos conceptuales, campo eléctrico.

Abstract

This paper discusses a research about the construction of the concepts of electric field, electric potential and related quantities, done by second year students of Mechanical Engineering at the Regional Santa Fe Faculty of the National Technological University. Taking into account the Theory of Conceptual Fields of Vergnaud, the cognitive activities involved by the students within a laboratory work using a simulation software are analyzed.

Keywords: Simulations, theory conceptual fields, electric field.

PACS: 01.40, Fk, 01.40-d

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Es innegable la relevancia que ha tenido en las últimas décadas el uso de las tecnologías computacionales en el campo científico. En la Educación en Física, en Argentina, la incorporación de las mismas es más reciente, aportando beneficios a partir de las diferentes modalidades de su empleo, ya sea en la recolección y análisis de datos en las actividades experimentales, la simulación de fenómenos, la graficación, la comunicación, entre otras.

El uso de las simulaciones en el aula requiere de un enfoque didáctico que permita a los docentes tener una visión acerca de cómo los estudiantes aprenden conceptos científicos mediante el uso de estos recursos por ejemplo, el de *campo eléctrico*. Éste es un concepto no sencillo de internalizar por los estudiantes en la Física Básica universitaria no sólo por su nivel de abstracción sino también por la tensión que se produce frente a la noción de fuerza eléctrica como interacción a distancia. Diversos investigaciones han destacado las dificultades reconocidas en los estudiantes en su conceptualización [1, 2, 3, 4, 5, 6,

7, 8, 9] Tales dificultades están asociadas con las debilidades en los conocimientos e interpretaciones del álgebra vectorial y de las representaciones gráficas y simbólicas, así como a las fijaciones funcionales derivadas de informaciones recibidas a lo largo de la instrucción.

Los trabajos prácticos ocupan un lugar importante en la enseñanza de Física Básica en las carreras de Ingeniería por cuanto constituyen instancias donde se introducen situaciones diferentes y variadas, tanto con el formato de problemas de lápiz y papel como de actividades experimentales, para enriquecer significados de conceptos, integrar contenidos, promover razonamientos, desarrollar y afianzar procedimientos. La incorporación de la simulación en los trabajos prácticos ofrece un marco para la visualización de aspectos involucrados en el concepto de *campo eléctrico*. Permite, además, al estudiante contrastar sus propias conceptualizaciones, en forma gráfica e inmediata.

Este artículo se centra en el uso de un trabajo práctico de simulación como una actividad de resolución de problemas de campo eléctrico, donde se recurre a nociones

tanto del dominio teórico al cual refiere la situación, como del dominio metodológico, ambos en íntima relación. Para la organización de la actividad se realizó un relevamiento de distintos software de simulación libre disponibles en la web, y se escogió uno que permitió diseñar actividades compatibles con los enfoques disciplinares y didácticos establecidos en la cátedra Física Eléctrica de la Facultad Regional Santa Fe de la Universidad Tecnológica Nacional (FRSF-UTN). Por ello se consideró importante que la inclusión del software de simulación entre los materiales curriculares fuera acompañada de un proceso reflexivo de los profesores que fundamentara la elección, por cuanto no se trataba de una selección sólo por el atractivo o interés que conlleva en sí mismo este tipo de recurso, sino de analizar el diseño de estrategias de enseñanza integradas y coherentes con los enfoques disciplinares y didácticos [10, 11]

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

La Teoría de los Campos Conceptuales [12, 13] postula que el conocimiento se organiza en *campos conceptuales*, definidos como grandes conjuntos informales y heterogéneos de situaciones y problemas, para cuyo análisis y tratamiento son necesarios variadas clases de conceptos, representaciones simbólicas, operaciones del pensamiento y procedimientos que se conectan unos con otros durante su aprendizaje o adquisición [14, 15, 16]. El *esquema*, noción central de esta teoría, es una totalidad organizada que permite generar una clase de conductas diferentes en función de las características particulares de cada una de las situaciones a la cual se dirige. Vergnaud distingue dos clases de situaciones: aquellas para las cuales el sujeto dispone, en su repertorio, de competencias necesarias para el tratamiento relativamente inmediato de la situación; aquellas para las cuales el sujeto no dispone de todas las competencias necesarias, lo que le obliga a un tiempo de exploración y de reflexión, de dudas, tentativas abortadas, y le conduce eventualmente al éxito o al fracaso. En el primer caso, se ponen en juego conductas muy automatizadas, organizadas por un esquema único; en el segundo caso, se observa el esbozo sucesivo de varios esquemas, que pueden entrar en competición y que, para llegar a la solución buscada, deben ser acomodados, separados y recombinados; este proceso se acompaña necesariamente de descubrimientos. 'Es en los esquemas donde se deben investigar los conocimientos en acto del sujeto que son los elementos cognitivos que permiten a la acción del sujeto ser operatoria. Los esquemas descansan siempre sobre una conceptualización implícita y algunos invariantes que hacen que el esquema sea operatorio. Las inferencias son indispensables para la puesta en funcionamiento del esquema en cada situación particular. El funcionamiento cognitivo del sujeto comporta operaciones que se automatizan progresivamente y de decisiones conscientes que permiten tener en cuenta valores particulares de las variables de la situación.

Los conceptos-en-acción pueden ser objetos, predicados o bien una categoría de pensamiento considerada como importante o adecuada. Los teoremas-en-acción son proposiciones, consideradas como verdaderas por el sujeto, sobre un aspecto de la realidad [17]. Cabe destacar que los conceptos-en-acción y teoremas-en-acción no son ni verdaderos conceptos ni verdaderos teoremas, pues se orientan hacia el saber hacer y no hacia la conceptualización. Ambos integran el conocimiento-en-acción el cual permite actuar frente a determinadas situaciones, independientemente de ser verdadero o apropiado de acuerdo a algún criterio científico.

Para Vergnaud, los verdaderos conceptos son relacionales y definidos como la terna $C=(S,R,I)$, donde **S** es un conjunto de situaciones como referentes que dan sentido al concepto, **I** es un conjunto de invariantes operatorios asociados al concepto y que constituyen su significado y **R** es un conjunto de representaciones simbólicas como signifiante (lenguaje natural, gráficos y diagramas, sentencias formales), que expresan, en forma explícita, los invariantes operatorios.

Vergnaud prestó particular atención a la didáctica centrando su atención en el sujeto que aprende y en el rol del docente, señalando:

- Los docentes son mediadores, usan palabras y frases para explicar, preguntar, seleccionar información, proponer metas, reglas, etc.; el lenguaje y los símbolos son importantes en ese proceso; deben ayudar a los estudiantes a desarrollar esquemas y representaciones.
- Los estudiantes se vuelven capaces de enfrentar situaciones cada vez más complejas desarrollando sus esquemas.
- La acción mediadora más importante de un docente es la de suministrar a los estudiantes situaciones fructíferas para su aprendizaje.
- La elección de las situaciones y su secuenciación es esencial para que el alumnado desarrolle esquemas potenciales.

III. METODOLOGÍA

El desarrollo del contenido *campo eléctrico* (**E**) en el curso Física Eléctrica para estudiantes de Ingeniería de la FRSF-UTN se estructuró en 4 fases: *iniciación* (destinada a la motivación de los estudiantes y a la activación de conocimientos previos, trabajándose sobre la comprensión lectora de un texto de Feymann, Leighton y Sands [18]; *desarrollo* (comprendió una secuencia de actividades seleccionadas para que los estudiantes trabajen, en forma progresiva, sobre diferentes tipos de situaciones, con aspectos que atienden a dar significado al concepto de **E** como una función del espacio, sus diversas formas de representación y su relación con el potencial eléctrico y la energía); *síntesis y autoevaluación* (con actividades propuestas en una guía diseñada teniendo en cuenta los conceptos organizadores del concepto de **E** de Llancaqueo, Caballero y Moreira [6], orientadas a la producción de explicaciones y su fundamentación por parte

de los estudiantes); *refuerzo y ampliación* (con actividades específicas utilizando un software de simulación, atendiendo a las debilidades individuales identificadas en el aprendizaje).

Participaron 20 estudiantes de Física Eléctrica de la FRSE - UTN, los mismos se dividieron en 5 grupos de 4 alumnos cada uno para la realización del Trabajo Práctico. Si bien el número de alumnos era superior, sólo se trabajó con los alumnos presentes el día de la actividad, que no era obligatoria.

La investigación, se centró en la última fase mencionada por cuanto ofrece información relevante para seguir la evolución del aprendizaje del concepto de campo eléctrico reconociendo los invariantes operatorios que utilizan los estudiantes para resolver situaciones problemáticas, producir explicaciones y fundamentar sus ideas.

La simulación seleccionada corresponde al programa denominado FisLab.net. Está organizado de acuerdo con los criterios propuestos por Pere Marquès Graells [19]. Dicho sitio constituye un programa interactivo, sobre contenidos de electrostática, que permite trabajar con diferentes configuraciones discretas de cargas eléctricas, analizar y calcular el campo y potencial eléctrico generado por las mismas, pudiéndose representar de distintas maneras. La guía de actividades, que acompañó el uso de la simulación, orientó la construcción significativa del concepto de campo eléctrico como una función del espacio, sus diversas formas de representación y su relación con el potencial eléctrico.

Se tuvo en consideración para la selección del software de simulación:

- la reproducción de fenómenos eléctricos difícilmente observables de manera directa,
- la oportunidad que brinda para que el estudiante ponga a prueba sus conocimientos previos acerca de los fenómenos eléctricos,
- la posibilidad que ofrece para que el alumno comprenda mejor el modelo conceptual utilizado para explicar el fenómeno, por ejemplo, de superposición de campos,
- la simulación permite modificar a voluntad parámetros y condiciones iniciales que aparecen en el modelo conceptual.
- la simulación evita al estudiante cálculos numéricos complejos, permitiéndoles concentrarse en los aspectos conceptuales de la situación planteada. (El cálculo numérico no queda excluido sino que se considera necesario postergarlo hasta avanzar en la conceptualización de campo eléctrico.)

La guía del trabajo práctico fue organizada sobre una secuencia de situaciones cuya caracterización se presenta en la Tabla I, algunas de las cuales ya se habían trabajado en las fases anteriores. En el trabajo práctico se requirió a los estudiantes (distribuidos en 4 grupos) que simulen con el software seleccionado y resuelvan las cuatro situaciones presentadas en la Tabla I. Se analizaron las producciones de los estudiantes, desde la perspectiva teórica de los Campos Conceptuales de Vergnaud.

TABLA I. Caracterización del Trabajo Práctico de simulación.

Situación	Objetivo	Conceptos requeridos
1: Represente el campo eléctrico mediante vectores de campo y líneas de campo.	Estudiar el campo eléctrico generado por cargas eléctricas en reposo, en particular, su representación, el reconocimiento y descripción de propiedades asociadas a dicha configuración.	Carga, fuerza eléctrica, campo eléctrico, principio de superposición, líneas de campo
2: Analice el campo eléctrico generado por una o más cargas puntuales.	Representar, determinar e interpretar el campo de cargas puntuales (distribuidas en forma discreta).	«Intensidad de campo» y su dependencia con la distancia y la carga generadora del campo.
3: Represente las regiones equipotenciales.	Interpretar las representaciones del potencial eléctrico y su variación espacial.	Relación entre las líneas de E y las superficies equipotenciales.
4: Se tienen cuatro cuerpos cargados de dimensiones pequeñas con cargas eléctricas de igual valor absoluto, el signo de ellas puede escogerse arbitrariamente. Hallándose ubicadas en los vértices de un cuadrado: a-Realice una representación de las distintas configuraciones espaciales de cargas con todas las posibilidades de signos de las cargas a adoptar. b-Analice y fundamente en qué punto o puntos colocarías una carga de prueba donde la fuerza resultante sobre la misma sea nula. c-Analice el tipo de equilibrio que experimenta la carga de prueba en cada caso.	Analizar la representación gráfica del campo eléctrico a través de las líneas de campo y su aplicación al estudio cuantitativo del mismo.	«Intensidad de campo» para una carga puntual y distribuciones de cargas puntuales.

IV. RESULTADOS

Se sintetizan, a continuación, los invariantes operatorios reconocidos en las interpretaciones de los estudiantes de las imágenes observadas y discutidas en el informe escrito e intervenciones orales.

TABLA II. Invariantes operatorios y reglas de acción inferidas de la resolución de la Situación 1.

Invariantes operatorios		Reglas de acción
Conceptos-en-acción	Teoremas-en-acción	
campo E vectores líneas de campo	- La intensidad y dirección del campo E en cada región se representa mediante vectores. - Analizar primero la pantalla con línea de campo para entender la representación con los vectores E superpuestos. - La representación con líneas de campo es mejor para cualquier distribución de cargas.	- Si la longitud del vector aumenta, el campo en ese punto es más intenso. - Si los vectores se superponen, analizo sólo la representación con líneas de campo. - La ventaja de la representación de líneas de campo E se hace evidente para más de cuatro cargas. - Para conocer la intensidad de campo, es suficiente con poner una superficie perpendicular a la figura y contar las líneas de campo que la atraviesan.

Situación 1: En la Tabla II se detallan los conceptos-en-acción, teoremas-en-acción y las reglas de acción que revelan los estudiantes en sus producciones

Se evidencia en el estudio la preferencia de los estudiantes por la representación en base a líneas de campo frente a la representación vectorial, en especial cuando se producen superposición de vectores debido a sus módulos; el reconocimiento. Asimismo en sus producciones se destaca la inmediata relación entre la intensidad de **E** y los valores de las cargas y de la distancia a ellas. Esta situación se ve favorecida por la rápida visualización en las pantallas de los cambios y posiciones de las cargas puntuales aisladas.

Situación 2: En la Tabla III se detallan los conceptos-en-acción, teoremas-en-acción y reglas de acción que emergieron del trabajo de los grupos.

TABLA III. Conceptos-en-acción, teoremas-en-acción y reglas de acción inferidas para la situación 2.

Invariantes operatorios		Reglas de acción
Conceptos-en-acción	Teoremas-en-acción	
carga puntual coordenadas campo E	- Las líneas de campo salen para cargas positivas. - Para dos cargas puntuales iguales el campo tiene simetría. - Con las líneas de campo reconozco la dirección y sentido de campo eléctrico porque es su tangente. - Donde las líneas se rechazan, hay campo nulo. - El análisis de un campo generado por una o dos cargas puntuales facilita inicialmente los cálculos.	- Si se traza la tangente a las líneas de campo, se encuentra el vector E. - Si una carga es muy chica frente a otra, casi no cambian las líneas de E. - Si dejo una carga fija y muevo la otra, las líneas de E cambian. - Si se ponen cargas puntuales alineadas obtengo el campo de una placa plana cargada. - Si se disponen las cargas siguiendo una línea circular cerrada se puede obtener el campo de una distribución esférica.

La posibilidad de modificar las posiciones de cargas de igual valor absoluto y ubicarlas en distintas posiciones favoreció que los estudiantes potencien la noción de simetría y visualicen singularidades en el comportamiento del campo eléctrico. Asimismo, se registró en el relato de los estudiantes el interés generado por las significativas modificaciones en las líneas de campo cuando se trabaja con cargas de distinto valor, tal como se observa en la Figura 1.

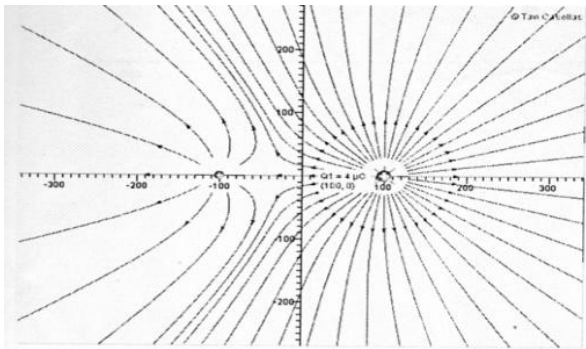


FIGURA 1. Pantalla con la simulación de las líneas de campo para dos cargas distintas (Situación 2).

También favorece la organización de configuraciones que simulan una placa plana cargada y una superficie esférica, a partir de la superposición de los campos de las cargas

individuales (Figura 2) como fuera realizado por un grupo y luego, frente a sus comentarios, replicado por otros.

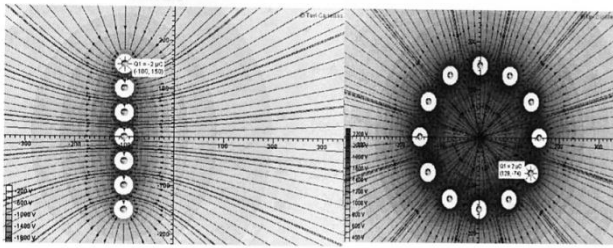


FIGURA 2. Pantalla con la simulación de una placa plana y una superficie esférica cargada (Situación 2).

Con la actividad de simulación los estudiantes reconocieron que la presencia de una carga de prueba en un campo eléctrico no altera la distribución de las cargas que crean el campo. Asimismo se observó la tendencia a introducir variadas modificaciones en las posiciones relativas entre cargas, entre sus valores y signos para visualizar anticipaciones emergentes de los participantes del grupo.

Reconocieron distintas configuraciones espaciales de cargas con diferentes posibilidades de signos y de valores a adoptar. También propusieron diferentes ubicaciones espaciales (Figura 3). El software favoreció que los estudiantes exploraran las correspondientes representaciones de campo eléctrico tanto mediante vectores como con líneas de campo eléctrico para dos o más cargas.

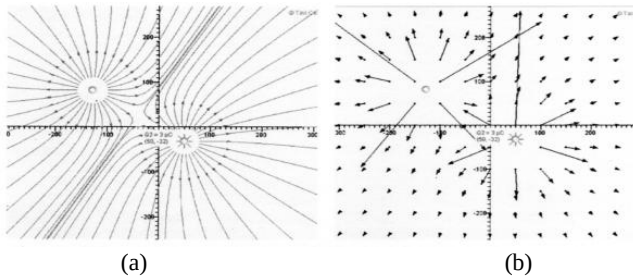


FIGURA 3. Representación del campo eléctrico mediante vectores y líneas de campo eléctrico para dos cargas iguales del mismo signo.

En el informe correspondiente al grupo 1, referido a las Figuras 3 (a y b), los alumnos argumentan:

“Vemos en la figura la representación del campo eléctrico mediante las dos formas que ofrece el simulador para la configuración de dos cargas puntuales iguales en magnitud y signo, a la izquierda vemos la representación mediante líneas de campo eléctrico y a la derecha la representación mediante vectores de campo. La ventaja que ofrece la primera es un gráfico agradable a la vista pero para su interpretación se deben tener un sólido conocimiento de los criterios por los cuales se rige esa

representación. La representación mediante vectores campo eléctrico permite ver de manera directa la intensidad y dirección del campo eléctrico en cada región, representada por la longitud o norma de cada vector supuesto están en la misma escala, pero a pesar de esta ventaja, los vectores superpuestos pueden resultar confusos y el dibujo difícil de interpretar en cuanto al impacto visual.”

En esta argumentación se evidencia una aproximación a interpretaciones más abstractas, dando significado a la representación de $\mathbf{E}$ mediante líneas de campo (Figura 3a) en función de su representación vectorial como tangente a la línea de campo en cada punto del espacio y de forma que cada uno de ellos dé la intensidad y la dirección en ese punto (Figura 3b).

También se observa la valoración realizada a las dos formas de representación de $\mathbf{E}$ con un criterio estético y otro conceptual-simbólico: la de la izquierda (a) es “agradable a la vista” pero demanda mayor carga cognitiva para interpretarla; la de la derecha (b) “... puede resultar confuso...” en un impacto visual, si bien “...permite ver de manera directa la intensidad y dirección del campo eléctrico en cada región...”. No explicitan la vinculación entre las dos representaciones.

Situación 3: En la Tabla IV se presentan los aspectos identificados en las producciones de los estudiantes. Su análisis da indicios que los estudiantes pueden verificar sus supuestos, con la visualización gráfica, tanto de la representación por líneas de campo como de la vectorial, para situaciones con más de dos cargas.

TABLA IV. Conceptos-en-acción, teoremas-en-acción y reglas de acción inferidas para la situación 3.

Invariantes operatorios		Reglas de acción
Conceptos-en-acción	Teoremas-en-acción	
campo $\mathbf{E}$ regiones equipotenciales	- El eje horizontal divide el campo de un dipolo en dos regiones simétricas. El eje vertical separa el plano en dos regiones equipotenciales. - Como hay regiones de potencial negativo y regiones de potencial positivo relacionados de manera directa, debe existir al menos un punto donde el potencial se anula. - Las regiones equipotenciales son perpendiculares a las líneas de campo $\mathbf{E}$ para distintas configuraciones.	- Si una fuerza mueve una partícula por una región que presenta el mismo color no realiza trabajo para vencer fuerzas eléctricas. - Si se ubican distintas configuraciones de carga en forma inmediata se tienen dibujadas las líneas de campo y las regiones equipotenciales en simultáneo.

Situación 4: En la Tabla V se muestran los conocimientos-en-acción reconocidos. El grupo 1 señala en referencia a la figura 4 que “la densidad de líneas de campo E que llegan a la carga negativa por la diagonal, muestra dos puntos que verifican la nulidad del vector campo E , estos puntos están próximos a la zona media de la imaginaria línea que une las cargas de igual signo”. De esta manera efectúa una lectura interpretativa de las líneas de campo y la posición donde se anularía el mismo.

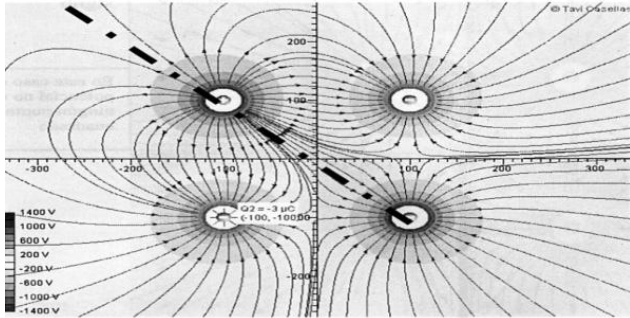


FIGURA 4. Pantalla con la simulación de líneas de campo para tres cargas negativas y una positiva

TABLA V. Conceptos-en-acción, teoremas-en-acción y reglas de acción inferidas en relación a la situación 4.

Invariantes operatorios		Reglas de acción
Conceptos-en-acción	Teoremas-en-acción	
cargas puntuales campo E potencial eléctrico	<u>Cuatro cargas positiva</u> - El potencial no puede anularse porque la suma del potencial eléctrico debido a cada carga puntual todos los términos son positivos.	- Si se rotan las cuatro cargas positivas, el campo eléctrico no se modifica sólo si las cargas son iguales. - Si se cambia la posición relativa entre cargas, el campo se modifica. - En la región formada por las cuatro cargas siempre hay una lectura del campo distinta de cero. - Si se analiza de a par consecutivo, el campo entre ellos es el de un dipolo - Si se analiza según la diagonal del cuadrado, el campo es el de cargas opuestas. - Si la densidad de líneas se reduce, el campo se atenúa. - Si las zonas donde se anula el potencial se halla en el límite de las superficies equipotenciales de las distintas cargas, el campo se anula en un punto sobre el 2do cuadrante en una recta de ecuación $y=-x$.
	<u>Dos positivas y dos negativas)</u> - Al igual que en el dipolo se verifica que el eje Y separa dos regiones equipotenciales que varían de negativo a positivo, esto demuestra que en algún punto o conjunto de puntos el potencial eléctrico debería ser cero.	
	<u>Dos positivas y dos negativas alternadas</u> - La configuración de las líneas de campo se pueden interpretar en función del campo de pares de cargas.	
	<u>Tres negativas una positiva</u> - La curvatura de las líneas de campo permiten encontrar los puntos donde el campo se anula.	

Sin embargo, la mayoría de los estudiantes reiteró su preferencia por la representación mediante líneas, encontrando confusas la vectorial, fundamentalmente en las posiciones donde se observan superposiciones relativas de vectores (Figura 5b).

Para las figuras 5 (a y b), correspondiente a la representación con seis cargas los integrantes del grupo 1 acompañan con el siguiente comentario:

“Para seis cargas de variados signos e intensidad distribuidas arbitrariamente en el plano XY, la representación de campo eléctrico generado por las cargas presentes mediante vectores de campo es una gráfica muy desordenada y difícil de interpretar, los vectores se presentan superpuestos. Mediante líneas de campo la representación mantienen cierto orden y se verifican claramente las zonas que están afectadas por el campo eléctrico y cuáles se ven poco afectadas o dónde el campo eléctrico puede resultar nulo o de poca intensidad”

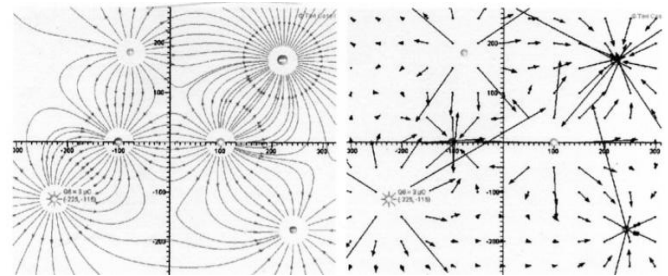


FIGURA 5. Representación del campo eléctrico mediante vectores de campo y líneas de campo eléctrico para seis cargas tres positivas y tres negativas (informe correspondiente al grupo 1).

El grupo 1 también expresa una valoración favorable para la representación mediante líneas de campo ya que la considera más ordenada y clara para una identificación de la forma en que es afectado cada punto del espacio para cualquier distribución de cargas. Los estudiantes distinguen con mayor claridad las zonas donde existe campo eléctrico y la dirección del mismo. Encuentran la representación vectorial (b) “...muy desordenada y difícil de interpretar...” haciendo alusión nuevamente a la confusión que se produce cuando los vectores se superponen.

En la Fig. 6 se presenta el caso particular del dipolo eléctrico analizado por el grupo 2:

Al respecto el grupo comenta:

“Vemos en la figura la configuración del dipolo que ofrece el simulador. Solicitamos del simulador la representación del campo y potencial eléctrico mediante líneas de campo y regiones equipotenciales respectivamente. Verificamos con esta figura donde suponíamos un plano en el cual todos los puntos del plano tienen, debido a la configuración dipolo, potencial nulo, siendo ese plano el XZ. El eje Y

separa dos regiones equipotenciales, una positiva y otra negativa, necesariamente el potencial debe valer cero. Vemos claramente definidas las regiones equipotenciales, en rojo intenso los potenciales más negativos y azul intenso los potenciales positivos. También en la figura vemos las líneas de campo eléctrico que representan el campo eléctrico en la región cercana al dipolo mostrado, es notable que las líneas de campo eléctrico atraviesan las líneas límites de las regiones equipotenciales y lo hacen siempre perpendicularmente a las mismas, también vemos que al cruzarlas lo hacen siempre en dirección desde una zona de mayor potencial a una de menor potencial. Tienen relación con el gradiente de la superficie en cuanto a su dirección en cada punto pero el sentido es contrario.”

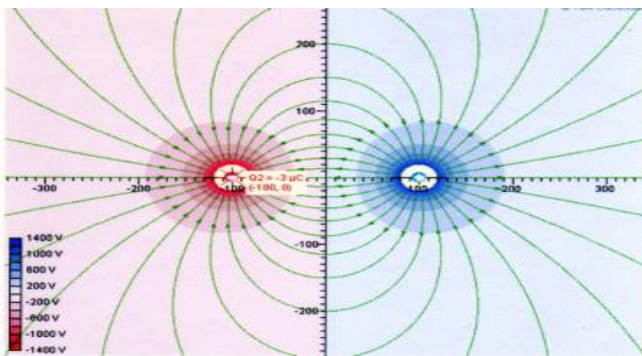


FIGURA 6. Representación del campo eléctrico mediante líneas de campo y regiones equipotenciales (intervalos de valores por densidad de colores) para un dipolo. Se muestra la proyección sobre el plano de la superficie equipotencial nula.

En el análisis del campo y potencial generado por cuatro cargas puntuales el grupo 2 comenta para la figura 7a:

“Para esta configuración planteada vemos en la figura dos regiones del plano en las cuales es notable la ausencia de líneas de campo eléctrico, lo cual hace suponer que el campo en esa región es muy débil. Esa región se encuentra en la mitad de la línea imaginaria que une cargas de igual signo. Si analizamos el campo debido sólo a las cargas de igual signo en el punto medio de la línea que las une, el campo eléctrico es nulo. Ahora agregamos el otro par y en ese punto el campo debido a estas últimas tiene como resultante un pequeño vector de componente ortogonal, de modo que desplazando la posición en sentido opuesto el primer par de cargas genera una componente según la misma dirección y sentido opuesto para anularlo. El mismo razonamiento para ambos lados nos resultan dos puntos en donde el vector campo eléctrico como suma de contribuciones de cada partícula cargada resulta nulo. En dichos puntos el potencial es no nulo. Al igual que el dipolo se verifica que el eje Y del gráfico separa dos regiones equipotenciales que varían de negativo (izquierda) a positivo (derecha)

esto demuestra que en algún punto o conjunto de puntos el potencial eléctrico debería ser cero. Efectivamente todos los puntos que pertenecen al plano YZ tienen potencial nulo debido a esta configuración.”

Para la figura 7b los estudiantes del grupo 2 analizan viendo dipolos consecutivos. También se detienen en considerar el campo en la región central de la configuración cuadrada de cargas, por cada par de cargas de igual magnitud y signo ubicadas en la dirección diagonal. En la descripción que realizan estos estudiantes sobresale la consideración de los puntos de potencial nulo en zona central, así como las observadas diferencias entre cuadrantes consecutivos.

“Es notable la ausencia de líneas de campo en el centro del cuadrado que en nuestro caso coincide con el origen de coordenadas. Efectivamente el campo eléctrico en esa región del plano se anula debido al par enfrentado sobre la diagonal. Analizando el potencial eléctrico para la configuración propuesta vemos que cada cuadrante tiene potencial distinto al que le sigue. Pasando de un cuadrante a otro existen puntos donde el potencial es cero, estos puntos coinciden en la figura con los ejes coordenados X –Y. Extendiendo al espacio el plano que coincide con el plano YZ y el plano XZ verifican para todos sus puntos el potencial nulo.”

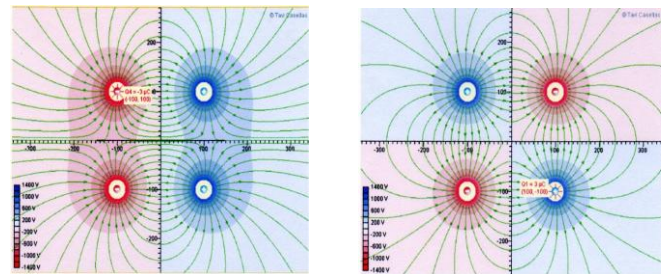


FIGURA 7. Representación del campo eléctrico mediante de líneas de campo y regiones equipotenciales (intervalos de valores por densidad de colores) para distintas configuraciones de 4 cargas (2 positivas y 2 negativas) (grupo 2).

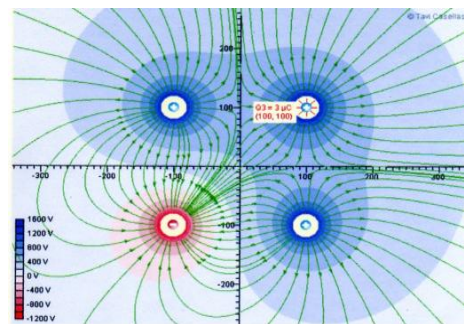


FIGURA 8. Representación del campo eléctrico mediante líneas de campo y potencial eléctrico generado cuatro cargas: tres positivas y una negativas (grupo 2). Se observó que el grupo 2 organizó diferentes configuraciones de cargas propuestas en una actividad de la

fase II, una de las cuales se muestra en la Figura 8. Esto permitió registrar la manera en que el software de simulación cumplió con el objetivo de validar, mediante la visualización gráfica, el razonamiento realizado por los estudiantes oportunamente.

Con la visualización del campo y potencial eléctrico generado por las distintas configuraciones de cuatro cargas puntuales, solicitadas en el trabajo práctico, los estudiantes tuvieron la oportunidad de obtener una representación tridimensional girando la figura en torno del eje de simetría.

V. CONCLUSIONES

Las acciones identificadas en la realización de las simulaciones dan indicios de procedimientos organizados desde anticipaciones, emergentes de enfoques teórico-prácticos trabajados en clases previas, a fin de estudiar comportamientos de configuraciones de cargas con complejidad creciente. Los registros muestran que las situaciones propuestas fueron enriquecidas por los estudiantes [20], quienes no se limitaron a situaciones estáticas de cargas variables en signo y valores, sino que analizaron efectos sobre el campo eléctrico $\mathbf{E}$ y en el potencial eléctrico de cargas en movimiento. Estas acciones les han exigido un mayor nivel de comprensión, lo cual se ve reflejado en sus escritos con la construcción de representaciones cada vez más diferenciadas.

El uso de la simulación ha contribuido a organizar el concepto de campo eléctrico, integrando a la representación mediante las líneas de campo, el significado como campo vectorial a través de la imagen del vector tangente a ellas en cada punto. Se evidencia que han integrado los conocimientos de campo y potencial eléctrico a través de sus informes. La resolución de los aspectos involucrados en la actividad fue mayor que el utilizado en las prácticas habituales, dado que los estudiantes debieron adaptarse a otra metodología en el desarrollo del trabajo práctico con el simulador a la cual no estaban habituados. Si bien esto constituyó una dificultad inicial, la motivación y la familiaridad con el ordenador contribuyeron a la adaptación.

La modelización del campo eléctrico y magnitudes asociadas implica el dominio, de los alumnos, de herramientas matemáticas tales como la divergencia y el gradiente de un campo vectorial que están aprendiendo casi simultáneamente en asignaturas de Matemática. La representación mediante líneas de campo y la vectorial asociada constituyen buenos recursos para visualizar el significado de divergencia, considerando el flujo neto a través de superficie arbitrariamente orientadas. La representación mediante vectores obtenida en la simulación se constituye en un auxiliar importante para analizar las variaciones del campo $\mathbf{E}$ según distintas direcciones, identificar entre ellas la que reviste el carácter de máxima variación, de modo de vincular sobre esta interpretación de la imagen el significado del gradiente de $\mathbf{E}$. En este sentido se puede resaltar el carácter integrador de la experiencia, que incluye el análisis e interpretación de gráficos en dos y

tres dimensiones, promoviendo articular las habilidades adquiridas en los cursos de Análisis Matemático a los conceptos físicos.

La identificación de esquemas para una clase definida de situaciones significó un avance hacia la identificación del campo $\mathbf{E}$. Así, la interpretación efectuada por los estudiantes de las imágenes da indicios de la organización cognitiva lograda por los mismos, con rasgos de lo que Vergnaud define como esquema. Uno de los resultados de esta investigación ha sido reconocer el esquema que podría denominarse de “dipolos consecutivos” aplicado por algunos estudiantes para inferir el campo en la región central de una configuración cuadrada de cargas. Éste consiste en identificar cada par de cargas que conforman dipolos en la configuración, organizar las líneas de campo correspondientes e integrarlas recurriendo a un principio de superposición. El trabajo práctico de simulación mostró su eficacia para promover una evolución en el pensamiento de los alumnos hacia una comprensión de los conceptos involucrados. En este sentido se reconoce el aporte positivo del software de simulación para el aprendizaje conceptual, concordando con los resultados obtenidos por Araujo, Veit y Moreira [21] quienes también señalan las posibilidades de interacción y visualización ofrecidas por este tipo de actividades como estrategia de enseñanza.

REFERENCIAS

- [1] Sandoval, M. y Mora C., *Modelos erróneos sobre la comprensión del campo eléctrico en estudiantes universitarios*, Lat. Am. J. Phys. Educ. **3**, 647-655 (2009).
- [2] Escudero C. y Jaime, E., *Elementos para la conceptualización de la noción de cuerpo rígido en la resolución de un problema integrativo*, Memorias XIII Reunión de educación en Física (REF XIII), Río cuarto (Córdoba, Argentina) (2003)
- [3] Furió, C. y Guisasola, J., *La enseñanza del concepto de campo eléctrico basada en un modelo de aprendizaje como investigación*, Enseñanza de las Ciencias **19**, 319-334 (2001).
- [4] Greca I. M^a y Moreira, M. A., *Além da detecção de modelos mentais dos estudantes: uma proposta representacional integradora*, Investigações em Ensino de Ciências **7**, 2 (2002).
- [5] Guisasola, J., Ceberio, M., y Zubimendi, J. L., *El papel científico de las hipótesis y los razonamientos de los estudiantes universitarios en resolución de problemas de Física*, Investigações em Ensino de Ciências **8**, 211-229 (2003)
- [6] Lllancanqueo, Caballero, C. y Moreira, M. A., *El aprendizaje del concepto de campo en física: una investigación exploratoria a luz de teoría de Vergnaud*, Revista Brasileira de Ensino de Física **25**(4), (2003)
- [7] Moreira, M. A. y Greca, I., *Cambio conceptual: análisis crítico y propuestas a la luz de la teoría del aprendizaje significativo*, Ciência & Educação **9**, 301-315 (2003).
- [8] Pocoví, M. C. y Hoyos, E., *Estudio de caso de la comprensión de diferencia de potencial y fem en alumnos*

avanzados y graduados en física, *Investigações em Ensino de Ciências* **9**, 37-348 (2004).

[9] Solano, F., Gil, J. Pérez, A. L. y Suero, M. I., *Persistencia de Preconcepciones sobre los Circuitos Eléctricos de Corriente Continua*, Brasileira de Ensino de Física **24**, 460-470 (2002).

[10] Alzugaray, G., Capelari, M. y Carreri, R., *La potencialidad didáctica de los materiales curriculares: categorías para evaluar la incorporación de software en la enseñanza de las Ciencias Experimentales*, Revista Científica del Instituto Latinoamericano de Investigación (ILIE), 1850-1974 (2006).

[11] Alzugaray, G., Capelari, M. y Carreri, R., *La evaluación de software en la enseñanza de la Física: criterios y perspectivas teóricas*. Revista Científica del Instituto Latinoamericano de Investigación (ILIE), 3(11), <http://www.cognición.net> (2007).

[12] Moreira, M. A., Organizador. La Teoría de los Campos Conceptuales de Vergnaud, La Enseñanza de las Ciências y La Investigación en el área. Instituto de Física Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. Textos de apoyo (2004).

[13] Vergnaud, G., *La Teoría de los campos Conceptuales*, Recherches en Didactique des Mathématiques **10**, 133-170 (1990).

[14] Rodríguez Palmero, M. L., La Teoría del Aprendizaje Significativo Proc. of the First Int. Conference on Concept Mapping. Pamplona, Spain (2004).

[15] Vergnaud, G., Multiplicative structures. In Lesh, R. and Landau, M. (Eds.) *Acquisition of Mathematics Concepts and Processes*, (Academic Press Inc., New York, 1983), pp. 127-174.

[16] Vergnaud, G., Teoría dos campos conceituais. In Nasser, L. (Ed.) *Anais do 1º Seminário Internacional de Educação Matemática do Rio de Janeiro*, (1993) pp.1-26.

[17] Rodríguez Palmero, M. L. y Moreira, M. A., *La teoría de los campos conceptuales de Vergnaud, la enseñanza de las ciencias y la investigación en el área*, Investigaciones em Ensino de Ciências **7**(1), Art 1 (2002).

[18] Feymann, R., Leighton, R. y Sands, M., *Física vol II Electromagnetismo y materia*, (Fondo Educativo Interamericano, EE:UU, 1987).

[19] Marquès Graells, P., *Plantilla para la catalogación multimedia*, (Universidad Autónoma de Barcelona, Barcelona, España, 2001).

[20] Moreira, M. A., *Aprendizaje significativo, campos Conceptuales y pedagogía de la autonomía: implicancias para la enseñanza*, Revista em Aprendizagem Significativa **2**, 44-65 (2012).

[21] Araujo, I. S., Veit, E. A. y Moreira, M. A., Simulações computacionais na aprendizagem da Lei de Gauss para a eletricidade e da Lei de Ampère em nível de Física Geral, Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias **6**, 601-629 (2007).

The Wimshurst machine as an electric circuit



Horacio Munguía Aguilar

*Departamento de Física, Universidad de Sonora,
Calle Rosales y Blvd. Transversal, Hermosillo, Son. 83000*

E-mail: hmunguia@correo.fisica.uson.mx

(Received 30 September 2013, accepted 16 February 2014)

Resumen

Se muestra una forma alternativa de visualizar la operación de una máquina de Wimshurst por medio de un circuito eléctrico equivalente. Este circuito traslada el concepto de la inducción electrostática cruzada presente en los discos de la máquina en términos de elementos de circuito conocidos. Se muestra un análisis sucinto de este circuito.

Palabras clave: Máquina de Wimshurst, generador electrostático, circuito equivalente.

Abstract

It is shown an alternative way to view the operation of the Wimshurst machine using an equivalent electrical circuit. This circuit translates the idea of cross-couple electrostatic induction present in the machine disks in terms of known electric circuit elements. A brief analysis of the circuit is offered.

Keywords: Wimshurst machine, electrostatic generator, equivalent circuit.

PACS: 41.20.Cv, 01.40.-d, 84.32.Tt, 84.30.Bv

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCTION

The Wimshurst machine is one of those devices with extensive presence in all basic electricity laboratories. For the generation of electrostatic charge it is preferred for its simplicity, reliability and elegance. Unlike the Van de Graaff generator, their maintenance problems are lower. Ironically, however, the main problem in the context of teaching is that its operating principle is more difficult to explain than that of the Van de Graaff generator.

The operation of a Wimshurst machine in any of its version is based on two concepts: charge transfer by electrostatic induction and charge storage in a capacitor. A third idea allows the operation of a Wimshurst machine: electrostatic regeneration or, in modern terms, positive electrical feedback.

We are not going to provide an exhaustive description of the functioning of the Wimshurst machine ever since there are many good references thereon [1, 2]. We will just summarize the essential features of its operation and then transfer these to an equivalent electrical circuit that we consider will improve their understanding

II. WIMSHURST MACHINE OPERATION

Even though there are several versions of the Wimshurst machine, we will focus on one of the best known which is shown in figure 1.

The classic Wimshurst machine consists of two nonconductor parallel discs rotating in opposite directions on a common shaft driven by a crank. These discs have

attached on their external sides a series of radially oriented metal strips. The inner plate of two Leyden bottles makes contact with the strips through brushes which serve as commutator as the discs turn. (Other models do not use brushes but an inductive comb). From these plates come out two rods whose ends generate high voltage sparks when they are close enough. The outside bottles plates make contact through a grounded wire. Each disc has a crossed metal rod which joins the strips diametrically placed by means of brushes. The rods are named neutralizers rods. This rods looks like an X when looked from the front side. Figure 2 shows an outline from the machine: the front disc with their stabilizer rod Y-Y'; the rod Z-Z' is from the rear disc.



FIGURE 1. The classic Wimshurst machine.

Let's suppose that there is initially some charge $+Q_0$ in a strip from the front disc and other charge $-Q_0$ in the

<http://www.lajpe.org>

matching strip from the rear disc. When the discs start rotating, the charged strips induce charge with opposite sign upon the front strips crossing their way. When these strips touch the brush from their respective rods, it is neutralized with the charge coming from the strip in the far end from the same disc; at the same time, the corresponding strips from the other disk induce charge over the neutralized strips bringing their polarity reversed and their magnitude amplified. As the discs turn, strips progressively accumulate more and more charge. We then have a cyclical process in which half the strips from each disc alternate their polarity as they touch the ends of their neutralized bars. The right bottle accumulate positive charge as its brush make contact with the right side strips from both discs, and the left bottle accumulate negative charge as its brush make contact with the left side strips from both discs. When the charge density in the output electrodes becomes sufficiently high, a dielectric breakdown is produced and a spark is generated. It should be noted that the charge increase in the Leyden bottles comes from two facts: the steady charge transfer coming from the strips, and the continuous increase in the magnitude of these charges due to the regeneration carried out by the neutralizer bars. So, this is the basic qualitative explanation of the operation of the Wimshurst machine.

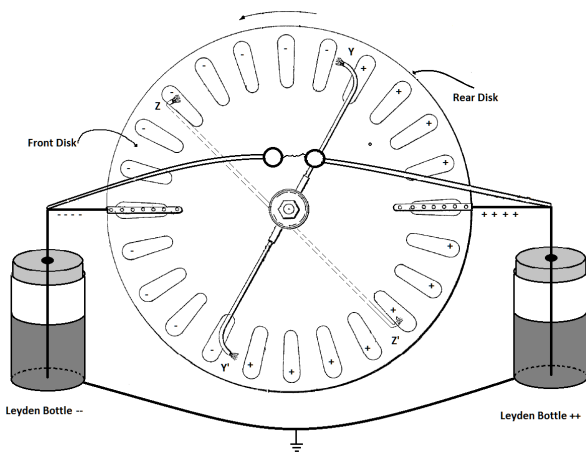


FIGURE 2. Outline of the Wimshurst machine.

III. THE EQUIVALENT CIRCUIT

It is possible to make a mathematical analysis of the physical behavior of a Wimshurst machine based only on the description of their induction and charging mechanisms already described, but this is not an easy job to do neither to explain [3]. On the other hand, it would seem strange to assume that the Wimshurst machine can be represented as an electrical circuit. No structure can be seen containing neither current nodes nor closed paths; nevertheless, it can be assumed that its elements are capacitors in a periodic switching process.

Since the Leyden bottles in a Wimshurst machine are capacitors which are periodically recharged through the

metal strips of the discs and these, in turn, may be considered as capacitors given that they store charges, it would be natural to consider the Wimshurst machine outputs as a capacitor C which is charged periodically by smaller capacitors C_i . The latter refer to the capacitance between each strip and ground.

In order to represent the charge mechanism we will make use of the circuit shown in figure 3. In this, we have a capacitor C with an initial charge Q been recharged by another capacitor C_i which carry a charge Q_0 ; the recharge – charge transfer- is made through the switch S .

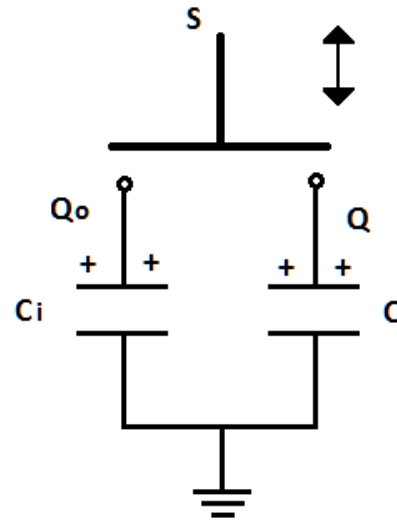


FIGURE 3. Recharging capacitor C from another capacitor C_i .

The corresponding capacitor voltages are $V=Q/C$ and $V_i=Q_0/C_i$. When the switch S closes the capacitors they stay in parallel and redistribute their charge. Their common voltage will become:

$$V = \frac{Q + Q_0}{C + C_i} \quad (1)$$

If $C \gg C_i$ the voltage increase will be:

$$\Delta V = \frac{Q_0}{C} \quad (2)$$

If now the switch S opens, capacitor C will be left with a voltage gain given by equation (2). Again, if capacitor C_i is recharged with a similar charge Q_0 and the process is repeated closing and opening the switch, the voltage gain will be twice the indicated by equation (2). After repeating this process n times the final voltage increase in capacitor C will be:

$$\Delta V(n) = n \frac{Q_0}{C} \quad (3)$$

Obviously, the charge gain is nQ_0 . Note that if the condition $C \gg C_i$ is not fulfilled the voltage gain may not occur. All would depend on the magnitude of Q_0 .

Now, look at the circuit in figure 4 showing the connections between the Leyden bottle, capacitors C_p and C_n , and the metal strips represented by capacitors C_x and C_y . Capacitors C_x are the strips touching C_p via brushes represented by rotary switch S_p ; capacitors C_y are the strips touching C_n via brushes represented by rotary switch S_n .

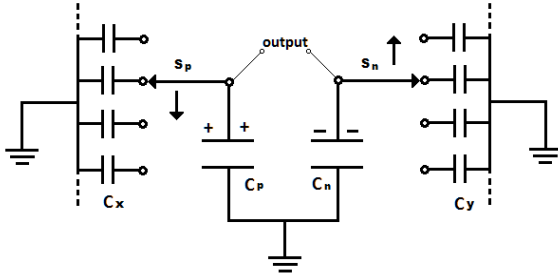


FIGURE 4 Switching process between the metal strips and the Leyden bottles.

This circuit shows that the charging process of C_p and C_n is similar to that shown in figure 3; the only difference is that in this case these capacitors receive charge from multiple capacitors in a switching sequence: C_x in one end and C_y from the other.

Let's suppose that the strips carry a constant charge Q_0 , that the disc rotation frequency is F turns per second and that there are m strips per disc; therefore the voltage increase in capacitors C_p and C_n per second, according to equation (3) will be:

$$\Delta V = mF \frac{Q_0}{C}. \quad (4)$$

Which corresponds to an increase in charge of mFQ_0 every second. This increased charge can be viewed as a current injection i taking place in the output capacitors. The current magnitude is

$$i = mFQ_0. \quad (5)$$

In order to include the injection process and the resultant voltage increase in capacitors C_p and C_n we will change the inducer capacitors C_x and C_y and the switch by a current source as can be seen in figure 5.

Taking into account that in a capacitor $i = C dV/dt$, the current source produces a linear incremental voltage provided that mFQ_0 remains constant.

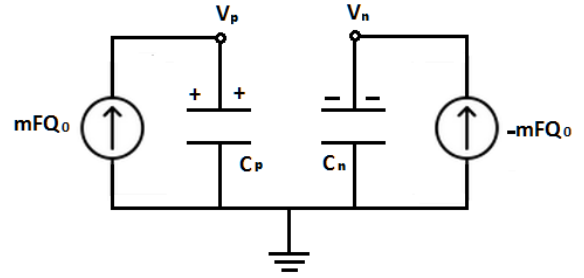


FIGURE 5 Equivalent circuit using current sources.

Remember that Q_0 is an initial charge on any strip whose magnitude change by the induction process. This means that the charge Q_0 from the current sources is not constant but time varying because they interact with the opposite capacitor voltages. In order to include this process in the circuit, we will have to recall that in the induction process, capacitors C_x and C_y interact with each other through their mutual capacitance in a sequential process. The induced charge magnitude depends, among other factors, from the inducer strip's voltage. Since this potential –referred to ground– is approximately equal to the output voltage capacitor (C_p or C_n), we can say that Q_0 in the current sources must be changed to other one proportional to the capacitor voltage. This means that we have a new charge $Q'_0 = kV_C$, where V_C is the voltage capacitor and k is a constant which depends of the strip area, the strips separation and other factors. Therefore, the current sources from figure 6 are really **voltage dependent current sources**. The left source depends from the voltage V_n and the right source depends from voltage V_p . Their current magnitude is thus

$$i = mkFV_C. \quad (6)$$

The final circuit is shown in figure 6.

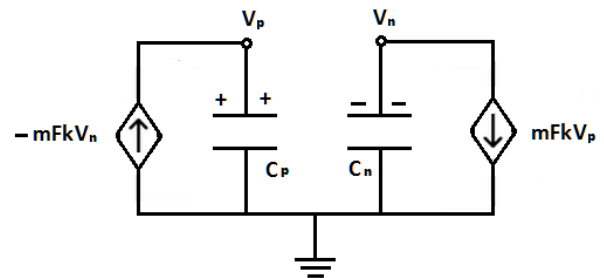


FIGURE 6. Wimshurst machine equivalent circuit.

The negative sign in the left source gives the correct polarity in the capacitor C_p . These dependent current sources clearly illustrate the feedback mechanism present in the Wimshurst machine.

It is possible to foresee that voltages V_p and V_n will increase exponentially if the capacitors have some initial charges. As we have shown, with a constant current source applied to a capacitor the voltage will increase linearly. But if the sources are not constant but increases with time, the voltage increases faster than linear. In fact, if the circuit is solved, it can be shown that V_p and V_n grow in a hyperbolic way. Figure 7 shows the circuit solution for V_p with symmetric initial condition and $C=1nF$, $V_p(0)=1, V_n(0)=-1v$ and $mFK=10^{-9}$

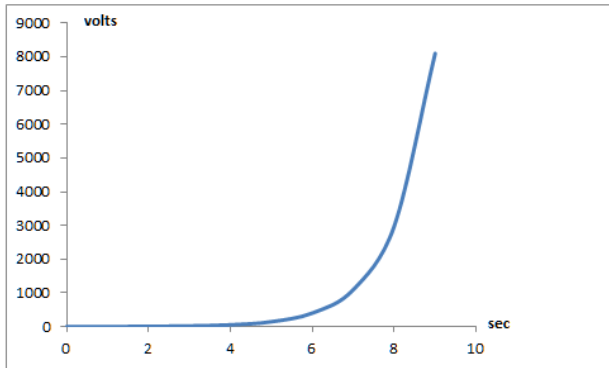


FIGURE 7. The hyperbolic voltage behavior of V_p

This solution is

$$V_p(t) = \text{Cosht} + \text{Senht} \cdot \quad (7)$$

The circuit shown represents only an approximation to the real behavior of the Wimshurst machine. Some secondary facts that have not been considered are:

- The induced charge in a strip is not only due to the front strip but from the adjacent strips.
- In all the capacitors considered there is some leakage charge.

- The strip's capacitances are not really constant.

IV CONCLUSION

The high voltage generation process in a Wimshurst machine involves three interrelated concepts: electrostatic induction, capacitor recharge and electric feedback. When these ideas are translated to an electric circuit containing capacitors, switches and current sources it is possible to improve the comprehension of the operation of this apparatus and facilitate their analysis. The circuit shown meets these characteristics and also allows quantitative assessment of their performance.

REFERENCES

- [1] De Queiroz A. C. M., *Operation of the Wimshurst Machine* (2007), <http://www.coe.ufri.br/~acmq/whyhow.html> Consulted: September 03, 2013
- [2] Masluk, N. A; *How a Wimshurst Machine Works*; http://www.randombytes.net/files/wimshurst_machine.pdf Consulted: September 05 2013
- [3] Simon, A. W., *On the Quantitative Theory of Electrostatic Systems*; Phys. Rev. **28**, 111-117 (1926)
- [4] Simon, A. W., *On the Quantitative Theory of the Wimshurst Static Machine*; Rev. Sci. Instrum. **4**, 67-74 (1933).
- [5] Zahn, M., Goslin, R. L. and Wicks, L. F., *Self-Excited, Alternating, High-Voltage Generation Using a Modified Electrostatic Influence Machine*, American Journal of Physics **42**, 289-294 (1974).

Tráfico de vehículos con autómatas celulares

EDV CATIO PHYSICORVM



Ramón Sebastián Salat Figols

Departamento de Matemáticas, Escuela Superior de Física y Matemáticas, Instituto Politécnico Nacional. Unidad Profesional "Adolfo López Mateos", Edificio 9, San Pedro Zacatenco, C.P 07730 México, D.F.

E-mail: rsalat@esfm.ipn.mx

(Recibido el 15 de Diciembre de 2013, aceptado el 28 de Marzo de 2014)

Resumen

En este trabajo se analiza el comportamiento del modelo de Nagel y Schreckenberg de autómatas celulares para el tráfico de vehículos en un solo carril. Se observa que el modelo, en general, explica bien el tráfico de vehículos; se hace notar que las aceleraciones de los vehículos que predice el modelo están fuera del rango de los valores que se encuentran en la práctica. Se propone un nuevo modelo para resolver este problema y se estudia su comportamiento.

Palabras clave: Autómata celular, tráfico de vehículos, simulación de Monte Carlo.

Abstract

The behavior of cellular automaton model of Nagel and Schreckenberg for vehicle traffic in a single lane, is analyzed in this paper. It is observed that the model generally explain well vehicular traffic, it is noted that the accelerations of the vehicles that are predicted by the model are outside the range of values found in practice. A new model to solve this problem is proposed and its behavior is studied.

Keywords: Cellular automaton, traffic flow, Monte Carlo simulation.

PACS: 05.10.Ln, 07.05.-t, 07.05.Tp, 07.70.-c

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

En 1992, Nagel y Schreckenberg [1], presentan un modelo para el tráfico de vehículos en una autopista de un solo carril. En el modelo, se divide el tiempo en pequeños intervalos iguales y en cada uno de ellos, se actualizan las posiciones y las velocidades de los vehículos simultáneamente. Se supone que la autopista tiene un solo carril y que está dividida en celdas iguales, de tamaño tal, que en cada una de ellas a lo más cabe un vehículo. Se define el espacio entre dos vehículos consecutivos, esp , como el número de celdas vacías que hay entre los dos. Si v es la velocidad de un vehículo cualquiera al inicio de un intervalo de tiempo, entonces su velocidad al inicio del siguiente intervalo de tiempo se calcula de acuerdo a las siguientes reglas:

- 1) Si $v < v_{max}$ y $v < esp$, entonces la velocidad del vehículo al inicio del siguiente intervalo de tiempo será $v+1$.
- 2) Si $v > esp$, entonces la velocidad del vehículo al inicio del siguiente intervalo de tiempo será esp .
- 3) Se genera un número aleatorio r , entre 0 y 1. Si $r < p$, donde p es algún número constante, también entre 0 y 1, entonces la velocidad del vehículo al inicio del siguiente intervalo de tiempo será $v-1$.
- 4) El vehículo avanza v celdas hacia adelante.

La cuarta regla, otorga un carácter aleatorio al fenómeno.

El algoritmo dado por las reglas de 1 a 4 puede ejecutarse en una hoja de cálculo con el fin de poder observar detalladamente cómo opera, por ejemplo, para fines didácticos. Si se ponen las velocidades y las posiciones iniciales en las columnas D y E, se pueden utilizar las siguientes fórmulas:

$$\begin{aligned} F2 &:= E3 - E2 - 1 \\ G2 &:= \text{IF}(Y(D2 < \$A\$3, D2 < F2), D2 + 1, D2) \\ H2 &:= \text{IF}(G2 > F2, F2, G2) \\ I2 &:= \text{IF}(\text{AND}(\text{RANDOM}() < \$A\$2, H2 > 0), H2 - 1, H2) \\ J2 &:= I2 = J2 + E2 \end{aligned} \quad (1)$$

Estas fórmulas deben colocarse en la fila 2 y reproducirse hacia abajo. La primera fórmula calcula el espacio entre dos vehículos; la segunda, la tercera y la cuarta, aplican las reglas 1, 2, 3 y 4, respectivamente. El uso de la hoja de cálculo tiene la ventaja de que pueden analizarse de manera minuciosa los primeros movimientos de los vehículos, utilizando, por ejemplo, el formato condicional de las celdas. En la figura 1, se observan las posiciones de 10 vehículos durante 7 intervalos de tiempo. Cada columna contiene las posiciones de los vehículos en un instante de tiempo y la columna siguiente a la derecha, contiene las

posiciones en el siguiente instante de tiempo. Las celdas sombreadas corresponden a las que están ocupadas por un vehículo.

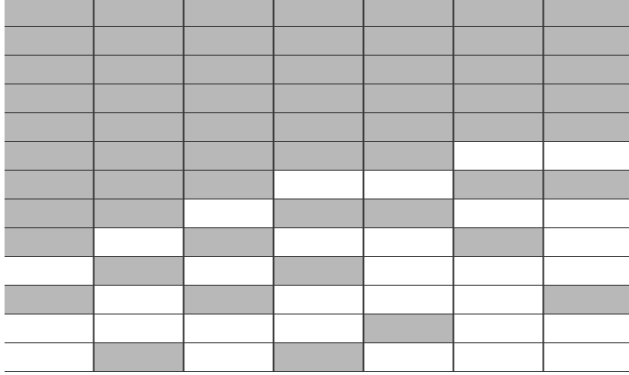


FIGURA 1. Posiciones de 10 vehículos durante 7 intervalos de tiempo. El movimiento es hacia abajo.

En la Figura 2, se presenta la gráfica de la posición contra el tiempo de diez vehículos; en ella puede observarse la formación de un congestionamiento, aproximadamente a 25 celdas del origen. Alrededor de este punto puede observarse que la velocidad de los vehículos baja considerablemente. Este fenómeno es consecuencia del carácter estocástico del modelo, que introduce la regla 3.

En todas las simulaciones que se efectúan en adelante, se supone que los vehículos se mueven en una circunferencia de longitud L . Tomando L grande comparado con las posiciones iniciales de los vehículos, estamos aproximadamente, en un sistema abierto, no acotado.

En la Figura 3 puede observarse las posiciones contra el tiempo, obtenidas por simulación, de 500 vehículos, durante 500 intervalos de tiempo. La velocidad máxima, se consideró de $5 \text{ celdas / unidad de tiempo}$ y $p = 0.3$. Los 500 vehículos se colocaron inicialmente uno tras de otro, sin espacio entre ellos y con velocidad cero. L se tomó como $100,000 \text{ celdas}$. La simulación se realizó con un programa en C++. Es importante aclarar que es usual en los artículos de simulación de tráfico de vehículos con autómatas celulares, invertir el sentido del eje t e intercambiar los ejes de posición y tiempo. En este artículo, se consideran a los ejes de posición y tiempo como es usual durante el estudio de la mecánica.

Uno de los aspectos importantes para validar el modelo es la relación entre el flujo y la densidad que produce. La densidad en una celda durante un intervalo de tiempo de longitud T se define como el número de instantes en los que la celda está ocupada por un vehículo, dividido entre T . Y se define al flujo en una celda en el mismo intervalo de tiempo, como el número de vehículos que pasan por la celda durante el intervalo de tiempo, dividido entre T .

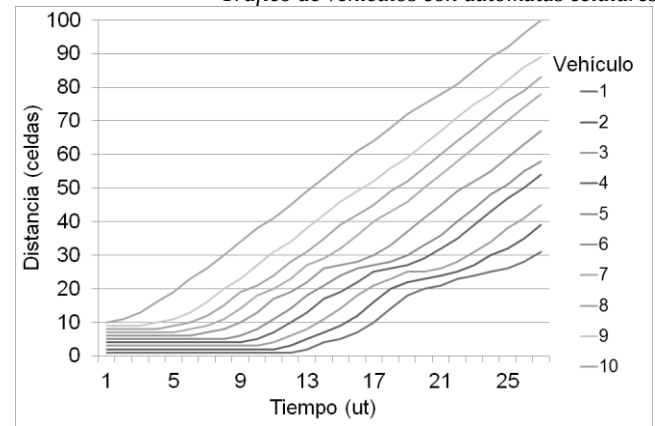


FIGURA 2. A una distancia aproximada de 25 celdas, se observa un congestionamiento que afecta a los últimos cinco vehículos.

Se simuló el movimiento de 500 vehículos, con $v_{\max} = 5 \text{ celdas / ut}$, $p = 0.3$ y $L = 100,000 \text{ celdas}$, 100,000 veces; en cada una de ellas se seleccionó una celda aleatoriamente y se tomaron mediciones de la densidad y del flujo. En la figura 4 se muestran los resultados.

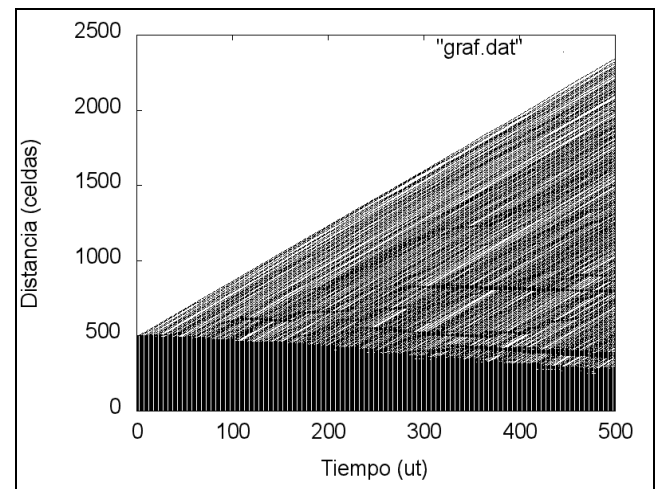


FIGURA 3. Entre las distancias de 500 y 1000 celdas se observan varias líneas oscuras con pendiente negativa, que representan congestionamientos que se propagan hacia atrás.

Otro aspecto importante de la validación es otorgar valores a los parámetros para producir resultados consistentes con los que se obtienen en el tráfico de vehículos. Nagel y Schreckenberg [1], consideran al tamaño de la celda como de 7.5 m. , el tiempo entre dos instantes consecutivos como de 1 s. Con éstos valores, la simulación generada produce valores para la velocidad media alrededor de $4.5 \text{ celdas / unidad de tiempo}$, que se convierte en 120 km. / h. , lo cual, es razonable.

Sin embargo, la regla número 2 ocasiona que existan desaceleraciones de -4 celdas/ut^2 , que se convierte en -30 m./s.^2 . Según Kumar y Shidhar [2], la máxima desaceleración (en valor absoluto) observada para un auto en una autopista es de -1.625 m./s.^2 , cuando su velocidad está entre 98 y 100 km/hr. La aceleración máxima producida por el modelo es de 1 celdas/ut^2 , que se convierte en 7.5 m./s.^2 . Según Mehar, Chandra y Velmurugan [3], la máxima aceleración observada en una autopista es de 2.5 m./s.^2 . Como puede observarse los datos proporcionados por el modelo en cuanto a las aceleraciones mínima y máxima, se alejan bastante de los valores observados.

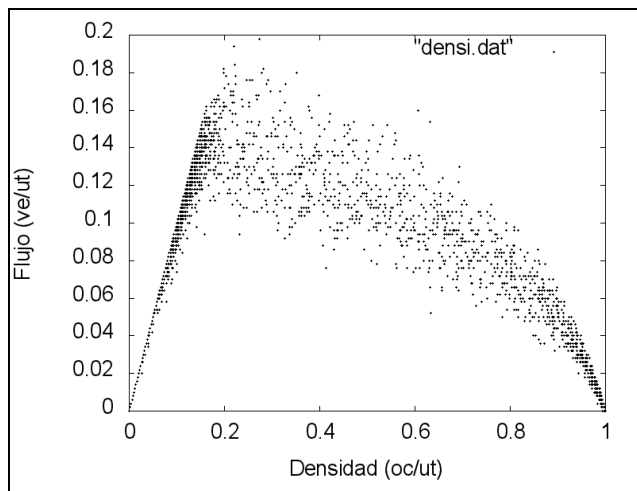


FIGURA 4. Para valores pequeños de la densidad, el flujo aumenta en forma lineal con la densidad. Pero cuando el flujo toma su valor máximo, entonces éste disminuye al aumentar la densidad. Esta propiedad está en congruencia con los datos reales.

II. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DEL MODELO

La regla número 2 del modelo, no permite velocidades superiores al espacio entre el vehículo y el que esté enfrente, provocando disminuciones bruscas de velocidad. La idea es proponer un modelo en el que la velocidad solo pueda cambiar en una unidad de un instante de tiempo al siguiente.

Supongamos que entre dos instantes consecutivos de tiempo, la velocidad solamente puede disminuir en una unidad. Si la velocidad en el primer instante de tiempo es v , en el segundo $v-1$, en el tercero $v-2$, ..., etc. Después de $v+1$ instantes de tiempo, la velocidad será 0, y el vehículo habrá recorrido una distancia $v+(v-1)+\dots+(v-(v-1))$, es decir, $(v^2+v)/2$. Ésta es la distancia que requiere el vehículo con velocidad v para detenerse si en cada lapso de tiempo, disminuye en una la velocidad. Además, el tiempo que tarda en detenerse es $v-1$. Si un vehículo disminuye la velocidad de una unidad

en una unidad, para no chocar con un objeto a una distancia d , debe cumplir la condición $(v^2+v)/2 < d$. Bajo estas consideraciones, se propone el siguiente modelo:

- 1) Si $v < v_{\max}$ y $v^2+v < 2esp$, entonces v se incrementa en 1.
- 2) Si $v^2+v > 2esp$, entonces v disminuye en 1.
- 3) Si $r < p$, $v > 0$ y v no disminuyó en 2, v disminuye en una unidad.

La hoja de cálculo es un instrumento útil para comparar el comportamiento de los dos modelos. En una hoja de cálculo se programaron los dos modelos utilizando $p=0.3$ y $5 \text{ celdas/unidad de tiempo}$ como velocidad máxima, y se compararon los comportamientos de ambos, para el caso en que un vehículo se encuentra inicialmente en la posición cero, y en una posición igual a 100, hay otro vehículo detenido. En la tabla 1 se presentan las posiciones y velocidades obtenidas por los dos modelos, considerando los siete últimos intervalos de tiempo. Como puede observarse, con el modelo NaSch, hay una fuerte disminución de la velocidad del intervalo 5 al 6; esto no ocurre con el modelo propuesto.

TABLA I. Tamaño promedio de partículas como función de la molienda

	Modelo NaSch		Modelo alternativo	
Tiempo	Vel.	Pos.	Vel.	Pos.
0	5	78	5	80
1	4	82	5	85
2	4	86	4	89
3	5	91	4	93
4	4	95	3	96
5	4	99	2	98
6	0	99	1	99
7	0	99	0	99

En la figura 5, se observan las posiciones de 500 vehículos, durante 500 intervalos de tiempo. Se tomaron $p=0.3$ y $5 \text{ celdas/unidad de tiempo}$ como velocidad máxima. Si se comparan las gráficas de las figuras 3 y 5, se observa que en 3 aparecen congestionamientos, que avanzan hacia atrás, mientras que en 5, no se observan o son menos notorios; pero ésta aparente diferencia de comportamiento solamente se da cuando L es grande comparado con nv . En general, con éste modelo, el tráfico se observa más uniforme; existen varias zonas de diferente densidad, que se van expandiendo durante el arranque de los vehículos. Con el primer modelo, la velocidad media fue de 4.71 celdas/ut. , mientras que con el segundo fue de 4.42 celdas/ut. Estos valores se obtuvieron simulando el movimiento de 500 vehículos desde $t=2000 \text{ ut}$ hasta

$t = 2500 \text{ ut}$ y calculando la velocidad media; éstas simulación se repitieron, y se promediaron los valores obtenidos.

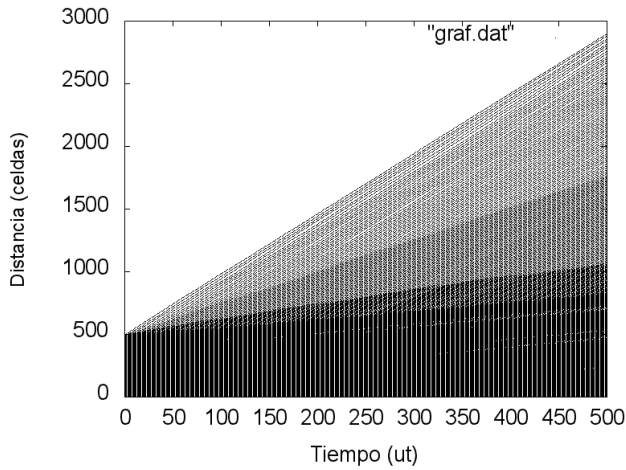


FIGURA 5. Se observan franjas de diferente densidad que se van expandiendo.

Simulando el movimiento de 500 vehículos, con $v_{\max} = 5 \text{ celdas/ut}$, $p = 0.1$ y $L = 100,000 \text{ celdas}$, 10,000 veces, se obtuvo la figura 6. Se observa, que en comparación con la figura 4, el flujo máximo es mayor y se produce en un valor de la densidad mayor que en 4.

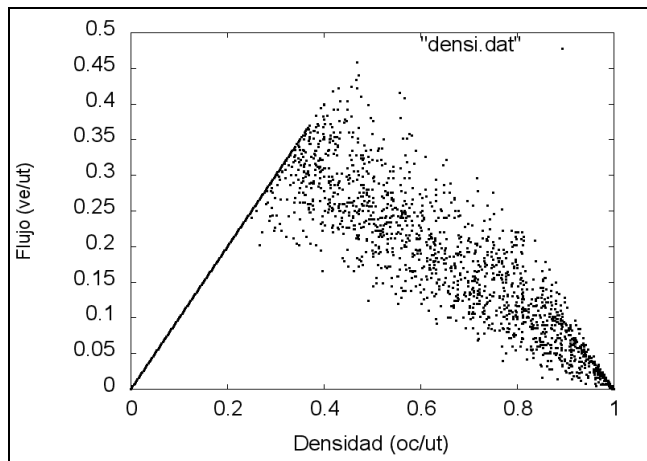


FIGURA 6. El comportamiento en cuanto a la relación entre el flujo y la densidad es similar al observado en la figura 4.

Si consideramos el tamaño de la circunferencia L un múltiplo pequeño del número de vehículos nv , por ejemplo, $L = 3nv$, con ambos modelos podemos observar congestionamientos periódicos. Considerando $nv = 60$, $L = 180 \text{ celdas}$, $t_0 = 600$ y $t = 900$, se obtuvieron las gráficas de las figuras 7 y 8 para el primer y para el segundo modelo, respectivamente. Como era de esperarse,

Tráfico de vehículos con autómatas celulares en la gráfica de la figura 8 los cambios de velocidad son menos bruscos que en la gráfica de figura 7. Con ambos modelos se observan congestionamientos periódicos que avanzan hacia atrás; con el segundo modelo, los congestionamientos son menos frecuentes.

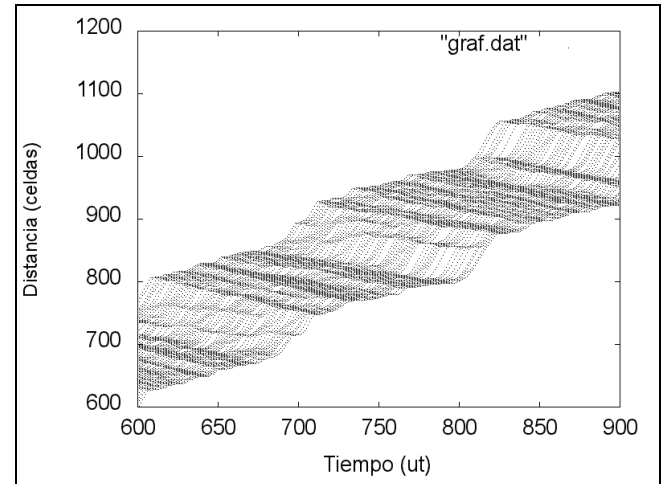


FIGURA 7. Se observa la formación de congestionamientos periódicos que avanzan hacia atrás.

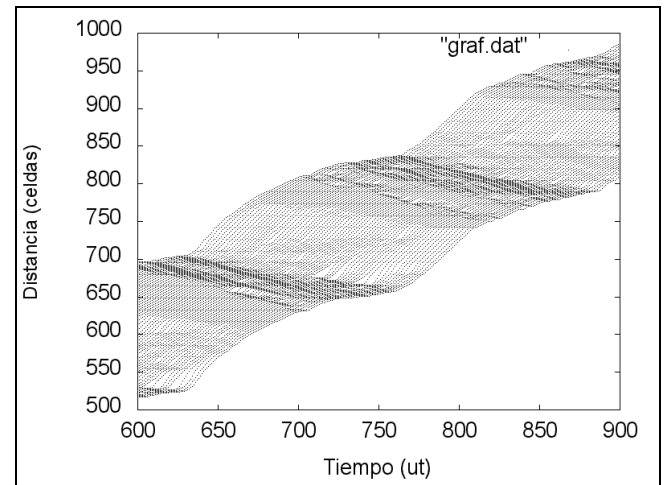


FIGURA 8. Al igual que en la figura 7, se observan congestionamientos que avanzan hacia atrás, pero con menor frecuencia.

III. CONCLUSIONES

El modelo de Nagel y Schreckenberg explica diversas características del flujo vehicular en autopistas, pero produce desaceleraciones excesivas comparadas con las observadas en la realidad. Por ejemplo, si la velocidad del vehículo es de $5 \text{ celdas/unidad de tiempo}$ y el número de celdas vacías entre el vehículo y el de enfrente es 0, el

Ramón Sebastián Salat Figols

modelo obliga a disminuir la velocidad a 0, que es un cambio sumamente brusco. Es razonable suponer que los conductores procuran disminuir la velocidad paulatinamente si observan que la distancia al vehículo de enfrente es demasiado pequeña, es decir, procurarán disminuir la velocidad con más anticipación y más paulatinamente. Ésta es la característica del comportamiento de los conductores que pretende tomar en cuenta el modelo que aquí se presenta. Las simulaciones realizadas, producen movimientos de los vehículos con cambios de velocidades menos bruscos, manteniendo, en general, los comportamientos deseables que tiene el modelo de Nagel y Schreckenberg.

Falta por investigar la posibilidad de extender el modelo a autopistas de varios carriles y profundizar aún más en el comportamiento del modelo presentado, como por ejemplo, Makowiec y Miklaszewski [4], lo han hecho para el modelo de Nagel y Schreckenberg.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional el apoyo

otorgado al proyecto “Uso de la hoja de cálculo en el aprendizaje de simulación de procesos”, con clave 20131365.

REFERENCIAS

- [1] Nagel, K. and Schreckenberg, M., *A celular automaton for freeway traffic*, J. Phys. I France **2**, 2221-2229 (1992).
- [2] Kumar, A. and Shridhar, P., *Study of deceleration behavior of different vehicle types*, International Journal for Traffic and Transport Engineering **2**, 253-270, 2012.
- [3] Mehar, A., and Velmurugan, S., *Speed and Aceleration Characteristics of Different Types of Vehicles and Multi-Lane Highways*, European Transport **55**, 1825-3997, (2013).
- [4] Makowiec, D, and Miklaszewski, *Traffic flow by cellular automata: the effect of maximal car velocity*. <<http://arxiv.org/abs/physics/0511128>> Consultado el 15 de diciembre de 2013.

Spring-magnet oscillations through a bored conductive plate



Celso L. Ladera, Guillermo Donoso and Pablo Martín

*Departamento de Física, Universidad Simón Bolívar, Apdo. 89000,
Caracas 1086, Venezuela.*

E-mail: clladera@usb.ve

(Received 5 January 2014, accepted 16 March 2014)

Abstract

Low frequency vertical oscillations of a spring-magnet system through an orifice bored in a non-magnetic metallic plate are here introduced and studied. In spite of the clean crossings of the magnet through the orifice a magnetic force between plate and magnet still dampens oscillations of this system. We build a theoretical model of the spring-magnet motion that leads us to its motion equation. This happens to be a third degree second-order differential that we solve for the case in which the magnet executes small amplitude oscillations. The model allowed us to predict the functional dependences of the magnet motion variables that we then confirmed experimentally in the laboratory. It is a low-cost oscillating system useful for both its physics content and its mathematical modelling, one that can be easily set-up and studied with parts and equipment ordinarily found in a physics laboratory. This work is within the reach of undergraduate students of physics and engineering students, and can be exploited either as an experiment in an intermediate physics laboratory or as an open-end project work.

Keywords: Damped nonlinear oscillations, Magnetic induction, Magnetic damping, Physics teaching experiments.

Resumen

Presentamos y estudiamos las oscilaciones verticales de un sistema formado por un imán que cuelga de un resorte, y que oscila a través de un orificio horadado en una placa metálica no-magnética. El magneto pasa a través del orificio sin tocar sus bordes, pero aún así se genera una fuerza magnética que amortigua las oscilaciones del sistema. Hemos construido un modelo teórico de estas oscilaciones que nos condujo a su ecuación de movimiento. Ésta resulta ser una ecuación diferencial no lineal de segundo orden la cual resolvemos aquí para el caso en el cual el sistema oscila con pequeña amplitud. El modelo nos ha permitido predecir las dependencias funcionales del movimiento del imán que luego hemos confirmado experimentalmente en el laboratorio. Se trata de un sistema oscilante de bajo costo que ha de resultar muy útil debido a la física-matemática utilizada para modelarlo. Es sin duda un oscilador que puede ser fácilmente construido y estudiado con componentes y equipos de uso corriente en laboratorios de física. El trabajo está al alcance de estudiantes de pregrado en física o ingeniería, y puede ser explotado bien como experimento de un laboratorio intermedio de física, o bien como un proyecto que tenga fines abiertos.

Palabras clave: Oscilaciones amortiguadas no lineales, inducción magnética, amortiguación magnética, experimentos de enseñanza de Física.

PACS: 75.80.+q, 41.20.Gz, 01.50.Pa, 72.15.Cz, 01.50.My

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCTION

Several magneto-mechanical oscillators have been recently presented in the literature [1, 2, 3, 4, 5, 6]. Fig. 1 depicts an entirely new one: a magnet that oscillates vertically, and with low frequency through an orifice of radius a bored in a non ferromagnetic metallic plate. The case of a magnet that oscillates above a whole plate [6] was recently studied, and the present case was therefore natural to consider. It leads to a very different analytical treatment, and to entirely different results. These oscillations are damped by the weak magnetic interaction force between the bored plate and the

moving magnet, *i.e.* by the interaction force between magnet and conductor as observed in other cases of magnet motion [4, 5, 6, 7, 8, 9], but this time the theoretical model of the magnet motion leads to a highly non-linear second order differential equation that can be solved in a number of ways. For the sake of a simplified mathematical and pedagogical treatment here we solve the system motion equation in Section II by assuming the oscillations of the magnet to be small and weakly damped by the magnetic force, and by equating the total energy change in the n -th cycle of oscillation to the energy lost by damping in the same cycle. This is in fact a very useful procedure

described by Landau and Lifshitz in the mechanics book of their well-known theoretical physics course [10]. For the present oscillating system the procedure leads to a quadratic algebraic equation that relates the initial amplitude A_n of oscillation in the n -th cycle to the amplitude of oscillation A_0 at the start of the oscillations. The oscillator shown in Fig. 1 can be easily set-up in the laboratory using a small neodymium magnet, and bored aluminium plates of different thicknesses. In Section II we develop our analytical model of the magnet motion, and find its nonlinear motion equation. After giving the actual details of our spring-magnet oscillator in Section III and of our experimental set-up, we present our experiments and results in Section IV, and compare the latter with the predictions of our analytical model. Finally we discuss the work and present our conclusions in Section V.

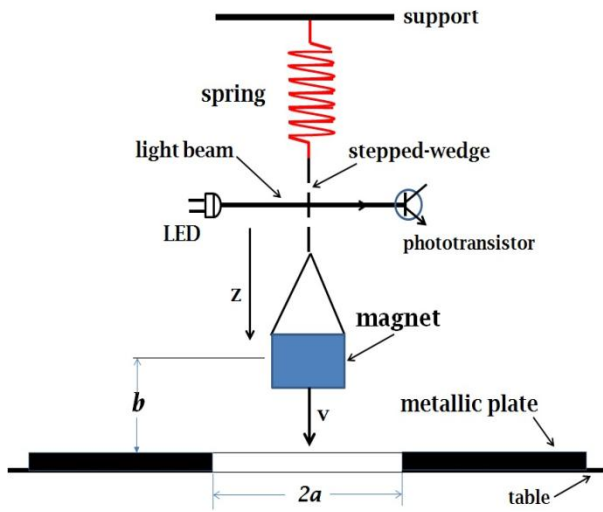


FIGURE 1. A magnet hangs from a spring and oscillates along the vertical z -axis through an orifice of radius a in a conducting non-magnetic plate. The equilibrium distance from magnet to plate is $b \ll a$. A transparent stepped-wedge modulates a collimated light beam from a LED and transduces the magnet position into an electrical signal (after detection with a phototransistor).

II. ANALYTICAL MODEL OF THE MAGNET MOTION

The dominant forces acting on the oscillating magnet in Fig. 1 are of course: its own weight, the elastic force applied by the spring as the magnet oscillates, and finally the magnetic dragging force applied to the magnet by the weak Foucault (eddy) currents induced in the plate by the moving magnet itself. The friction of the whole oscillating system with the surrounding air was previously measured and found to be negligible in comparison. The magnetic dragging force has been calculated in many works, and in a number of altogether different instances [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 12]. We need to recalculate it here in the light of the present

set-up: thus consider an infinitesimal ring of the conducting plate, of radius $r > a$ and width dr , coaxial with the main axis of symmetry of the magnet, and with the orifice, as shown in Fig. 2. The equilibrium vertical position of the magnet is represented by b .

Since the magnet approaches the orifice with speed v a motional $e.m.f.$ ε_i is induced in the conducting infinitesimal ring element. This $e.m.f.$ can be obtained by applying Faraday's Law ($\varepsilon_i = \int (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l}$) [6, 12, 13]:

$$\varepsilon_i = 2\pi r B_\rho(r, b) v, \quad (1)$$

where B_ρ denotes the radial component of the magnet field. If τ denotes the thickness of the plate, and σ its electrical conductivity, the electrical current di that appears in the infinitesimal ring is given by the induced $e.m.f.$ ε_i times the conductance $G = (\sigma \tau dr) / 2\pi r$ of the ring i.e.

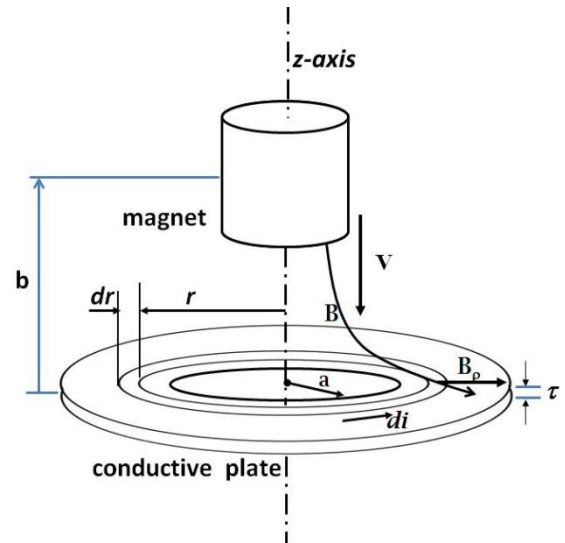


FIGURE 2. A magnet moves with vertical velocity v towards the orifice of radius a in a conducting plate (of thickness τ). A current di is induced in an infinitesimal ring element of radius r and width dr . The magnetic line $\mathbf{B}$ has a radial component B_ρ at the ring. The magnet-to-orifice separation is b .

$$di = \varepsilon_i \frac{(\sigma \tau dr)}{2\pi r} = 2\pi r B_\rho(r, b) v (\sigma \tau dr / 2\pi r), \quad (2)$$

which is simply the equation of a purely resistive circuit. Note that we are neglecting any inductance effects in the infinitesimal conducting ring considered in Fig. 2, e.g. the term $L di/dt$ in the circuit equation was neglected. One can easily calculate the inductance L of the infinitesimal ring which is of the order of $0.1 \mu H$, therefore any inductance term, or effect depending upon the ratio $\omega L/R$ can be safely neglected in the circuit (as well as any levitating force on the magnet [14] that may be considered). It must also be noted that the so-called *skin depth effect* can be neglected too since in the present case (~ 1 Hz oscillations) this depth is of the order of 10 cm, while the thickness of the conducting plates here considered is of the order of a few millimetres [5, 13, 15, 16, 17].

The magnetic interaction force $d\mathbf{F} = di \int (d\mathbf{l} \times \mathbf{B})$ between the magnet and the infinitesimal conducting ring can be found using a well-known relation [11, 12, 13, 18]

$$dF = (di) 2\pi r B_\rho(r, b) = 2\pi r \sigma \tau B_\rho^2(r, b) v dr. \quad (3)$$

Integrating this infinitesimal force from $r=a$ to infinity we get the force between the bored plate and the magnet, i.e. the magnet dragging force,

$$F = 2\pi \sigma \tau v \int_a^\infty B_\rho^2(r, b) r dr. \quad (4)$$

Let us now assume, for the sake of simplicity, the *single dipole approximation* to the small magnet. The radial component B_ρ of the field may then be written as (see Appendix A),

$$B_\rho(r, b) = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{3mrb}{(r^2+b^2)^{5/2}}, \quad (5)$$

where m is the magnetic dipole moment of the magnet. A higher-order approximation, for instance the two-dipole approximation, would indeed be a better one. However, it shall be seen that this time the single dipole approximation proves to be acceptable, as it predicts with good accuracy the results of the experiments performed by us, and described below. Furthermore, it does so without resorting to lengthy and cumbersome mathematical integrals. From Eqs. (4) and (5) we get

$$F = 2\pi \sigma \tau v \left(\frac{3m\mu_0}{4\pi} \right)^2 \int_a^\infty \frac{(br)^2}{(r^2+b^2)^5} r dr. \quad (6)$$

Let us rewrite the instantaneous vertical magnet-to-hole separation as $b+z(t)$ where $z(t) \ll a$ is a small elongation of the magnet oscillation, and b is the initial equilibrium position of the magnet. In our experiments $b \ll r$, and we may neglect b^2 with respect to r^2 in the denominator of the integrand in Eq. (6). This integral can then be immediately evaluated, and by further writing $v = \dot{z}(t)$ we get

$$F = \frac{3\pi \sigma \tau}{a^4} \left(\frac{m\mu_0}{4\pi} \right)^2 \frac{(b+z)^2}{a^2} \dot{z}. \quad (7)$$

This is the sought magnetic damping force on the oscillating magnet. It is a viscous force (note its dependence upon the magnet speed $\dot{z}$), but more importantly it is a nonlinear time-varying force since the coefficient of $\dot{z}$ is nonlinear as well as time-varying. It is also a weak force since we are assuming $(b+z(t)) < a$.

When the system in Fig. 1 is set in small amplitude oscillations from a small initial separation $b \sim 0$, it is always seen to execute long lasting oscillations of slowly decaying amplitude, and therefore we may rewrite the damping force given in Eq. (7) as

$$F = \frac{3\pi \sigma \tau}{a^4} \left(\frac{m\mu_0}{4\pi} \right)^2 \frac{z^2}{a^2} \dot{z} \equiv 2M\lambda_0 \left(\frac{z}{a} \right)^2 \dot{z}, \quad (8)$$

Spring-magnet oscillations through a bored conducting plate where M is the total mass of the oscillator, and where we have introduced the damping constant λ_0 defined as

$$\lambda_0 \equiv \left(\frac{m\mu_0}{4\pi} \right)^2 \frac{3\pi \sigma \tau}{2a^4 M}. \quad (9)$$

It is important to note that the damping force on the magnet motion is a function of the product $z^2 \dot{z}$ (see Eq. (8)), and therefore it becomes zero at the oscillation extremes, and zero once again when the mid-plane of the magnet crosses through the plane of the orifice in the plate. For the latter position, half of the magnet lies over the plate, and the other half below, the radial component B_ρ of the field then being exactly zero at the plate. Therefore we may expect the damping force on the magnet to become practically nil once again for this particular position of the magnet in phase space (z, v) .

Having found the expression for the magnetic damping force we can now write the magnet motion equation

$$\ddot{z} + 2\lambda_0 \frac{z^2}{a^2} \dot{z} + \omega_0^2 z = 0. \quad (10)$$

In this non-linear equation the constant λ_0 is in fact the damping coefficient for a whole (non-bored) plate. It is interesting to compare Eq. (10) with the motion equation of the usual damped oscillator that contains a viscous term of the form $2\lambda \dot{z}$ (λ being a constant), and whose solution is an exponentially decaying function. In the present case we have a non-linear factor proportional to z^2 in the viscous term of the equation.

Equation (10) can be approximately solved in a number of ways, e.g. by resorting to numerical integration methods. In this work we shall find particular solutions under some reasonable and sound assumptions e.g. assuming *the magnet oscillations to be of small amplitude, and taking into account the truly small damping constant* (in practice $\lambda_0 \ll \omega_0$, see Section IV) *of the system*. With these assumptions in mind, we can find a solution for the motion equation of the oscillator in a simple way using a procedure introduced by Landau and Lifshitz [10], and also used in [3]. It consists in finding an expression that would give us the amplitude A_n of the n -th oscillation cycle in terms of the initial amplitude A_0 of oscillation set by the experimenter. We therefore need to evaluate *the energy lost per oscillation cycle* of the magnet-spring system, which is indeed a small amount of energy due to the actual small damping. To the effect we simply rewrite Eq. (10) as

$$\ddot{z} + \omega_0^2 z = -2\lambda_0 \frac{z^2}{a^2} \dot{z}. \quad (11)$$

By integrating Eq. (11) along the n -th cycle of oscillation we get the following: from the left hand side of the equation the total energy change ΔE *per unit mass* in the cycle where $E = \left[\frac{1}{2} \dot{z}^2 + \frac{1}{2} \omega_0^2 z^2 \right]_n$, while from the right we get the energy lost due to the damping, again *per unit mass*, during this n -th cycle, i.e.

$$\left[\frac{1}{2} \dot{z}^2 + \frac{1}{2} \omega_0^2 z^2 \right]_{n+1} - \left[\frac{1}{2} \dot{z}^2 + \frac{1}{2} \omega_0^2 z^2 \right]_n = \dots$$

$$- \int_n^{n+1} 2\lambda_0 \frac{z^2}{a^2} \dot{z} dz = - \int_{t_n}^{t_{n+1}} 2\lambda_0 \frac{z^2}{a^2} \dot{z}^2 dt, \quad (12)$$

which is the essence of the quoted Landau and Lifshitz method.

Eq. (12) is a first order differential equation that can be dealt with by recalling our assumptions that our magnet is oscillating with slowly decaying small amplitudes $A(t)$, whose angular frequency is ω_0 , that is we may try a solution of the form

$$z(t) = A(t) \cos \omega_0 t. \quad (13)$$

After replacing this into Eq. (12) and averaging over time along the n -th oscillation cycle we get

$$-\Delta E = \langle 2\lambda_0 \frac{z^2}{a^2} \dot{z}^2 \rangle_t T_0 = \int_0^{T_0} \frac{\lambda_0}{a^2} \omega_0^2 A^4 2 \cos^2 \omega_0 t \sin^2 \omega_0 t dt, \quad (14)$$

where T_0 is the period of the oscillations, and $A=A_n$ the amplitude. Therefore

$$-\Delta E = \frac{\lambda_0}{2a^2} \omega_0^2 A^4 \int_0^{T_0} \sin^2(2\omega_0 t) dt = \frac{\lambda_0}{4a^2} A^4 \omega_0^2 T_0. \quad (15)$$

Since the total energy E of the oscillator may be equated either to its maximum kinetic energy or to its maximum elastic potential energy we may write the simple relation

$$E = \left[\frac{1}{2} \dot{z}^2 + \frac{\omega_0^2}{2} z^2 \right]_n = \frac{1}{2} \omega_0^2 A^2, \quad (16)$$

which also represents the total spring-magnet oscillator energy in the n -th oscillation cycle (practically a constant of the oscillations, since the damping is so small), and where $A \equiv A_n = z_n$ is the oscillation amplitude in that cycle. Since both ΔE and T_0 are small we may rewrite the quotient $\Delta E/T_0$ as dE/dt and thence fore

$$\frac{dE}{dt} = - \frac{\lambda_0}{4a^2} \omega_0^2 A^4. \quad (17)$$

Furthermore, replacing E from Eq. (16) we may write

$$\frac{d \left[\frac{1}{2} \omega_0^2 A^2 \right]}{dt} = - \frac{\lambda_0}{4a^2} \omega_0^2 A^4 \Leftrightarrow \frac{dA^2}{(A^2)^2} = - \frac{\lambda_0}{2a^2} dt. \quad (18)$$

Integrating (18) between $t=0$ and $t=nT_0$ with $n \in \mathbb{N}$ (that is between the initial amplitude A_0 and the amplitude A_n of the n -th oscillation) we finally get

$$\frac{1}{A_n^2} - \frac{1}{A_0^2} = \frac{\lambda_0 T_0}{2a^2} n. \quad (19)$$

This quadratic algebraic equation allows us to obtain the amplitude A_n in any oscillation cycle in terms of the small

initial oscillation amplitude A_0 that the experimenter sets at the start of the magnet oscillations.

III. EXPERIMENT SET-UP

As in Fig. (1) a small cylindrical Nd-ferrite magnet (height 3.20 mm, diameter 13.2 mm) of mass 3.20 g was hung from a soft spring of elastic constant 3.31 N/m. Actually the total mass of our oscillating system is 55.4 g (non-magnetic tare was attached to the magnet to increase its inertia and period of oscillation, as well as to ensure smooth oscillations of the system along the vertical). The angular frequency of our freely oscillating magnet-spring system is $\omega_0 = 7.72$ rad/s, a value that corresponds to a natural period of oscillation $T_0=0.814$ s (accurately measured using a digital scope in previous calibration experiments). The small attenuation constant of the oscillations was measured to range from 0.020 s^{-1} to 0.080 s^{-1} for the different cases presented below. The natural mechanical attenuation of the oscillating system was found instead to be much lower, only 0.003 s^{-1} . A 26.0 mm diameter orifice was bored in a 3.0 mm thick stock aluminium (Alclad 3003-O) plate. The magnet was then set in motion so that it could oscillate symmetrically across this orifice. The electrical conductivity of the aluminium used was previously found ($\sigma = 26.9 \text{ Ohm}^{-1}\text{m}^{-1}$) by measuring the resistance of several long aluminium strips of the material. The magnetic dipole 0.48 Am^2 of the Nd magnet was also found in a previous simple experiment (using a coil instead of the metallic plate, letting the magnet to oscillate inside the coil, and then applying Faraday's induction law to estimate the dipole [4, 12]).

The vertical position of this oscillating system is reliably monitored using a convenient device already described in previous works [4, 12]. It is a home-made transparent stepped-wedge (about 66 steps) of thin acetate transparency strips carefully stacked so that each step is only about 0.2 mm long. This wedge is attached between the magnet and the spring so that a collimated beam of light from a white-light LED traverses it (Fig. (1)). This stepped wedge exponentially attenuates the beam intensity and the transmitted beam is measured with a photo-transistor followed with a diode connected in series to its emitter. The electrical signal generated is instantaneously displayed in a digital-storage oscilloscope. Previous calibrations show that as this stepped-wedge moves vertically it attenuates the light beam with small error, thus performing as a good linear position transducer for the magnet. The storage oscilloscope not only displays the actual waveform of the magnet oscillations, it also allows to store the waveform in a convenient way for analysis *a posteriori* (no need at all to use image analysis of a video). Not shown in Fig. (1) we attached a 1.5 cm wide acetate strip at the top of the stepped wedge to avoid the magnet to rotate about the vertical. This auxiliary and flexible damper strip, bent as an arch (upward concavity) was fixed between a nearby post and the wedge with a sticker. This stabilizing strip did not add significant friction to the free low frequency oscillation of the system

(the total measured mechanical attenuation constant of the system, flexible strip included is less than 0.003 s^{-1}).

IV. EXPERIMENTS

As explained below we performed two sets of experiments with our system. In the first experiments we initially placed the magnet in coincidence with the orifice *i.e.* $b=0$. We expected both the damping force on the magnet and the radial field to be small, and then a motion equation with a non-linear damping term proportional to the product $z^2 \dot{z}$. For the second set of experiments the magnet was initially placed above the orifice so that $b \sim a$. Now the attenuation was given by the linear term $2\lambda(b) \dot{z}$, and as b increased the damping coefficient approached the magnetic damping on a magnet that oscillates above a whole conducting plate, as in reference [6].

(A. Small magnet oscillations for separation $b=0$)

When $b=0$ the magnet mid-plane is coincident with the orifice mid-plane, and the magnet can then be set to oscillate symmetrically with respect to the plate. Fig. 3(a) shows the small amplitude oscillation of the magnet theoretically predicted using the original motion Eq. (10), which we solved using the 4th-order Runge-Kutta method. The plotted envelope of the trace in Fig. 3(a) involves the amplitudes $A(t)$ and was obtained instead using Eq. (19) of the Landau-Lifshitz approximation we developed in Section II. Figure 3(a) thus shows the good accuracy obtained by using this approximation: the envelope does match the decaying amplitudes (*i.e.* it involves the oscillations peaks).

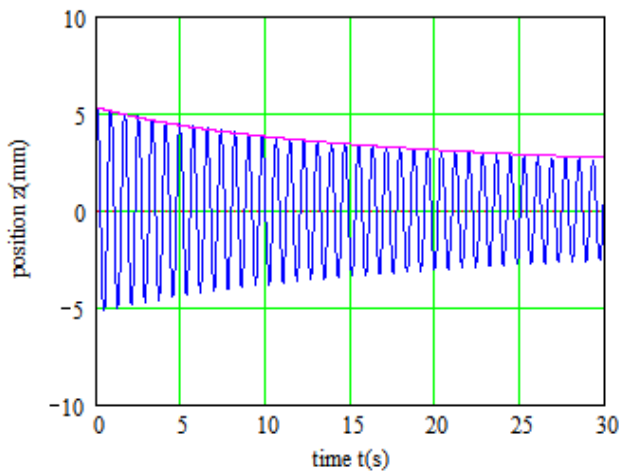


FIGURE 3(a). Predicted oscillations of the magnet: the oscillations obtained numerically solving the motion Eq. (10), for an initial amplitude 5.3 mm. The envelope curve of the oscillations was obtained instead using the quadratic Eq. (21).

Spring-magnet oscillations through a bored conducting plate
Fig. 3(b) shows actual experimental results. It shows the storage-oscilloscope trace of the magnet oscillations recorded for initial amplitude 5.3 mm. Notice the large number of smoothly decaying oscillations recorded in the experiment. The envelope of the oscillations in this figure was again obtained using our Eq. (19), yet this time including the small natural damping of the whole oscillating spring-magnet system (that includes even the friction of the whole system with air (Appendix C)), as well as a correction due to large amplitude oscillations. The agreement between theory and experiment is again very good.

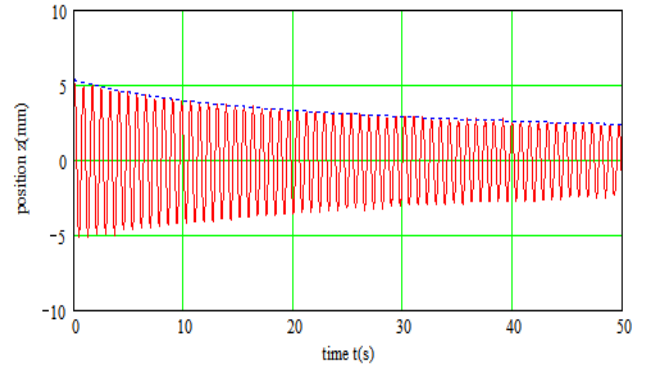


FIGURE 3 (b). Actual experimental oscilloscope trace of the same oscillations and envelope plotted in (a) for an initial amplitude $A_0 = 5.3 \text{ mm}$ (65 smoothly decaying oscillations are shown). This figure is to be compared with Fig. 3(a).

Figure 3(c) shows only a few of the actual oscillations of the magnet in the time interval 10 to 15 s, and with greater detail than in Fig. 3(b). It may be noticed in the figure that the resolution and the linearity of our stepped-wedge-phototransistor detector is good enough not to distort the harmonic nature of the oscillations.

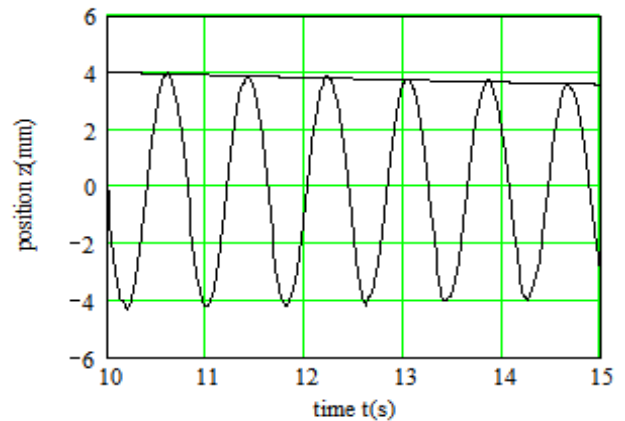


FIGURE 3(c) Details of the oscilloscope trace of the magnet oscillations taken from Fig. 3(b): showing its undistorted quasi-sinusoidal oscillations from 10 to 15 s. This confirms the linearity of our position detection transducer to locate the magnet position as it oscillates.

Figure 4 corresponds to the same experimental data plotted in Fig. 3(b), but instead it shows (lower continuous line) the reciprocal of the squared decaying amplitudes $1/A^2$ as a function of time ($t_n = n T_0$) as given by the theory. As a matter of fact Eq. (19) of our analytical model predicts that the experimental data must lie in a straight line. The upper set of plotted points in the figure represents the experimentally measured maxima of the oscillation cycles. The lower set of data points, closer to the continuous line, was obtained by subtracting the natural mechanical damping of the system from the upper set of plotted data points. Again note that the agreement between experimental data and theory is good.

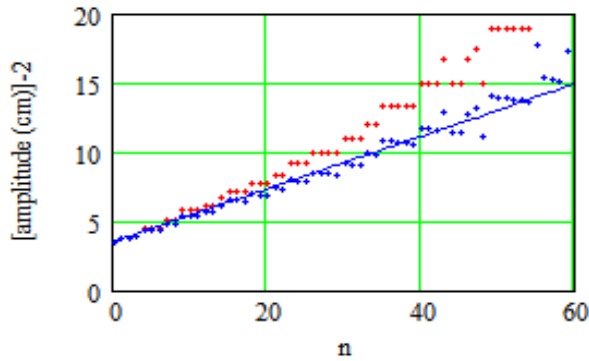


FIGURE 4. Inverse squared amplitudes A_n of the oscillations vs. the number n of oscillation cycles (time $t=nT_0$) as obtained from the oscillations in Figure 3(b). The continuous curve is given by Eq. (12). The upper set of points was experimentally obtained with an initial amplitude $A_0 = 5.3 \text{ mm}$.

B. Small magnet oscillations when $b \neq 0$

We have also studied the case of small oscillations when $b \neq 0$. In this case the integral in Eq. (6) can be evaluated exactly without any approximation (see Appendix B for the case $b \neq 0$). The solution is the damped oscillation expression $z(t) = A_0 \exp[-\lambda(b)t] \cos(\omega_0 t)$ for the magnet position z as given in Appendix B. In these cases we have measured in the laboratory the parameter $\lambda(b)$. In Fig. 5 we have plotted the attenuation constant $\lambda(b)$ of the magnet-spring oscillator for a set of initial equilibrium positions $b \neq 0$ of the magnet with respect to the orifice. The continuous curve in the figure was plotted using Eq. (B4) of the Appendix B. We have also plotted in the figure a dashed curve that bears an interesting relation with the present work: such dashed curve represents the damping coefficient (versus the ratio b/a) when the magnet oscillates above a plate with no orifice in it.

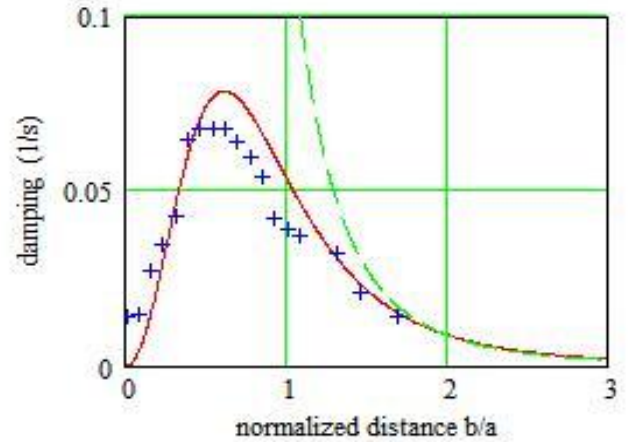


FIGURE 5. Plot of the damping constant of the oscillator versus the separation distance b (equilibrium position of the magnet) in the regime of small amplitude oscillations. The continuous line is given by Eq. (B4) of Appendix B. The dashed line represents the damping on the magnet oscillations over a plate with no orifice.

V. DISCUSSION AND CONCLUSIONS

In this work we have presented a simple mechanical system that consists of a small magnet hung from a vertical spring that executes magnetically damped oscillations across an orifice bored in a metallic plate. The motion equation of the magnet, derived in Section II using basic fundamental principles, happens to be a non-linear differential equation which we approximately solved under two simplifying assumptions: the magnetic drag of the conducting plate on the magnet is weak, and the oscillations of the latter are of slowly decaying amplitudes. Then it was possible to apply an approximate method of solution, based on energy conservation, described in a well-known mechanics textbook [10]. It led us to a much simpler quadratic algebraic equation. Throughout the work we represented the magnet field using the single dipole approximation, which proved to be sufficient to explain satisfactorily our laboratory results. Once the set-up described in Section 3 was ready (with a single piece of equipment, a digital storage oscilloscope), we studied two particular cases of oscillations: (i) when the mean vertical position (equilibrium position) of the magnet oscillations is zero and coincident with the plate mid-plane, i.e. $b=0$ in Fig. (1); (ii) when $b \neq 0$. In both cases our theoretical predictions about the motion of the magnet closely matched the experimental results we later obtained in the laboratory. It is interesting to discuss the damping on the magnet motion as a function of the outer radius r_{out} of the bored finite-sized circular plate placed below the magnet. For $a < r_{out} < 2a$, i.e. outer radius less than about twice the radius a of the orifice, we clearly observed the damping on the magnet motion in its decaying oscillations, and such damping increased with the outer radius of the plate. However, for circular plates of outer radii $r_{out} > 2a$ the damping remained practically constant. The reason for this is clear: the Foucault currents

induced by the moving magnet in the bored plate are located, as expected, mostly about the rim of the orifice. By increasing the orifice diameter from a to $2a$ we lose about 75% of the region of the metallic plate where the Foucault's currents arise. This is concomitant with the $1/a^4$ dependence of the magnetic force obtained in Eq. (9). Appendices B and C are included to show how our theoretical model and experiments can be extended to study the asymmetrical oscillation, and large amplitude oscillations of the magnet-spring system, respectively (two suitable extensions for a laboratory open-end project). Work is now in progress to solve the non-linear motion equation of our spring-magnet system using numerical methods for both small and large oscillations, and for any value of the parameter b . Finally, the oscillating system presented here is a suitable experiment for senior undergraduate physics and engineering students, for an open-end project, as well as for demonstrations. The level of readership is therefore from undergraduate to graduate students, as well as for any university teaching physicist.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank Prof. J. G. Ruiz, Head of Laboratory D, Universidad Simón Bolívar, for providing computer accessories. This work was partially supported by the Decanato de Investigaciones y Desarrollo, Universidad Simón Bolívar (under grant GID-073).

REFERENCES

- [1] Kraftmakher Y., *Experiments with a magnetically controlled pendulum*, Eur. J. Phys. **28**, 1007–20 (2007).
- [2] Tomasei F. G. and Marconi M. C., *Rolling magnets down a conducting hill: Revisiting a classic demonstration o the effects of eddy currents*, Am. J. Phys. **80**, 800-803 (2012).
- [3] Muiznieks A. and Dudareva I., *Quantitative analysis of the damping of magnet oscillations by eddy currents in aluminium foil*, Am J. Phys. **80**, 804-809 (2012).
- [4] Ladera, C. L. and Donoso, G., *Anharmonic oscillations of a spring-magnet system inside a magnetic coil*, Eur. J. Phys. **33**, 1259-70 (2012).
- [5] Donoso, G. and Ladera, C. L., *Nonlinear dynamics of a magnetically driven Duffing-type spring-magnet oscillator in the static magnetic field of a coil*, Eur. J. Phys. **33** 1473–1486 (2012).
- [6] Ladera, C. L. and Donoso, G., *Oscillations of a spring-magnet damped by a conducting plate*, Eur. J. Phys. **34**, 1187-1197 (2013).
- [7] Ireson, G. and Twiddde, J., *Magnetic braking revisited: Activities for the undergraduate laboratory*, Eur. J. Phys. **29**, 745-751 (2008).
- [8] Donoso, G., Ladera, C. L. and Martin, P., *Damped fall of magnets inside a conducting pipe*, Am. J. Phys. **79**, 193-200 (2011).

- Spring-magnet oscillations through a bored conducting plate*
- [9] Hahn, K D., Johnson, Brokken A. and Baldwin, S., *Eddy current damping of a magnet moving through a pipe*, Am. J. Phys. **66**, 1066-1076 (1998).
- [10] Landau, L. D. and Lifshitz, E., *Course of Theoretical Physics Volume 1: Mechanics*, (Pergamon, Oxford UK, 1960), chapter V paragraph 25.
- [11] Alonso, M. and Finn, E. J., *Fundamental University Physics II: Field and Waves*, (Addison-Wesley Reading-Massachusetts, 1967) chapter 17
- [12] Donoso, G., Ladera, C. L. and Martin, P., *Magnetically coupled magnet-spring oscillators*, Eur. J. Phys. **31**, 433-452 (2010).
- [13] Griffiths, D. J., *Introduction to Electrodynamics* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1981), chapter 8 section 8.3
- [14] Tjossem, P. J. H. and Prost, E C., *Optimizing Thomson's jumping ring*, Am J Phys **79**, 353-358 (2011).
- [15] Panofsky, W K H and Philips, M., *Classical Electricity and Magnetism* 2nd edition, (Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1969), chapter 7.
- [16] Davis, L. C. and Reitz, J. R., *Eddy Currents in Finite Conducting Sheets*, J. App. Phys. **42**, 4119-4127 (1971).
- [17] Lorrain, P. and Corson, D., *Electromagnetic Fields and Waves*, (Freeman, San Francisco, 1970).
- [18] Jackson, J. D., *Classical Electrodynamics*, 3rd Ed., (Wiley, New York, 1999), Chapter 8, section 1.

APPENDIX A

The components of the magnetic field of a magnetic dipole m can be written in spherical coordinates (r, θ, φ) as in [18]

$$B_r = \frac{2\mu_0 m \cos \vartheta}{4\pi r^3}, \quad B_\vartheta = \frac{2\mu_0 m \sin \vartheta}{4\pi r^3}. \quad (\text{A1})$$

In cylindrical coordinates (ρ, φ, z) , where $\rho = r \sin \theta$ and $z = r \cos \theta$, we have

$$B_z = B_r \cos \vartheta - B_\vartheta \sin \vartheta, \quad (\text{A2})$$

$$B_z = \frac{\mu_0 m}{4\pi} \frac{2\cos^2 \vartheta - \sin^2 \vartheta}{r^3} = \frac{\mu_0 m}{4\pi} \frac{2z^2 - \rho^2}{(\rho^2 + z^2)^{5/2}}. \quad (\text{A3})$$

Analogously for the radial component in cylindrical coordinates we get

$$B_\rho = B_r \sin \vartheta + B_\vartheta \cos \vartheta, \quad (\text{A4})$$

$$B_\rho = \frac{3\mu_0 m}{4\pi} \sin \vartheta \cos \vartheta = \frac{\mu_0 m}{4\pi} \frac{3\rho z}{(\rho^2 + z^2)^{5/2}}, \quad (\text{A5})$$

which after setting $\rho = r$ it becomes Eq. (5) of the main text.

APPENDIX B. REGIME OF OSCILLATIONS WHEN $b \neq 0$

By making the change $r = bu$ in Eq. (6) of the main text we get

$$F = 2\pi\sigma\tau vb^2 \left(\frac{3m\mu_0}{4\pi b^3}\right)^2 \int_b^\infty \frac{u^3}{(1+u^2)^5} du, \quad (B1)$$

This leads us to evaluate the following indefinite integral

$$\int \frac{u^3}{(1+u^2)^5} du = \frac{-(1+4u^2)}{24(1+4u^2)^4} + \text{constant}, \quad (B2)$$

and to introduce the result in (B1); by further changing back to the variable r , the magnetic interaction force between plate and magnet can then be written as

$$F = \left(\frac{m\mu_0}{4\pi}\right)^2 \frac{3\pi\sigma\tau}{2a^4} \frac{b^2}{a^2} \frac{a^6(b^2+4a^2)}{4(b^2+a^2)^4} v. \quad (B3)$$

Introducing now the constant λ_0 defined in Eq. (9) of the main text, and the new attenuation coefficient $\lambda(b) = \frac{F}{2Mv}$ we get

$$\lambda(b) = \lambda_0 \left(\frac{b^2}{a^2}\right) \frac{a^6(b^2+4a^2)}{4(b^2+a^2)^4}. \quad (B4)$$

And thus we arrive to the new motion equation of the oscillating magnet for cases when $b \neq 0$, i.e. when the magnet is initially separated from the orifice,

$$\ddot{z} + 2\lambda(b)\dot{z} + \omega_0^2 z = 0. \quad (B5)$$

Note that when $b = z(t) \ll a$ the second fraction in Eq. (B4) becomes unity, and then we recover our motion Eq. (10) of the main text, as expected. But, when $b \neq 0$ and when the oscillations are of small amplitude the motion equation is linear in z and accept the well-known solution $z(t) = A_0 \exp[-\lambda(b)t] \cos(\omega_0 t)$, as already considered in the second set of experiment (see Section IV-b).

APPENDIX C. LARGE AMPLITUDE OSCILLATION REGIME

When the oscillation are of large amplitude, and about $z=0$ the energy lost per cycle as given by Eq. (14) must be corrected by introducing a damping $\lambda(b)$, instead of λ_0 , in that equation, and also realizing that now $b=z(t)$, therefore the energy lost ΔE becomes

$$\Delta E = - \int_{t_n}^{t_{n+1}} 2\lambda(z) \frac{z^2}{a^2} \dot{z}^2 dt, \quad (C1)$$

where now $\lambda(z)$ is given by $\lambda_0 f(z)$, with the function $f(z)$

$$f(z) = \frac{a^6(z^2+4a^2)}{4(z^2+a^2)^4} = \frac{1+\frac{u^2}{4}}{(1+u^2)^4}, \quad (C2)$$

where for convenience we have just set $u=z/a$. By expanding the denominator on the right hand side of this equation as a binomial we get

$$f(u) \approx \left(1 + \frac{u^2}{4}\right) (1 - 4u^2 + 6u^2 + \dots) = 1 - \frac{15}{4}u^2 + 5u^4 + \dots$$

The integral in Eq. (C2) can now be re-written with $b=z$ and then we get

$$\Delta E \approx \int_0^T 2\lambda_0 \frac{z^2}{a^2} \left[1 - \frac{15}{4}\left(\frac{z}{a}\right)^2 + 5\left(\frac{z}{a}\right)^4\right] \dot{z}^2 dt. \quad (C3)$$

It should be noticed that the integral of the first term in the square bracket of this equation recovers the ΔE already considered in the main text (Section II, Eq. (16)) as it should be. However, note that now two additional energy terms have appeared in Eq. (C3). By averaging over an oscillation cycle, as already done in the main text, we get

$$E = \left[\frac{1}{2}\dot{z}^2 + \frac{\omega_0^2}{2}z^2\right]_n = \frac{1}{2}\omega_0^2 A^2 \left[1 - \frac{15}{8}\left(\frac{A}{a}\right)^2 + \frac{15}{8}\left(\frac{A}{a}\right)^4\right]. \quad (C4)$$

This equation allows us to write the new damping coefficient for the case of large amplitude oscillations, which is given (as a function of A/a) by

$$\lambda\left(\frac{A}{a}\right) = \lambda_0 \left[1 - \frac{15}{8}\left(\frac{A}{a}\right)^2 + \frac{15}{8}\left(\frac{A}{a}\right)^4\right]. \quad (C5)$$

And now Eq. (19) of the main text must be rewritten, for large-amplitude oscillations, to read,

$$\frac{1}{A_n^2} - \frac{1}{A_0^2} = \frac{\lambda_0}{2a^2} \left[1 - \frac{15}{8}\left(\frac{A}{a}\right)^2 + \frac{15}{8}\left(\frac{A}{a}\right)^4\right] nT_0. \quad (C6)$$

For the particular case when $A/a = 5.3/13.0$ the second term in the square bracket of this equation represents a correction of 0.312.

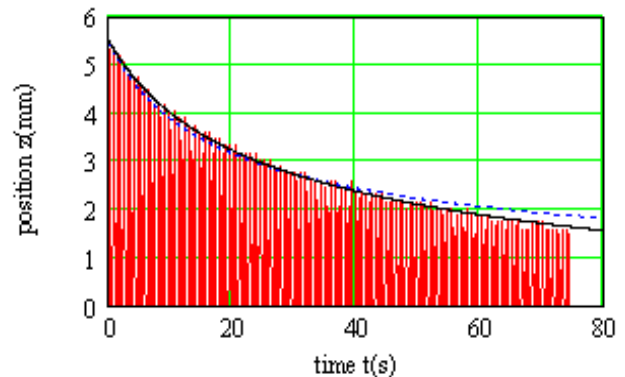


FIGURE C1. Actual half-oscillations of large amplitude for $b=0$. Two lines have been drawn to envelope the amplitudes of oscillation: the dotted line was drawn using Eq. (19), while the solid envelope was obtained with Eq.(C6), that includes the correction for the amplitudes of oscillation being large.

Figure C1 shows actual experimental half-oscillations of large amplitude (oscilloscope traces) involved with envelopes given by Eq. (12), the dotted line, as well as with Eq. (C6), the solid line, respectively. It may be seen that the dotted envelope (obtained for small-amplitude oscillations)

Spring-magnet oscillations through a bored conducting plate departs from the experimental results as time goes by, while the continuous envelope obtained using the large-amplitude oscillations model, just derived in this Appendix, do involve the peaks of the oscillations, as it should be.

Amplificadores com transistores bipolares na configuração Darlington para pequenos sinais



Francisco José Arnold, Rony da Silva Albano, Talia Simões dos Santos

Divisão de Telecomunicações, Faculdade de Tecnologia, Universidade Estadual de Campinas, Rua Paschoal Marmo, 1888. Jardim Nova Itália, CEP. 13484-332. Limeira, SP - Brasil.

E-mail: arnold@ft.unicamp.br

(Recibido el 16 de Noviembre de 2013; aceptado el 27 de Marzo de 2014)

Resumo

A análise de circuitos eletrônicos em cursos de Física é fundamental para o aprendizado de técnicas instrumentais. Normalmente, nos programas que incluem esse conteúdo, são analisados os circuitos mais populares. Este trabalho apresenta uma análise simplificada de um amplificador em classe A na configuração Darlington. O intuito deste trabalho é o de sugerir uma aplicação complementar didática buscando ampliar a visão de análise de circuitos e sua utilização em instrumentação eletrônica. Resultados experimentais, simulados e teóricos foram confrontados e discutidos. Os procedimentos realizados são úteis para o desenvolvimento da capacidade de análise dos circuitos eletrônicos e podem ser adotados em trabalhos didáticos complementares.

Palavras-chave: Amplificadores, Pequenos Sinais.

Abstract

The analysis of electronic circuits in physics courses is crucial for learning instrumental techniques. Typically, in the programs that include this content only most popular circuits are analyzed. This paper presents a simplified analysis of an amplifier in class A with Darlington configuration. The purpose of this paper is to suggest a complementary didactic application seeking to expand the vision of circuit analysis and their use in electronic instrumentation. Experimental, theoretical, and simulated results were confronted and discussed. The procedures are useful for the development of the ability to analyze electronic circuitry and can be adopted in complementation of didactic activities.

Keywords: Amplifiers, Small Signals.

PACS: 01.40.-d, 01.40.gb, 84.30-r.

ISSN 1870-9095

I. INTRODUÇÃO

O estudo de circuitos eletrônicos é um conteúdo pertinente na formação em Física e áreas afins e encontra-se presente em muitos programas de disciplinas de cursos de bacharelado e licenciatura. Há dois motivos importantes para o estudo dos circuitos eletrônicos: o primeiro é que os componentes semicondutores, que são os elementos ativos desses circuitos, são aplicações tecnológicas de tópicos fundamentais da teoria do estado sólido; segundo, esses circuitos formam a base da instrumentação eletrônica que é primordial na formação de um físico experimental.

O processamento de sinais em sistemas de instrumentação eletrônica engloba, inequivocamente, os amplificadores de sinais. Há vários tipos de amplificadores que podem ser utilizados. Cada amplificador apresenta um conjunto de características que o torna mais ou menos adequado a aplicação ao qual será destinado. Entre as principais características de um amplificador podemos citar: os ganhos de tensão, corrente e potência, as impedâncias de entrada e saída, a eficiência, a compliância

e a resposta em frequência. Escolhas de amplificadores com características não apropriadas para a aplicação podem levar a desempenhos ruins do sistema de instrumentação como um todo.

As principais configurações de amplificadores eletrônicos são visitadas nas disciplinas que tratam o tema. Há várias versões de circuitos amplificadores baseadas em transistores bipolares, que se diferenciam por configuração e classe de operação e, entre elas, encontra-se a configuração Darlington [1].

Neste trabalho foi realizada uma análise da configuração Darlington (Figura 1) em emissor comum operando em classe A. Apesar da importância da configuração Darlington, a literatura difundida nos cursos de graduação [2, 3, 4, 5] que introduz o tema amplificadores eletrônicos nos cursos de Física concentra seu foco na análise de circuitos de configurações convencionais, como o circuito da Figura 2.

Os objetivos deste trabalho são: apresentar uma análise com finalidade didática dos amplificadores na configuração Darlington de forma a complementar conteúdos pouco explorados na literatura; investigar peculiaridades da

operação da configuração Darlington em classe A visando orientar sua aplicação no desenvolvimento de circuitos voltados à instrumentação eletrônica.

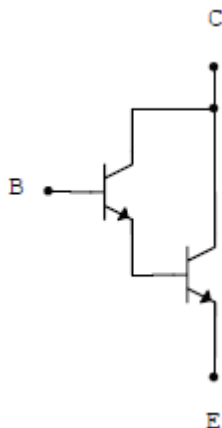


FIGURA 1. Configuração Darlington.

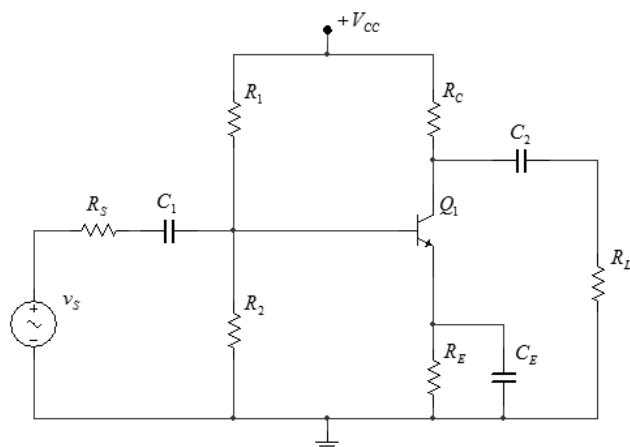


FIGURA 2. Circuito amplificador classe A convencional emissor comum.

Na Figura 3 é apresentado o diagrama esquemático do amplificador Darlington usado neste estudo. Para atender os objetivos propostos realizaremos a análise dos circuitos em corrente contínua (CC) e alternada (CA), para determinar as principais características de polarização, ganho e eficiência. A análise teórica é complementada por uma avaliação experimental do circuito analisado e por simulações computacionais.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: na seção 2 é apresentado o procedimento geral e as premissas para a análise de circuitos amplificadores; na seção 3 são apresentados e analisados os circuitos CC e CA; na seção 4 é descrita a metodologia experimental e o procedimento para simulação computacional; na seção 5 são apresentados os resultados; as discussões estão na seção 6 e, finalmente, na seção 7 o trabalho é concluído.

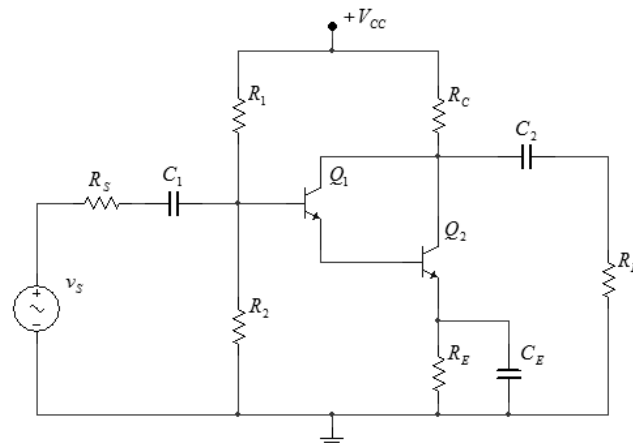


FIGURA 3. Circuito amplificador Darlington.

II. CIRCUITOS AMPLIFICADORES

A análise de circuitos amplificadores é normalmente realizada aplicando-se o Teorema da Superposição. O Teorema da Superposição produz dois circuitos que são analisados de forma independente.

O primeiro circuito contém apenas correntes contínuas decorrentes da energização produzida pela fonte de alimentação do amplificador. Este circuito é obtido considerando-se a fonte dos sinais a serem amplificados em curto-circuito.

A partir da análise desse circuito, doravante denominada análise CC, são determinados o ponto quiescente dos transistores, as potências dissipadas e as fornecidas pela fonte de alimentação. Esses resultados subsidiam a determinação de características dos amplificadores como a eficiência e a compliância.

O segundo circuito leva em conta apenas a energização da fonte de sinais (v_s). Este circuito é obtido considerando-se a fonte de alimentação em curto-circuito e os capacitores de acoplamento e desvio com reatâncias capacitivas desprezíveis. Esta última condição restringe à análise a condição de independência de frequências. Os transistores são substituídos por modelos elétricos equivalentes.

Neste artigo se considera o modelo de Ebers-Moll para pequenas amplitudes de sinais e em faixa de operação linear (Figura 4). Os resultados da análise (análise CA) desses circuitos permitem determinar os ganhos de tensão, corrente e potência e as impedâncias de entrada e saída.

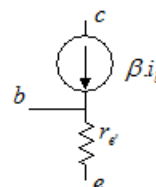


FIGURA 4. Modelo de Ebers-Moll para transistores bipolares.

As condições impostas para a análise conduzem a <http://www.lajpe.org>

Francisco José Arnold, Rony da Silva Albano, Talia Simões dos Santos determinação dos ganhos, das impedâncias de entrada e saída, da compliância e da eficiência dos amplificadores, sob operações com sinais de pequena amplitude e sem dependência de frequência e com relação linear entre as variáveis de entrada e saída.

Tal como é encontrado na literatura [1, 2, 3, 4], neste trabalho as grandezas elétricas manipuladas na análise CC são representadas por letras maiúsculas, enquanto que as do circuito CA em minúsculas.

III. AMPLIFICADOR DARLINGTON

O circuito da Figura 3 é analisado usando-se o Teorema da Superposição. As subseções 3.1 e 3.2 apresentam as análises dos circuitos CC e CA, respectivamente.

A. Análise CC

Para obter o circuito equivalente CC, os capacitores devem ser considerados como circuitos abertos, pois em corrente contínua a reatância capacitiva tende ao infinito. A Figura 5 apresenta o circuito da parte de correntes contínuas.

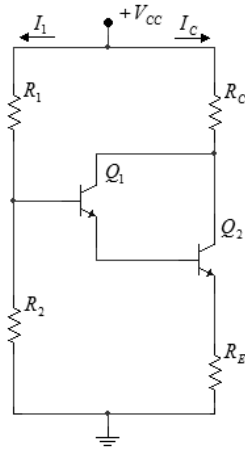


FIGURA 5. Amplificador Darlington com enfoque na parte de correntes contínuas.

Aplicando-se o Teorema de Thévenin no circuito polarizador da base de Q_1 (malha composta por R_1 e R_2) obtém-se o circuito da Figura 6, onde

$$V_{TH} = \frac{R_2 \cdot V_{CC}}{R_1 + R_2}, \quad (1)$$

$$R_{TH} = R_1 // R_2. \quad (2)$$

Aplicando-se a Lei de Kirchhoff para Tensões (LKT) na malha (α_{CC}) constituída por V_{TH} , R_{TH} , junções BE_1 e BE_2 e R_E , obtém-se a corrente de base do transistor Q_1 (I_{B1}):

$$I_{B1} = \frac{V_{TH} - 2 \cdot V_{BE}}{R_{TH} + R_E \cdot (1 + \beta_1) \cdot (1 + \beta_2)}, \quad (3)$$

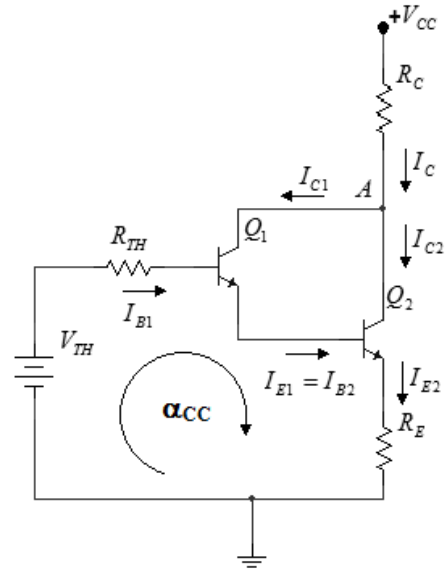


FIGURA 6. Circuito CC simplificado após o uso do teorema de Thévenin no circuito polarizador.

onde β_1 e β_2 são os parâmetros de ganho de corrente de Q_1 e Q_2 , respectivamente; V_{BE} é a tensão na junção base-emissor do transistor, aproximadamente 0,7 V.

As correntes de coletor (I_C), emissor (I_E) e base (I_B) nos transistores são determinadas pelas Equações:

$$I_{C1} = \beta_1 \cdot I_{B1}, \quad (4)$$

$$I_{E1} = I_{B1} + I_{C1} = I_{B1} \cdot (1 + \beta_1), \quad (5)$$

$$I_{B2} = I_{E1}, \quad (6)$$

$$I_{C2} = \beta_2 \cdot I_{B2} = \beta_2 \cdot I_{B1} \cdot (1 + \beta_1), \quad (7)$$

$$I_{E2} = I_{B2} + I_{C2} = I_{B1} \cdot (1 + \beta_1) \cdot (1 + \beta_2). \quad (8)$$

Usando a LKT nas malhas de coletor de cada transistor pode-se escrever as equações

$$V_{CC} = R_C (I_{C1} + I_{C2}) + V_{CEQ2} + R_E I_{E2}, \quad (9)$$

$$V_{CC} = R_C (I_{C1} + I_{C2}) + V_{CEQ1} + V_{BE2} + R_E I_{E2}, \quad (10)$$

e determinar os pontos quiescentes de Q_1 (Eqs. 11 e 12) e de Q_2 (Eqs. 13 e 14)

$$V_{CEQ1} = V_{CEQ2} - V_{BE2}, \quad (11)$$

$$I_{CQ1} = \beta_1 \cdot I_{B1}, \quad (12)$$

$$R_P = R_1 // R_2, \quad (20)$$

$$V_{CEQ2} = V_{CC} - R_C(I_{CQ1} + I_{CQ2}) - R_E I_{E2}, \quad (13)$$

$$r_C = R_C // R_L. \quad (21)$$

$$I_{CQ2} = \beta_2 \cdot I_{B1} \cdot (1 + \beta_1). \quad (14)$$

Uma linha de carga CC aproximada, onde $I_{CQ1} \ll I_{CQ2}$, pode ser obtida usando-se a Eq. 13. Os pontos de corte e saturação são obtidos impondo-se $I_{CQ2} = 0$ e $V_{CEQ2} = 0$, respectivamente.

$$I_{C(sat)} = \frac{V_{CC}}{R_E + R_C}, \quad (15)$$

$$V_{CE(corte)} = V_{CC}. \quad (16)$$

As potências dissipadas pelos transistores são dadas por:

$$P_{Q1} = V_{CEQ1} \cdot I_{CQ1}, \quad (17)$$

$$P_{Q2} = V_{CEQ2} \cdot I_{CQ2}. \quad (18)$$

A potência fornecida pela fonte de alimentação CC é calculada pela Eq. 19

$$P_D = V_{CC} \cdot (I_1 + I_C). \quad (19)$$

onde $I_1 \approx \frac{V_{CC}}{R_1 + R_2}$.

B. Análise CA

A Figura 7 mostra o circuito equivalente CA do amplificador Darlington usando a aproximação do modelo de Ebers-Moll para sinais de pequena amplitude.

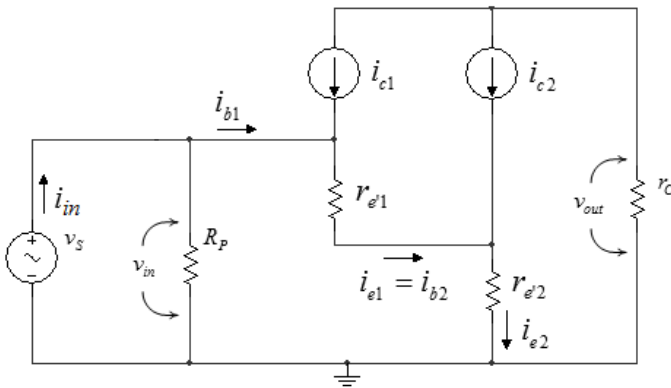


FIGURA 7. Circuito CA do amplificador da Figura 3 com os transistores substituídos por modelos de Ebers-Moll.

No circuito da Figura 7, R_P e r_C são dados por:

O ganho de tensão, definido por $A_v = v_{out}/v_{in}$, é calculado a partir de:

$$v_{out} = -r_C \cdot i_{e2}, \quad (22)$$

$$v_{in} = r_{e1} \cdot i_{e1} + r_{e2} \cdot i_{e2}. \quad (23)$$

onde $r_{e1(2)} = \frac{25mV}{I_{E1(2)}}$.

No circuito da Figura 7 também são válidas as Equações para as correntes alternadas similares àquelas apresentadas na análise do circuito de corrente contínua.

$$i_{c1} = \beta_1 \cdot i_{b1}, \quad (24)$$

$$i_{e1} = i_{b1} + i_{c1} = i_{b1} \cdot (1 + \beta_1), \quad (25)$$

$$i_{b2} = i_{e1}, \quad (26)$$

$$i_{c2} = \beta_2 \cdot i_{b2} = \beta_2 \cdot i_{b1} \cdot (1 + \beta_1), \quad (27)$$

$$i_{e2} = i_{b2} + i_{c2} = i_{b1} \cdot (1 + \beta_1) \cdot (1 + \beta_2). \quad (28)$$

Substituindo-se (25) e (28) em (22) e (23) obtém-se as tensões de saída e entrada do amplificador:

$$v_{out} = -r_C \cdot i_{b1} \cdot (1 + \beta_1) \cdot (1 + \beta_2), \quad (29)$$

$$v_{in} = i_{b1} \cdot (1 + \beta_1) [r_{e1} + r_{e2} \cdot (1 + \beta_2)]. \quad (30)$$

Assim o ganho de tensão resultante é dado por:

$$A_v = \frac{v_{out}}{v_{in}} = -\frac{r_C \cdot (1 + \beta_2)}{r_{e1} + r_{e2} \cdot (1 + \beta_2)}. \quad (31)$$

Usando-se as Eqs. 5 e 8 e a definição de r_e , pode-se obter $r_{e1}/r_{e2} = (1 + \beta_2)$. Com isso, após algumas manipulações algébricas em (31), o ganho de tensão é calculado por

$$A_v = -\frac{r_C}{2 \cdot r_{e2}}. \quad (32)$$

Considerando-se a corrente alternada que é aplicada à base de Q_1 , o ganho de corrente é definido pela razão i_{e2}/i_{b1} :

$$A_{ib} = \frac{i_{e2}}{i_{b1}} = (1 + \beta_1) \cdot (1 + \beta_2). \quad (33)$$

Francisco José Arnold, Rony da Silva Albano, Talia Simões dos Santos
Multiplicando (32) por (33) obtém-se o ganho de potência, A_p :

$$A_p = A_v \cdot A_i = -\frac{r_C \cdot (1 + \beta_1)(1 + \beta_2)}{2 \cdot r_{e'2}}. \quad (34)$$

Um caso particular a ser considerado é quando os transistores apresentam o mesmo parâmetro de ganho de corrente, ou seja, $\beta_1 = \beta_2 = \beta$. Neste caso, o ganho de potência pode ser aproximado por:

$$A_p = A_v \cdot A_i \approx -\frac{r_C \cdot \beta^2}{2 \cdot r_{e'2}}. \quad (35)$$

A impedância de entrada “vista” a partir da base de Q_1 , z_{ib} , é dada por

$$z_{ib} = \frac{v_{in}}{i_{b1}} = r_{e'1} \cdot (1 + \beta_1) + r_{e'2} \cdot (1 + \beta_1) \cdot (1 + \beta_2) \approx \beta_1 \cdot (r_{e'1} + \beta_2 \cdot r_{e'2}). \quad (36)$$

Na qual esta equação pode ser simplificada, pois $r_{e'1} \approx \beta_2 \cdot r_{e'2}$, então:

$$z_{ib} = \frac{v_{in}}{i_{b1}} = \beta_1 \cdot 2 \cdot r_{e'1}. \quad (37)$$

Com isso a impedância de entrada, z_{in} , é

$$z_{in} = R_1 // R_2 // z_{ib}. \quad (38)$$

A impedância de saída, z_{out} , do circuito amplificador é dada por:

$$z_{out} = r_C = R_C // R_L. \quad (39)$$

Uma reta de carga CA aproximada, considerando-se que $i_{c1} \ll i_{c2}$ e $i_{c2} = i_{e2}$, é obtida usando-se o circuito simplificado apresentado na Figura 8, onde $r_b = R_1 // R_2 // R_s$ e $r_C = R_C // R_L$.

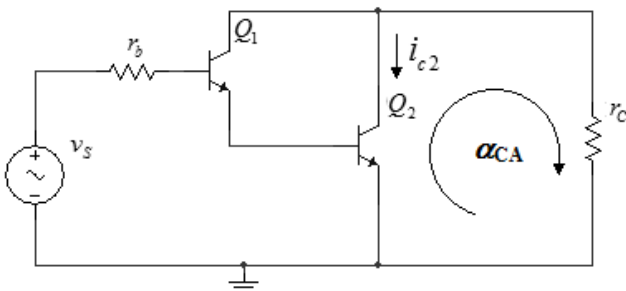


FIGURA 8. Circuito CA do amplificador Darlington.

Aplicando-se a LKT na malha (α_{CA}) obtém-se:

Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 8, No. 1, March 2014

$$v_{ce2} + r_C \cdot i_{C2} = 0, \quad (40)$$

onde $v_{CE2} = \Delta V_{CE2} = V_{CE2} - V_{CEQ2}$ e $i_{C2} = \Delta I_{C2} = I_{C2} - I_{CQ2}$.

Com isso, a partir das suas definições, os pontos de saturação e corte são calculados.

$$I_{C2(Sat)} = I_{CQ2} + \frac{V_{CEQ2}}{r_C}, \quad (41)$$

$$V_{CE2(Corte)} = I_{CQ2} \cdot r_C + V_{CEQ2}. \quad (42)$$

A Figura 9 ilustra as retas CC e CA obtidas a partir das correntes de coletor de saturação (Eqs. 15 e 41) e tensões entre coletor e emissor de corte (Eqs. 16 e 42) dos transistores.

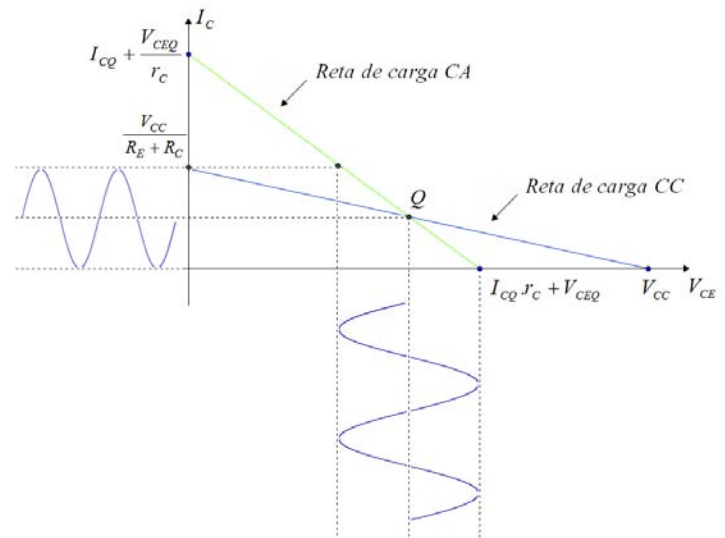


FIGURA 9. Retas de Carga CC e CA e método visual para determinação da compliância.

Por meio das retas de carga CC e CA pode-se determinar a compliância (máxima excursão da tensão de saída sem ceifamento), MPP. O MPP é definido como sendo o menor valor entre as Eqs. 43 e 44 e encontra-se indicado na Figura 9.

$$MPP = 2 \cdot r_C \cdot I_{CQ2}, \quad (43)$$

$$MPP = 2 \cdot V_{CEQ2}. \quad (44)$$

A potência dissipada pela carga na compliância é dada pela Equação:

$$P_L = \frac{(V_L)^2}{R_L} = \frac{(MPP)^2}{8 \cdot R_L}. \quad (45)$$

O rendimento é obtido pela razão entre (45) e (19), resultando em:

$$\eta = \frac{P_L}{P_D} \times 100\% . \quad (46)$$

A estabilidade em amplificadores eletrônicos é também um fator importante no seu desempenho. Todo dispositivo semicondutor é afetado pelo aumento da temperatura, uma vez que sob os efeitos desta pode haver maior migração de elétrons da banda de valência para a de condução. Particularmente, nos transistores bipolares, os efeitos da temperatura podem afetar, entre outros, o valor de β . Como β influencia nas correntes de coletor, e consequentemente no ponto quiescente dos transistores, é importante investigar essa dependência.

Substituindo-se (3) em (12) e (14) obtém-se

$$I_{CQ1} = \frac{\beta_1(V_{TH} - 2V_{BE})}{R_{TH} + R_E(1 + \beta_1)(1 + \beta_2)} \cong \frac{\beta_1(V_{TH} - 2V_{BE})}{R_{TH} + R_E\beta_1\beta_2} , \quad (47)$$

$$I_{CQ2} = \frac{\beta_2(1 + \beta_1)(V_{TH} - 2V_{BE})}{R_{TH} + R_E(1 + \beta_1)(1 + \beta_2)} \cong \frac{\beta_1\beta_2(V_{TH} - 2V_{BE})}{R_{TH} + R_E\beta_1\beta_2} \quad (48)$$

Considerando-se que as correntes de coletor apenas dependem de β_1 e β_2 , pode-se calcular a diferencial total

$(\Delta I_{CQ} = \frac{\partial I_{CQ}}{\partial \beta_1} \Delta \beta_1 + \frac{\partial I_{CQ}}{\partial \beta_2} \Delta \beta_2)$ para obter expressões relativas às variações de I_{CQ1} e I_{CQ2} .

$$\Delta I_{CQ1} = \frac{(V_{TH} - 2V_{BE})}{(R_{TH} + R_E\beta_1\beta_2)^2} (R_{TH} \Delta \beta_1 - R_E \beta_1^2 \Delta \beta_2) , \quad (49)$$

$$\Delta I_{CQ2} = \frac{(V_{TH} - 2V_{BE})}{(R_{TH} + R_E\beta_1\beta_2)^2} (R_{TH} \beta_2 \Delta \beta_1 + R_{TH} \beta_1 \Delta \beta_2) . \quad (50)$$

IV. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram construídos 2 circuitos amplificadores na configuração Darlington mostrada na Figura 3. Estes amplificadores são designados por CD1 e CD2. Os componentes utilizados nesses circuitos são: $V_{CC} = 15$ V, $R_S = 510\Omega$, $R_1 = 15k\Omega$, $R_2 = 3,3k\Omega$, $R_C = 3,6k\Omega$, $R_E = 1,0$ k Ω , $R_L = 3,6k\Omega$, $C_1 = C_2 = C_E = 100$ μ F. Os capacitores de acoplamento e de desvio dos circuitos apresentam reatância capacitiva desprezível em relação à frequência de excitação da fonte de sinais. No circuito CD1, ambos os transistores são 2N2222 com $\beta_1 = 155$ e $\beta_2 = 145$. No circuito CD2, os transistores Q_1 e Q_2 são o 2N2222 ($\beta_1 = 155$) e TIP41 ($\beta_2 = 49$). Os sinais de entrada eram senoidais e com frequência de 10 kHz. A impedância de saída da fonte desses sinais foi

desprezada. Os valores dos β s dos transistores foram determinados usando-se a função para este fim de um multímetro Minipa – ET-1100.

Estes circuitos foram montados em matriz de contato (protoboard). As tensões V_{CC} e v_s foram fornecidas, respectivamente por uma fonte de alimentação Agilent - U8032A e por um gerador de funções Tektonix – AFG3021B. As medições referentes ao circuito CC foram feitas com um multímetro Fluke modelo 8808A com a fonte v_s desconectada. As medições de sinais alternados foram feitas com um osciloscópio digital Tektronix – TDS2004C.

Estes circuitos também foram simulados no software Orcad 16.6 e as mesmas grandezas obtidas experimentalmente foram determinadas com o auxílio deste. Nestas simulações, os parâmetros de modelo dos transistores utilizados [6] foram aqueles padronizados nas bibliotecas fornecidas pelo fabricante do *software*.

A compliância foi determinada teoricamente por meio do valor mínimo entre os obtidos nas (Eqs. 42 e 43). Experimentalmente, a compliância é estimada por inspeção visual da forma da curva de v_{out} de maior amplitude e sem distorções perceptíveis. Procedimento visual similar foi utilizado para se determinar a compliância pelas simulações computacionais. Nos 3 casos considerou-se a carga $R_L = 3,6$ k Ω .

O ganho de tensão em malha fechada ($R_L = 3,6$ k Ω) foi determinado a partir das medições de v_{in} e v_{out} , onde $v_s = 30$ mV_{pp} em CD1 e CD2. Em ambos os casos as frequências do sinal de entrada foram de 10 kHz. O rendimento experimental, simulado e teórico do amplificador na compliância foi obtido de (45).

As correntes de base, necessárias para o cálculo dos ganhos de corrente e potência, não foram medidas diretamente, pois os instrumentos utilizados para tal não tinham sensibilidade suficiente para detecção de correntes da ordem de nA. No entanto, foram determinadas a partir das medições das tensões em R_s , R_1 e R_2 .

V. RESULTADOS

Nas Tabelas I e II são apresentados os valores de P_D , I_{CQ1} , V_{CEQ1} , P_{Q1} , I_{CQ2} , V_{CEQ2} , P_{Q2} , A_v , A_i , A_p , MPP e η dos circuitos CD1 e CD2, respectivamente.

TABELA I. Valores experimentais, simulados e teóricos de P_D , I_{CQ1} , V_{CEQ1} , P_{Q1} , I_{CQ2} , V_{CEQ2} , P_{Q2} , A_v , A_i , A_p , MPP e η do circuito CD1.

Grandeza	Experimental	Simulado	Teórico
P_D (mW)	36,0	35,22	31,78
I_{CQ1} (μ A)	10,60	9,08	8,85
V_{CEQ1} (V)	7,20	7,31	8,32
P_{Q1} (μ W)	76,32	66,37	73,63
I_{CQ2} (mA)	1,57	1,53	1,29
V_{CEQ2} (V)	7,84	8,01	9,02
P_{Q2} (mW)	12,31	12,25	11,64
A_v	-37,30	-52,15	-47,18

A_i	5248,94	2257,88	22833,00
A_p	195785,46	117748,44	1077260,94
MPP	1,50 ($v_s = 40$ mVpp)	1,75 ($v_s = 40$ mVpp)	4,64
$\eta(\%)$	0,21	0,30	0,51

TABELA II. Valores experimentais, simulados e teóricos de P_D , I_{CQ1} , V_{CEQ1} , P_{Q1} , I_{CQ2} , V_{CEQ2} , P_{Q2} , A_v , A_i , A_p , MPP e η do circuito CD2.

Grandeza	Experimental	Simulado	Teórico
P_D (mW)	37,5	37,04	32,19
I_{CQ1} (μA)	31,22	58,31	26,00
V_{CEQ1} (V)	6,89	6,71	8,92
P_{Q1} (μW)	215,10	391,26	231,92
I_{CQ2} (mA)	1,64	1,65	1,30
V_{CEQ2} (V)	7,39	7,41	8,22
P_{Q2} (mW)	12,12	12,22	10,69
A_v	-38,00	-59,55	-47,36
A_i	4129,23	5734,47	7709,18
A_p	156910,74	341487,69	365106,76
MPP	1,56 ($v_s = 40$ mVpp)	1,90 ($v_s = 40$ mVpp)	4,68
$\eta(\%)$	0,22	0,34	0,50

As linhas de carga CC são as mesmas para os circuitos CD1 e CD2. Os resultados obtidos para $I_{C2(sat)}$ e $V_{CE2(corte)}$ são 3,26mA e 15V, respectivamente. Os extremos das linhas de carga CA, obtidas teoricamente, são: $I_{C2(sat)} = 6,31$ mA, $V_{CE2(corte)} = 11,36$ V para CD1 e $I_{C2(sat)} = 6,31$ mA, $V_{CE2(corte)} = 11,35$ V para CD2.

As impedâncias de entrada foram calculadas resultando em $z_{ib} = 870,10$ k Ω e $z_{in} = 2,69$ k Ω para CD1 e $z_{ib} = 296,16$ k Ω e $z_{in} = 2,67$ k Ω para CD2.

VI. DISCUSSÕES

A literatura básica dos programas da disciplina eletrônica em cursos de física usualmente aborda apenas as configurações convencionais de amplificadores eletrônicos. Estudos de configurações alternativas, como a Darlington e a Sziklai [7] podem servir como atividades complementares dessas disciplinas.

O Orcad 16.6 apresenta-se como uma ótima solução para ensaios e projetos. O Orcad faz uso do modelo de Gummel-Poon [8] para simular transistores bipolares. Este modelo apresenta características que os convencionais não possuem e é adequado para implementação em programas de computador. Os resultados simulados e experimentais apresentaram-se com baixos desvios. Isso credencia o uso deste *software* como instrumento didático no sentido de avaliar de forma ágil e segura novas configurações de amplificadores ou de outros de circuitos eletrônicos. Evidentemente, apenas o uso do *software* não exime a prática de laboratório, em que o desenvolvimento de protótipos com refinamento da percepção da tolerância dos

componentes e a prática de ajustes finos são altamente recomendáveis.

Os erros verificados nos cálculos com o modelo teórico podem ser atribuídos a inserção de um circuito equivalente de transistor (modelo de Ebers-Moll) composto por componentes lineares. A junção base-emissor, que fisicamente corresponde a um diodo, é aproximada por um resistor cujo valor é dependente da corrente de polarização. Também se despreza o efeito Early [9], que impõe variação de corrente de coletor em função da tensão entre coletor e emissor. Outro aspecto a ser considerado é a dependência de β com a corrente de coletor. A determinação dos valores de β usando-se um multímetro convencional é feita baseada nas correntes que são impostas pelo circuito de teste do instrumento. O transistor, quando em operação no circuito, é sujeito a outros níveis de corrente que podem alterar o valor de β . Essas restrições que foram impostas ao modelo influenciam nos resultados, conduzindo a um aumento nos erros. Contudo, de modo geral, a magnitude desses erros não foi expressiva se consideramos os procedimentos práticos para desenvolvimento dos circuitos eletrônicos.

Tanto em CD1 como em CD2, o consumo de potência da fonte é praticamente o mesmo. No entanto, quando se utiliza o transistor Q_2 com β inferior, a dissipação em Q_1 é maior. O transistor Q_1 atua como uma fonte de corrente para Q_2 . Portanto, o aumento na corrente de coletor de Q_1 é necessário para suprir maior corrente para a base de Q_2 a fim de manter o ponto quiescente do mesmo.

O valor de r_{e2} deve ser pequeno pois, sendo a corrente $I_{E1} = I_{B2}$ amplificada por Q_1 , I_{E2} torna-se elevada. Isto colabora para o aumento do ganho de tensão (Eq. 32) nesta configuração de amplificadores. O ganho de corrente na configuração Darlington (Eq. 33), considerando-se i_{b1} como variável de entrada, é elevado, pois depende do produto dos valores de β e, consequentemente, o mesmo ocorre com o ganho de potência.

A entrada do amplificador é composta por uma associação paralela de $R_1//R_2$ e z_{ib} . Como $R_1//R_2$ é muito menor que z_{ib} , a corrente fornecida pela fonte de sinais é em grande parte desviada ao terra. Como consequência, se o ganho de corrente tomar como referência i_{in} , este terá um valor reduzido. Dessa forma, optou-se por uma relação de correntes entre i_{b1} e i_{e2} para definir o ganho de correntes, pois esta permite uma avaliação mais significativa do desempenho da configuração Darlington. Os resultados experimentais e simulados obtidos para este ganho de corrente apresentaram pequeno desvio. Por outro lado, o modelo teórico produziu desvios importantes no ganho de corrente. Esta divergência pode ser atribuída à corrente de fuga entre base e coletor.

Quando se considera a corrente de fuga entre base e coletor, a corrente de coletor é dada por $i_c = (i_b + i_{cbo})/\beta$. Isto significa que a corrente de base é maior e, portanto, o valor β efetivo do transistor é menor. Quando simulamos o circuito com intuito de determinar o ganho de corrente, verificamos que a corrente de base na simulação foi cerca de 10 vezes maior que a esperada pelo modelo teórico simplificado. Com isso, a diferença entre os ganhos de corrente foi grande. Como as correntes de base são da

ordem de nA, estas devem ser afetadas pela corrente i_{cbo} (que também são da ordem de nA) que não é prevista pelo modelo teórico adotado. Sendo assim, na simulação a corrente de base é maior que a obtida pelo modelo teórico e, com isso, se explica a diferença entre os ganhos. Mesmo assim, o elevado ganho de corrente e, consequentemente de potência, é o principal diferencial da configuração Darlington em comparação com o circuito convencional (Figura 2).

A impedância de entrada do circuito da configuração Darlington é dominada pelo termo R_{TH} . A impedância “vista” pela base de Q_1 é muito alta, uma vez que a baixa corrente que excita a base de Q_2 eleva o valor de r_{e1} . Além disso, Q_1 é um transistor média potência que possui β elevado. Para circuitos em que o valor de β_2 é menor, a corrente de coletor (emissor) de Q_1 é maior e isto faz com que a impedância z_{ib} diminua. Em relação a impedância de saída, ambas são idênticas.

A compliância determinada pelo modelo teórico é maior que no caso experimental. Isto se explica, pois o modelo teórico considera pontos de corte e saturação, enquanto que, na realidade, existem regiões, que contém esses pontos, onde a perda de linearidade se manifesta e a forma de onda da tensão de saída se distorce. Portanto, a excursão do ponto quiescente pela linha de carga CA não ocorre em toda a extensão ilustrada na Figura 10, mas em uma faixa mais limitada, causando diminuição da compliância. Isto se reflete também na eficiência, nas Tabelas I e II se verifica que a eficiência obtida experimentalmente é menor que a teórica. Uma avaliação mais precisa sobre a compliância poderia ser feita usando-se um analisador de espectro para se analisar a incidência de harmônicos na forma de onda da tensão de saída.

Os amplificadores classe A apresentam baixa eficiência causada pelo fornecimento de energia da fonte de alimentação para a corrente de coletor dos transistores durante todo o ciclo de operação. Esta baixa eficiência também se verifica em circuitos convencionais, como aquele apresentado na Figura 2. Para se obter melhores eficiências deve-se usar a configuração Darlington em classe B, por exemplo.

A avaliação da estabilidade dos circuitos é feita por meio das Equações 46 a 49. Se $R_{TH} \ll R_E \beta_1 \beta_2$, verifica-se que I_{CQ2} é independente dos β s. Na mesma condição, I_{CQ1} é dependente de β_2 . Portanto, para se alcançar maior estabilidade dos pontos quiescentes deve-se estabelecer nos projetos valores de $R_{TH} \ll R_E \beta_1 \beta_2$ e buscar dissipar, com eficiência, a energia térmica de Q_2 por meio do uso de dissipadores. Como pode ser visto nas Tabelas I e II, a potência dissipada em Q_2 é maior e, portanto, este transistor pode ser afetado pelos efeitos térmicos.

VII. CONCLUSÕES

Foi apresentado um procedimento simplificado para análise de amplificadores na configuração Darlington com finalidade didática. Resultados experimentais e simulados foram obtidos e comparados com os do modelo teórico

baseado no equivalente de Ebbbers-Moll, usualmente empregado em estudos simplificados de amplificadores.

A utilização do Orcad 16.6, apresentou resultados simulados próximos aos experimentais, ilustrando a real possibilidade de utilização deste *software* como ferramenta didática e de desenvolvimento de projetos.

Do procedimento metodológico realizado, foram obtidas as seguintes conclusões:

- mesmo fazendo uso de um modelo aproximado, os resultados provenientes deste estão, para a maioria dos parâmetros mensurados, próximos aos obtidos experimentalmente e por simulação;
- apesar de algumas limitações, o modelo apresentado ajuda na interpretação física das características do amplificador e estabelece parâmetros iniciais para o desenvolvimento de projetos;
- os resultados recomendam a utilização dos amplificadores Darlington para a obtenção, em um único estágio, de elevados ganhos de potência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPESP (Projeto nº 2012/07639-4) pelo suporte financeiro deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] Hodges, D. A., *Darlington's contribution to transistor circuit design*, IEEE Trans. on Circuits and Systems I **46**, 102-104 (1999).
- [2] Malvino, A. P., *Eletrônica*, vol. 1, 4ª Edição, (Makron Books, São Paulo, 1997).
- [3] LaLond, D. E. and Ross, J. A., *Princípios de Dispositivos e Circuitos Eletrônicos*, vol. 1, (Makron Books, São Paulo, 1999).
- [4] Boylestad, R. L. and Nashelsky, L., *Dispositivos Eletrônicos e Teoria de Circuitos*, 8ª Edição, (Prentice-Hall, São Paulo, 2004).
- [5] Sedra, A. S. and Smith, K. C., *Microeletrônica*, 4ª Edição, (Makron Books, São Paulo, 2000).
- [6] Orcad Pspice AD – Reference Guide, Bipolar Junction Transistor, 204-214 (1999).
- [7] Pandei, B. and Susmrita, S. and Tiwari, S. N. and Singh, J. and Shukla, S. N., *Qualitative analysis of small-signal modified Sziklai pair amplifier*, Indian Journal of Pure & Applied Physics **50**, 272-276 (2012).
- [8] Gummel, H. K. and Poon, H. C., *An integral charge control model for bipolar transistors*, Bell Syst. Tech. J. **49**, 827-852 (1970).
- [9] Hart, B. L., *Modeling the Early Effect in Bipolar Transistors*, IEEE J. of Solid-State Circuits **18**, 139-140 (1983).

Puntualizaciones en las aplicaciones didácticas de la ley de Stokes



Ricardo Fernández Cruz, José Luis Hernández Pérez,

Jaime Solá de los Santos

*Grupo Heurema. Departamento de Física y Química, I. E. S. Cervantes,
C/ Embajadores 70, C.P. 28012, Madrid, España.*

E-mail: ridafercruz@gmail.com

(Recibido el 2 de Enero de 2014, aceptado el 30 de Marzo de 2014)

Resumen

Los libros de Física recomiendan utilizar bolas de diámetros pequeños y números de Reynolds muy bajos, cuando se aplica la ley de Stokes a la medida de la viscosidad de líquidos, especialmente la glicerina, pero no cuantifican ni el Reynolds ni el diámetro, de modo que utilizando varias bolas de diámetros pequeños, sorprendentemente, se obtienen valores diferentes de la viscosidad, aun manteniendo constante la temperatura. En este artículo se hace un estudio que permite cuantificar los diámetros de las bolas y los valores del Reynolds, por debajo de los cuales se debe trabajar para obtener un valor de la viscosidad constante.

Palabras clave: Ley de Stokes, Viscosidad, Fotografía digital.

Abstract

Physics books recommend employing small diameter balls and very low Reynolds numbers, when Stokes' Law is applied for measuring liquid viscosity, especially that of glycerine. However, neither Reynolds nor ball diameters are quantified, so that if several small diameter balls are employed, surprisingly, different viscosity values are obtained, even under constant temperature. In this study we performed experiments that enabled us quantify the actual ball diameters and Reynolds values, under which work should be carried out to obtain a constant viscosity value.

Keywords: Stokes law, Viscosity, Digital photography.

PACS: 01.40.Fk, 47.15.G, 07.05.Fb, 07.68.+m

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Una práctica frecuente en los primeros cursos de Facultades y Escuelas Técnicas, es aplicar la ley de Stokes para estudiar fácilmente el movimiento de sólidos (esferas) en un medio resistente. Generalmente se utiliza glicerina y esferas de diámetro superior a 1 mm; se mide su velocidad límite, el número de Reynolds y como aplicación, el coeficiente de viscosidad del fluido.

Los autores hemos verificado, que utilizando distintas esferas de radio superior al milímetro, sí que se alcanza rápidamente la velocidad límite, sin embargo, se obtienen resultados que conducen a valores distintos del coeficiente de viscosidad de la glicerina, aun teniendo gran cuidado en mantener la temperatura constante. En otras palabras, alcanzar la velocidad límite es una condición necesaria pero no suficiente. No obstante, cuando se emplean esferas de radios inferiores al milímetro, los valores del coeficiente de viscosidad se mantienen muy aproximados dentro de los errores experimentales, lo que parece indicar que la teoría de Stokes funciona bien para esferas de radios muy pequeños ($r \leq 1$ mm) y no tan bien para esferas de radios superiores.

II. FUNDAMENTO TEÓRICO

Cuando un sólido se desplaza verticalmente y en sentido descendente en el seno de un fluido sobre él actúan las siguientes fuerzas: El peso del sólido $\vec{P}$, en vertical y sentido hacia abajo, la fuerza de empuje $\vec{E}$, vertical y sentido hacia arriba y una fuerza resistente al movimiento $\vec{F}_R$, vertical y hacia arriba, Fig.1. Esta fuerza dependerá de la naturaleza del fluido, de la sección transversal, de la forma del sólido y directamente de una potencia de la velocidad v con que se desplaza. Para el caso de sólidos esféricos dicha fuerza podrá expresarse como:

$$F_R = -C_D r^2 \eta v. \quad (1)$$

Donde r es el radio de la esfera, C_D un coeficiente de rozamiento o de arrastre y η el coeficiente de viscosidad del fluido.

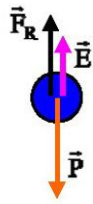


FIGURA 1. Fuerzas sobre una esfera en movimiento en el seno de un fluido.

Analizando el balance de las fuerzas, si $|\vec{P}| > |\vec{E} + \vec{F}_R|$ el movimiento es acelerado, con aceleración no constante y en sentido vertical descendente. Teniendo en cuenta que según la ecuación (1) $\vec{F}_R$ aumenta con la velocidad, resulta que un movimiento inicialmente acelerado, termina por convertirse en otro uniforme, cuando

$$|\vec{P}| = |\vec{E} + \vec{F}_R|. \quad (2)$$

En este caso, la velocidad constante alcanzada, recibe el nombre de *velocidad límite* v_L .

Se comprueba que si se emplean bolas de acero de masa m y densidad ρ_B y glicerina de densidad ρ_G el movimiento uniforme a la velocidad límite, según la teoría se alcanza a tiempo infinito, pero en la práctica se alcanza en seguida como puede verse en la fotografía estroboscópica [1] de la Figura 2.



FIGURA 2. Fotografía estroboscópica de una esfera de radio 4 mm descendiendo en glicerina. Se ha tomado en intervalos de tiempo de 0,104 s. La distancia entre los índices de la regla es 200 mm.

En esta ocasión el intervalo temporal entre cada dos posiciones consecutivas de la bola, es $\Delta t = 0,104$ s y la distancia entre los índices de la regla es 200 mm. Intencionadamente, hemos empleado una bola de radio 4 mm, mayor que el de las esferas utilizadas posteriormente para medir la viscosidad, para comprobar realizando medidas cuantitativas en la foto, que la velocidad límite se

establece muy pronto, y así nos aseguramos que con esferas más pequeñas, la velocidad límite se alcanzará rápidamente. Cuando la bola se mueve con la velocidad límite, el problema físico es equivalente al del movimiento de un fluido alrededor de un obstáculo estático, cuando la velocidad del fluido en el infinito es uniforme e igual a v_L . Suponiendo el flujo incomprensible, las ecuaciones de la Física de Fluidos para este problema dependen de un único parámetro adimensional, que se llama número de Reynolds.

$$R_E = \frac{2r\rho_G v_L}{\eta_G}. \quad (3)$$

Donde η_G es la viscosidad de la glicerina y ρ_G su densidad. Stokes demostró en 1851 que en el límite $R_E \rightarrow 0$ (equivalente a despreciar las fuerzas de inercia frente a las fuerzas viscosas) y para el caso de una esfera, existe una solución exacta (y laminar) para *el campo de velocidades del fluido*, a partir de la cual se puede obtener una expresión explícita para el coeficiente de arrastre.

$$C_D = 6\pi/r. \quad (4)$$

De tal forma que la fuerza de resistencia es $F_R = -6\pi r \eta v_L$. Desde el trabajo pionero de Stokes, el estudio del movimiento de un fluido viscoso en torno a un sólido se ha convertido en uno de los problemas fundamentales de la Física de Fluidos y de la Hidrodinámica. Por supuesto esta fuera de lugar en este artículo, de intención meramente didáctica extenderse más en este asunto. Tan solo mencionaremos que obtener expresiones teóricas más allá del límite de Stokes un campo que, a pesar de más de 150 años de avances, todavía no está cerrado [2]. Lo mismo ocurre, incluso tras los bien conocidos estudios de von Karman, con el fenómeno de la inestabilización del flujo por detrás del sólido (aparición de estelas y de turbulencias) que sucede a valores del R_E más altos de los que manejamos aquí.

Una vez alcanza la velocidad límite, combinando las ecuaciones (1), (2) y (4) se obtiene:

$$\begin{aligned} mg &= V\rho_G g + 6\pi r \eta v_L, \\ \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_B g &= \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_G g + 6\pi r \eta v_L, \\ \frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho_B - \rho_G) &= 6\pi r \eta v_L, \\ \eta &= \frac{2}{9}g(\rho_B - \rho_G) \frac{r^2}{v_L}. \end{aligned} \quad (5)$$

Existen diversos libros de Física Experimental [3, 4, 5, 6, 7, 8], en los que se incluye una práctica para determinar la viscosidad de la glicerina, midiendo las variables que contiene la ecuación (5). Si se utiliza dicha ecuación, es preciso lograr que la esfera alcance la velocidad límite y medirla, junto con las dos densidades y el radio de las esferas.

En la mayoría de los textos se sugiere, solamente de forma cualitativa, que las esferas utilizadas sean de radio pequeño y algunos ponen otra condición y es que el número de Reynolds sea mucho menor que 1, $Re \ll 1$, de acuerdo con el carácter asintótico de la fórmula de Stokes, Ec. (4). Finalmente, dos textos de los citados [3, 6] indican que la velocidad límite medida experimentalmente debe corregirse, mediante la ecuación conocida con el nombre de Ladenburg, debido a que la esfera se mueve en un medio limitado por paredes y no en un fluido de extensión infinita.

$$v_{\text{Corregida}} = v_L \left(1 + k \frac{r}{R} \right) = v_L \left(1 + 2,4 \frac{r}{R} \right). \quad (6)$$

En la que R es el radio del cilindro donde se ha determinado la velocidad límite y k una constante. No existe unanimidad en el coeficiente k , algunos autores indican el valor 2,1 como la referencia [9]. La ecuación (5) puede escribirse:

$$v_L = \frac{2g(\rho_B - \rho_G)}{9\eta} r^2. \quad (7)$$

Resultando que si la ecuación es válida para esferas que alcancen la velocidad límite, al representar v_L frente a r^2 , a una cierta temperatura, se debe obtener una línea recta. Para verificarlo es necesario emplear varias esferas de distinto radio, pero de la misma densidad ρ_B .

Comenzamos el experimento con esferas de radio $r \geq 4$ mm y aunque se alcanzaba enseguida la velocidad límite, al representar $v_L = f(r^2)$ no se obtenía la recta esperada, o en otras palabras, el valor obtenido de la viscosidad parecía depender del diámetro de la esfera. Decidimos entonces trabajar con esferas de radios $r \leq 1,50$ mm, buscando a partir de qué valores de r los resultados de la viscosidad se mantenían constantes dentro de los errores experimentales.

III. TÉCNICA DE MEDIDA

A. Materiales y dispositivo

Se utilizaron los instrumentos indicados en la Figura 3: (1) Sonda de temperatura, (2) Termómetro digital, (3) Reloj digital, (4) Probeta.

Otros elementos que no están en la imagen: Electroimán (situado encima de la probeta) con interruptor y fuente de c.c. Cámara fotográfica digital conectada a un ordenador. Dos focos de iluminación con paraguas reflectores. Barras y nueces de montaje. Fondo negro.

Esferas de acero de diferentes radios, en mm: 0,50 ; 0,79 ; 1,00 ; 1,25 ; 1,50.

Las esferas de acero se venden, a precio muy asequible, en tiendas de rodamientos. Se suministran con el valor de sus diámetros, los comprobamos empleando un micrómetro y los valores suministrados por el fabricante son muy fiables.

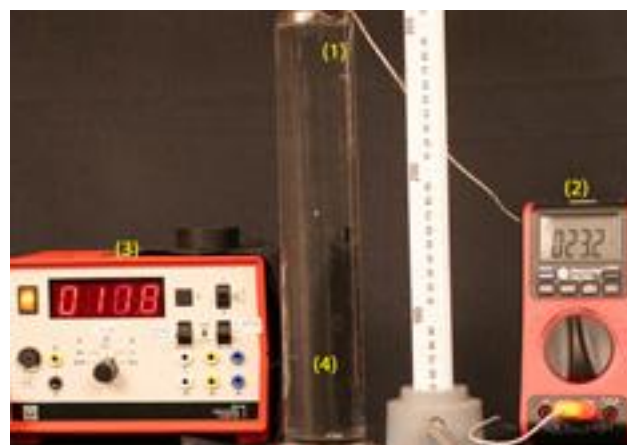


FIGURA 3. Montaje experimental con la sonda de temperatura (1) en la probeta (4), conectada al termómetro digital (2). Un reloj digital (3) y la regla para determinar las posiciones de la bola, sobre la propia fotografía. Obsérvese también a la bola descendiendo.

B. Determinación de la densidad de las esferas

Para determinar la densidad de las bolas se han medido, para diversas esferas sus diámetros, con un micrómetro y sus masas con una balanza electrónica, obteniéndose como valor medio de la misma:

$$\rho_B = (7,77 \pm 0,09) \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}.$$

C. Determinación de la densidad de la glicerina

La glicerina utilizada es un producto comercial designado como “glicerina bidestilada”. Su densidad se determinó midiendo los volúmenes de líquido con una probeta y pesando cada contenido en una balanza electrónica. La temperatura de la glicerina estaba comprendida entre 23 y 24°C.

El valor medio obtenido para la densidad de la glicerina:

$$\rho_G = (1,26 \pm 0,01) \cdot 10^3 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}.$$

D. Determinación de la velocidad límite y de la temperatura

Para determinar la velocidad límite se siguieron los siguientes pasos:

- 1) Se coloca la bola en el electroimán cerrando el circuito.
- 2) Se abre el interruptor del electroimán, con lo que la bola cae en vertical, al mismo tiempo que se pone en funcionamiento el reloj digital.
- 3) Se fotografía la caída de la bola. Dado que la velocidad de caída es muy lenta se obtiene un conjunto de varias fotografías con las posiciones de la bola, en distintos instantes de tiempo, siendo una la de la Fig.3. En cada

Ricardo Fernández Cruz, José Luis Hernández Pérez, Jaime Solá de los Santos
fotografía quedan registradas: la temperatura, el instante de tiempo y la posición de la bola.

- 4) Con cada bola se han realizado tres series de medidas, para confirmar la validez de los datos experimentales. Las bolas de radio inferior a 1 mm a veces quedan retenidas en el electroimán debido al magnetismo remanente, por ello fue preciso soltarlas con la mano. La bola de radio 0,50 mm permanecía sobre la superficie de la glicerina sin hundirse, debido a la tensión superficial y a su pequeño peso, por lo que fue necesario empujarla dentro de la glicerina con un objeto ligero, para que empezara a descender.

La viscosidad de la glicerina depende de forma notable de la temperatura. Hemos realizado todos los experimentos manteniendo su temperatura dentro de un intervalo de $23,2 \pm 0,1^\circ\text{C}$.

El trabajo se efectuó en un laboratorio con calefacción y el control de la temperatura se hacía con un ventilador dirigido directamente a la probeta que contenía la glicerina y abriendo y cerrando las ventanas del laboratorio, cuando era necesario. Esto nos exigió dosis de paciencia para mantener constante la temperatura adecuada.

La posición se obtiene directamente en la pantalla del ordenador. En cada fotografía se traza una línea recta que va desde la bola a la regla. En el ordenador se amplía al máximo la fotografía y esto nos permite leer la posición con una incertidumbre de $\pm 1\text{mm}$ (Figura 4).



FIGURA 4. Trazando con el ordenador una línea horizontal, desde la bola a la regla, medimos su posición en cada instante. El cable que aparece en vertical, a la derecha dentro de la probeta, es la sonda de temperatura introducida en la glicerina.

IV. RESULTADOS

A. Representaciones gráficas

Para cada esfera se representa la posición y , frente al tiempo t . La pendiente de la recta nos da la velocidad límite experimental. Se muestran los resultados para las distintas esferas, en las Figuras 5 y 6.

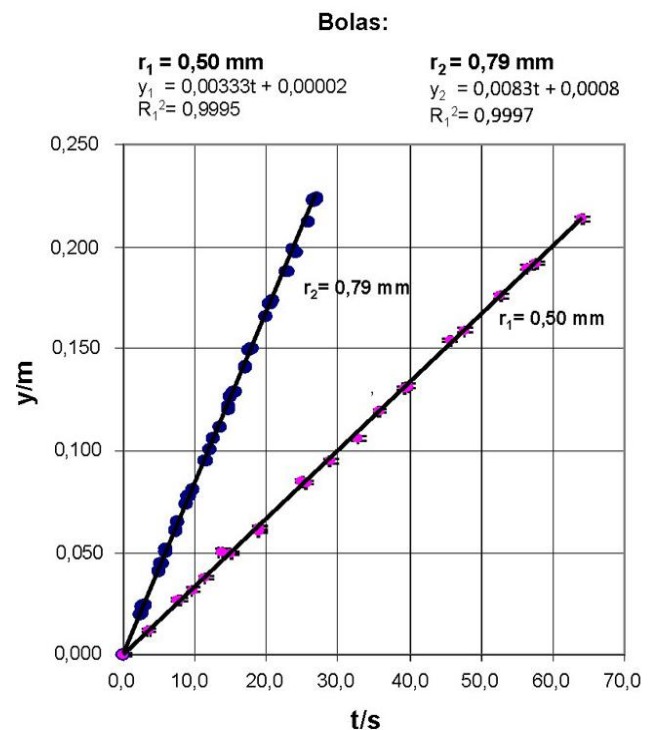


FIGURA 5. Gráfica posición-tiempo de las bolas de radios: 0,50 mm y 0,79 mm.

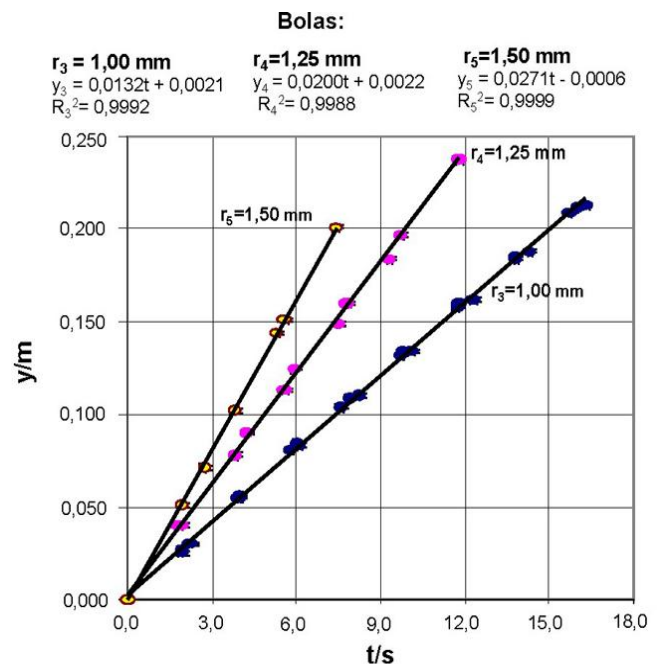


FIGURA 6. Gráfica posición-tiempo de las bolas de radios: 1,00, 1,25 y 1,50 mm.

Todos los resultados experimentales correspondientes a las velocidades límites, en función de los diámetros de las bolas se muestran en la Tabla I.

TABLA I. Velocidades límite.

Diámetro de las bolas/mm	Velocidad límite v_L/ms^{-1}
$1,00 \pm 0,01$	$(3,33 \pm 0,01) \cdot 10^{-3}$
$1,58 \pm 0,01$	$(8,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$
$2,00 \pm 0,01$	$(13,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$
$2,50 \pm 0,01$	$(20,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$
$3,00 \pm 0,01$	$(27,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$

Representamos la velocidad límite frente al cuadrado del radio, ajustando por una recta, como cabe esperar de acuerdo con la ecuación (7), deducida de la ley de Stokes, véase la Figura 7.

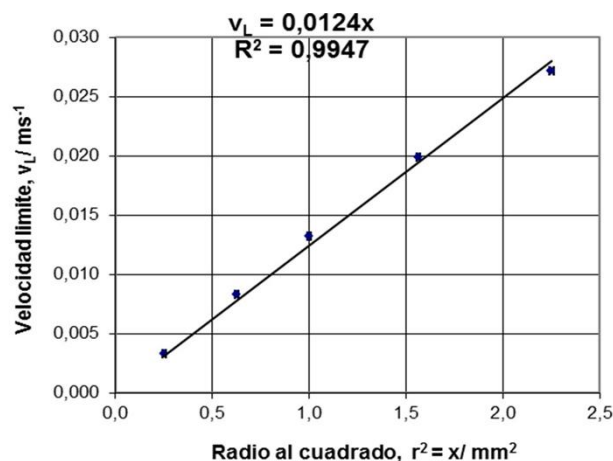


FIGURA 7. Representación de la velocidad límite frente al cuadrado del radio, ajustando por una recta.

Los puntos experimentales se adaptan aproximadamente a una recta, sin embargo, el coeficiente de correlación está algo alejado de la unidad. Probamos a ajustar los datos anteriores por una curva de segundo grado y el valor de R^2 se hace la unidad, Figura 8.

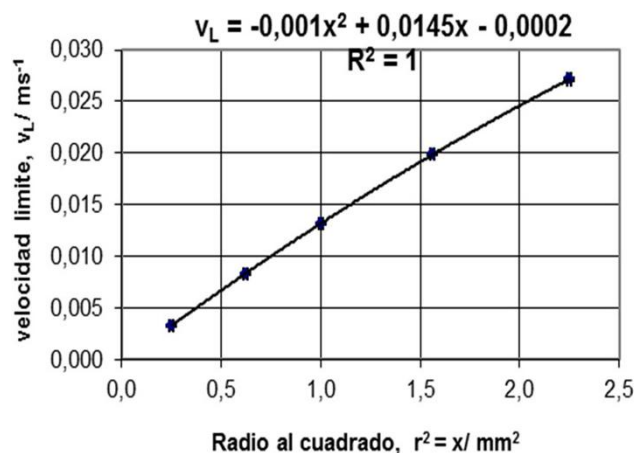


FIGURA 8. Representación de la velocidad límite frente al cuadrado del radio, ajustando por una parábola.

Puntualizaciones en las aplicaciones didácticas de la ley de Stokes Representamos ahora solamente, los puntos correspondientes a las tres esferas de radios más pequeños y los puntos experimentales se ajustan a una recta, con un coeficiente de correlación R^2 que es prácticamente la unidad (Figura 9).

Bolas de radios/mm: 0,50; 0,79; 1,00 $v_L = 0,0132x + 7E-0$
 $R^2 = 0,9999$

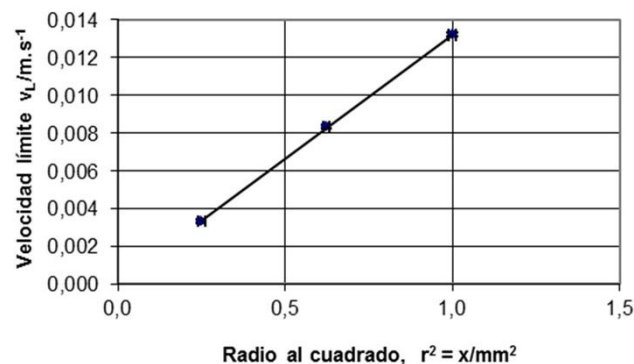


FIGURA 9. Representación de la velocidad límite frente al cuadrado del radio para las tres bolas de menor radio.

Los resultados parecen indicar que la ley de Stokes funciona bien para radios de las esferas inferiores o iguales a 1 mm.

B. Determinación de la viscosidad y del número de Reynolds

Incertidumbre en la diferencia de densidades:

$$\rho_B - \rho_G = (7,77 \pm 0,09) \cdot 10^3 - (1,26 \pm 0,01) \cdot 10^3 = (6,5 \pm 0,1) 10^3$$

$$\varepsilon_r = \frac{0,1}{6,5} 100\% = 1,5\%$$

Empleando la ecuación (5) se determina la viscosidad de la glicerina con cada bola y el número de Reynolds con la ecuación (3); mostrándose los resultados en la Tabla II.

TABLA II. Viscosidad de la glicerina según el radio de la bola y el número de Reynolds.

Diámetro bolas/mm	$V_L/10^{-3}\text{ms}^{-1}$	Viscosidad/ $\eta/\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$	Número de Reynolds
$1,00 \pm 0,01$	$3,33 \pm 0,01$	$1,06 \pm 0,04$	$(4,0 \pm 0,2) \cdot 10^{-3}$
$1,58 \pm 0,01$	$8,3 \pm 0,1$	$1,06 \pm 0,04$	$(16 \pm 1) \cdot 10^{-3}$
$2,00 \pm 0,01$	$13,2 \pm 0,1$	$1,07 \pm 0,03$	$(31 \pm 2) \cdot 10^{-3}$
$2,50 \pm 0,01$	$20,0 \pm 0,1$	$1,11 \pm 0,04$	$(57 \pm 3) \cdot 10^{-3}$
$3,00 \pm 0,01$	$27,1 \pm 0,1$	$1,18 \pm 0,04$	$(87 \pm 4) \cdot 10^{-3}$

Se deduce de la Tabla II, que cuanto menor es el número de Reynolds, los valores de la viscosidad son más similares dentro de los errores experimentales, sin embargo, para Reynolds mayores se empiezan a dispersar. El resultado está vinculado al hecho de que la fórmula de Stokes es una aproximación válida, en el límite $Re \rightarrow 0$.

Finalmente se ha representado la viscosidad frente al radio, confirmándose lo visto acerca del tamaño adecuado de las esferas, para lograr medidas coherentes de ésta magnitud (Figura 10).

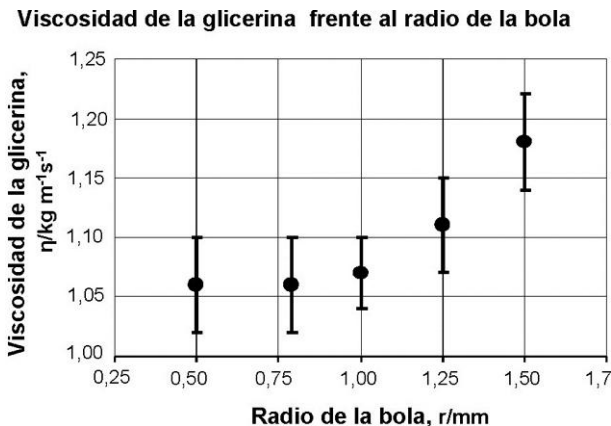


FIGURA 10. Valores de la viscosidad frente al radio.

Se observa, que aunque la viscosidad es una a cada temperatura, sin embargo su determinación experimental parece estar influenciada por el radio de la bola, exceptuando las de radios ≤ 1 mm. Los resultados muestran que hay que elegir el radio correcto, para hacer adecuadamente el experimento.

C. Corrección de Ladenburg

La corrección de Ladenburg (6) afecta en mayor cuantía a las esferas de radio mayor y tiende a proporcionar valores de la viscosidad, (como se observa en la Tabla III), que se acerquen a los valores obtenidos con las esferas de menor radio. En dicha Tabla, se dan los valores de las viscosidades corregidas. ($\text{V.C.}/\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$) para cada diámetro de diversas esferas. Observamos que, cuando se aplica la ecuación de Ladenburg desaparece la aparente (y no física) dependencia de la viscosidad del líquido con el radio de la esfera que se emplea para medirla.

TABLA III. Viscosidades con la corrección de Ladenburg.

D/ mm	1,00	1,58	2,00	2,50	3,00
V. C.	1,02±0,04	1,00±0,04	0,99 ±0,03	1,01±0,02	1,04±0,03

V. CONCLUSIONES

- Empleando glicerina, la velocidad límite se alcanza rápidamente hasta con bolas de 4 mm de diámetro.
- El suceso de alcanzar la velocidad límite, no es una condición suficiente para obtener un valor correcto de la viscosidad a una cierta temperatura.
- Los valores que parecen más fiables de la viscosidad se obtienen con bolas de radios muy pequeños (≤ 1 mm) a las que corresponden velocidades límites muy bajas y también números de Reynolds menores que 0,03.
- A la vista de la Tabla.III debe hacerse siempre la corrección de Ladenburg, para obtener unos valores concordantes de la viscosidad.
- Para medir la viscosidad de la glicerina, hay que procurar que la temperatura se mantenga constante y nunca con variaciones superiores a $\pm 0,1$ °C.

REFERENCIAS

- [1] Hernández Pérez, J. L., Solá de los Santos, J., y Fenández Cruz, R., *Caída libre. Realidad y modelos*, Rev. Española de Física **20**, 39-42 (2006).
- [2] Veysey, J. y Goldenfeld, N., *Simple viscous flow: From boundary layers to the Renormalization Group*, Reviews of Modern Physics **79**, 883-927 (2007).
- [3] Worsnop, B. L. y Flint H. T., *Curso Superior de Física Práctica*, Tomo I, (Eudeba, Editorial Universitaria de Buenos Aires, 1960), p. 171.
- [4] Daish, C. B. y Feunder, D. H., *Experimental Physics*, (2ª Edition), (The English Universities Press, London, 1970), p. 71.
- [5] Schaefer, C., L. y Bergmann, Ll., *Prácticas Fundamentales de Física*, (Traducción de la segunda edición alemana por el Prof. Julio Palacios) (Editorial Labor S.A., Barcelona, 1946), p. 85.
- [6] Tyler, F., *A Laboratory Manual of Physics* (4ª edition), (Edward Arnold (publishers), London, 1974), p. 52.
- [7] Nelkon, M. y Ogborn, J. M., *Advanced Level Practical Physics* (4ª Edition), (Heinemann Educational Books, London, 1978), p. 34.
- [8] Hackey, S. W. y Mills, J. K., *Physics by Experiment*, (Wheaton, UK, 1973), p. 117.
- [9] *Bulletin of the National Research Council*, Febrero, N° 84 (1932).

On the back of the clouds

Tamás Stonawski

*Calvinist Grammar School and Student's Hostel,
Street Szatmári No. 1, Nagyecsed, 4355 Hungary*

E-mail: stonawski@gmail.com

(Received 3 August 2013, accepted 26 February 2014)



Abstract

The duration of some natural phenomena is too long and their examination needs a special software with 'time laps' system and a camera with high resolution. The trail of the clouds, the apparent movement of the Moon, the Sun, the growth of the plants, the evaporation of the raindrops, the melting of the ice, etc. happen so slowly that instead of making a normal film from photos where 30 ones are taken in a second, it is more worth making films from photos taken in every minute or even hour because if they are played at a normal speed, the examined phenomena can be seen in an accelerated way. With such records analysis can be made more easily with different kinds of analyzing software.

Keywords: Classical Mechanics teaching.

Resumen

La duración de algunos fenómenos naturales es tan larga y su examinación necesita un software especial con un sistema de 'lapsos temporales' y una cámara de alta resolución. El sendero de nubes, el movimiento aparente de la Luna, el Sol, el crecimiento de las plantas, la evaporación de las gotas de lluvia, el derretimiento de hielo, etc. suceden tan lentamente que en lugar de hacer un filme normal de fotos en donde 30 de ellas son tomadas en un segundo, merece la pena hacer filmes de fotos tomadas en cada minute o incluso hora porque si son reproducidas a velocidad normal, el fenómeno examinado puede verse en una forma acelerada. Tal análisis de grabaciones se puede hacer más fácilmente con la ayuda de diferentes tipos de software de análisis.

Palabras clave: Enseñanza de la Mecánica Clásica.

PACS: 01.40.gb, 01.40.ek, 01.50.Pa

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCTION

A cloud can be defined as a set of tiny waterdrops and icecrystals floating in the different heights of the atmosphere. Meteorology differentiates 10 main types of clouds. The following factors are taken into consideration: the height, the size, the form, the texture, the light intensity and the colour of the cloud. Its features are determined by the many physical processes, which are studied by the physics of environmental streams.

During the extracurricular lesson we decided to measure the speed of the clouds with the help of the webcam. As we did not know the width of the clouds we needed two data: the height of the cloud in the atmosphere and the α angle typical of the webcam.

II. CALCULATING THE ANGLE TYPICAL OF THE WEBCAM

The webcam similarly to the human eye is able to sense only part of the space around it. The width of the plane seen by the camera is determined by the so called viewing angle,

which is a constant feature of the camera. In many cases it is indicated in the description of the camera. If this data information is not available for us, it can be easily determined with geometric methods as well. Draw concentric bows on an A4 sheet, then put the camera in the centre. Create the image formed on the computer. After that going on the bows find the points with the help of the pencil tip where the pencil tip can be seen on the edge of the screen. Connecting the points two lines crossing each other can be seen. The angle of the lines crossing each other is the viewing angle of the camera.

With the help of the viewing angle the real width of the plane in h height can be determined in the picture taken by the camera.

$$y = 2h \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}, \quad (1)$$

where α is the angle value typical of the webcam, the viewing angle. H is the distance of the examined plane from the camera and y is the width of the examined plane.

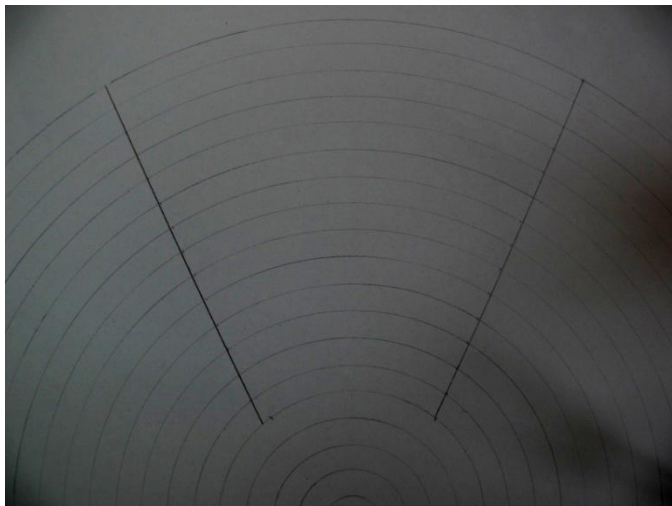
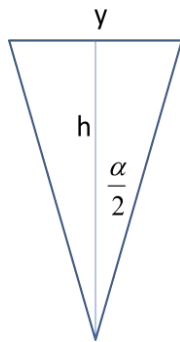


FIGURE 1. The horizon-points indicated on the concentric lines drawn on an A4 sheet.

III. CHECKING THE VIEWING ANGLE OF THE CAMERA

The viewing angle was made on an A4 sheet with geometric methods. As the tiny angle divergences are not striking in such small-size construction, we checked the viewing angle of the camera with known values of object-distance and object-size. We put the camera in the back of the classroom opposite the blackboard. After that we measured the distance between the blackboard and the camera with a tape measure as well as the length and width of the blackboard. Then a photo was taken with the camera. With the help of the Tracker video analysis software the values of the blackboard were calibrated into real values and the width of the full screen was measured with the programme. The viewing angle was calculated again from the rate of the width of the screen and the camera-blackboard distance. The value was almost the same as the one we calculated on the sheet: $\alpha=52,84^\circ$

IV. DETERMINING THE HEIGHT OF THE CLOUDS FROM SEALEVEL

If the distance between the camera and the object is known, the real width of the image on the full screen can be calculated on the basis of (1). On 10 May 2012 we recorded the movements of the clouds from the window of the Physics equipment store of the Secondary Calvinist Grammar School. The Webcamlaboratory software was used and it was set to take a photo in every 15 seconds with the fixed webcam. The clouds seemed to be quite close to us and moved fairly fast on the overcast sky. On the basis of the pictures of the clouds we selected the ones that were the most similar to them from the cloud atlas and the parameters available were collected. The clouds examined resembled the Cumulus(Cu) set of clouds most.



FIGURE 2. The clouds were identified according to their photos . The photo on the left shows the record made from the window of the equipment store, whereas in the photo on the right the flat Cumulus humilis from the Wikipedia can be seen.

Classification of clouds	low-level
main group	Cumulus
diameter	1-20 km
colour	white, nacreous
contour	blurred

The Cumulus humilis is a long-stretching type of cloud with blurred contour. Its edge is white or nacreous, its middle is of greyish shade. It is formed in middle-height (2-5km) as a result of the thermic convection. It can develop in any part of the world except for the Antarctic (as the cold surface hinders the convection). The water steam precipitates in the air streaming upwards and contacting the cold air higher above, which can also be observed in the record: several smaller puffs in contrast with their larger mates did not swim into the picture area but mysteriously emerged from the blue background. This process also took place inversely: some parts of the clouds dissolved on the records due to the continuous warm stream.

In summer the cumuli collapse by late afternoon in most of the cases. The Cumulus humilis is not a cloud of rain but it can predict the arrival of rain coming in near future(12-24h), it is especially true if its developed form, the Cumulus congestus can be seen. It is a cauliflower-like cloud in several km height. On 10 May higher cumuli did not develop either by late afternoon and neither did it rain.

IV. DETERMINING THE SIZE OF THE CLOUDS

The real length of the total camera screen width was calculated from the height of the clouds.

$$y_{\min} = 2 \cdot 2\text{km} \cdot \text{tg}26,42^\circ = 1,987\text{km},$$

$$y_{\max} = 2 \cdot 5\text{km} \cdot \text{tg}26,42^\circ = 4,968\text{km}.$$

The total width of the screen was set on the minimum and maximum calibrations and a small and a big cloud were selected. If we leave the calibration fixed, the programme makes it possible that we can determine the width and length values of the objects in planes of the calibrations. This way the size of the clouds were measured to be 1-3km wide.

V. DETERMINING THE SPEED OF THE CLOUD

A peculiar point of the cloud was selected and with the help of the programme its movement was followed. The x axis of the coordinate system was taken in the line of the direction of the cloud movement. During the measurement the analysis was run with the minimum and maximum values.

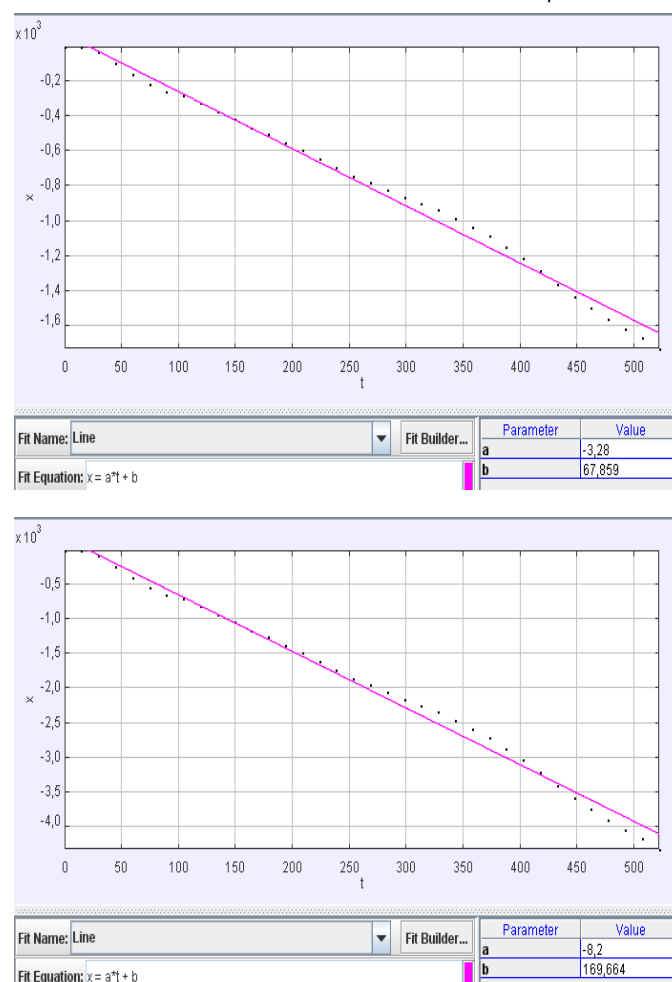


FIGURE 3. The pictures of the $x(m)$ - $t(s)$ graph from the video analysis. On the left the picture of the cloud supposedly in 2km distance can be seen whereas on the right the picture of the cloud supposedly in 5km height is shown.

We inserted linear lines on the x - t graphs; the steepness of the lines was in accordance with the possible speed-values of the cloud. The result was: 3,28-8,2 m/s $\approx$ 12-30 km/h

VI. DETERMINING THE SPEED -DIRECTION OF THE CLOUDS

First we orientated the window of the equipment store with the help of <https://maps.google.hu/>. We typed the address of the school and using the maximum enlargement we cut the satellite photo of the school. (These photos were taken in accordance with the orientation of the maps) After that we applied the photo taken by the camera parallel with the plane of the windowframe, where we indicated the streaming direction of the clouds. The direction of the speed of the clouds was north-west that is south-east wind was blowing in the height of the clouds.

VII. CONCLUSIONS

The Cumulus cloud most frequently develops with the arrival of a coldwave. The measured speed figures also supported the approach of the coldwave. The speed of the coldwave stream is usually 25-40km/h, the wind appearing spasmodically turn into north-west and can become stormy. Its typical precipitation is shower, thunderstorm with hail.

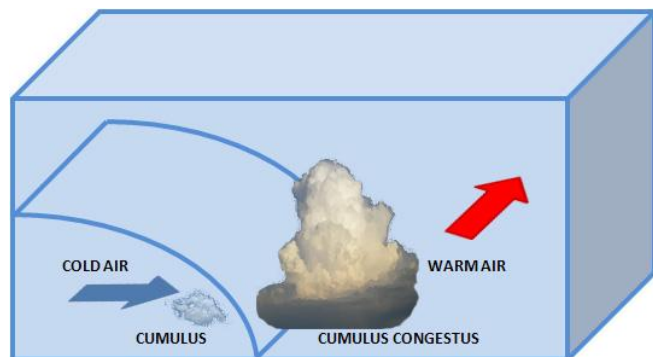


FIGURE 4. As a result of the coming coldwave there is an intense upsteaming on the border of the warm air which helps the cumulonimbus (Cumulus congestus) to develop

The streaming direction of the examined clouds was north-west. On the day after the records there was 3mm rainfall a few kilometers north-west from Nagyecsed, then in 2 days 24mm. (on that day it was raining all over the country). On 13 May 5mm rain fell on average in the region and on 14 May it stopped raining.

Originally we were thinking about a simple speed-measuring-idea during the lesson however we found several interesting things about the atmospheric phenomena. We tried to find connections between the type, the speed of the clouds and the atmospheric streams. We experienced cause and effect relations on our skin as on the days after the lesson there was a heavy rainfall.

On the meteorological websites we could check the streaming direction of the wind, its power, the possible occurrence of precipitation and its quantitative values. We learned the name and features of some typical clouds, we explored the streaming effects of the rotation of the Earth and we looked up on the sky more frequently.

ACKNOWLEDGEMENTS

I wish to express my thanks to my tutor Dr. Juhász András, my students, the “Webcamlaboratory” for the free software use, and also to Kürti Anetta.

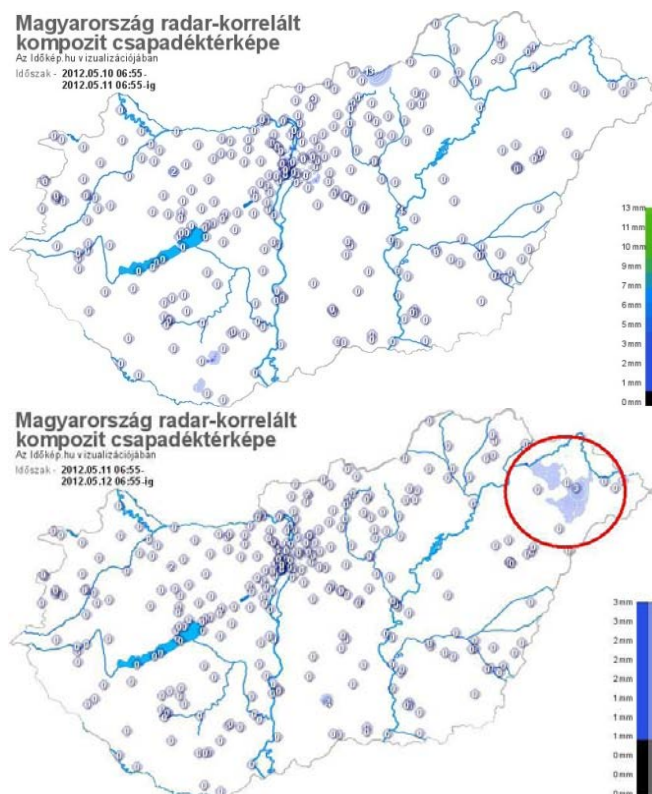


FIGURE 5. Radar-correlated composite precipitation map of Hungary. As a result of the arriving coldwave there was a heavy rainfall in the area around Nagyecsed

REFERENCES

- [1] http://www.youtube.com/watch?v=Q_rMyTGKbDg (30 July 2013).
- [2] Dr. Koppány György: *Felhők*, (Móra, Hungary, 1978).
- [3] http://hu.wikipedia.org/wiki/L%C3%A9g%C3%B6ri_fr%C3%B3nt (30 July 2013).
- [4] <http://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/> (30 July 2013).
- [5] <http://webcamlaboratory.com> (30 July 2013).
- [6] <http://www.komfortabc.hu/ido/felhoatlasz/index.php#alacsony> (30 July 2013).
- [7] <http://www.idokep.hu/csapadek/20120511> (30 July 2013).
- [8] <http://www.youtube.com/watch?v=kPWtGY5MQ28> (30 July 2013).

Sistemas de referencia en la enseñanza de la Astronomía. Un análisis a partir de una revisión bibliográfica

Diego Galperin, Andrés Raviolo

Sede Andina, Universidad Nacional de Río Negro, Mitre 630, C. P. 8400, Bariloche, Argentina.

E-mail: dgalperin@unrn.edu.ar

(Recibido el 9 de Diciembre de 2013; aceptado el 21 de Marzo de 2014)

Resumen

Se presenta el resultado de un proceso de revisión bibliográfica centrado en identificar cuáles son los sistemas de referencia astronómicos que utilizan los investigadores, tanto implícita como explícitamente, cuando intentan averiguar y categorizar las concepciones de los alumnos y docentes en relación a la comprensión de los fenómenos astronómicos más cotidianos (día y noche, estaciones del año y fases de la Luna) y cuando proponen secuencias de enseñanza acerca de dichos fenómenos. Las conclusiones obtenidas muestran un predominio de artículos en los cuales los fenómenos celestes son desarrollados desde un sistema de referencia externo a la Tierra, sin hacer mención a la posibilidad de describirlos y explicarlos adecuadamente desde un sistema posicionado en la superficie terrestre. Esto pone de manifiesto la necesidad de explicitar y justificar con claridad el sistema de referencia que será utilizado al llevar adelante investigaciones en esta temática.

Palabras clave: Revisión bibliográfica, Investigaciones, Sistemas de referencia, Astronomía.

Abstract

We present the results of a bibliographical review process focused on identifying which astronomical frames of reference are used by researchers, implicitly or explicitly, when inquiring into and categorizing students' and teachers' conceptions of certain well known astronomical phenomena (day and night, seasons, and phases of the moon) and when they propose teaching sequences of this topic. The results obtained show a predominance of articles in which these phenomena are developed from a frame of reference external to the Earth, without mentioning the possibility of describing and explaining them from a terrestrial frame of reference. This evidences the need to explain and justify the reference frame used when carrying out research in this area.

Keywords: Bibliographical review, Researches, Frames of reference, Astronomy.

PACS: 01.40.E-, 01.40.Fk, 01.40.gb

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo de revisión bibliográfica es parte de una investigación en desarrollo que estudia los procesos relacionados con la enseñanza y el aprendizaje de conocimientos relativos a los fenómenos astronómicos cotidianos. En este sentido, existe una gran cantidad de investigaciones realizadas que muestran las dificultades presentes en estudiantes de todos los niveles educativos, y en docentes, para comprender las causas de los fenómenos astronómicos más cotidianos: el día y la noche, las estaciones del año y las fases de la Luna [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]. Estas dificultades pueden tener diferentes orígenes, aunque en este trabajo nos hemos centrado en uno solo de ellos: la elección del sistema de referencia más adecuado para describir y comprender dichos fenómenos astronómicos.

Nos hemos planteado tres preguntas como parte de la investigación:

1. ¿Cuáles son los sistemas de referencia astronómicos que se utilizan (tanto explícita como implícitamente) al intentar describir y explicar los fenómenos celestes más cotidianos en el contexto escolar?
2. ¿Existe alguna razón para privilegiar un sistema de referencia por sobre otro?
3. ¿La elección de un sistema de referencia determinado puede ser una de las causas de las dificultades detectadas en alumnos de todos los niveles en relación a la comprensión de los fenómenos astronómicos cotidianos?

En este artículo nos centraremos en la primera de estas preguntas focalizando la atención en las investigaciones que se llevan a cabo con el fin de indagar acerca del aprendizaje y la enseñanza de algunos fenómenos posibles de ser

observados a simple vista en el cielo: día y noche, estaciones del año y fases lunares. Se parte de la sospecha de que existe un amplio predominio de investigaciones en las cuales los fenómenos astronómicos son desarrollados desde un sistema de referencia externo a la Tierra, sin hacer mención a la posibilidad de describir y explicar estos mismos fenómenos desde un sistema de referencia terrestre que valore la observación directa y el contacto con el cielo real [18].

Consideramos que esta perspectiva, la utilización adecuada de los sistemas de referencia, es central para la comprensión de las dificultades presentes en la enseñanza de estos fenómenos y será relevante para la investigación futura acerca del modo más adecuado de enseñar Astronomía en los distintos niveles educativos.

II. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

A. Sistemas de referencia

La elección de un sistema de referencia adecuado es un tema crucial para el análisis y la comprensión de los fenómenos físicos ya que éstos no ocurren igual en todos los sistemas y, en consecuencia, cobra gran relevancia el proceso de decisión acerca de cuál elegir con el fin de lograr que los fenómenos de la naturaleza aparezcan en él de la forma más simple [19]. Al respecto, el principio de relatividad del movimiento sostiene que cada observador puede elegir el sistema de referencia que prefiera ya que carece de sentido hablar de movimiento absoluto de un cuerpo debido a que sólo podemos referirnos a la posición o el desplazamiento de un objeto en relación a otro. A su vez, el poder definir a la posición como una magnitud física implica reducir un cuerpo a un punto y comprender que este punto equivale a su lugar espacial. De este modo, el sistema de referencia puede definirse como el conjunto de cuerpos que convencionalmente se consideran inmóviles y con respecto a los cuales se analiza y mide el movimiento de otros objetos.

Dado que el sistema de referencia puede ser elegido arbitrariamente, queda claro que la descripción del movimiento de un cuerpo será diferente en función de la elección que se realice. Si el sistema de referencia se encuentra en el mismo objeto a analizar, éste se hallará en reposo respecto al sistema elegido pero se encontrará en movimiento respecto a otros posibles sistemas de referencia. A su vez, esto implica que el mismo cuerpo se moverá diferente, siguiendo distintas trayectorias en los distintos sistemas.

Como vemos, el concepto de sistema de referencia presenta cierta complejidad conceptual, por lo que debe ser desarrollado y enseñado explícitamente en las clases de Física. Esto queda en evidencia dado que los alumnos de entre 9 y 16 años suelen describir la posición que ocupa un cuerpo respecto a otro sin referirla a ningún sistema de referencia explícito, estableciendo únicamente una relación lineal directa entre el observador y el cuerpo o entre dos cuerpos [20]. A su vez, los estudiantes muestran una tendencia a definir el movimiento como algo intrínseco al cuerpo y no como algo en relación a un sistema de referencia

específico, lo que provoca que movimiento y reposo sean considerados substancialmente inequivalentes [21]. En este sentido, se encuentra muy presente la idea acerca de la existencia de un sistema de referencia absoluto, basado en los cambios en la posición de un cuerpo en relación al espacio mismo, y que todas las descripciones realizadas desde otros sistemas deberían ser transformadas a éste. Esta preferencia de los estudiantes, incluso los universitarios, por un espacio o sistema de referencia absoluto no llama la atención si se tiene en cuenta que en la vida cotidiana solemos aceptar implícitamente la existencia de tales sistemas (el suelo, por ejemplo) [22].

Por su parte, entre los distintos sistemas posibles existen ciertas ventajas de los llamados “sistemas de referencia inerciales”, que son aquellos en los cuales el sistema se encuentra ligado a un cuerpo que se desplaza a velocidad constante. En estos sistemas, los fenómenos físicos ocurren de la misma manera y las leyes de la naturaleza poseen la misma forma, lo que provoca que sean indistinguibles entre sí. En contraposición, las leyes físicas se enuncian de distinta manera en los diferentes sistemas acelerados o “no inerciales”, proponiendo el agregado de fuerzas adicionales o “inerciales”, por lo cual es natural que los fenómenos físicos se intente estudiarlos, la mayoría de las veces, con mayor o menor grado de precisión, desde sistemas de referencia inerciales.

B. Sistemas de referencia astronómicos

En el caso de los fenómenos astronómicos, se torna imposible definir un sistema de referencia que sea estrictamente inercial ya que nos encontramos en un planeta en continua rotación y con continuas aceleraciones, lo cual sucede de igual manera si deseamos centrar nuestro sistema en el Sol. Sin embargo, dado el lento cambio en la dirección de las velocidades de los movimientos de rotación y traslación, un sistema de referencia posicionado en un punto de la superficie terrestre puede ser considerado inercial, con un muy pequeño margen de error, para la gran mayoría de las experiencias cotidianas.

Por otra parte, dadas las enormes dimensiones que presenta el universo, la posición de un astro suele indicarse en función de la dirección espacial hacia la que se deben apuntar los ojos (o un instrumento óptico) para poder observarlo. En función de esto, resulta muy conveniente utilizar la idea de “esfera celeste”, pensándola como una esfera de radio arbitrario sobre la que se encuentran proyectados todos los astros y cuyo centro se encuentra en un punto determinado del espacio. De este modo se pueden establecer distintos sistemas de referencia en función del origen elegido para dicha esfera. En este caso donde analizaremos los fenómenos astronómicos cotidianos, es conveniente situar el origen del sistema en alguno de los siguientes puntos: un lugar sobre la superficie terrestre (sistema de referencia “topocéntrico”), el centro de masas de la Tierra (sistema de referencia “geocéntrico”) o el centro de masas del Sistema Solar (sistema de referencia “heliocéntrico”) [23].

En la Tabla I se indican las características de tres sistemas de coordenadas astronómicas muy utilizados, cada uno de los cuales posee su origen en un punto distinto del espacio. Para complementar la caracterización de cada uno de ellos se indica un plano y un punto fundamental para la medición de los ángulos y el nombre de las correspondientes coordenadas astronómicas.

TABLA I. Características de tres sistemas de coordenadas astronómicas.

Origen	Ubicación centro de la esfera celeste	Nombre del sistema	Plano fundamental	Coordenadas
Topo-céntrico	Superficie terrestre	Horizontal o Altacimutal	Horizonte del observador	Acimut y altura
Geo-céntrico	Centro de masas de la Tierra	Ecuatorial absoluto	Ecuador celeste	Ascensión recta y declinación
Helio-céntrico	Centro de masas del Sistema Solar	Helio-céntrico	Eclíptica	Longitud y latitud heliocéntricas

III. METODOLOGÍA

El trabajo de revisión bibliográfica realizado consistió en la lectura minuciosa de cada artículo y su análisis teniendo en cuenta frases que hicieran referencia a un determinado sistema de referencia, tanto en forma explícita como implícita. De este modo, cada artículo fue clasificado en función de utilizar un sistema de referencia centrado en el Sol, centrado en la Tierra o en ambos simultáneamente. A su vez, se identificó el o los niveles educativos que estaban siendo mencionados en cada trabajo: alumnos y docentes de nivel primario, alumnos y docentes de nivel medio, alumnos y docentes de carreras de formación docente o alumnos de carreras de nivel superior en general. Por último, se realizó un sencillo análisis cuantitativo de la relación entre los sistemas de referencia utilizados y el nivel destino de los trabajos analizados de modo tal de poder extraer conclusiones en relación a la utilización de los distintos sistemas de referencia astronómicos al momento de plantear investigaciones y propuestas didácticas en relación a la temática.

A. Muestra

Se analizaron 50 artículos sobre la comprensión de los fenómenos astronómicos cotidianos por parte de estudiantes y docentes, correspondientes a revistas especializadas y a libros sobre enseñanza de las ciencias publicados en las últimas tres décadas. El listado de los artículos coincide con el presente en las referencias bibliográficas, salvo algunos

B. Clasificación de los artículos

A partir de lo mencionado anteriormente sobre sistemas de referencia astronómicos, los artículos han sido categorizados en:

a) Heliocéntricos (He): aquellos que brindan explicaciones y descripciones utilizando un sistema de referencia externo a la Tierra. Esta categoría incluye la subcategoría “Heliocéntrico observacional” (He obs), que corresponde a artículos que, a su vez, sostienen la necesidad de relacionar dichas explicaciones y descripciones “heliocéntricas” con lo que se observa desde la superficie terrestre.

b) Terrestres (Te): brindan descripciones y explicaciones utilizando un sistema de referencia centrado en la Tierra. Esta categoría incluye las subcategorías “Geocéntrico” (Geo), donde el sistema de referencia se encuentra centrado en el centro de masas de la Tierra, y “Topocéntrico” (To), en la cual el sistema de referencia tiene su origen en un punto de la superficie terrestre.

a) Dual (Du): se utilizan descripciones y explicaciones del movimiento de los astros en el cielo vistos desde la superficie terrestre, haciendo referencia a que estos movimientos pueden explicarse de igual modo desde un sistema de referencia externo a la Tierra. Esto implica que estos artículos indican explícitamente la posibilidad de utilizar adecuadamente un sistema de referencia externo (He) o uno terrestre (Te), en sintonía con lo que postula el principio de relatividad del movimiento.

C. Frases que identifican sistemas de referencia

A continuación se presentan algunas citas extraídas de los artículos analizados que han permitido su categorización. Se considera que este tipo de frases hacen posible identificar desde qué sistema de referencia se encuentran desarrollados los fenómenos astronómicos que se estudian en cada trabajo.

• C.1. Sistema de referencia “Heliocéntrico” (He)

“...se les solicitó explicar, con un diagrama o usando una esfera de poliestireno que se les proporcionó, por qué se hace de día y de noche.” [1, p. 504].

“En ningún caso se advierte que [el movimiento del Sol] se trata de un movimiento aparente.” [24, p. 343]

“En este trabajo se estudian las representaciones gráficas y los textos que acompañan a las mismas, realizadas por estudiantes de Magisterio sobre los movimientos de la Tierra y de la Luna y sus consecuencias. Su análisis permite afirmar que hay una falta de comprensión del modelo Sol-Tierra-Luna.” [25, p. 153].

“La conceptualización de las causas de las fases lunares requiere un pensamiento muy complejo. Primero, los alumnos deben saber los movimientos de rotación y revolución de la Luna y la Tierra y sus posiciones relativas al Sol mientras se van moviendo.” [15, p. 12].

“Se le solicita al profesor... que escoja el objeto que mejor representa a la Tierra y lo coloque en un lugar de la sala...”

[luego, sobre el objeto elegido] que coloque un muñeco que represente a una persona en la superficie de Tierra.” [26, p. 802].

C.1.1. Subcategoría: “Heliocéntrico observacional” (He obs)

“Los estudiantes destacaron los siguientes aspectos positivos de la unidad didáctica: - Se contempla la observación de los movimientos aparentes de los astros. - La constante relación realidad observable/ modelo interpretativo.” [27, p. 126].

“...resulta irrelevante que un niño, «sepa» el movimiento de rotación terrestre si no sabe explicar con él la variación de la posición del Sol en el cielo a lo largo de la jornada y la sucesión de los días y las noches.» [28, p. 230].

“...[los estudiantes] respondieron correctamente que en la latitud de Turquía, al norte del Trópico de Cáncer, el Sol nunca está directamente sobre la cabeza al mediodía... La mayoría de los estudiantes... indicaron que la causa de las diferentes estaciones que experimentamos cada año son la inclinación del eje de la Tierra con respecto al plano de su órbita y su giro alrededor del Sol.” [29, p. 19].

• C.2. Sistema de referencia “Terrestre” (Te)

C.2.1. Subcategoría: “Geocéntrico” (Geo)

“Ninguna percepción directa del cuerpo nos hace pensar en el desplazamiento de nuestro planeta sobre el que apoyamos los pies. No hay ninguna razón práctica evidente para hacernos abandonar el modelo de Tolomeo... éste «funciona» estupendamente para explicar y describir lo que se ve cotidianamente.” [18, p. 175].

“Nuestra intención en este capítulo es presentar al sistema geocéntrico como un modelo útil, que sirve para hacer predicciones válidas de los movimientos del Sol, las estrellas y la Luna (y de las fases de esta última) tal como se ven en el cielo a simple vista.” [30, p. 136].

C.2.2. Subcategoría: “Topocéntrico” (To)

“Una observación más atenta y extendida en el tiempo, muestra el movimiento uniforme de la mayor parte de éstas a lo largo del día y del año y el de la luna y algunas de estas «estrellas», respecto a las otras que parecen mantener invariables sus posiciones relativas y permiten su agrupación en imaginarias figuras: las constelaciones...” [31, p. 48]

“...es decir, como el observador (los niños) está ubicado en un determinado punto de la Tierra, todo lo que puede observar debe describirse en primer lugar desde un sistema centrado en el lugar del observador (posición topocéntrica), y entonces se puede hablar con total rigurosidad, de que el Sol sale y se pone...” [32, p. 153]

“Estas actividades han de estar dirigidas a reconocer los astros más importantes que podemos apreciar, a conocer sus nombres y a tratar de determinar cómo éstos modifican sus posiciones a lo largo del tiempo, siempre desde una posición centrada en nuestro propio punto de referencia.” [33, p. 96].

• C.3. Sistema de referencia “Dual” (Du)

“...será a través del citado diálogo entre la realidad y la utilización de los modelos concretos como gradualmente se irán construyendo aprendizajes que incorporen una “perspectiva dual” en el análisis de estos fenómenos: nos referimos a imaginar al mismo tiempo dos perspectivas: la topocéntrica propia de lo netamente vivencial, observacional, y una perspectiva propia del megaspacio, como si estuviéramos observando el sistema “desde afuera.” [34, p. 84].

“...el modelo geocéntrico se refiere a un sistema que es cinemáticamente consistente con el modelo heliocéntrico. Los dos modelos son paralelos: difieren solamente en la preferencia de elección del origen del sistema de referencia.” (35, p. 8).

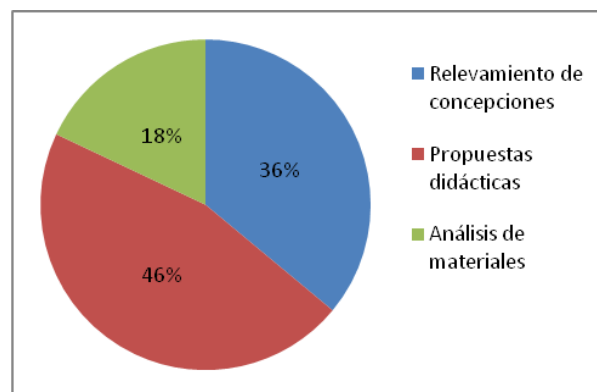
“Los resultados presentados aquí apoyan nuestra afirmación de que los estudiantes necesitan ser guiados en la comprensión de cómo hacer las conexiones entre los movimientos reales de los objetos heliocéntricos y sus consecuencias observables desde una perspectiva con sede en la Tierra.” [36, p. 23].

“La astronomía diurna es de hecho mucho más fácil de aprender, como primer paso, cuando describimos todos los fenómenos desde el sistema de referencia del observador... Sabemos que el arco seguido por el Sol en el cielo local es el efecto resultante (visible) de nuestra propia rotación (la Tierra).” [37, p. 40].

El análisis completo llevado a cabo se encuentra detallado en el Anexo, en el cual se presenta cada artículo, alguna/s cita/s representativa/s del sistema de referencia utilizado en él y la categoría en que fue incluido.

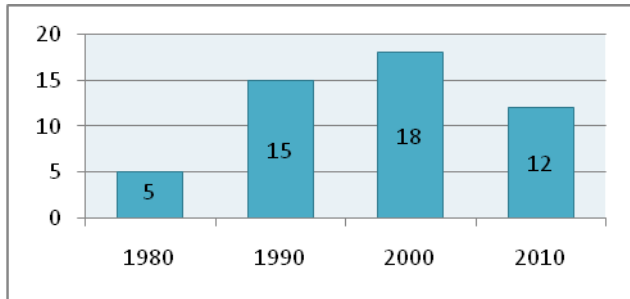
IV. RESULTADOS

De acuerdo a los objetivos formulados en los trabajos analizados, en la Gráfica 1 se aprecia que muchos presentaban propuestas didácticas (46%), otros realizaban una indagación de concepciones sobre los fenómenos astronómicos cotidianos presentes en docentes y alumnos (36%) y algunos otros examinaban materiales curriculares (18%).



GRÁFICA 1. Tipos de artículos analizados.

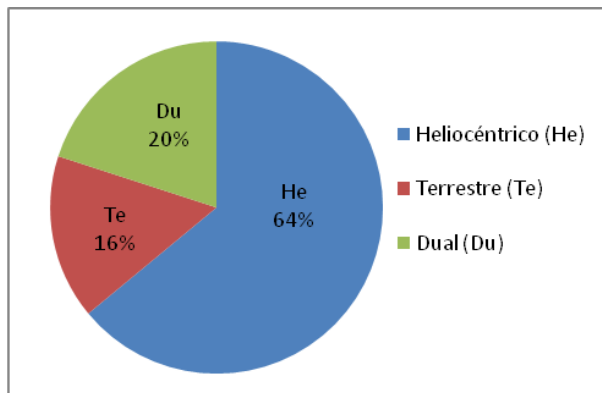
A su vez, en la Gráfica 2 puede apreciarse que 30 trabajos analizados (60% del total) han sido publicados en los últimos 12 años, y 45 en los últimos 20 años (80% del total), dando cuenta de ser una revisión actualizada.



GRÁFICA 2. Cantidad de artículos analizados por década de publicación.

Más allá de haber examinado una muestra acotada, consideramos que podemos afirmar que esta revisión es representativa de una cantidad de trabajos mucho mayor dado que en cada uno de los artículos analizados estaban presentes referencias bibliográficas que se encontraban en sintonía y fundamentaban, en cierto modo, lo planteado en él.

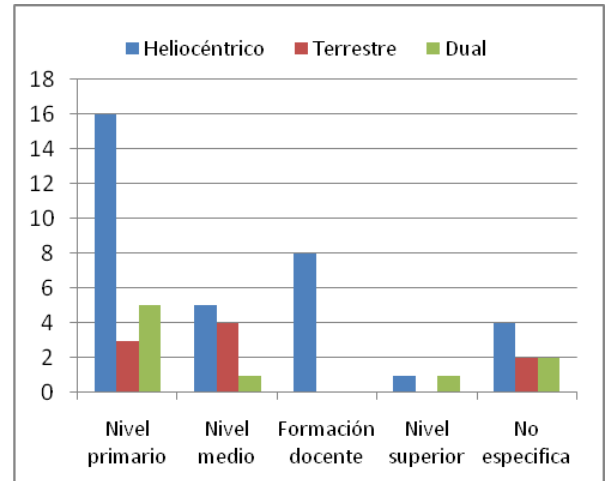
Como se aprecia en la Gráfica 3, del total de artículos analizados (50), 32 de ellos (64%) utilizan un sistema de referencia externo a la Tierra (categoría “Heliocéntrico”), 10 de los trabajos (20%) proponen el uso de un sistema de referencia terrestre para la descripción de los fenómenos observables en el cielo y, simultáneamente, uno externo para la explicación de los mismos (categoría “Dual”) y, por último, 8 artículos (16%) sostienen descripciones y explicaciones desde un punto ubicado en nuestro planeta (categoría “Terrestre”).



GRÁFICA 3. Porcentaje de artículos que utilizan cada sistema de referencia.

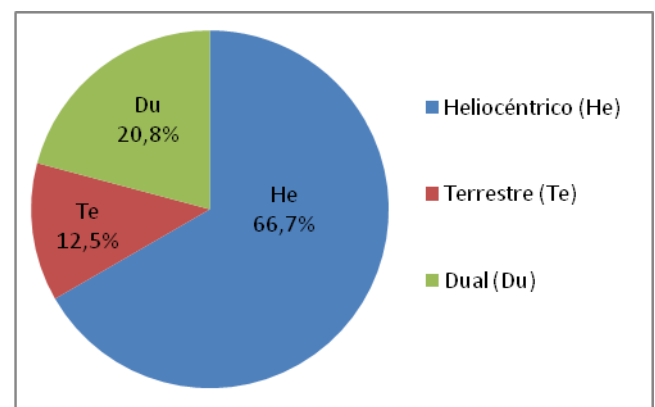
En la Gráfica 4 se presenta un análisis acerca de la categoría en que fue clasificado cada trabajo en función del nivel educativo con el que se relaciona. En este caso, algunos artículos fueron contados más de una vez dado que estaban dirigidos a más de un nivel educativo y se discriminan aquellos que no especifican un nivel educativo en particular.

A su vez, en el nivel superior se diferencian aquellos trabajos relacionados con estudiantes de carreras de formación docente de aquellos vinculados con estudiantes de otras carreras.



GRÁFICA 4. Cantidad de artículos clasificados por categoría y por nivel educativo.

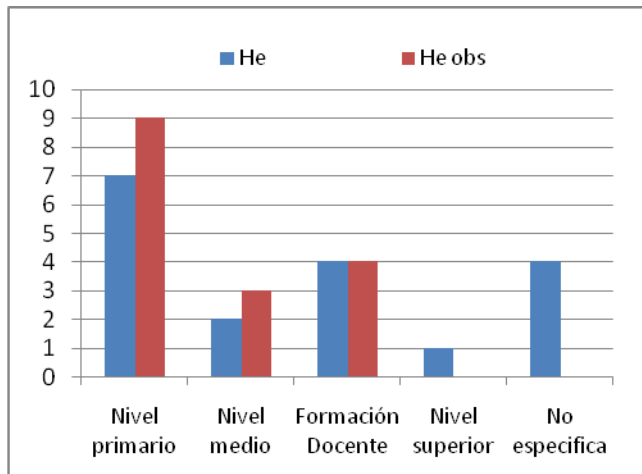
Como puede apreciarse, en prácticamente todos los niveles predominan los trabajos que utilizan el sistema de referencia heliocéntrico, haciéndose mucho más notable esta diferencia en el nivel primario y en la formación docente. Vale aclarar que los artículos categorizados como “duales” involucran también explicaciones “heliocéntricas”, por lo cual la presencia de este último sistema de referencia es sin dudas preponderante en los artículos examinados. Por ejemplo, los 8 trabajos analizados correspondientes a la formación docente presentan un desarrollo “heliocéntrico” de los fenómenos astronómicos tratados. A su vez, de 24 trabajos analizados para el nivel primario, sólo 3 (12,5%) proponen descripciones netamente terrestres (ver Gráfica 5).



GRÁFICA 5. Porcentaje de artículos de nivel primario pertenecientes a cada categoría.

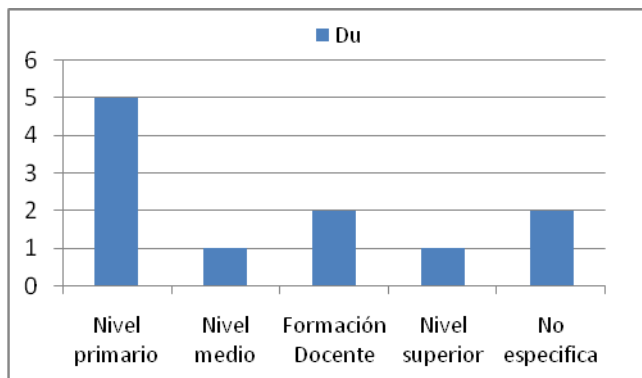
El análisis de los 34 trabajos incluidos en la categoría “Heliocéntrico” se presenta en la Gráfica 6, la cual muestra que prácticamente la mitad de los artículos (47%) manifiestan la necesidad de relacionar las explicaciones

heliocéntricas con lo que puede observarse en el cielo desde la superficie terrestre (subcategoría “Heliocéntrico observacional”). Esta última posición es abordada en una gran proporción de artículos en los cuales se identifica a las observaciones del cielo como una propuesta didáctica motivadora que favorece los aprendizajes. En consecuencia, tanto en el nivel medio como en el primario, la cantidad de trabajos incluidos en la categoría “Heliocéntrico observacional” (He obs) supera a los que no proponen la relación con el cielo cotidiano.



GRÁFICA 6. Cantidad de trabajos que utilizan exclusivamente el sistema de referencia heliocéntrico, clasificados por nivel con el que se relaciona el artículo.

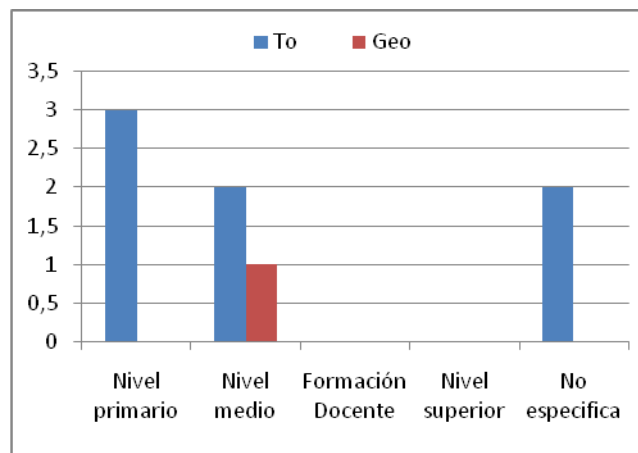
Algunos artículos manifiestan la importancia de enseñar a los estudiantes a moverse entre distintos sistemas de referencia [36, 38]. La Gráfica 7 muestra la presencia de esta categoría “Dual” (Du) en los distintos niveles educativos, la cual se encuentra presente en un 20% de los artículos analizados y, en mayor medida, en trabajos relacionados con el nivel primario.



GRÁFICA 7. Cantidad de trabajos incluidos en la categoría Dual clasificados por nivel.

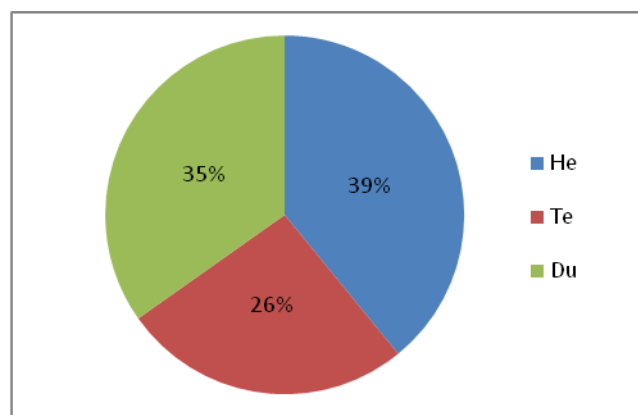
Los sistemas de referencia terrestres (Geocéntrico o Topocéntrico) son poco utilizados en todos los niveles ya que se presentan en sólo el 16% del total de artículos analizados, aunque llama especialmente la atención su nula

presencia en los trabajos vinculados a la formación docente (ver Gráfica 8). Esto puede guardar cierta relación con su escasa utilización en las aulas de nivel primario, en contraposición con el sistema heliocéntrico, de gran presencia en dicho nivel.



GRÁFICA 8. Cantidad de trabajos que utilizan exclusivamente un sistema de referencia terrestre, clasificados por nivel.

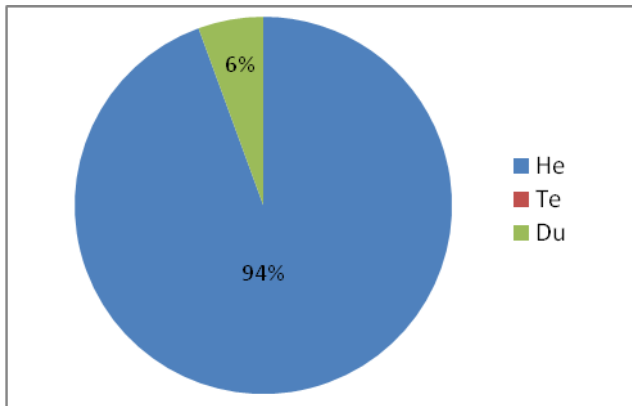
Entre los 50 artículos analizados existe una preponderancia de trabajos que utilizan exclusivamente el sistema de referencia heliocéntrico para explicar los fenómenos astronómicos más cotidianos. Sin embargo, este predominio no se visualiza de igual modo en todos los tipos de artículos. Por ejemplo, como puede verse en la Gráfica 9, entre los 23 trabajos que presentan propuestas didácticas para el aula, este predominio no se visualiza de ninguna manera ya que los porcentajes por categoría se encuentran muy cercanos entre sí: el 39% de los trabajos son “Heliocéntricos”, el 35% presenta un abordaje “Dual”, mientras que un 26% son “Terrestres”.



GRÁFICA 9. Porcentaje de artículos pertenecientes a cada categoría que presentan propuestas didácticas

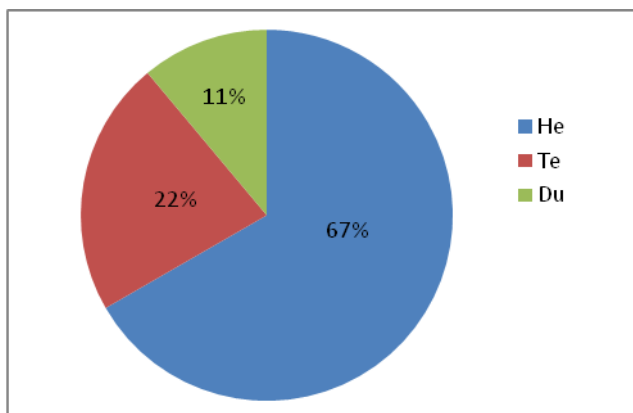
Muy por el contrario, la Gráfica 10 muestra que al analizar los 18 trabajos que relevan concepciones en relación a los fenómenos astronómicos cotidianos tanto de estudiantes como de docentes, se encuentra que en dichos relevamientos predomina ampliamente la utilización del sistema de

referencia heliocéntrico para la explicación de dichos fenómenos. En este caso, 17 artículos pertenecen a la categoría “Heliocéntricos” mientras que sólo uno propone un abordaje “Dual”. Llama la atención que, entre los trabajos analizados, no se encuentren investigaciones centradas en conocer las ideas de estudiantes y docentes en relación a los movimientos de los astros en el cielo posicionados desde un sistema de referencia topocéntrico.



GRÁFICA 10. Porcentaje de artículos que relevan concepciones de estudiantes y docentes, clasificados por categoría.

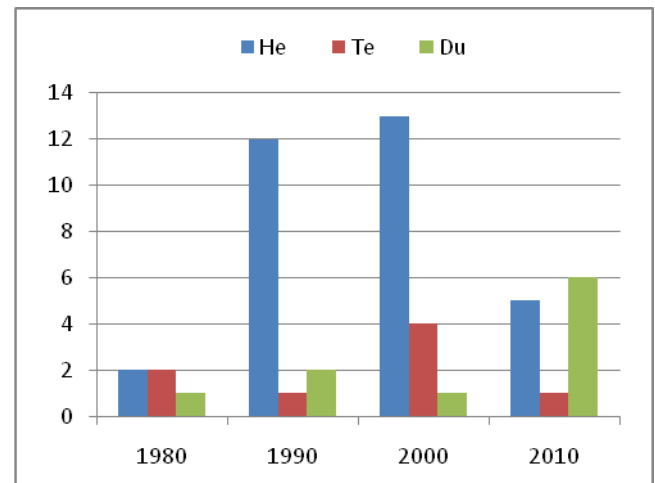
La Gráfica 11 muestra el análisis de los 9 trabajos que examinan materiales curriculares. Aquí se encuentran 6 artículos “Heliocéntricos” (67%), lo que indica un predominio en la utilización de este sistema de referencia. A su vez, 2 de los artículos son “Terrestres” (22%), mientras que sólo 1 fue clasificado como “Dual” (11%).



GRÁFICA 11. Porcentaje de artículos que analizan materiales curriculares, clasificados por categoría.

Por su parte, si analizamos el o los sistemas de referencia utilizados en los trabajos en relación al año de su publicación, encontramos lo sintetizado en la Gráfica 12: que los artículos “Heliocéntricos” son mayoritarios en el período 1990 - 2010, tendencia que se revierte ampliamente en los últimos años, donde la cantidad de artículos “duales” equipara prácticamente a la de “heliocéntricos”. A su vez, se evidencia que la cantidad de trabajos que utilizan un sistema

de referencia exclusivamente “terrestre” disminuye en los últimos años.



GRÁFICA 12. Cantidad de artículos publicados en cada década, clasificados por categoría

V. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Como se ha visto, entre los 50 artículos analizados existe una preponderancia de trabajos que utilizan exclusivamente el sistema de referencia heliocéntrico para explicar los fenómenos astronómicos más cotidianos. Al respecto, es interesante notar que los artículos incluidos en la categoría “Heliocéntricos” suelen indicar como “reales” a los movimientos descritos desde el sistema de referencia heliocéntrico, mientras que, en contraposición, caracterizan como “aparentes” a aquellos movimientos descritos desde un sistema de referencia terrestre. Esto último se contradice con el principio de relatividad del movimiento, que expresa que todos los movimientos son “aparentes” ya que dependen del sistema de referencia elegido. Las citas de los artículos [27] y [28] que figuran en el Anexo son un ejemplo de lo aquí expresado.

La muestra de trabajos analizada ha sido elegida sin un criterio específico de selección, lo que le brinda ciertas ventajas y desventajas. Por un lado, las desventajas se relacionan con ser una muestra pequeña en relación a la cantidad de trabajos relacionados con la comprensión de los fenómenos astronómicos cotidianos publicados en los últimos 30 años. Sin embargo, dado que cada trabajo presenta en su bibliografía otros artículos que generalmente refuerzan lo expresado en él, es posible afirmar que el análisis realizado es representativo de una muestra muchísimo mayor a la aquí examinada. A su vez, posee la desventaja de presentar algunos artículos pertenecientes a los mismos autores, lo que provoca que ciertas posturas se vean reforzadas por sobre otras. Sin embargo, puede considerarse que esta “repetición” da cuenta de la dedicación y el compromiso de determinados autores con la investigación en el área, hecho que no queda representado si se decide analizar un artículo por autor.

Por último, las conclusiones que se extraen de este trabajo no intentan ser concluyentes en cuanto a porcentajes y cantidades relativas a la utilización de cada sistema de referencia astronómico. Por el contrario, proponen centrar la mirada en un aspecto didáctico en el cual ha habido escaso desarrollo y del cual se ha investigado escasamente: la influencia de los sistemas de referencia a la hora de generar aprendizajes acerca de los fenómenos astronómicos cotidianos en los estudiantes. En este sentido, la elección de una muestra arbitraria de investigaciones resulta ventajosa ya que pone en evidencia que, sin importar demasiado los artículos analizados, casi con seguridad se encontrará una preponderancia de trabajos “Heliocéntricos”, cuyos autores no especifican desde qué sistema de referencia se encuentran describiendo y explicando los fenómenos astronómicos más cotidianos.

VI. CONCLUSIONES

La elección de un sistema de referencia adecuado para el análisis de un determinado fenómeno físico es central en el trabajo científico cotidiano y, en consecuencia, a la hora de tener que proponer secuencias para la enseñanza de dichos fenómenos. Sin embargo, muchos estudiantes, incluso universitarios, sostienen la existencia de un sistema de referencia, con mayor validez que cualquier otro, en el cual existen objetos en reposo absoluto y en los cuales las leyes de la Física son enunciadas de un modo “correcto”. En este trabajo se ha buscado identificar si esta creencia se manifiesta también en el caso de los fenómenos astronómicos y, particularmente, si se pone de manifiesto o no en los trabajos de investigación.

En función del análisis realizado, se puede evidenciar que en los artículos examinados predomina la utilización del sistema de referencia heliocéntrico para la descripción y explicación de los fenómenos astronómicos posibles de ser observados en el cielo cotidianamente. Dado que la elección de un sistema de referencia determinado responde a cuestiones de utilidad y sencillez, es llamativo que la mayoría de los trabajos no mencionen explícitamente las razones para privilegiar un sistema de referencia por sobre otro. Parecería ser que muchos de los investigadores consideran que las únicas descripciones y explicaciones posibles y válidas de los fenómenos astronómicos son las que se realizan desde un sistema de referencia externo a la Tierra, sin tomar conciencia de que, para muchos de los fenómenos observables desde nuestro planeta, las explicaciones “terrestres” son extremadamente sencillas y potentes desde un punto de vista descriptivo y predictivo [30].

En este sentido, el utilizar descripciones y explicaciones topocéntricas permite poner el acento en la observación a simple vista del cielo, relacionando la Astronomía con lo vivencial y cotidiano para el alumno, y potenciando sus ganas de conocer debido al asombro que provoca la belleza y grandiosidad del firmamento [18]. A su vez, permite que el alumno utilice con total rigurosidad su lenguaje cotidiano ya que, desde su posición, efectivamente “el Sol sale y se

pone”, “la Luna sale cada día más tarde” o “las estrellas giran” [32]. Por lo tanto, sería importante preguntarse qué tan relevante puede ser para la enseñanza de las ciencias que los alumnos “sepan”, por ejemplo, el movimiento de rotación terrestre, si “no saben” explicar la variación de la posición del Sol en el cielo a lo largo del día y de los meses [28].

Por otro lado, pese a la existencia de una gran cantidad de investigaciones que dan cuenta de enormes dificultades por parte de niños, jóvenes y adultos para la comprensión de los fenómenos astronómicos más cotidianos, como el día y la noche, las estaciones del año y las fases de la Luna, no se han detectado trabajos que pongan énfasis en identificar si dichas dificultades pueden guardar alguna relación con el sistema de referencia utilizado a la hora de brindar explicaciones acerca de estos fenómenos.

A su vez, pese a haber encontrado que aproximadamente un cuarto (26%) de los trabajos que proponen propuestas didácticas promueven la enseñanza de los fenómenos astronómicos cotidianos utilizando un sistema de referencia terrestre, esto se ve muy poco reflejado en los trabajos de investigación sobre concepciones alternativas y, sobre todo, en los materiales curriculares presentes en las escuelas.

Esto abre un espacio importante de reflexión en relación a la necesidad de desarrollar, profundizar y explicitar el trabajo con sistemas de referencia, de modo tal que en los artículos sobre enseñanza de la Astronomía comience a indicarse claramente cuál es el sistema de referencia que se está utilizando, sin dar por sentado que hay uno solo posible para explicar un determinado fenómeno. Creemos que el explicitar y justificar el sistema de referencia elegido es un requisito indispensable a la hora de desarrollar investigaciones en esta temática.

REFERENCIAS

- [1] Baxter, J., *Children's understanding of familiar astronomical events*, International Journal of Science Education **11**, 502-513 (1989).
- [2] Nussbaum, J., La tierra como cuerpo cósmico, en Driver, R., Guesne, E. y Tiberghien, A. (Eds.), *Ideas científicas en la infancia y la adolescencia*, (Morata, Madrid, 1992), pp. 259-290.
- [3] Schoon, K., *Students alternative conceptions of Earth and Space*, Journal of Geological Education **40**, 209 (1992).
- [4] Schoon, K., *The origin and extent of alternative conceptions in the Earth and Space sciences: a survey of pre-service elementary teachers*, Journal of Elementary Science Education **7**, 27-46 (1995).
- [5] Vosniadou, S. and Brewer, W., *Mental models of the Earth: a study of conceptual change in childhood*, Cognitive Psychology **24**, 535-585 (1992).
- [6] Vosniadou, S. and Brewer, W., *Mental models of the day/night cycle*, Cognitive Science **18**, 123-183 (1994).
- [7] Camino, N., *Ideas previas y cambio conceptual en astronomía. Un estudio con maestros de primaria sobre el día y la noche, las estaciones y las fases de la Luna*, Enseñanza de las Ciencias **13**, 81-96 (1995).

- [8] Stahly, L., Krockover, G. and Shepardson, D., *Third grade students' ideas about the lunar phases*, Journal of Research in Science Teaching **36**, 159-177 (1999).
- [9] Trumper, R., *A cross-age study of junior high school students' conceptions of basic astronomy concepts*, International Journal of Science Education **23**, 1111-1123 (2001).
- [10] Vega Navarro, A., *Tenerife tiene seguro de Sol (y de Luna): Representaciones del profesorado de primaria acerca del día y la noche*, Enseñanza de las Ciencias **19**, 31-44 (2001).
- [11] Vega Navarro, A., *Ideas, conocimientos y teorías de niños y adultos sobre las relaciones Sol-Tierra-Luna. Estado actual de las investigaciones*, Revista de Educación **342**, 475-500 (2007).
- [12] Trundle, K., Atwood, R. and Christopher, J., *Preservice elementary teachers' conceptions of moon phases before and after instruction*, Journal of Research in Science Education **39**, 633-658 (2002).
- [13] Trundle, K., Atwood, R. and Christopher, J., *Fourth-grade elementary student's conceptions of standards-based lunar concepts*, International Journal of Science Education **29**, 595-616 (2007).
- [14] Chiras, A. and Valanides, N., *Day/night cycle: mental models of primary school children*, Science Education International **19**, 65-83 (2008).
- [15] Bayraktar, S., *Pre-service primary teachers' ideas about lunar phases*, Journal of Turkish Science Education **6**, 12-23 (2009).
- [16] Iglesias, M., Quinteros, C. y Gangui, A., *Indagación llevada a cabo con docentes de primaria en formación sobre temas básicos de Astronomía*, Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias **9**, 467-486 (2010).
- [17] Galperin, D., Raviolo, A., Señorans, L. y Prieto, L., *El día y la noche: dificultades para la comprensión de un fenómeno muy cotidiano*, <<https://www.academia.edu/>>, Consultado el 4 de diciembre de 2013.
- [18] Lanciano, N., *Ver y hablar como Tolomeo y pensar como Copérnico*, Enseñanza de las Ciencias **7**, 173-182 (1989).
- [19] Landau, L., Ajiezer, A. y Lifshitz, E., *Curso de Física General. Mecánica y Física molecular*, (Mir, Moscú, 1973).
- [20] Jiménez Gómez, E. y Guirao Moya, L., *La conceptualización de la posición por los alumnos de 11 a 16 años. Propuesta de dominio de instrucción*, Enseñanza de las Ciencias **25**, 45-58 (2007).
- [21] Saltiel, E. and Malgrange, J., *'Spontaneous' ways of reasoning in elementary kinematics*, European Journal of Physics **1**, 73-80 (1980).
- [22] Driver, R., *Psicología cognoscitiva y esquemas conceptuales de los alumnos*, Enseñanza de las Ciencias **4**, 3-15 (1986).
- [23] Berrocoso, M., Ramírez, M., Enríquez-Salamanca, J. y Pérez-Peña, A., *Notas y apuntes de trigonometría esférica y astronomía de posición*, (Universidad de Cádiz, España, 2003).
- [24] Vega Navarro, A., *Ideas Precopernicanas en nuestros libros de texto*, Revista de Educación **311**, 339-354 (1996).
- [25] Gil Quilez, M. y Martínez Peña, M., *El modelo Sol-Tierra-Luna en el lenguaje iconográfico de estudiantes de magisterio*, Enseñanza de las Ciencias **23**, 153-166 (2005).
- [26] Leite, C. y Hosoume, Y., *Explorando a dimensão espacial na pesquisa em ensino de astronomia*, Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias **8**, 797-811 (2009).
- [27] García Barros, S., Martínez Losada, C. y Mondelo, M., *La astronomía en la formación de profesores*, Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales **10**, 121-127 (1996).
- [28] García Barros, S., Martínez Losada, C., Mondelo Alonso, M. y Vega Marcote, P., *La Astronomía en textos escolares de educación primaria*, Enseñanza de las Ciencias **15**, 225-232 (1997).
- [29] Kalkan, H. and Kiroglu, K., *Science and nonscience students' Ideas about basic astronomy concepts in preservice training for elementary school teachers*, Astronomy Education Review **1**, 15-24 (2007).
- [30] Gellon, G., Rosenvasser Feher, E., Furman, M. y Golombek, D., *Los astros celestes: el uso de un modelo*. En *La ciencia en el aula*, (Paidós, Buenos Aires, 2005), pp. 135-149.
- [31] Ten, A. y Monros, M., *Historia y enseñanza de la Astronomía, II. La posición de los cuerpos celestes*, Enseñanza de las Ciencias, 47-56 (1985).
- [32] Camino, N., *Sobre la didáctica de la astronomía y su inserción en EGB*. En Kaufman, M. y Fumagalli, L. (Eds.), *Enseñar ciencias naturales*, (Paidós, Buenos Aires, 1999), pp. 143-173.
- [33] Galperin, D., *Propuestas didácticas para la enseñanza de la Astronomía*. En Insaurralde, M. (Eds.), *Ciencias Naturales. Líneas de acción didáctica y perspectivas epistemológicas*, 189-229 (Novedades Educativas, Buenos Aires, 2011).
- [34] Camino, N., *Aprender a imaginar para comenzar a comprender. Los «modelos concretos» como herramientas para el aprendizaje en astronomía*, Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales **42**, 81-89 (2004).
- [35] Shen, J. and Confrey, J., *Justifying alternative models in learning Astronomy: A study of K-8 science teacher's understanding of frames of reference*, International Journal of Science Education **32**, 1-29 (2010).
- [36] Plummer, J., Wasko, K. and Slagle, C., *Children learning to explain daily celestial motion: Understanding astronomy across moving frames of reference*, International Journal of Science Education **33**, 1-30 (2011).
- [37] Camino, N. and Gangui, A., *Diurnal astronomy: using sticks and threads to find our latitude on Earth*, The Physics Teacher **50**, 40-41 (2012).
- [38] Jiménez Liso, R., López-Gay, R. y Martínez Chico, M., *Cómo trabajar en el aula los criterios para aceptar o rechazar modelos científicos. ¿Tirar piedras contra nuestro propio tejado?*, Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales **72**, 47-54 (2012).
- [39] Afonso López, R., Bazo González, C., López Hernández, M., Macau Fábrega, M. y Rodríguez Palmero, M., *Una aproximación a las representaciones del alumnado sobre el universo*, Enseñanza de las Ciencias **13**, 327-335 (1995).

- [40] Arribas de Costa, A. y Riviere, V., *La Astronomía en la enseñanza obligatoria*, Enseñanza de las Ciencias **7**, 201-205 (1989).
- [41] Camino, N., *La didáctica de la Astronomía como campo de investigación e innovación educativas*, I Simposio Nacional de Educação em Astronomia, Rio de Janeiro (2011).
- [42] De Manuel Barrabín, J., *¿Por qué hay veranos e inviernos? Representaciones de estudiantes y de futuros maestros sobre algunos aspectos del modelo Sol-Tierra*, Enseñanza de las Ciencias **13**, 227-236 (1995).
- [43] Dicovski, E., Iglesias, M., Karaseur, F., Gangui, A., Cabrera, J. y Godoy, E., *El problema de la posición del observador y el movimiento tridimensional en la explicación de las fases de la Luna en docentes de primaria en formación*, III Jornadas de Enseñanza e Investigación Educativa en el campo de las Ciencias Exactas y Naturales, 219-230 (La Plata, Argentina: Universidad Nacional de La Plata (2012).
- [44] García Barros, S., Mondelo, M. y Martínez Losada, C., *¿Qué vemos en el cielo? Una introducción a la enseñanza de la Astronomía*, Suplemento Aula 44 (Graó Educación, Barcelona, 1995).
- [45] García Barros, S., Mondelo, M., Martínez Losada, C. y Larrosa Cañestro, I., *La observación del cielo. Un instrumento para estudiar el espacio y el tiempo*, Suplemento Aula 51 (Graó Educación, Barcelona, 2003).
- [46] González, R., *La Astronomía y la reforma de la enseñanza*, Enseñanza de las Ciencias **9**, 111-113 (1990).
- [47] Kriner, A., *Las fases de la Luna, ¿cómo y cuándo enseñarlas?*, Ciência & Educação **10**, 111-120 (2004).
- [48] Lanciano, N., *Mirando el cielo: obstáculos conceptuales ante el espacio. Un enfoque transversal, Uno: Revista de Didáctica de las Matemática* **6**, 85-94 (1995).
- [49] Lanciano, N. y Camino, N., *Del ángulo de la geometría a los ángulos en el cielo. Dificultades para la conceptualización de las coordenadas astronómicas acimut y altura*, Enseñanza de las Ciencias **26**, 77-92 (2008).
- [50] Moreno Lorite, M., *A cielo abierto: una experiencia de aprendizaje de astronomía*, Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales **18**, 75-83 (1998).
- [51] Navarro Pastor, M., *Enseñanza y aprendizaje de Astronomía diurna en primaria mediante "secuencias problematizadas" basadas en "mapas evolutivos"*, Enseñanza de las Ciencias **29**, 163-174 (2011).
- [52] Ogan-Bekiroglu, F., *Effects of model-based teaching on pre-service physics teacher's conceptions of the Moon, Moon Phases, and other lunar phenomena*, International Journal of Science Education **29**, 555-593 (2007).
- [53] Olivares Alfonso, J., *Horologium, Uno: Revista de didáctica de las matemáticas* **33**, 89-98 (2003).
- [54] Plummer, J., *Students' Development of astronomy concepts across time*, Astronomy Education Review **1**, 139-148 (2008).
- [55] Plummer, J., Kocareli, A. and Slagle, C., *Learning to explain astronomy across moving frames of reference: Exploring the role of classroom and planetarium-based instructional contexts*, in review.
- [56] Rincón Voelzke, M. y Pereira Gonzaga, E., *Analysis of the astronomical concepts presented by teachers of some Brazilian state*, Journal of Science Education **1**, 23-25 (2013).
- [57] Sneider, C., Bar, B. and Kavanagh, C., *Learning about seasons: A guide for teachers and curriculum developers*, Astronomy Education Review **10**, 1-22 (2011).
- [58] Subramaniam, K. and Padalkar, S., *Visualisation and reasoning in explaining the phases of the Moon*, International Journal of Science Education **31**, 395-417 (2009).
- [59] Ten, A. y Monros, M., *Historia y enseñanza de la Astronomía, I. Los primitivos instrumentos y su utilización pedagógica*, Enseñanza de las Ciencias, 49-56 (1984).
- [60] Vega Navarro, A. y Marrero Acosta, J., *El hechizo de la elipse, Relación Secundaria-Universidad*, Encuentros de Didáctica de las Ciencias **2**, 624-632 (Universidad de La Laguna, La Laguna, 2002).
- [61] Vega Navarro, A., *El día y la noche en los cuentos*, Curriculum **16**, 61-73 (2003).

ANEXO

En la Tabla II se presenta el listado de los artículos analizados y la transcripción de algún párrafo que permite clasificarlo en las categorías mencionadas anteriormente. Para abreviar este listado se ha decidido no repetir aquellos trabajos que ya han sido citados en la sección “Frases que identifican sistemas de referencia”.

TABLA II. Clasificación de los artículos y ejemplo de transcripción representativa. El número de artículo coincide con el que se encuentra en la bibliografía y la segunda columna indica el nivel educativo con el que se relaciona el trabajo: nivel primario (NP), nivel medio (NM), formación docente (FD), adultos en general (AD) o todos los niveles educativos (TOD). La tercera columna especifica el sistema de referencia (S.R.) en que ha sido categorizado: Heliocéntrico (He), Terrestre (Te) o Dual (Du). En algunos casos se presenta directamente la subcategoría en que se lo ha ubicado: Heliocéntrico observacional (He obs), dentro de la categoría Heliocéntrico, o Geocéntrico (Geo)/Topocéntrico (To) dentro de la categoría Terrestre.

Nº	Nivel	S.R.	Cita textual presente en el artículo
[5]	NP	He	“...los niños tienen dificultad en comprender la información de que la Tierra es una esfera enorme, rodeada de espacio. La idea de que vivimos en todo en el exterior de una Tierra esférica es contrario a la intuición y no está de acuerdo con la experiencia cotidiana.” (p. 541)
[6]	NP	He	“Los modelos mentales iniciales no mostraron influencia de la explicación científica actualmente aceptada del ciclo día/noche, mientras que los modelos mentales sintéticos representan los intentos de asimilar las explicaciones científicas a las actuales estructuras conceptuales.” (p. 181) [Aclaración: el artículo toma como “explicación científica aceptada” a la explicación del ciclo día/noche desde el sistema de referencia heliocéntrico]
[7]	NP	He obs	“El día y la noche, las estaciones y las fases serían fenómenos fácilmente explicables, para todos, si pudiéramos tener una perspectiva desde fuera del sistema Tierra-Sol-Luna... la dificultad no radica en los fenómenos en sí mismos sino en que buscamos comprenderlos desde una perspectiva topocéntrica, sin generar herramientas que nos permitan imaginar otros puntos de vista.” (p. 87)
[8]	NP	He	“La lección del tercer día proporciona a los estudiantes experiencias adicionales para investigar las posiciones en el modelo tridimensional Sol-Tierra-Luna. De esta manera, los estudiantes observaron qué pasó con la forma de la Luna vista desde la Tierra cuando cambió la posición de la Luna en relación a la Tierra y al Sol.” (p. 164)
[10]	NP	He	“TAREA 1... Supón que estás en una nave espacial desde la que se puede ver toda la Tierra mirando desde una ventanilla... a) Dibuja la Tierra tal y como piensas que la verías.” (p. 43)
[11]	TOD	He	“...mientras no estemos en condiciones de aceptar que la Tierra es esférica y de entender el concepto de gravedad, solamente tendremos aproximaciones que frecuentemente se interfieren y se mezclan con otros conceptos, dando lugar a una extensa retahíla de ideas alternativas, como muestran los diferentes estudios.” (p. 476)
[13]	NP	He obs	“Para comenzar la instrucción, el observador participante enseñó a 63 chicos y 3 docentes procedimientos para juntar, registrar y compartir observaciones de la Luna. Los chicos y docentes fueron llevados fuera del edificio escolar y orientados según los puntos cardinales usando lugares de referencia de la comunidad.” (p. 602) “Continuando con las actividades con formas y secuencias, los estudiantes participaron en una actividad de modelado psicomotor en una habitación oscura... una esfera de poliestireno sostenida a la longitud del brazo servía como modelo de la Luna; el bulbo incandescente representaba el Sol; y la cabeza de los estudiantes representaba la Tierra.” (p. 604)
[14]	NP	He obs	“...hay algunos prerrequisitos esenciales para la comprensión del ciclo día/noche y su duración: a) la Tierra tiene forma esférica, b) el día/noche es causado exclusivamente por la rotación de la Tierra alrededor de su eje, c) es imposible tener sólo día o noche en la Tierra, d) el eje de la Tierra está inclinado... Las habilidades de los chicos para proceder con observaciones sistemáticas de varios fenómenos astronómicos es una condición básica para la comprensión de distintos conceptos astronómicos porque constituye el primer paso para cualquier generalización para su comprensión.” (p. 75)
[16]	FD	He	“(9) ¿En qué consisten los movimientos de rotación y traslación terrestres? Descríbalos.” (p. 472) “Por su parte, en las respuestas a la pregunta ¿Por qué hay días y noches en la Tierra?... un 63% de las respuestas obtenidas corresponde a la explicación científicamente aceptada.” (p. 479)
[27]	FD	He obs	“Como en el caso anterior los futuros maestros, con ayuda de objetos reales, debían explicar teóricamente las causas de las estaciones... el análisis de los informes presentados por los distintos grupos, nos sirvió para detectar las siguientes ideas... - Consideraron que el cambio de estaciones se debe a la mayor o menor distancia de la Tierra al Sol (91,7%). - No mantuvieron constante la orientación del eje de giro... (58,3%).” (p. 125) “Los estudiantes destacaron los siguientes aspectos positivos de la unidad didáctica: - Se contempla la observación de los movimientos aparentes de los astros. - La constante relación realidad observable/modelo interpretativo.” (p. 126)

[28]	NP	He obs	“Dado que la comprensión de la teoría heliocéntrica no es evidente y encierra importantes dificultades para los alumnos de educación primaria, es necesario que los planteamientos didácticos contemplen: a) la relación entre los movimientos reales de los astros y los aparentes; b) las ideas e interpretaciones de los niños; c) la utilización de modelos manejables, dramatizaciones...” (p. 21). «La observación directa del cielo es uno de los procedimientos esenciales en el estudio de la astronomía, que no siempre se trata con la amplitud que se merece en los textos escolares... En este caso resulta irrelevante que un niño, «sepa» el movimiento de rotación terrestre si no saben explicar con él la variación de la posición del Sol en el cielo a lo largo de la jornada y la sucesión de los días y las noches.» (p. 230)
[31]	TOD	To	“Mediante la observación directa del firmamento a simple vista, percibimos de modo inmediato, además del sol, otro cuerpo celeste singular, la luna, y una inmensa cantidad de cuerpos luminosos puntuales: las estrellas. Una observación más atenta y extendida en el tiempo, muestra el movimiento uniforme de la mayor parte de éstas a lo largo del día y del año y el de la luna y algunas de estas «estrellas», respecto a las otras que parecen mantener invariables sus posiciones relativas y permiten su agrupación en imaginarias figuras: las constelaciones...” (p. 48)
[38]	FD	Du	“...desde la Tierra inmóvil podemos observar cómo el Sol se mueve de arriba (21 de junio) a abajo (21 de diciembre) pasando dos veces por el punto intermedio... Si cambiamos de referencia... podemos observar el movimiento rectilíneo de la Tierra de arriba (21 de diciembre) a abajo (21 de junio). Basta sumar el movimiento circular... para conciliar ambos modelos...” (p. 52)
[40]	NP y NM	He obs	“Sin querer entrar en la polémica de si se deben utilizar sistemas geocéntricos o heliocéntricos en la explicación de las apariencias... sería conveniente una relación constante entre la observación y la explicación del fenómeno; al ver, por ejemplo, la órbita de Venus, no debe olvidarse relacionarla con su característica de astro matutino o vespertino.” (p. 204)
[41]	TOD	Du	“Cabe resaltar que esta concepción sobre la Didáctica de la Astronomía no implica poner ningún límite a la rigurosidad conceptual ni a las posibilidades de modelización lógico-matemática. Sólo propone que previamente a la necesaria abstracción los aprendices deben interactuar con los fenómenos astronómicos del mundo natural, iniciándose así un diálogo indispensable entre lo vivido y lo interiorizado, entre la realidad y el aula.” (p. 4)
[41]	FD	He obs	“5. ¿Qué es una constelación? ¿En cuál se halla la estrella polar?... 7. ¿Cuál es el nombre de nuestra galaxia?... 9. ¿Por qué cuando en «medio planeta es invierno, en la «otra mitad» es verano... 10. ¿Sabrías decir qué se conoce con el nombre de Big-Bang?” (p. 112)
[42]	TOD	He	“Como ya sabes, la Tierra gira alrededor del Sol mediante un movimiento denominado traslación... ¿Cuál de estos tres dibujos se aproxima más a la trayectoria que sigue la Tierra alrededor del Sol?...” (p. 229) “No es fácil relacionar la inclinación del eje de rotación de la Tierra con la cantidad de radiación recibida por unidad de superficie. La comprensión del modelo puede facilitarse con el uso de simulaciones... y diseñar un modelo sencillo Tierra-Sol con un balón y un foco de luz...” (p. 235)
[43]	FD	He	“Las fases de la Luna que percibimos desde nuestro lugar en la Tierra son vivencias astronómicas topocéntricas. Sin embargo, para dar una explicación sobre su origen, hay que recurrir a un punto de vista situado en el espacio. En este sentido, uno de los principales obstáculos en el aprendizaje de la astronomía es aquel que está ligado a la visión espacial, es decir, a la capacidad mental de ver y trabajar en tres dimensiones.” (p. 221)
[45]	NP	He obs	“Los niños de esta edad deben conocer con detalle los fenómenos naturales observables para apreciar la utilización que los seres humanos hacemos de ellos. También deben acostumbrarse a buscar el porqué de estos fenómenos y a poner a prueba sus ideas mediante observaciones reales, si es posible, y/o mediante simulaciones tangibles con objetos sencillos, con su propio cuerpo, etc. Todo ello constituye un paso inicial importante para profundizar en la secundaria obligatoria en el modelo teórico abstracto (heliocentrismo).” (p. 3)
[47]	NP	He	Siendo el objetivo que los niños puedan establecer relaciones entre las fases de la Luna con los movimientos de los cuerpos celestes involucrados, parece necesario secuenciar apropiadamente estos conocimientos y desarrollar el contenido a lo largo de varios años a medida que los alumnos los van adquiriendo. Por último, es aconsejable ofrecer actividades didácticas que permitan a los alumnos visualizar al sistema Tierra-Sol-Luna utilizando el modelo heliocéntrico.” (p. 118)
[48]	AD	Du	“...la experiencia ha confirmado de qué modo quien tiene cierta práctica de observación y de reflexión sobre todo lo que se ve en el cielo, ha adquirido una capacidad de razonar sobre el macroespacio, estando en el interior del mismo.” (p. 93)
[49]	NM	To	“Al definir el sistema de coordenadas horizontal astronómico, y al utilizarlo en la práctica docente a través de las coordenadas acimut y altura, damos naturalmente por hecho que el espacio físico con el que trabajaremos tiene las propiedades del espacio geométrico euclídeo. Debemos entonces notar que tomar una geometría particular para describir el espacio físico es una elección arbitraria y, por tanto, la misma debería incluir ciertas «advertencias» para quienes la utilicen, en especial para sus aplicaciones en el ámbito de la educación.” (p. 79)
[50]	NP	Du	“Los movimientos de la bóveda celeste a lo largo de la noche y del año se pueden explicar con el modelo geocéntrico. Sin embargo, en el segundo ciclo al conocer el movimiento retrógrado de los planetas, sus satélites y la existencia de fases, se hacen patentes las dificultades para dar una explicación satisfactoria... ahora se requiere un nuevo modelo que sea capaz de explicar adecuadamente los hechos que no encajan en el modelo anterior.” (p. 81)

[51]	NP	He obs	“...priorizar lo observacional y descriptivo permite que los niños realicen investigaciones científicas, cosa que en el caso de las teorías explicativas resulta altamente problemático. No hay que olvidar que el aprendizaje del modelo Sol-Tierra y las causas de las estaciones presenta una gran dificultad intrínseca... asociada en parte a las destrezas geométricas proyectivas requeridas –la capacidad de imaginar y operar el sistema en tres dimensiones y de vincular la perspectiva local con la espacial–.” (p. 165)
[52]	FD	He obs	“La enseñanza basada en modelos consistió en realizar observaciones periódicas de la Luna, y en la construcción y uso de modelos en grupos.” (p. 575)
[53]	NM	To	“El movimiento del Sol, que determina la duración de sus fases u horas, proporciona al mismo tiempo un recurso precioso para su medición: la variación de las sombras proyectadas por los objetos expuestos a sus rayos. El conocimiento exacto de esta variación ha dado lugar a la confección de los relojes solares, tanto los clásicos como otros más o menos complejos... Otra técnica muy usada ha sido la observación de la dirección de la sombra de objetos verticales, como el propio cuerpo humano. Ambos sistemas se basan en relacionar la hora con el azimut del Sol sin tener en cuenta su altura.” (p. 91)
[54]	NP	He obs	“...la mayoría de la instrucción no ayuda a los estudiantes a realizar conexiones entre los movimientos observados en el cielo y el movimiento de los planetas, el Sol y la Luna desde una perspectiva exterior (Nussbaum, 1986).” (p. 139) “Se necesita más investigación para poner a prueba las hipótesis sobre la progresión desarrolladas en esta tesis, incluyendo instrucción sobre el movimiento aparente del cielo... así como la instrucción que ayuda a los niños a aprender a conectar la comprensión del movimiento aparente con los movimientos reales de la Tierra y la Luna.” (p. 145)
[55]	NP	Du	“Comparamos los resultados de la participación de estudiantes de 3º grado (N=99) en cuatro condiciones instruccionales: un currículum que enfatiza la perspectiva basada en el espacio, un programa de planetario que enfatiza la perspectiva basada en la Tierra, clases instruccionales que enfatizan la explicación de las observaciones basadas en la Tierra y una condición final que combina tanto el planetario como las explicaciones durante la clase.” (p. 2)
[56]	NP	He	“Los resultados muestran una clara mejora de los conocimientos astronómicos de los maestros: un 97,0% de los profesores sabe que el sistema solar se compone de ocho planetas, el 42,4% conoce la correcta definición de planeta, el 78,1% sabe explicar correctamente cómo se produce un eclipse lunar y un eclipse solar; 72,7% son capaces de explicar la aparición de las estaciones del año y el 89,7% puede definir correctamente el término “cometa”.“ (p. 25)
[57]	NP	He obs	“Estos problemas se hacen aún más difíciles debido a que algunos de los conceptos más avanzados, especialmente los que implican la física de la luz y la interacción de la luz con la materia, debe ser entendidos antes para que los estudiantes sean capaces de sintetizar las perspectivas de las estaciones desde la Tierra y desde el espacio. Nótese... que la reconciliación de las vistas desde la Tierra y desde el espacio pueden comenzar en un nivel superior de primaria respecto al ciclo día/noche, ya que este último es menos complejo de visualizar que la causa de las estaciones.” (p. 18)
[58]	AD	He	“Con el fin de explicar con éxito las fases lunares, uno tiene que cambiar de perspectiva, pasando al espacio a partir de un punto de vista basado en la Tierra. Además, uno necesita extraer invariantes de una situación dinámica... Estos invariantes son elementos conceptuales tales como el límite de iluminación y el límite de visibilidad, y pertenecen al dominio de la geometría de la esfera. Una vez que estos invariantes son identificados, el problema de la obtención de la forma exacta de las fases se reduce a la proyección de curvas en la superficie de la esfera.” (p. 18)
[59]	TOD	To	“Esta primera parte está dedicada, como hemos apuntado, a presentar y estudiar las posibilidades de algunos instrumentos basados todos ellos sobre el mismo principio: la determinación de la posición y trayectoria del Sol mediante la observación directa de las sombras que sus rayos producen.” (p. 51)
[60]	TOD	He	“Son esas imágenes... las que no nos permiten entender la causa real de las estaciones. Porque si las imágenes se correspondiesen con la realidad, habría que deducir de ellas una gran variación de temperaturas en función de la cercanía-lejanía de la Tierra y el Sol. Y eso es lo que piensan quienes las han tenido tantas veces delante de sus ojos, sin acordarse de la inclinación del eje de rotación, ni de que en el otro hemisferio la estación es contraria.” (p. 6)
[61]	NP	To	“La Luna no puede ser el símbolo de la noche... porque es un grave error conceptual que colisionará más tarde con la explicación correcta del fenómeno noche-día (ausencia-presencia de luz solar), con la visión heliocéntrica del sistema solar y con la idea de un universo dinámico.” (p. 70)

A tutorial on the technical analysis of dye lasers and short review of their novel applications



Kamal Nain Chopra

*Applied Physics Department, Maharaja Agrasen Institute of Technology,
Rohini, GGSIP University, New Delhi - 110086, India.*

E-mail: kchopra 2003 @gmail.com

(Received 3 October 2013, accepted 25 February 2014)

Abstract

The field of Dye lasers has recently started evolving briskly, and many researchers have carried out serious investigations for exploring the newer applications of these lasers. This paper gives the technical analysis of the dye lasers, besides presenting a short review of their recent important novel applications. It is expected that the paper should be useful for the new entrants in the field, and also the researchers engaged in exploring the newer applications of dye lasers.

Keywords: Laser Dyes, Energy States of an Excimer, Novel Applications of Dye Lasers.

Resumen

El campo de los láseres de colorante ha comenzado recientemente a evolucionar rápidamente, y muchos investigadores han llevado a cabo investigaciones serias para la exploración de nuevas aplicaciones de estos láseres. En este trabajo se da un análisis técnico de los láseres de colorante, además de presentar una breve reseña de sus novedosas recientes aplicaciones importantes. Se espera que el documento sea útil para los principiantes en este campo, así como a los investigadores que trabajan en la exploración de nuevas aplicaciones de los láseres de colorante.

Palabras clave: Láseres de colorantes, Estados Energía de un Excimer, Aplicaciones Novedosas de Láser de colorante.

PACS: 01.40.gb, 01.40.ek

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCTION

A dye laser is a laser based on using an organic dye as the lasing medium, mostly in the form of a liquid solution, and has the advantage as compared to the solid and gaseous lasing media mainly in the sense that a dye can usually be used for a much wider range of wavelengths, and this aspect of the wide bandwidth makes them useful as tunable lasers (tuning being done by mounting a prism or diffraction grating in the path of the beam), in addition to the fact that the dye can be replaced by another type of dye for generating different wavelengths with the same laser, with slight replacement of the optical components. It is important to note that in certain cases, solid state dyes like dye doped organic matrices are used as the gain medium, and these lasers are called as solid state dye lasers (SSDLs). The work on dye lasers started in the mid 1960s [1], and some papers were also published in 1970s – 1980s [2, 3, 4]. Valdmanis et al [4] have described an ultrashort pulse laser, which under specific operating conditions, balances the mechanisms of conventional passive mode locking and soliton like pulse

shaping in a single resonator to generate 27 fsec optical pulses emitted directly from the laser. After that, some regular progress has been observed in their development, with great efforts being made in the last decade on the evolution of the subject.

A dye laser is fabricated by mixing an organic dye with a solvent, and then either circulating it through a dye cell (or cuvette), or streaming through the air by using a dye jet (to avoid the reflection losses). Just like the conventional lasers, its fabrication requires some basic components like: (i) a high energy source of light is required for pumping the liquid beyond its lasing threshold, (ii) a fast discharge flashlamp (or an external laser), (iii) a set of mirrors (one fully reflecting ~ 99.99% reflectivity, and the other, the output mirror with 80-85% reflectivity) to oscillate the light produced by the dye's fluorescence, amplified with each pass through the liquid. Since the liquid dyes have very high gain as laser media, the beam requires making a few passes through the liquid for achieving the full design power, and thus resulting in the high transmittance of the output coupler. Care is taken for coating or anodizing the pump cavities or making them of a material that does not reflect at

the lasing wavelength when being reflected at the pump wavelength. The schematic of a dye laser has been shown below:

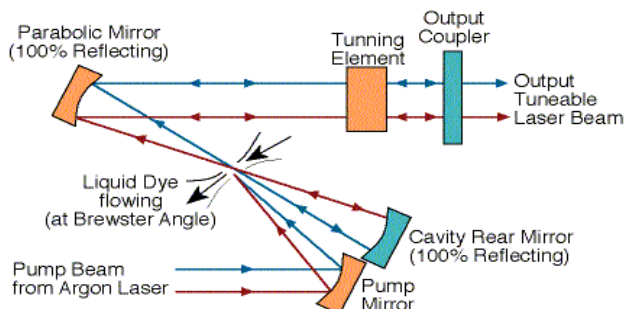


FIGURE 1. Schematic of a Dye Laser. Figure courtesy www.weizmann.ac.il.

The dyes used in these lasers have large organic molecules, which fluoresce, since the dye molecules are excited by the incoming light to emit stimulated radiation in the singlet state, in which the molecules emit light via fluorescence, the dye chosen being transparent to the lasing wavelength. Within a microsecond, or less, the molecules change to their triplet state very fast, in $\sim$ a microsecond, in which state, light is emitted by phosphorescence, and in the process, the molecules completely absorb the lasing wavelength, and change the transparent dye into opaque. Great care has to be taken that the speed of circulation is very high, which helps in avoiding triplet absorption and also decreasing the degradation of the dye. The organic dyes have a tendency of decomposing by light, and that is precisely the reason that the dye solution is circulated from a large reservoir, through a cuvette or a dye jet, which avoids reflection losses from the glass surfaces and contamination of the walls of the cuvette, though for these advantages, alignment becomes more complicated. The frequently employed kind of dye laser uses a thin dye jet as the gain medium, in which case the dye molecules are used only for a short time within the pump and laser beam, and also have a long time for recovering before being used again. Time for recovery is required because of the tendency of organic dye molecules to become trapped in triplet states, and so ceasing to participate in the lasing process. In some cases, the triplet concentration is lowered by adding a triplet quenching agent to the dye solution. In some cases, the dye is pumped through a thin cuvette of some material like quartz, and the dye is enclosed in some transparent material, which has the advantage of easily obtaining a steady flow. Quartz is chosen because it is resistant to the laser light and the pump light, and the cuvette surfaces must have a high optical quality. The passively mode locked dye lasers yield very short pulses $\sim$ few hundred fs. It is important to note that they are limited by our ability to saturate the absorber. The schematic of the passively Mode-locked Dye Laser has been shown below:

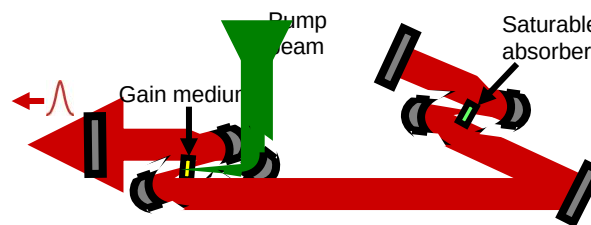


FIGURE 2 Mode-locked Dye Laser. Figure courtesy www.powershow.com/.

The fact that the liquid medium of a dye laser can be employed in any shape, leads to the possibility of using many different configurations. The most commonly employed configuration is the Fabry Pérot (FP) laser cavity, which is mainly used for flashlamp pumped lasers. The F.P. cavity consists of two mirrors, flat or curved, mounted parallel to each other with the laser medium in between them. In general, the dye cell is side pumped, having one or more flashlamps positioned parallel to the dye cell in a reflector cavity, which is mostly water cooled, to prevent the possibility of the thermal shock in the dye caused by the large amounts of near IR radiation produced by the flashlamp. The other common geometry is that of the axial pumped lasers, having a hollow, annular shaped flashlamp surrounding the dye cell, which has lower inductance to provide a shorter flash, and also the improved transfer efficiency. In some cases, we have coaxial pumped lasers having an annular dye cell, surrounding the flash lamp, which provides even better transfer efficiency, though with a lower gain due to the diffraction losses. It is a common practice to choose a ring laser design for continuous wave (CW) operation, in which the mirrors are positioned so that the beam follows a circular path. The dye requires to be pumped, which is normally done by an external laser like excimer laser, or frequency doubled Nd:YAG laser. The ring laser design behaves differently than the FP cavity, in that it does not generate standing waves, causing a phenomenon in which the energy is trapped in unused portions of the medium between the crests of the wave; and leads to the spatial hole burning, which results in a better gain from the lasing medium, and hence a better efficiency. In general, the dye lasers have some additional components like several frequency selective elements *e.g.* a birefringent tuner or a diffraction grating in Littrow configuration, for the wavelength tuning in a range of tens of nanometers. For the case of the narrow linewidth dye lasers, use is made of some more frequency filtering components like etalons, and also the sophisticated computer controlled tuning mechanics for precise output of the desired wavelengths. However, in case of the mode-locked lasers, with large emission bandwidth, use of a coarse wavelength control is adequate. It is interesting to note that these tuning elements provide a stable linear polarization of the output.

Thus we see that dye lasers are liquid lasers, having organic dyes solved in organic solvents, pumped by a laser, to emit light via fluorescence. The dyes are generally organic

polyatomic molecules with conjugated π -chains, like - rhodamine, tetracene, coumarine, and stilbene; and the comon solvents are - methanol, ethanol, water or ethylene glycol. The additional chemicals are added, which prevent intersystem crossing and also prohibit degradation of the dye. Some of the polyatomic organic molecules contain the conjugated double bonds. The electrons move freely within the whole chain, and may be described as a free electron in 1D potential well.

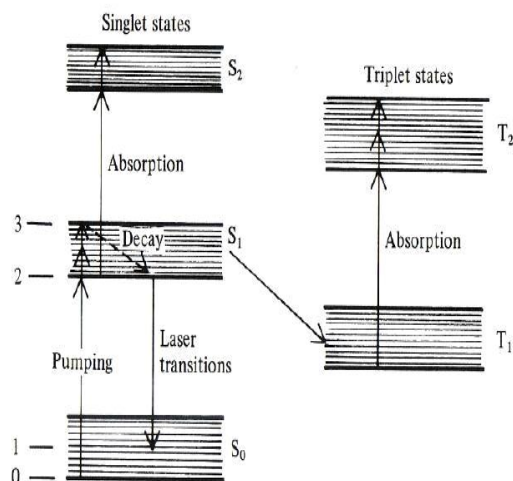


FIGURE 3. The Singlet and Triplet states of Dye Laser. Figure courtesy www.star.le.ac.uk.

There are three singlet states – S_0 , S_1 and S_3 , and two triplet states T_1 and T_2 . The pumping takes S_0 to S_1 . The singlet S_1 consists of two levels (2 and 3), and the singlet S_0 consists of two levels (0 and 1). The vibrational and rotational levels remain unresolved in the liquids. The selection rules are: (i) $\Delta S = 0$, and (ii) S_1 to S_0 is allowed. These systems contain an organic dye in a solvent. Such dyes can be excited by absorption of short wavelengths and fluoresce by emitting at longer wavelengths. There are a large number of electronic energy levels in bands, resulting in a large number of possible LASER transitions, and hence these lasers are tunable.

Pumping is done optically using radiation from another laser, for example the Ar ion laser. The Fluorescence emission takes place from S_1 to S_0 . There are three types of losses – (i) The inntersystem crossing – S_1 to T_1 ; (ii) The phosphoresence – T_1 to S_0 ; and (iii) Absorption – S_1 to S_2 , and T_1 to T_2 . There are certain problems faced while making a dye laser - (i) Short lifetime of the S_1 state, (ii) Intersystem crossing and long lifetime of T_1 , and (iii) Thermal gradients produce refractive gradient.

II OPERATION OF DYE LASER

The operation is mainly based on the following points:

There is a Pulsed laser action, with Circulation of dye solution, and pumping through another laser like - Nitrogen laser (UV-visible), Excimer laser (UV-visible), and Nd:YAG laser (visible). Since the excimer laser is very commonly empoyed for pumping, it is briefly disussed technically as given below:

The Excimer LASER is the Electron pumped LASER, based on the Dimer (excimer)/complex (exciplex) formation, and providing the LASER radiation: as a resut of the relaxation from excited state dimer to ground state as: $e^- + A \rightarrow A^*$, and $A^* + B \rightarrow AB^* \rightarrow AB + h\nu$, where $h\nu$ is the energy. After this action, immediately, disassociation of AB takes place as: $AB \rightarrow A + B$.

There are two important facts, that have to be noted, and these are: (i) The lower state does not exist, and (ii) There are no rotational/vibrational bands. The Energy states of an excimer are shown in the following figure:

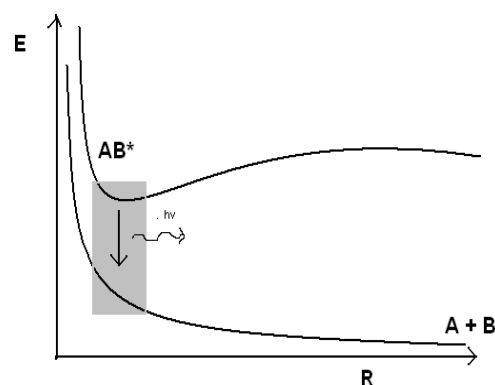


FIGURE 4. Energy States of an Excimer.

The excited dimmers are of the form - F_2 , Xe_2 , and the excited complexes (exciplex) are formed by the combination of rare gas (Ar, Kr, and Xe) atoms and halogen (F, Cl, and Br) atoms. The action can give various wavelengths depending upon the excited dimer. The repetition rate observed varies from 0.05 Hz to 20 kHz, and the laser beam is observed to be of high power ~ several 10 – 200W. Some of the Excimer gases and the related wavelengths emitted by them are given below:

Ar₂ - 126 nm, Kr₂ - 146 nm, F₂ - 157 nm, Xe₂ - 172 nm and 175 nm, ArF - 193 nm, KrF - 248 nm, Cl₂ - 259 nm, N₂ - 337 nm, and XeF - 351 nm.

III APPLICATIONS OF DYE LASERS

Dye lasers are really quite versatile in the sense, that in addition to their recognized wavelength, these lasers offer very large pulsed energies or very high average powers; e.g. the Flashlamp-pumped dye lasers are able to yield hundreds of Joules per pulse. Dye lasers are used in many applications including astronomy, as laser guide stars, medicine, and spectroscopy.

In the field of medicine, these lasers are applied on several areas, including dermatology, in which they are used to skin tone more even. Vascular skin lesions are known to contain oxygenated haemoglobin, which has the characteristic of strongly absorbing the visible light at 418nm, 542nm and 577 nm, and the pigmented skin lesions contain melanin, which has a wide range of absorption in the visible and IR wavelength regions. The difficulty in using the IR lasers is that they are very destructive because of the fact that they are absorbed by water in and around the skin cells. However, the aim of the doctor is to destroy the target cells and also at the same time not to harm the surrounding tissues, and this is achieved by using the short pulses, and thus reducing the heating of the damaged cells, and finally reducing the thermal injury which could result in scarring. In this treatment, help is also taken from the automated scanners, which reduce the chances of the overlapping of the treatment areas.

Many types of lasers including the argon, APTD, KTP, krypton, copper vapour, copper bromide, pulsed dye lasers and Nd:YAG. Argon (CW) have been used successfully to treat various types of vascular lesions, including superficial vascular malformations like the facial telangiectases, and poikiloderma of Civatte. However, the pulsed dye lasers have been found to be the most suitable for these vascular lesions because they are clinically very efficient and quite low risk profile. The dye lasers are found to be very effective because of two factors: (i) the wide range of possible wavelengths matching very close to the absorption lines of the certain tissues (melanin or hemoglobin), and (ii) the narrow bandwidth obtainable helping in reducing the possibility of damage to the surrounding tissue. Because of the same reasons, they are also used for various other applications like – treatment of port-wine stains and other blood vessel disorders, scars and kidney stones.

Dye lasers are very useful for carrying out the research work in spectroscopy, as they can be used to study the absorption and emission spectra of various materials, very efficiently due to many characteristics: (i) Their tunability, from the near IR to the near UV, narrow bandwidth, and high intensity allowing a much greater diversity than other light sources. These lasers are also used for the environmental pollution monitoring.

IV RECENT NOVEL APPLICATIONS AND CONCLUDING REMARKS

The field of dye lasers has drawn the increased attention of the researchers in the last decade. This is also because of the fact that apart from other uses of the lasers, their biomedical applications, especially for skin diseases, are making them specially very important. Some of the recent important novel applications have been reviewed here. Bornemann et al [5] have reported the first realization of a cw solid-state dye laser, in which the laser medium consists of a laser dye (Rhodamine 6G) dissolved in a photopolymer, and the UV cured solution is sandwiched between two Digital Versatile

Disc (DVD) substrates, the resonator design being derived from a conventional liquid solvent dye laser geometry. It has been shown that the laser radiation can be tuned from 565 to 615 nm by using a birefringent filter, and a pump power of 2 W leads to a cw output power of more than 20 mW. Won [6] has discussed that the Optofluidic dye lasers, although attractive as miniature coherent light sources for integrated optics, have a limitation in that they require a solvent for the preparation of their liquid dye solution.

Choi *et al.* [7] have reported on the demonstration of liquid organic dye lasers free from solvent, based on 9-(2-ethylhexyl)carbazole (EHCz), so-called liquid carbazole, doped with green- and red-emitting laser dyes; and also have prepared both waveguide and Fabry-Perot type microcavity fluidic organic dye lasers by capillary action under solvent-free conditions. This work was accomplished by employing Cascade Förster-type energy transfer processes from liquid carbazole to laser dyes, for achieving color-variable amplified spontaneous emission and lasing. It has been emphasized that this study provides the first step towards the development of solvent free fluidic organic semiconducting lasers and also demonstrates a new kind of optoelectronic application for liquid organic semiconductors.

It is now accepted that the Lab-on-a-chip systems made of polymers are promising for the integration of active optical elements, enabling *e.g.* on-chip excitation of fluorescent markers or spectroscopy. Wienhold *et al.* [8] have presented the diffusion operation of tunable optofluidic dye lasers in a polymer foil, and have demonstrated that these first order distributed feedback lasers can be operated for more than 90 min at a pulse repetition rate of 2 Hz without fluidic pumping. It has been reported that the Ultra-high output pulse energies of more than 10 μ J and laser thresholds of 2 μ J have been achieved for resonator lengths of 3 mm. Tunability of laser output wavelengths over a spectral range of 24 nm on a single chip has been accomplished by varying the laser grating period in steps of 2 nm. It has been emphasized that these on-chip lasers are suitable for a wide range of lab-on-a-chip applications, *e.g.* excitation of fluorescent markers, and surface enhanced Raman spectroscopy (SERS).

Rawat *et al.* [9] have designed and fabricated a dye cell to facilitate high repetition rate single longitudinal mode (SLM) operation with low viscosity solvents such as ethanol, and also have been able to eliminate the flow circulation (vortex) in the dye cell by reducing the flow cross section from 10 to 5 mm² with optimized flow entry. Flow visualization of various geometries in the dye cell has been carried out using commercial computational fluid dynamics (CFD) software, and it has been reported that the slit as well as tubular entry to the dye cell of cross section 1×10 mm² shows flow circulation (a vortex) near the entry to the dye cell. It has been highlighted that the time averaged SLM line widths of 400 and 175 MHz were obtained with a copper vapor laser (CVL) and Nd:YAG laser, respectively; and a single pulse line width of 315 MHz was obtained with a CVL pumped dye laser. It should

be noted that these line widths are quite significant from some specific applications point of view.

Klinkhammer *et al.* [10] have reported the fabrication and characterization of continuously tunable, solution processed distributed feedback (DFB) lasers in the visible regime, in which the continuous thin film thickness gradients have been achieved by means of horizontal dipping of several conjugated polymer and blended small molecule solutions on cm scale surface gratings of different periods. In addition, the optically pumped continuously tunable laser emissions of 13 nm in the blue, 16 nm in the green and 19 nm in the red spectral region have been obtained on a single chip. Passeron *et al.* [11] have shown a treatment to prevent, by a large extent, the relapse of melasma. In the medical field, it is well known that the Melanocytes express vascular endothelial growth factor (VEGF) receptors 1 and 2 and neuropilin, and the VEGF and skin vascularization might play a role in the pigmentation processes, and therefore in melasma. It has been emphasized that by targeting the vascular component in melasma lesions, the used dye laser may decrease the melanocyte stimulation and subsequently the relapses. It has also been suggested that additional studies are required to confirm this result of the prevention of relapses, and also to optimize the treatment.

Gerosa *et al.* [12] have demonstrated an all-fiber dye laser, in which the dye solution is kept under flow, allowing for high repetition rate pumping. It has been reported that the threshold average pump power of 2.15 mW and conversion slope efficiency of ~8.5% have been achieved. Yang *et al.* [13] have reported a highly sensitive stress probe based on pyrromethene 597 (PM597) doped elastic polydimethylsiloxane films. By sandwiching the dye doped elastic film with two plano dichromatic mirrors, a solid-state microcavity laser with low laser threshold (0.2 μJ) has been presented as a simple probing method for mechanical stress, which is monitored by the laser output spectra, and have demonstrated a resolution limit higher than 0.01 MPa. It is also interesting to note that they have achieved the photostability of PM597 doped into the microcavity laser higher than 7222 GJ/mol, and also have observed fast self-recovery on the laser output in less than 1 h, which is considered to be due to the diffusion of dye molecules. Song and Psaltis [14] have presented a tunable optofluidic dye laser with integrated elastomeric air-gap etalon controlled by air pressure, by fabricating the chip with polydimethylsiloxane (PDMS) via replica molding, which comprises a liquid waveguide and microscale air-gap mirrors providing the feedback. The system is based on choosing the lasing wavelength by the interference between two parallel PDMS-air interfaces inside the internal tunable air-gap etalon, and realizing the pneumatic tuning by inflating the air-gap etalon with compressed air. The results like - (i) a pumping threshold of 1.6 μJ/pulse, (ii) a lasing linewidth of 3 nm, and (iii) a tuning range of 14 nm, have been achieved.

Rosacea is a commonly noticed chronic inflammatory condition, which is characterised by erythema, telangiectasias, papules, and pustules. There are many quite

effective treatment mechanisms for the papulopustular type. Laser therapy is found to be the most effective technique for the treatment of erythematotelangiectatic rosacea. Kashlan *et al.* [15] have proposed a novel technique for enhancing the response of rosacea patients being treated for erythema with pulsed dye laser, and have shown that pre treatment with forced heated air prior to pulsed dye laser leads to a greater response in rosacea patients with erythema and flushing. Thus, it is observed that novel applications of the dye lasers have been established by the researchers, on the basis of which, it can be concluded that the field of dye lasers applications is evolving at a brisk pace.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author is grateful to the Dr. Nand Kishore Garg, Chairman, Maharaja Agrasen Institute of Technology, GGSIP University, Delhi for providing the facilities for carrying out this research work, and also for his moral support. The author is thankful to Dr. M. L. Goyal, Director, for encouragement. Thanks are also due to Dr. V. K. Jain, Deputy Director for his support during the course of the work. The author is really grateful to Prof. V. K. Tripathi, Department of Physics, Indian Institute of Technology, Delhi for useful discussions and various suggestions resulting in considerable improvement in the presentation and readability of the paper.

REFERENCES

- [1] Soffer, B. H. and McFarland, B. B., *Continuously tunable, narrow-band organic dye lasers*, Appl. Phys. Lett. **10**, 266 (1967).
- [2] Shank, C. V. and Ippen, E. P., *Subpicosecond kilowatt pulses from a modelocked cw dye laser*, Appl. Phys. Lett. **24**, 373 (1974).
- [3] Shank, C. V., *Physics of dye lasers*, Rev. Mod. Phys. **47**, 649 (1975).
- [4] Valdmann J. A., Fork R. L., and Gordon J. P., *Generation of optical pulses as short as 27 femtoseconds directly from a laser balancing self-phase modulation, group-velocity dispersion, saturable absorption, and saturable gain*, Opt. Lett. **10**, 131-133 (1985).
- [5] Bornemann, R., Lemmer, U. and Thiel, E., *Continuous-wave solid-state dye laser*, Opt. Lett. **31**, 1669-1671 (2006).
- [6] Won Rachel, *Dye lasers, Going solvent-free*, Nature Photonics **7**, 504 (2013).
- [7] Choi Eun, Y., Mager, L., Cham Tran, T., Dorkenoo Kokou, D., Fort, A., Wu Jeong, W., Barsella, A. and Ribierre, J.-Ch., *Solvent-free fluidic organic dye lasers*, Optics Express **21**, 11368-11375 (2013).
- [8] Wienhold, T., Breithaupt, F., Vannahme, Ch., Christiansen, M. B., Dörfler, W., Kristensen, A. and Mappes, T., *Diffusion driven optofluidic dye lasers*

encapsulated into polymer chips, *Lab Chip* **12**, 3734-3739 (2012).

[9] Rawat, V. S., Gantayet, L. M., Sridhar, G. and Singh, S., *Design of the dye cell of a dye laser to facilitate repetitive operation in the single longitudinal mode*, *Laser Phys.* **23**, 035001 (2013).

[10] Klinkhammer, S., Liu, X., Huska, K., Shen, Y., Vanderheiden, S., Valouch, S., Vannahme, C., Bräse, S., Mappes, T. and Lemmer, U., *Continuously tunable solution-processed organic semiconductor DFB lasers pumped by laser diode*, *Optics Express* **20**, 6357-6364 (2012).

[11] Passeron, T., Fontas, E., Kang, H. Y., Bahadoran, P., Lacour, J. P., Ortonne, J.-P., *Melasma Treatment With Pulsed-Dye Laser and Triple Combination Cream: A*

Prospective, Randomized, Single-Blind, Split-Face Study, *Arch Dermatol.* **147**, 1106-1108 (2011).

[12] Gerosa, R. M., Sudirman, A., Menezes, L. S., Matos, J. S. de and Margulis, W., *All-Fiber High-Flow Microfluidic Dye Laser*, *Workshop on Specialty Optical Fibers and their Applications*, Sigtuna Sweden, August 28-30, 2013 Poster Session I (W3).

[13] Yang ,Y., Liao, Z., Zhou, Y., Cui, Y. and Qian, G., *Self-curable solid-state elastic dye lasers capable of mechanical stress probing*, *Optics Letters* **38**, 1627-1629 (2013).

[14] Song ,W. and Psaltis, D., *Pneumatically tunable optofluidic dye laser*, *Appl. Phys. Lett.* **96**, 081101 (2010).

[15] Kashlan, L., Graber, M. and Arndt, K. A., *Hair Dryer Use to Optimize Pulsed Dye Laser Treatment in Rosacea Patients*, *J. Clin. Aesthet. Dermatol.* **5**, 41-44 (2012).

Analytical solutions to the fractional wave equation with variable dielectric function



H. Yépez-Martínez, J. M. Reyes and I. O. Sosa

Universidad Autónoma de la Ciudad de México, Prolongación San Isidro 151,
Col. San Lorenzo Tezonco, Del. Iztapalapa, P.O. Box 09790 México D.F., México.

E-mail: huitzilin.yepetz.martinez@uacm.edu.mx

(Received 2 December 2013, accepted 27 February 2014)

Abstract

The fractional wave equation is presented as a generalization of the wave equation when arbitrary fractional order derivatives are involved. We have considered variable dielectric environments for the wave propagation phenomena. The Jumarie's modified Riemann-Liouville derivative has been introduced and the solutions of the fractional Riccati differential equation have been applied to construct analytical solutions of the fractional wave equation. New family of exact solutions has been found for the fractional wave equation. These new solutions are compared with that obtained previously in the literature for the case of integer order derivatives. The results show how powerful can result the fractional calculus when is applied to many different physical situations.

Keywords: Fractional wave equation, Variable dielectric environments for wave propagation, Analytical solution for the fractional wave equation.

Resumen

Se presenta la ecuación de onda de orden fraccionario como una generalización de la ecuación de onda cuando se tienen derivadas de orden fraccionario arbitrario. Se consideran medios dieléctricos variables para la propagación de ondas. Se emplea la derivada fraccionaria de Riemann-Liouville modificada por Jumarie y se aplican las soluciones de la ecuación diferencial fraccionaria de Riccati para obtener soluciones analíticas para la ecuación de onda fraccionaria. Una familia nueva de soluciones para la ecuación de onda fraccionaria se ha obtenido. Estas nuevas soluciones se comparan con las soluciones obtenidas previamente en la literatura para el caso de derivadas de orden entero. Los resultados muestran lo poderoso que resulta el cálculo fraccionario cuando se aplica a diversas situaciones físicas.

Palabras clave: Ecuación de onda fraccionaria, Medios dieléctricos variables para la propagación de ondas, Soluciones analíticas para la ecuación de onda fraccionaria.

PACS: 01.40.gb, 02.30.Jr, 42.25.Bs, 77.22.Ch

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCTION

Fractional differential equations are generalizations of classical differential equations of integer order. In recent years, nonlinear fractional differential equations have gained considerable interest. It is caused by the development of the theory of fractional calculus itself but also by the applications of such constructions in various sciences such as physics, engineering, biology and others areas [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Among the investigations for fractional differential equations, research for seeking exact solutions is an important topic as well as applying them to practical problems [8, 9, 10, 11, 12, 13].

The exact solutions of the electromagnetic wave equation for inhomogeneous medium for physically relevant dielectric function have attracted much attention of the physicist since many years ago. Considerable effort [14] has been made in order to obtain exact solutions to the electromagnetic wave equation for inhomogeneous medium.

In this paper, some basic properties of the fractional

calculus have been successfully employed to obtain the analytical solution of the fractional wave-like equation where we have incorporated variable dielectric environments for wave propagation into inhomogeneous medium. Here we have considered a special dielectric function of fractional polynomial form:

$$\varepsilon(\omega, z) = \varepsilon(z) = \left(\frac{a}{b + z^\alpha} \right)^2. \quad (1)$$

The method for solving the fractional wave equation is based on the modified Riemann-Liouville fractional derivative of order α [15, 16] and the analytical solutions for the fractional Riccati differential equation without using any restrictive assumption [17]. The exact solutions for the electric fields of the fractional wave equation are expressed in terms of simple polynomial functions in the fractional variable z , associated with the wave propagation direction.

From historical point of view fractional calculus may be described as an extension of the concept of a derivative

operator from integer order n to arbitrary order α , where α is a real or complex number:

$$\frac{d^n}{dx^n} \rightarrow \frac{d^\alpha}{dx^\alpha} . \quad (2)$$

The physicists have been attracted to the fractional differential equations that have been applied in several areas, like: wave and diffusion equations, Schrödinger equation, Yang-Mills theory, nuclear and particle physics [18].

The recent appearance of fractional differential equations and their applications in physical-mathematical problems make necessary to investigate the methods for the solution for such equations (analytical and numerical) and we hope that this work is a step in this direction. We present, for the interested students and the professor research as well, a concise example of a fractional wave equation in the electromagnetic wave propagation with analytical solution.

In order to give a pedagogical approach to this problem, in section II we first present a brief introduction (with out a rigorous proof) to the fractional derivatives and the elemental properties of the fractional derivatives. In the literature there are several definitions for the fractional derivatives, here we will only consider the Jumarie's modified Riemann-Liouville definition for fractional derivative [15, 16], because the fractional derivative defined in this way results to be very useful when analytical solutions for fractional differential equations are investigated. After this we present the general analytical solutions for the Riccati fractional differential equation [17]. Then in section III we introduce the electromagnetic wave propagation into an inhomogeneous medium where some analytical solutions to this problem have been obtained previously [14]. Next in section III.B we present the application of the fractional calculus to solve the inhomogeneous fractional order wave equation when the dielectric function takes the fractional position dependence of the equation (1). In section IV, we discuss the reliability of the proposed method and the exact solutions are compared with the results reported in the literature [14], when only the inhomogeneous integer order wave propagation has been considered. Finally in section V some conclusions are presented.

II. FRACTIONAL CALCULUS (BASIC IDEAS)

If we consider an application of differential or integral calculus simply as mapping from a given function set f onto another set g , e.g.,

$$g(x) = \frac{d}{dx} f(x) . \quad (3)$$

Then in general from this relation we cannot deduce any valid information on a possible similarity of a function and its derivative.

Therefore it is surprising and remarkable that for particular function classes we observe a very simple relationship in respect of their derivatives.

It is easy to show that for the exponential, the trigonometric and the powers functions a simple rule can be written for all $n \in N$ [18]:

$$\begin{aligned} \frac{d^n}{dx^n} e^{kx} &= k^n e^{kx}, \\ \frac{d^n}{dx^n} \sin(kx) &= k^n \sin\left(kx + \frac{n\pi}{2}\right), \\ \frac{d^n}{dx^n} x^k &= \frac{k!}{(k-n)!} x^{k-n}. \end{aligned} \quad (4)$$

For arbitrary order n apparently a kind of self similarity emerges, e.g., all derivatives of the exponential lead to exponentials, all derivatives of trigonometric functions lead to trigonometric functions. Since the derivative is given in a closed form it is straightforward to extend this rule from integer derivative coefficients $n \in N$ to real and even imaginary coefficients α and postulate the fractional derivative as:

$$\begin{aligned} \frac{d^\alpha}{dx^\alpha} e^{kx} &= k^\alpha e^{kx}, & k \geq 0 \\ \frac{d^\alpha}{dx^\alpha} \sin(kx) &= k^\alpha \sin\left(kx + \frac{\alpha\pi}{2}\right), & k \geq 0 \\ \frac{d^\alpha}{dx^\alpha} x^k &= \frac{\Gamma(1+k)}{\Gamma(1+k-\alpha)} x^{k-\alpha}, & x \geq 0, k \neq -1, -2, -3, \dots \end{aligned} \quad (5)$$

We restrict to $k \geq 0$ and $x \geq 0$ respectively to ensure the uniqueness of the fractional derivative definition [8-13].

Now we consider the formal definition for the Jumarie's modified Riemann-Liouville fractional derivative of order α (D_x^α) [15, 16]:

$$D_x^\alpha f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \int_0^x \frac{[f(\xi) - f(0)]}{(x-\xi)^{\alpha+1}} d\xi, & \text{for } \alpha < 0 \\ \frac{1}{\Gamma(1-\alpha)} \frac{d}{dx} \int_0^x \frac{[f(\xi) - f(0)]}{(x-\xi)^\alpha} d\xi, & \text{for } 0 < \alpha < 1 \\ [f^{(\alpha-n)}(x)]^{(n)}, & \text{for } n \leq \alpha \leq n+1, n \geq 1. \end{cases} \quad (6)$$

Some properties for the proposed modified Riemann-Liouville derivative are [15, 16]:

$$D_x^\alpha x^\gamma = \frac{\Gamma(\gamma+1)}{\Gamma(\gamma+1-\alpha)} x^{\gamma-\alpha},$$

$$D_x^\alpha c = 0, \quad \alpha \geq 0 \quad c = \text{const.}$$

$$D_x^\alpha (cf(x)) = c(D_x^\alpha f(x)), \quad \alpha \geq 0 \quad c = \text{const.} \quad (7)$$

$$D_x^\alpha (f(x)g(x)) = g(x)(D_x^\alpha f(x)) + f(x)(D_x^\alpha g(x)),$$

$$D_x^\alpha f[g(x)] = f'_g[g(x)]D_x^\alpha g(x).$$

Other important result for the research of analytical solutions of the fractional wave equation is the exact solution of the fractional Riccati equation:

$$D_x^\alpha \phi = \sigma + \phi^2, \quad (8)$$

where σ is a constant. By using the generalized exp-function method via Mittag-Leffler function, Zhang et al. [19], obtained the following solutions of the fractional Riccati equation (8):

$$\phi(\xi) = \begin{cases} -\sqrt{-\sigma} \tanh_\alpha(\sqrt{-\sigma}\xi), & \sigma < 0, \\ -\sqrt{-\sigma} \coth_\alpha(\sqrt{-\sigma}\xi), & \sigma < 0, \\ \sqrt{\sigma} \tan_\alpha(\sqrt{\sigma}\xi), & \sigma > 0, \\ \sqrt{\sigma} \cot_\alpha(\sqrt{\sigma}\xi), & \sigma > 0, \\ -\frac{\Gamma(1+\alpha)}{\xi^\alpha + \omega}, & \omega = \text{const.} \quad \sigma = 0, \end{cases} \quad (9)$$

where the generalized hyperbolic and trigonometric functions are defined as:

$$\begin{aligned} \sinh_\alpha(x) &= \frac{E_\alpha(x^\alpha) - E_\alpha(-x^\alpha)}{2}, \\ \cosh_\alpha(x) &= \frac{E_\alpha(x^\alpha) + E_\alpha(-x^\alpha)}{2}, \\ \tanh_\alpha(x) &= \frac{\sinh_\alpha(x)}{\cosh_\alpha(x)}, \\ \coth_\alpha(x) &= \frac{\cosh_\alpha(x)}{\sinh_\alpha(x)}, \\ \sin_\alpha(x) &= \frac{E_\alpha(ix^\alpha) - E_\alpha(-ix^\alpha)}{2}, \\ \cos_\alpha(x) &= \frac{E_\alpha(ix^\alpha) + E_\alpha(-ix^\alpha)}{2}, \\ \tan_\alpha(x) &= \frac{\sin_\alpha(x)}{\cos_\alpha(x)}, \\ \cot_\alpha(x) &= \frac{\cos_\alpha(x)}{\sin_\alpha(x)}, \end{aligned} \quad (10)$$

where $E_\alpha(z)$ is the Mittag-Leffler function, given as:

$$E_\alpha(z) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{z^k}{\Gamma(1+k\alpha)}. \quad (11)$$

III. FRACTIONAL WAVE EQUATION IN INHOMOGENEOUS MEDIUM

In several cases the propagation or transmission of a physical quantity can be modeled by a wave equation in which the velocity is a function of the propagation coordinate: for instance, the cases of electromagnetic waves in normal incidence on a region whose electric permeability depends on the position in the medium, thin film coating of optical surfaces where reflection is of practical interest, radio wave reflection, propagation or transmission of electromagnetic field in the ionosphere, optical systems with variable index of refraction, etc. For this kind of system, several dielectric profiles have been solved analytically: the inverse squared profile, exponential, linear and quadratic polynomials (e.g., V. Ginzburg [14] and references therein).

The propagation of waves in inhomogeneous isotropic media involves a very wide range of possibilities, which arise mainly from the specific form of the dielectric function ε . It is necessary to state the problem more definitely, here we consider a medium which consist of plane-parallel layers. The propagation of waves in a plane-parallel layer medium may conveniently be first considered for the particular case of a wave incident normally on a layer of an inhomogeneous medium. For this case we may consider electric fields of the form:

$$E(z, t) = E(z)e^{i\omega t}, \quad (12)$$

where ω is the angular frequency and z is the wave propagation direction. $E(z)$ is the electric field perpendicular to the wave propagation direction ($E_x(z)$ or $E_y(z)$), the component $E_z(z)$ is taken to be zero. The electric field satisfies the wave equation:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 E(z, t)}{\partial z^2} &= \frac{\varepsilon(\omega, z)}{c^2} \frac{\partial^2 E(z, t)}{\partial t^2} \\ \Rightarrow \\ \frac{d^2 E(z)}{dz^2} + \frac{\omega^2 \varepsilon(\omega, z)}{c^2} E(z) &= 0, \end{aligned} \quad (13)$$

$\varepsilon(\omega, z)$ is the dielectric function inside the inhomogeneous medium. This wave equation for arbitrary $\varepsilon(\omega, z)$ has no solution which can be written in terms of known functions, the particular cases where this can be done are of considerable interest [14]. For example, in the case of a linear form $\varepsilon(\omega, z) = \varepsilon(z) = a + bz$, the solution of the equation (13) can be expressed in terms of known functions of order 1/3 or Airy functions. For a parabolic form $\varepsilon(z) = a + bz^2$, the solution can be expressed in terms of parabolic cylinder functions (Weber functions) [14]. The solutions for $\varepsilon(z) =$

$(a+bz)^m$ with integral m can be expressed in terms of Bessel functions; for $m = -2$ the solution is a power function.

A. Wave propagation in a inhomogeneous medium with a dielectric function $\varepsilon(z)=(a/(b+z))^2$

We shall now discuss one of the simplest exact solutions for the equation (13), namely the special case where:

$$\varepsilon(\omega, z) = \varepsilon(z) = \left(\frac{a}{b+z} \right)^2, \quad (14)$$

which is of interest because the exact solution is expressible in terms of elementary functions. For the wave equation:

$$\frac{d^2 E}{dz^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \left(\frac{a}{b+z} \right)^2 E = 0, \quad (15)$$

it is easily verified, by direct substitution in the above equation, that the solution is

$$E(z) = C_1 (b+z)^{r_1} + C_2 (b+z)^{r_2}, \quad (16)$$

$$r_{1,2} = \frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \left(\frac{\omega a}{c} \right)^2} = \frac{1}{2} \pm i \sqrt{\left(\frac{\omega a}{c} \right)^2 - \frac{1}{4}}.$$

As an example, let us consider reflection from a layer of the type of the equation (14):

$$\varepsilon = 1 \quad \text{for } z \leq \Lambda \quad (\text{medium 1}),$$

$$\varepsilon = \left(\frac{\Lambda}{z} \right)^2 \quad \text{for } z > \Lambda \quad (\text{medium 2}), \quad (17)$$

with $b = 0$ and $a = \Lambda$ in the equation (14), see Figure 1.

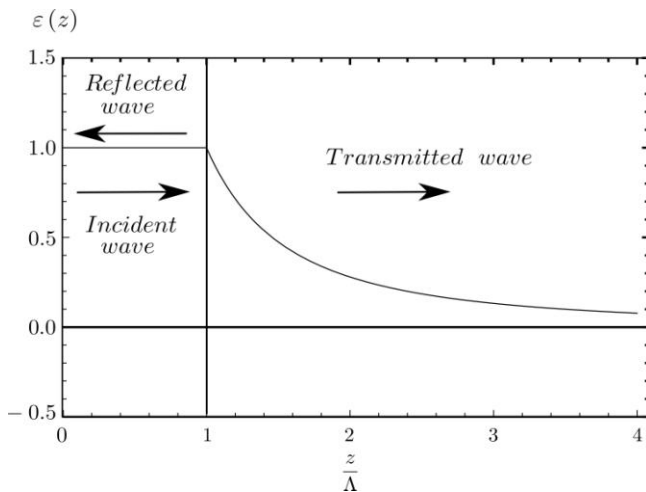


FIGURE 1. The dielectric function $\varepsilon(z)$ given by the equation (17) with $\Lambda=12.5$.

Let the wave be incident from medium 1, a vacuum, where the field has the form

$$E_1 = e^{-i\frac{\omega}{c}(z-\Lambda)} - R \left(e^{i\frac{\omega}{c}(z-\Lambda)} \right), \quad (18)$$

here we consider both the incident wave traveling to the right and the reflected wave (R) traveling backwards to the left. In medium 2 the field is

$$E_2 = A z^{1/2-i\sqrt{(\omega\Lambda/c)^2-1/4}} = A z^{1/2} z^{-i\sqrt{(\omega\Lambda/c)^2-1/4}} \quad (19)$$

$$\equiv A z^{1/2} z^{-i\beta} = A z^{1/2} e^{-i\beta \ln z},$$

since in the equation (16) we must put $b=0$, $a = \Lambda$; we have also used the fact that in medium 2 there is only a wave travelling away from the boundary. It is assumed that the wave can be propagated, which implies that $\omega\Lambda/c > 1/2$. At the boundary we must have $E_1=E_2$ and $(dE_1/dz)=(dE_2/dz)$, whence:

$$R = 1 - A(\Lambda)^{1/2-i\beta} = i \frac{1}{2 \left(\frac{\omega\Lambda}{c} + \beta \right)},$$

$$|R| = \frac{1}{2 \left(\frac{\omega\Lambda}{c} + \beta \right)},$$

$$A = \frac{2(\Lambda)^{-1/2+i\beta}}{1 + i \frac{c}{\omega\Lambda} \left(\frac{1}{2} - i\beta \right)},$$

$$\beta = \sqrt{\left(\frac{\omega\Lambda}{c} \right)^2 - \frac{1}{4}}.$$

B. Fractional wave propagation in inhomogeneous medium with a dielectric function $\varepsilon(z)=(a/(b+z^\alpha))^2$

Now if we consider the generalization of the equation (13) for an arbitrary fractional order we obtain:

$$D_z^{2\alpha} E(z, t) = \frac{\varepsilon(\omega, z)}{c^2} \frac{\partial^2 E(z, t)}{\partial t^2}$$

$$\Rightarrow$$

$$D_z^{2\alpha} E(z) + \frac{\omega^2 \varepsilon(\omega, z)}{c^2} E(z) = 0, \quad (21)$$

in the special case where:

$$\varepsilon(\omega, z) = \varepsilon(z) = \left(\frac{a}{b+z^\alpha} \right)^2. \quad (22)$$

For the wave equation:

$$D_z^{2\alpha} E + \frac{\omega^2}{c^2} \left(\frac{a}{b+z^\alpha} \right)^2 E = 0, \quad (23)$$

it is easy to show that the solution for this equation is given by:

$$E(z) = A(b+z^\alpha)^s. \quad (24)$$

We can verify the above result by taking into account the properties of the Jumarie's modified Riemann-Liouville fractional derivative (see equation (7))

$$\begin{aligned} D_z^\alpha \left((b+z^\alpha)^s \right) &= D_z^\alpha \left(\left(\frac{1}{b+z^\alpha} \right)^{-s} \right) = \\ &= -s \left(\frac{1}{b+z^\alpha} \right)^{-s-1} D_z^\alpha \left(\left(\frac{1}{b+z^\alpha} \right) \right), \end{aligned} \quad (25)$$

and noting that

$$\begin{aligned} D_z^\alpha \left(\left(\frac{1}{b+z^\alpha} \right) \right) &= -\frac{1}{\Gamma(1+\alpha)} D_z^\alpha \left(-\frac{\Gamma(1+\alpha)}{b+z^\alpha} \right), \\ &= -\frac{1}{\Gamma(1+\alpha)} \left(\frac{\Gamma(1+\alpha)}{b+z^\alpha} \right)^2, \\ &= -\Gamma(1+\alpha) \left(\frac{1}{b+z^\alpha} \right)^2, \end{aligned} \quad (26)$$

where we have taken into account that the function $\phi(z) = -\Gamma(1+\alpha)/(b+z^\alpha)$ is one of the analytical solutions (9) of the fractional Riccati equation (8), therefore we obtain:

$$\begin{aligned} D_z^\alpha \left((b+z^\alpha)^s \right) &= D_z^\alpha \left(\left(\frac{1}{b+z^\alpha} \right)^{-s} \right), \\ &= s \left(\frac{1}{b+z^\alpha} \right)^{-s-1} \Gamma(1+\alpha) \left(\frac{1}{b+z^\alpha} \right)^2, \\ &= s\Gamma(1+\alpha) \left(\frac{1}{b+z^\alpha} \right)^{-s+1}, \end{aligned} \quad (27)$$

and

$$\begin{aligned} D_z^{2\alpha} \left(\left(\frac{1}{b+z^\alpha} \right)^{-s} \right) &= s\Gamma(1+\alpha) D_z^\alpha \left(\left(\frac{1}{b+z^\alpha} \right)^{-s+1} \right) \\ &= s(-s+1)\Gamma(1+\alpha) \left(\frac{1}{b+z^\alpha} \right)^{-s} D_z^\alpha \left(\frac{1}{b+z^\alpha} \right), \\ &= s(s-1)(\Gamma(1+\alpha))^2 \left(\frac{1}{b+z^\alpha} \right)^{-s} \left(\frac{1}{b+z^\alpha} \right)^2, \end{aligned} \quad (28)$$

and from equation (23) we found:

$$\begin{aligned} D_z^{2\alpha} E + \frac{\omega^2}{c^2} \left(\frac{a}{b+z^\alpha} \right)^2 E &= s(s-1)(\Gamma(1+\alpha))^2 \left(\frac{1}{b+z^\alpha} \right)^{-s+2} \\ &+ \frac{\omega^2}{c^2} \left(\frac{a}{b+z^\alpha} \right)^2 \left(\frac{1}{b+z^\alpha} \right)^{-s} = 0, \end{aligned} \quad (29)$$

and the solution to the wave equation (23) is obtained by solving the quadratic equation:

$$s(s-1)(\Gamma(1+\alpha))^2 + \frac{\omega^2 a^2}{c^2} = 0, \quad (30)$$

the solutions of the above equation are given by

$$\begin{aligned} s_{1,2} &= \frac{1}{2} \pm \sqrt{\frac{1}{4} - \left(\frac{\omega a}{\Gamma(1+\alpha)c} \right)^2} \\ &= \frac{1}{2} \pm i \sqrt{\left(\frac{\omega a}{\Gamma(1+\alpha)c} \right)^2 - \frac{1}{4}}, \end{aligned} \quad (31)$$

and finally the solution for the fractional wave equation (23) is given by

$$E(z) = A(b+z^\alpha)^{s_1} + B(b+z^\alpha)^{s_2}. \quad (32)$$

Let us now consider the reflection from a layer of the type (14):

$$\begin{aligned} \varepsilon &= 1 \quad \text{for } z \leq \Lambda \quad (\text{medium 1}), \\ \varepsilon &= \left(\frac{\Lambda}{z} \right)^{2\alpha} \quad \text{for } z > \Lambda \quad (\text{medium 2}), \end{aligned} \quad (33)$$

with $b=0$ (see figure 1). Let the wave be incident from medium 1, a vacuum $z \leq \Lambda$, where the field has the form

$$\begin{aligned} E_1(z) &= E_\alpha \left(-i \frac{\omega}{c} (z^\alpha - \Lambda^\alpha) \right) \\ &- R \left[E_\alpha \left(i \frac{\omega}{c} (z^\alpha - \Lambda^\alpha) \right) \right], \end{aligned} \quad (34)$$

and E_α is the Mittag-Leffler function defined previously (see equation (11)). The equation (34) is the fractional order generalization for the incident wave of the equation (18). The electric field given in terms of the Mittag-Leffler function satisfies the following fractional wave equation:

$$\begin{aligned} D_z^{2\alpha} E_\alpha \left(-i \frac{\omega}{c} (z^\alpha - \Lambda^\alpha) \right) \\ + \frac{\omega^2}{c^2} E_\alpha \left(-i \frac{\omega}{c} (z^\alpha - \Lambda^\alpha) \right) = 0. \end{aligned} \quad (35)$$

In medium 2 the field is

$$\begin{aligned} E_2(z) &= A(z^\alpha)^{1/2-i\sqrt{(\omega\Lambda^\alpha/c\Gamma(1+\alpha))^2-1/4}}, \\ &= Az^{(1/2)\alpha} z^{-i\alpha\sqrt{(\omega\Lambda^\alpha/c\Gamma(1+\alpha))^2-1/4}}, \\ &\equiv Az^{(1/2)\alpha} z^{-i\beta\alpha} = Az^{(1/2)\alpha} e^{-i\beta\alpha \ln z}, \end{aligned} \quad (36)$$

since in the equation (32) we must put $b=0$, $a = \Lambda^\alpha$; we have also used the fact that in medium 2 there is only a wave travelling away from the boundary. It is assumed that the wave can be propagated, which implies that $\omega\Lambda^\alpha/c\Gamma(1+\alpha) > 1/2$. At the boundary we must have $E_1=E_2$ and $(D_z^\alpha E_1)=(D_z^\alpha E_2)$, whence:

$$\begin{aligned} R &= 1 - A(\Lambda^\alpha)^{1/2-i\beta}, \\ A &= \frac{2(\Lambda^\alpha)^{-1/2+i\beta}}{1+i\frac{c\Gamma(1+\alpha)}{\omega\Lambda^\alpha}\left(\frac{1}{2}-i\beta\right)}, \\ \beta &= \sqrt{\left(\frac{\omega\Lambda^\alpha}{c\Gamma(1+\alpha)}\right)^2 - \frac{1}{4}}. \end{aligned} \quad (37)$$

IV. DISCUSSION

Figure 2 illustrates the behavior of the analytical solution (34) and (36) for the electric field $E(z)$ when $\alpha=0.92$, $(\omega/c)=(5/\Lambda)^\alpha$ and $\Lambda=12.5$, we have also shown the analytical solution (18) and (19) for the electric field $E(z)$ when $\alpha=1$, $(\omega/c)=5/\Lambda$ and $\Lambda=12.5$.

From these results we can observe that one of the principal effects of considering the fractional order wave propagation in inhomogeneous medium is the appearance of an entire family of solutions (36) as a function of the fractional order parameter α . Also from figure 2 we notice that the wave length of the solution increases as the fractional order parameter α varies from 1 and approaches to 0. Additionally it can be noted that the solution obtained in (36) reduce to the previously known solution (19) for the limit case $\alpha=1$, that has been previously reported in the literature [14], in this way the solutions obtained by the fractional calculus techniques are more general and contain as a limit case the well known solution for integer order wave propagation phenomena. It should be noted that the analytical results (34) and (36) are in good agreement with the approximated solutions previously obtained by Mohyud-Din *et al.* [20], where they have applied the homotopy analysis method to the wave-like fractional non-linear equation.

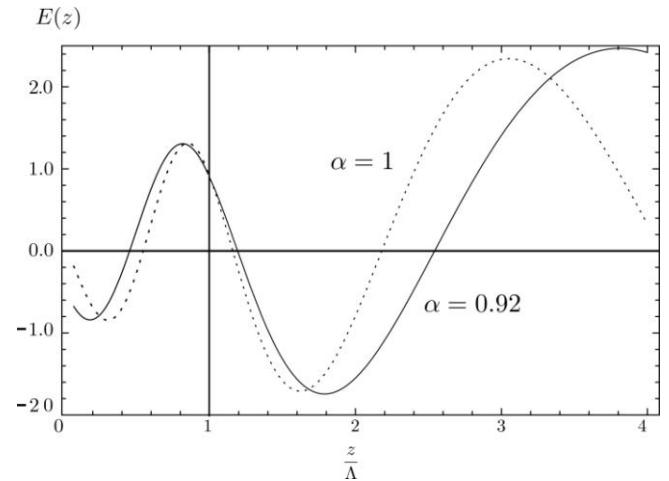


FIGURE 2. The analytical solution for the electric field $E(z)$ when $\alpha=0.92$, $(\omega/c)=(5/\Lambda)^\alpha$ and $\Lambda=12.5$ (solid line) and $\alpha=1$ (dashed line).

V. CONCLUSIONS

The analytical solutions for the fractional wave equation for an inhomogeneous medium have been obtained by considering a dielectric profile with a polynomial form $\epsilon(z)=(a/(b+z^\alpha))^2$. We have illustrated these solutions and compared them with the results found for the integer wave equation for an inhomogeneous medium considering a dielectric profile with a polynomial form $\epsilon(z)=(a/(b+z))^2$. The effect to varying the order of the space-fractional derivatives on the behavior of solutions has been investigated. We have noticed that for the fractional order case an entire new family of solutions $E(z)$ appears and the wave length of these solutions increases as the fractional order parameter α approaches to zero. We have shown through a simple example of wave propagation in inhomogeneous medium, the importance of introducing fractional order differential equations in physics and the necessity of introducing the fractional calculus techniques to the physics students.

ACKNOWLEDGEMENTS

We gratefully acknowledge to the Universidad Autónoma de la Ciudad de México and the ADI of the Universidad Autónoma de la Ciudad de México for supporting this research work.

REFERENCES

- [1] Oldham, K. B. and Spanier, J., *The Fractional Calculus*, (Academic Press, New York, USA, 1974).
- [2] Samko, S. G., Kilbas, A. A. and Marichev, O. I., *Fractional Integrals and Derivatives*, (Gordon and Breach Science, Yverdon, Switzerland, 1993).
- [3] Miller, K. S. and Ross, B., *An Introduction to the*

Fractional Calculus and Fractional Differential Equations, (John Wiley & Sons, New York, USA, 1993).

[4] Podlubny, I., *Fractional Differential Equations*, (Academic Press, San Diego, California, USA, 1999).

[5] Hilfer, R., *Applications of Fractional Calculus in Physics*, (World Scientific Publishing, River Edge, USA, 2000).

[6] West, B. J., Bologna, M. and Grigolini, P., *Physics of Fractal Operators*, (Springer, New York, USA, 2003).

[7] Kilbas, A., Srivastava H. M. and Trujillo J. J., *Theory and Applications of Fractional Differential Equations*, (North-Holland Mathematics Studies, Elsevier Science, Amsterdam, the Netherlands, 2006, 204).

[8] Kiryakova, V., *Generalized Fractional Calculus and Applications. Pitman Research Notes in Mathematics Series*, (Longman Scientific & Technical, Harlow, UK, 1994, 301).

[9] Sabatier, J., Agrawal, O. P. and Machado, J. A. T., *Advances in Fractional Calculus: Theoretical Developments and Applications in Physics and Engineering*, (Springer, New York, NY, USA, 2007).

[10] Mainardi, F., *Fractional Calculus and Waves in Linear Viscoelasticity: An Introduction to Mathematical Models*, (Imperial College Press, London, U.K., 2010).

[11] Yang, X. J., *Local Fractional Functional Analysis and Its Applications*, (Asian Academic Publisher, Hong Kong, 2011).

[12] Baleanu, D., Diethelm, K., Scalas, E. and Trujillo J. J.,

Fractional Calculus: Models and Numerical Methods. Series on Complexity, Nonlinearity and Chaos, (World Scientific Publishing, Boston, USA, 2012), p. 3.

[13] Yang, X. J., *Advanced Local Fractional Calculus and Its Applications*, (World Science Publisher, New York, USA, 2012).

[14] Ginzburg, V. L., *Propagation of Electromagnetic Waves in Plasmas* 2nd ed. (Pergamon Press, Oxford, 1970).

[15] Jumarie, G., *Modified Riemann-Liouville derivative and fractional Taylor series of non differentiable functions further results*, Comput. Math. Appl. **51**, 1367-1376 (2006).

[16] Jumarie, G., *Fractional partial differential equations and modified Riemann-Liouville derivative new methods for solution*, J. Appl. Math. Comput. **24**, 31-48 (2007).

[17] Zhou, Y. B., Wang, M. L. and Wang Y. M., *Periodic wave solutions to a coupled KdV equations with variable coefficients*, Phys. Lett. A. **308**, 31-36 (2003).

[18] Herrmann, R., *Fractional Calculus. An Introduction for Physicists*, (World Scientific, Singapore 2011).

[19] Zhang, S., Zong, Q. A., Liu, D. and Gao, Q., *A generalized Exp-function method for fractional Riccati differential equations*, Commun. Fract. Calc. **1**, 48-51 (2010).

[20] Mohyud-Din S. T., Yildirim, A. and Usman, M., *Homotopy analysis method for fractional partial differential equations*, International Journal of the Physical Sciences **6**, 136-145 (2011).



Solitons propagation in a self-refractive waveguide

O. Díaz-Hernández¹, G. J. Escalera Santos¹, S. Mendoza¹, R. Arceo¹
and A. Zuñiga-Segundo²

¹Centro de Estudios en Física y Matemáticas Básicas y Aplicadas,
Universidad Autónoma de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, C. P. 29050, México.

²Escuela Superior de Física y Matemáticas, Instituto Politécnico Nacional,
Edificio 9, 07738 México D.F., México.

E-mail: orlando.diaz@unach.mx

(Received 23 de Septiembre de 2013, accepted 28 de Febrero de 2014)

Abstract

We show a simulation for the free propagation of a Gaussian and multi-spatial soliton beam in a self-refractive waveguide through the Beam Propagation Method (BPM). We observed and conjectured that a Gaussian beam can be decomposed into Solitons by the propagation in a self-refractive media. We observe too that given the presence of nonlinearity these spatial solitons displays also self-bending phenomena.

Keywords: Solitons, photorefractive and Kerr effects, nonlinear waveguides.

Resumen

Mostramos una simulación para la propagación libre de un haz solitónico multi-espacial en una guía de onda auto refractive mediante el Método de Propagación de Haz (BPM). Observamos y conjeturamos que un haz Gaussiano puede ser descompuesto en Solitones por la propagación en un medio auto-refractivo. Observamos también que dada la presencia de no linealidad estos solitones espaciales muestran también el fenómeno de autoflexión.

Keywords: Solitones, efectos fotorefractivo y de Kerr, guía de ondas no lineal.

PACS: 05.45.Yv, 42.65.Hw, 42.65.Wi

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCTION

The soliton was discovered with the experimental computer aid by the mathematicians Zabusky and Kruskal [1], but researchs on the topic began in the 19th century when Russell observed a big solitary wave in a watercourse near Edinburgh. His observation was reported to the British Association in 1844 [2]. He showed that this solitary wave has many particle properties, e.g., an elastic interaction, from the analogies with particles Zabusky and Kruskal named these waves, solitons.

In 1973 Hasegawa and Tapper [3] proposed that the pulse of the soliton could be useful in optical communications through of the constructive interplay in between nonlinearity and dispersion. They showed that the solitons propagate according to the nonlinear Schroedinger equation (NLS); this equation was solved previously by Zakharov [4] and by Satsuma and Yajima [5] with the inverse scattering method. Seven years later Mollenauer [6] showed experimentally the solitons propagation in an optical fiber.

Recently, optical spatial soliton studies have been taken up [7, 8] due to the increasing need to transfer data in a faster and more efficient way as the optical technologies advance call for. Nowadays a good knowledge is important

for the applications in information processing, considering the advantage provided by the nonlinearity in the media. Motivated by the above, we have made the present work.

II. SOLITONS

A. Nonlinear wave equation in a Kerr medium

Nonlinearity is a property of the medium through which the light travels, and one important effect is the self-focusing, producing changes in the refraction index due to charges distribution in the cristal [9]. Although the optical field is smaller than the interatomic field, still focused with a laser, the nonlinearity is weak but observable. The relationship between the polarization vector $\vec{P}$ and the electric field vector $\vec{E}$ can be expressed as [10]:

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi^1 \vec{E} + 2\chi^2 \vec{E}^2 + 4\chi^3 \vec{E}^3 + \dots,$$

where in general χ^1 , χ^2 and χ^3 are tensors. The nonlinear equation, for a media that does not respond instantaneously to the electric field $\vec{E}$ and nonlinear polarization $\vec{P}_{NL}$,

whether $E \rightarrow -E$, $P \rightarrow -P$, $\chi^{(2)} = 0$, $\chi^{(1)}(t - \tau) = 0$, and $P_{NL}(E) = \frac{\epsilon_0 a_3}{w^2} E^3$, is:

$$\nabla^2 E(x, z, t) - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} E(x, z, t) = \frac{1}{\epsilon_0 c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\epsilon_0 a_3}{w^2} E^3 \right). \quad (1)$$

We propose the next harmonic solution to the equation (1)

$$E(x, z, t) = \frac{1}{2} [\psi e^{i\omega t} + \psi^* e^{-i\omega t}],$$

with $\psi = \psi(x, z)$.

Now we consider a dielectric material block with thickness d , and inside this block we propose plane-waves forms: $\psi(x, z) = |\psi| e^{(-ik_x x - ik_z z)}$, with $|\psi|$ constant inside of the dielectric.

When an intense beam travels in a nonlinear homogeneous media the refractive index is changed in a nonuniform way, such that the media acts like a guide for its own light, this means, the beam makes its own guide. Whether light intensity has the same spatial distribution in the transverse plane, the beam propagates self-consistently without change in its spatial distribution. In this condition the diffraction is compensated by the nonlinear effect and the beam is confined to its own self-created guide; this self-guided beam is called a soliton. This “self-guided” light in a Kerr optical medium is described by the Helmholtz equation

$$[\nabla^2 + n^2(I)k^2]E = 0, \quad (2)$$

where the refractive index is function of the light intensity (I). Equation (2) can be expressed in the paraxial form. Considering now small nonlinear effects, this means that we can express the refractive index like $n(I) = n + n_2 I$, with $n_2 I \ll n$, and $I = \frac{|E|^2 n}{2\eta_0}$, then we have

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\eta_2}{\eta_0} k^2 |A|^2 A = 2ik \frac{\partial A}{\partial z}. \quad (3)$$

Equation (3) is the Schrödinger nonlinear equation and one solution is [5]

$$A(x, z) = A_0 \operatorname{sech}\left(\frac{x}{W_0}\right) \exp\left(-i \frac{z}{4z_0}\right), \quad (4)$$

where W_0 is constant. A_0 satisfies $\frac{n_2 k^2 A_0^2}{2\eta_0} = \frac{1}{W_0^2}$, and $z_0 = \frac{1}{2} k W_0^2$ is called the Rayleigh range [10].

Applying the paraxial approximation we obtain

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{3}{4} \frac{a_3}{c_0^2} k^2 |\psi|^2 \psi = 2ik \frac{\partial \psi}{\partial z}. \quad (5)$$

Finally, comparing equations (3) and (5) we get,

$$\psi = A_0 \operatorname{sech}\left[A_0 \left(\frac{3}{8} \frac{a_3}{c_0^2}\right)^{\frac{1}{2}} x\right]. \quad (6)$$

B. Beam Propagation Method (BPM)

Now the next task is to propagate an electromagnetic field in a guide with length L . Ad hoc, we use the Beam Propagation Method (BPM) [11], this method divides the distance L into n intervals of length Δz and this is further divided in two. Considering now the j th interval; we carry out a free propagation in the first half of Δz ; exactly in the central plane we perform a phase correction that mainly depends on the refractive index changes. Finally, in the second half, we carry out another free propagation between the last two planes.

III. RESULTS

Firstly, we show the characteristic of the self-refractive effect and finally the solitons propagation. In our daily life, we can see that a beam of light propagating in a media with constant refraction index disperses gradually as it move away from the source, e.g., the light of a lamp in the field. This method does not work to send information between distant points. To simulate this, we considered a Gaussian beam propagation through a waveguide with length $l = 5.0$, and width $d = 3.0$ (all units measured in length units), refractive index $n1 = 2.5$ and on air substrate $n2 = 1.0$, see Fig. 1. We see in this case (Fig. 1a) that the beam come into the guide normally ($\theta = 0^\circ$), in the up to down direction, with wavelength $\lambda = 0.02$, width=1.0 and located in the center of the guide ($x_0 = 0$). We see that the light is dispersed through the propagation in the waveguide, from now on we show in gray scale the light intensity, associating the white light to the maximum intensity and the black color to the zero intensity. In Fig. 1 b) we show the transversal sections of the electric field intensity $|E|$, and we highlight the small effects.

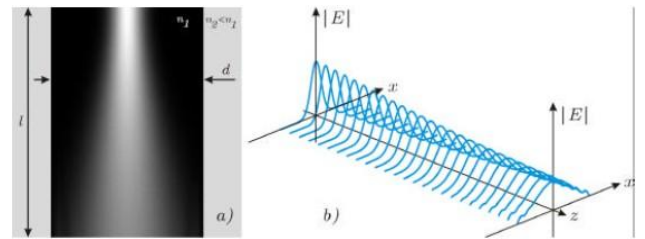


FIGURA 1. a) This graphic represents the laser intensity that propagate through a waveguide with constant refractive index. The plot in b) shows the transversal sections magnitude of the electric field for the propagation of light in the linear media.

As mentioned before, in a cubic nonlinearity the self-refractive effect appears changing the refraction index function of the light intensity, i.e., $n_g = n_1 + \frac{3a_3}{8k_0^2} |E|^2$.

When the cubic parameter a_3 is negative, the refraction index is lower than n_1 in regions where the intensity $|E| > 0$, particularly is minimum in the center of the guide where the beam intensity is maximum, this suggest that the light disperses more quickly than in a media in which the refraction index is constant, Fig. 2 a) shows this effect. In Fig. 2 a) we have the same parameters conditions but

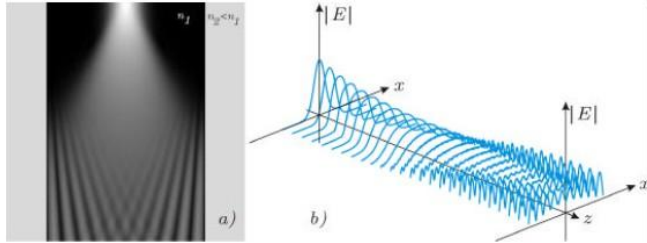


FIGURE 2. a) The gray tones represents the laser intensity propagating in a waveguide with cubic parameter equal to -3000.0. b) Transversal sections of the electric field intensity for the propagation in a self-refractive media with negative cubic parameter.

now a cubic parameter $a_3 = -3000.0$. We observed in this case that the light disperses more quickly than in a linear waveguide, like in a negative lens. Fig. 2 b) shows the transversal sections of the electric field intensity in the same situation that Fig. 2 a), we see in both cases that the light interacts with the border of the waveguide and makes an internal interference pattern. We see in this figure that the light is brought out of focus more quickly than in a linear media. The following questions arises: Does the light remain focused when the cubic parameter is positive?, Could this process continue indefinitely focusing the light in such a way that the width is approximately zero?.

The answer to the first question is: because of that the maximum refraction index is obtained where the light intensity is maximum, this focuses the light where the intensity is maximum, i.e., the light is self-focusing. For the second question we argued that if this process is repeated successively we could think that, therefore, the light focuses more every time, and at the same time also the refraction index increases, consequently focusing more light and so successively, but this process could not continue indefinitely because of the diffraction is present and the light is dispersed again, see Fig. 3.

We can say that the light propagation in a Kerr media is a consequence of the self-focusing which is generated by the self-refractive effect and the dispersion produced by diffraction; therefore the light cannot be focused to be considered zero-width. In Fig. 3 a) we show how the initial Gaussian beam intensity is self-focused when it propagates through a self-refractive waveguide with cubic parameter $a_3 = 3000.0$. We observe the last transversal sections of

Solitons propagation in a self-refractive waveguide the electric field intensity, Fig. 3 b), and we note that there appears relative maximums next to the principal maximum, this confirm our comments about considering that the light focuses to zero-width, because strictly a portion of the light beam is out of the region of focusing.

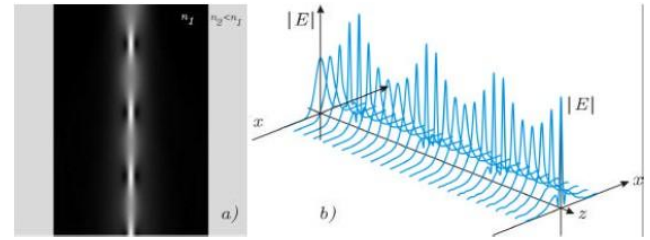


FIGURE 3. a) Graph in gray tones represent the laser intensity propagating through a guide with cubic parameter $a_3 = 3000$. b) Progressive section from the electric field intensity propagating in a self-refractive media with positive cubic parameter.

Consider now a nonlinear waveguide with length $l = 50.0$, $d = 3.0$ and $n_1 = 1.54$ on an air substract. Like in the last case, and we simulate come into the waveguide a Gaussian beam; with an angle $\theta = -5^\circ$, located now in $x_0 = 1.0$ and changing in every simulation the cubic parameter of the waveguide. When the cubic parameter is zero we have a linear waveguide, and the light interacts with the border of the waveguide making an interference pattern, i.e., a group of dark and bright patterns, and after reflects propagating to the other side. Is evident from our simulation that through this trajectory the beam disperses gradually, see Fig. 4 a).

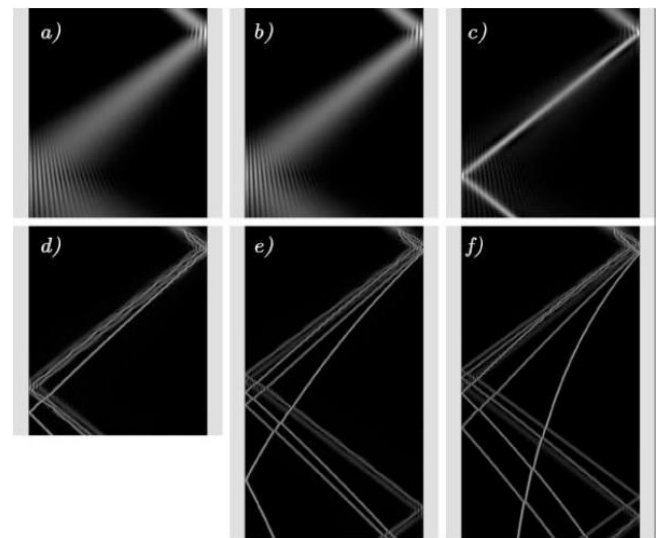


FIGURE 4. Nonlinear cubic effect on the propagation of a Gaussian beam for a_3 equal to: a) 0.0, b) 40.0, c) 400.0, d) 4000.0, e) 6000.0, and f) 8000.0.

Whether we increase the cubic parameter from $a_3 = 40.0$ to 400.0 we see that the light is focuses avoiding dispersion, see Figs. 4 b) and 4 c), respectively. We see again the sequences of self-focusing and dispersion effects, that is a characteristic of a self-refractive media, yet after interaction with the waveguide faces. Now we increase to $a_3 = 4000.0$, we observe that the Gaussian beam is decomposed in thin beams, see Fig. 4 d). These “lumithread” is dispersed in different angles, in apparent violation to the Snell’s law. We observe that these “lumithread” propagates almost without deformation, inclusive after the interaction between them. Whether we increase the parameter from $a_3 = 6000.0$ to 8000.0 (and $l = 75.0$) we see that these lumithread does not propagate in a straight line, moreover, when interact between them they deflect toward the left or right side from the original trajectory, see Figs. 4 e) and 4 f).

The self-bending has been verified in waves-tank, reproducing the historical experiment about solitons from Jhon Scott Russell [2] and C. Y. Gao *et al.* [8], and in nonlinear materials [15, 16]. With this we proved that these “lumithread” observed in the last figure are solitons. We conjecture that a Gaussian beam can be decomposed in solitons by the propagation through a self-refractive media; the definitive proof will be in the possibility that we may have a highly nonlinear media.

The solitons are waves that balance the self-focusing and dispersion produced by a self-refractive media, in this case is a solution of the nonlinear wave equation, and are waves travelling through a nonlinear waveguide without changes in its shape, see Fig. 5, Ref. [13, 14]. It is noteworthy that the width in a soliton depends on the cubic parameter and it does not an independent parameter, like in the Gaussian case.

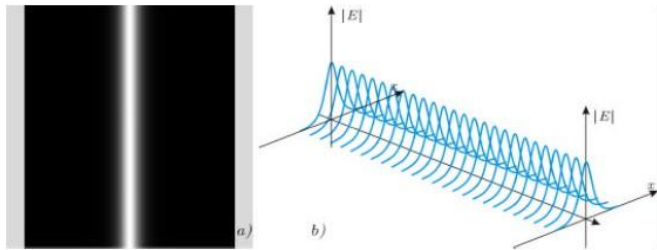


FIGURE 5. a) Gray tones represents the light intensity produced by a soliton propagating through a nonlinear waveguide. b) Transversal sections of the electric field intensity for the soliton propagation.

The soliton formation in a self-refractive waveguide is in according to with the work from Satsuma and Yajima and is called a multi-soliton (n -soliton) [5]; and that subsequently Nikolaus and Grischowsky [12] observed experimentally in an optical fiber and found about of fifty of them. Based on the above, in Fig. 6 we show a two-soliton propagation; we observe a self-focusing with relative maximum next to the intense light; this relative

maximum produces dispersion performing a periodic propagation, in according with [5, 7].

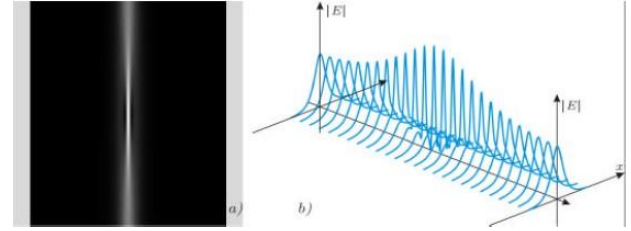


FIGURE 6. a) Gray tones represents the light intensity produced by a two-soliton propagating through a nonlinear waveguide. b) Transversal sections of the electric field intensity for the two-soliton propagation.

Considering now a three-soliton, we observe that the beam is divided in one and after in two beam with relative maximum next to them, producing again a periodic propagation, see Fig. 7. This result is in according with Ref. [10].

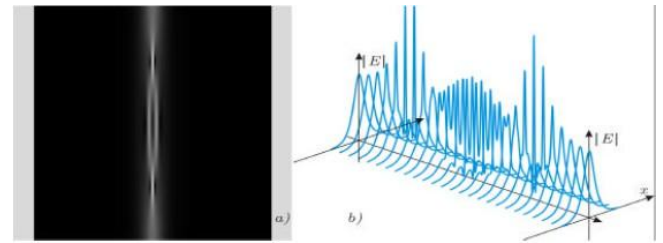


FIGURE 7. a) Gray tones represents the light intensity produced by a three-soliton propagating through a nonlinear waveguide. b) Transversal sections of the electric field intensity for the three-soliton propagation.

Fig. 8 shows the propagation of two solitons with the same phase and width, separated 0.2 and cubic parameter $a_3 = 400.0$, with a length $l = 25.0$. We observe that this propagation is periodical and similar to a two-soliton.

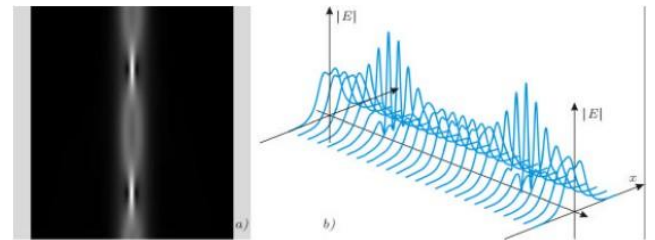


FIGURE 8. a) Gray tones represents the light intensity produced by two solitons propagating very closely and with the same phases through a nonlinear waveguide. b) Transversal sections of the electric field intensity for the solitons propagation in a).

When the phase is different to zero the coupling is of another kind, in the Fig. 9 we show the last case but now with a phase difference of $\theta = \pi/4$ between them. We observe that this propagation has a twist behavior that represents the multi-solitons propagation showed in Fig. 4.

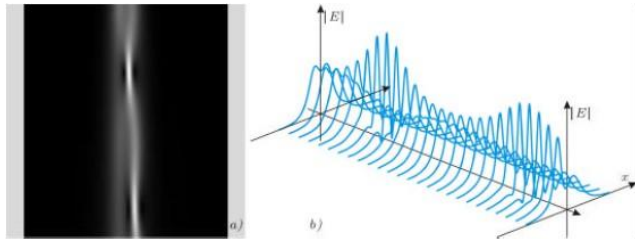


FIGURE 9. a) Gray tones represents the light intensity produced by two solitons propagating very closely and with a phase difference of $\pi/4$ through a nonlinear waveguide. b) Transversal sections of the electric field intensity for the solitons propagation in a).

We simulated the interaction between a soliton and the border of the waveguide; and we observed that the simulation is in accordance with the experimental result obtained by Russell [2], the result is not shown.

IV. CONCLUSIONS

We have shown in a numerical way the propagation of different beams, illustrating particularly the multi-spatial solitons propagation in a self-refractive waveguide. Our results allow us to conjecture and observe that a Gaussian beam can be decomposed into solitons by the propagation in a self-refractive medium.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank to PIEIC-UNACH and Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (grant 106561) for the financial support.

REFERENCES

[1] Zabusky, N. J. and Kruskal, M. D., *Interaction of Solitons in a collisionless plasma and the recurrence of initial states*, Phys. Rev. Lett. **15**, 240 (1965).
 [2] Russell, J. S., *Report on Waves*, 14th meeting of the British Association for the Advancement of Science, 311, (1844).

Solitons propagation in a self-refractive waveguide
 [3] Hasegawa, A. and Tapper, F., *Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers*, Appl. Phys. Lett. **23**, 142 (1973).
 [4] Zakharov, V. E. and Shabat, A. B., *Exact Theory of two-dimensional self-focusing and one-dimensional self-modulation of waves in nonlinear media*, Sov. Phys. JETP **34**, 62 (1972).
 [5] Satsuma, J. and Yajima, N., *Initial Value Problems of One-Dimensional Self-Modulation of Nonlinear Waves in Dispersive Media*, Prog. Theor. Phys. **55**, 284 (1974).
 [6] Mollenauer, L. F., Stolen, R. H. and Gordon, J. P., *Experimental observation of picosecond pulse narrowing and solitons in optical fibers*, Phys. Rev. Lett. **45**, 1095 (1980).
 [7] Tiemann, M., Halfmann, T. and Tschudi, T., *Photorefractive spatial solitons as waveguiding elements for optical telecommunication*, Optics Communications **282**, 3612-3619 (2009).
 [8] Gao, C. Y., Xu, J. Q., Feng, G. F., Qiu, J., Liu, S. W. and Wang, A. K., *Dynamic behavior of spatial bright solitons in a biased transversely shifting photorefractive crystal*, Appl. Phys. B **107**, 779-784 (2012).
 [9] Petrovic, M., Jovic, D., Belic, M., Schroder, J., Jander, Ph. and Denz, C., *Two dimensional counterpropagating spatial solitons in photorefractive crystals*, Phys. Rev. Lett. **95**, 053901 (2005).
 [10] Agrawal, G. P., *Nonlinear Fiber Optics*, fifth edition, (Academic Press, USA, 2012).
 [11] Vysloukh, V. A., *Propagation of pulses in optical fibers in the region of a dispersion minimum. Role of nonlinearity and higher-order dispersion*, Sov. J. Quantum Electron **13**, 1113 (1983).
 [12] Nicolaus, B. and Grischkowsky, D., *90-fs tunable optical pulses obtained by two-stage pulse compression*, Appl. Phys. Lett. **43**, 228 (1983).
 [13] Belic, M., Jander, Ph., Motzek, K., Desyatnikov, A., Jovic, D., Strinic, A., Petrovic, M., Denz, C. and Kaiser, F., *Counterpropagating self-trapped beams in photorefractive crystal*, J. Opt. B Quantum Semiclass. Opt. **6**, S190-S196 (2004).
 [14] Motzek, K., Belic, M., Richter, T., Denz, C., Desyatnikov, A., Jander, Ph. and Kaiser, F., *Counterpropagating beams in biased photorefractive crystal: Anisotropic theory*, Phys. Rev. E **71**, 016610 (2005).
 [15] Lobanov, V. E., Kartashov, Y. V., Vysloukh, V. A. and Torner, L., *Soliton generation by counteracting gain-guiding and self-bending*, Optics Letters **37**, 4540-4542 (2012).
 [16] Petter, J., Weilnau, C., Denz, C., Stepken, A. and Kaiser, F., *Self-bending of photorefractive solitons*, Optics Communications **170**, 291-297 (1999).

Dynamics on a spherical surface in accelerated dilation with a pressure difference



Adrián G. Cornejo

Electronics and Communications Engineering from Universidad Iberoamericana, Calle Santa Rosa 719, C. P. 76138, Col. Santa Mónica, Querétaro, Querétaro, Mexico.

E-mail: adriang.cornejo@gmail.com

(Received 7 November 2013, accepted 25 February 2014)

Abstract

Dynamics on a spherical surface in accelerated dilation with a pressure difference is analyzed, where some regions of the surface may have one of three states regarding to its deformation, which may remain flat, may be curved or perforated. When the surface is considered as a fluid, those three states can be described by the Bernoulli's equation.

Keywords: Pressure difference, Surface tension, Bernoulli's equation, Non-inertial frame of reference.

Resumen

Se analiza la dinámica sobre una superficie esférica en dilatación acelerada con una diferencia de presión, donde algunas regiones de la superficie podrían tener uno de los tres estados relacionados con su deformación, siendo que podría mantenerse plana, curvarse o perforarse, cambiando su forma. Cuando la superficie es considerada un fluido, esos tres estados pueden ser descritos por la ecuación de Bernoulli.

Palabras clave: Diferencia de presión, Tensión superficial, Ecuación de Bernoulli, Marco de referencia no inercial.

PACS: 01.55.+b, 47.55.dd, 61.20.Gy, 64.60.Bd

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCTION

In the study about surfaces, spherical surface is mainly analyzed as a bubble related with the superficial tension and the pressure difference [1]. We can find that some region of a surface may have one of three states regarding to its deformation, which may remain flat, may be curved or may be perforated. Surface can be curved or distorted, for instance, by supporting some high quantity of matter, having the following scenarios,

- No distorted surface, that supports nil or very low density of matter (only the pressure difference on the surface is noticed).
- Curved surface by supporting some considerable density of matter. Also, objects about the density of matter will follow the curvature in their motion.
- Curved and perforated surface by supporting a high density of matter and increasing of temperature, where the matter and the surface itself are drawn (as a fluid) through the formed hole.

Assuming a spherical surface in accelerated dilation like a fluid, we find that each state of the surface can be described by the terms in the Bernoulli's equation.

In classical mechanics, total energy of a system includes different aspects of energy [2], defined as

$$E_T = PE_e + PE_g + KE, \quad (1)$$

where E_T is the total energy, P is the pressure, E_e is the elastic energy, E_g is the gravitational energy and KE is the kinetic energy. Total energy is commonly written as

$$E_T = \frac{1}{2}kx^2 + mgh + \frac{1}{2}mv^2, \quad (2)$$

where k is the elasticity constant, m is the mass, g is the constant of gravity for the Earth, h is the high and v is the velocity.

For a fluid system, an analogous expression is given according to the type of energy, having

$$E_F = PE_e + PE_g + KE, \quad (3)$$

where E_F is the fluid energy. This relation is described by the Bernoulli's equation [3] that relates pressure and velocity, defined as

$$p_1 + \rho gh_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 = p_2 + \rho gh_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2, \quad (4)$$

where p is the pressure and ρ is the fluid density.

In this work, dynamics on a spherical surface in accelerated dilation with a pressure difference is analyzed for each one of the three states of the surface, which may remain flat, may be curved or perforated. When the surface

is considered as a fluid, those three states can be described by the Bernoulli's equation.

II. NO DISTORTED SPHERICAL SURFACE IN DILATION WITH A PRESURE DIFFERENCE

Let us consider a homogenous spherical surface given by $A = 4\pi R^2$ in radial accelerated dilation from a central point, where R is the radius of the sphere. Spherical surface in dilation sweeps out the space during its dilation changing proportional to the increasing of radius. Then, changing of the surface multiplied by the acceleration, for a spherical surface in accelerated dilation, yields

$$adA = a4\pi dR^2, \quad (5)$$

where a is the radial acceleration. Considering that an interior force F_1 homogenously push out the spherical surface to be in accelerated dilated, we have the similar case of a spherical bubble with a surface tension γ [1] in dilation by effect of the interior force. When a force F_1 is applied from within the spherical surface exerting a pressure p_1 , the surface tension is given by

$$F_1 = (2\pi R)\gamma \therefore \gamma = \frac{F_1}{2\pi R}, \quad (6)$$

where $2\pi R$ is the perimeter of its circumference. If now we assume that an external force F_2 is exerting a pressure p_2 from the external side of the spherical surface (for instance, due to the pressure exerted by an exterior bubble in contraction, as shown in Fig. 4), such force may cause a pressure difference $\Delta p = p_2 - p_1$ on such a surface, having

$$F_2 = \Delta p \pi R^2 \therefore \Delta p = \frac{F_2}{\pi R^2}. \quad (7)$$

Equating the forces, $F_1 = F_2$ from the expressions (6) and (7) results the so-called Laplace's law [4], where considering that the spherical surface is only one film, is defined as

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{2\gamma}{R}. \quad (8)$$

In this case, surface is not distorted and nor perforated, then only pressure on the surface is present. Considering the surface as fluid, then Bernoulli's equation (4) is reduced to

$$p_1 = p_2. \quad (9)$$

Difference of pressure between the inner and outer sides of a bubble depends of the superficial tension, and it decreases with increasing radius of the spherical surface. If no force or a very few force acts normal to the surface, it must remain flat.

For the case of a spherical surface in accelerated dilation, radius R accelerated increases and the pressure difference Δp existent between both, inner and outer media is negative, where $p_1 > p_2$. In this way, force in the sphere in dilatation is greater than the force exercised from the external media.

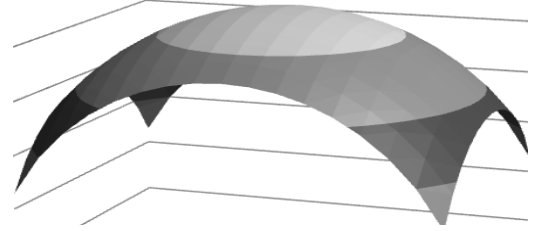


FIGURE 1. Section of a no-distorted spherical surface in dilation.

III. CURVED SURFACE BY THE DENSITY OF MATTER

Eventually, surfaces have to support some quantity of matter, which may distort the surface in dilation if the force exerted by the matter overpass the surface tension in a given point.

Let us now consider a spherical surface in accelerated dilation which can be elastically distorted by apply a force on it, for instance due to a considerable density of material that forms a body on the surface. So, considering a given amount of matter m on the surface that exerts a force, equaling expressions (7) and (8) and applying the second Newton law, yields

$$\gamma = \frac{F_2}{2\pi R} = \frac{ma}{2\pi R} \therefore R = \frac{ma}{2\pi\gamma}. \quad (10)$$

Then, changing of radius by the deformation directly depends of the quantity of matter in the body.

From expression (6), force is given by

$$F_1 = 2\pi R\gamma = ma. \quad (11)$$

From expression (8), we can write equivalence for a massive body, giving

$$\frac{\Delta p R}{M\rho} = \frac{\Delta p R}{V\rho^2} = \frac{2\gamma}{V\rho^2} \therefore \Delta p = \frac{2\gamma M}{V\rho R}, \quad (12)$$

where M is a massive body, ρ is the density of mater and V is the volume.

Magnitude of the surface distortion is measured by the changing in R at the distorted region.

If the pressure on one side of the surface differs from pressure on the other side, the pressure difference times surface area results in a normal force. In order for the surface tension forces to cancel the force due to pressure, the surface must be curved.

Surface curvature of a tiny patch of surface leads to a net component of surface tension forces acting normal to the center of the patch. When all the forces are balanced, the resulting equation is known as the Young–Laplace equation (8) [5].

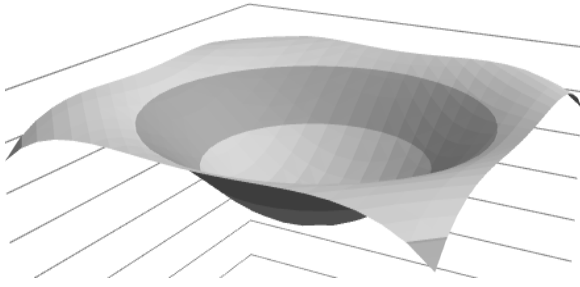


FIGURE 2. Section of a distorted spherical surface in dilation.

Furthermore, for a distorted spherical surface in accelerated dilation, matter about the distorted region will be moving on the geometry following the shape of surface. We can analyze path of the relative motion of a body m in the region of a distorted surface in dilation due to a high density of matter of other body M . Relative motion between the two bodies can be described by a non-inertial frame of reference that is traditionally derived by a coordinate transformation.

Let us consider a given body with mass m in circular motion with constant velocity v and radius r circumgyrating around a central point O on the x and y -axes [6]. Position vector is given by

$$r' = v_t t, \quad (13)$$

where v_t is the tangential velocity of the given body and t is the time.

If such a body in circular motion is also uniformly accelerated towards the vertical direction (it is, along the z -axis), then its position vector is given by

$$r_0 = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2, \quad (14)$$

where v_0 is the initial velocity of the given body and a is its acceleration along that z -axis. Having that relative velocity is the velocity of a body (or a frame of reference) with respect to other; it is related only in systems of two bodies (or two frames of reference). Thus, relation between both, position in a fixed coordinate system and positions in the accelerated system, for a fixed observer is given by

$$r = r' + r_0 = v_t t + \left(v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \right), \quad (15)$$

where its components in a three-dimensional frame of reference are given by

$$\begin{cases} r = v_t t \therefore t = \frac{r}{v_t}, \\ z = v_0 t + \frac{1}{2} a t^2. \end{cases} \quad (16)$$

Finding out time from the first expression in (16) and replacing it in the second expression of it, we have the equation of its trajectory as it is seen by a fixed observer on the given body, hence

$$z = v_0 \left(\frac{r}{v_t} \right) + \frac{1}{2} a \left(\frac{r}{v_t} \right)^2, \quad (17)$$

which is a parabola. If that acceleration starts from the rest, then initial velocity equals zero and expression (17) is reduced, giving

$$z = \frac{a r^2}{2 v_t^2}. \quad (18)$$

We can generalize expression (18) for a spherical scenario extending vertical acceleration from along only one z -axis to several radial “ z -axes” starting each one of them from a common central point [7]. Then, in a homogeneous radial acceleration, a sphere in accelerated dilation is formed. Thus, equation of the radial movement will be equivalent to the radius R of the formed sphere, hence

$$R = \frac{a r^2}{2 v_t^2}. \quad (19)$$

Reducing radius in both sides, and reordering, yields

$$a r = 2 v_t^2. \quad (20)$$

In addition, considering the surface as fluid, having from the Bernoulli's equation (4), yields

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho v^2 = \frac{1}{2} \rho a r \therefore a r = \frac{2 \Delta p}{\rho}. \quad (21)$$

Equating both equivalences (20) and (21) and reordering, yields

$$a r = 2 v_t^2 = \frac{2 \Delta p}{\rho} \therefore \Delta p = \rho v_t^2 = \rho a r. \quad (22)$$

Having that $r = h_1 - h_2$ represents the difference of distances between two points, and considering acceleration like the gravity $a = g$, we can write as

$$p_2 - p_1 = \rho g (h_1 - h_2). \quad (23)$$

Then, in this case Bernoulli's equation (4) is reduced to

$$p_1 + \rho gh_1 = p_2 + \rho gh_2. \quad (24)$$

IV. PERFORATED SURFACE BY A HIGH DENSITY OF MATTER

A surface can be perforated in a section where the superficial tension is zero. For instance, increasing the amount of matter in a body which is on a spherical surface in accelerated dilation, surface will increase its distortion. Such a density of matter could not perforate the surface until reach a certain density of matter that exceeds the threshold of the surface tension. Also considering that temperature of the center of mass increases its temperature, eventually the surface does not support more and it overcomes separating the particles that compose the surface being perforated in the expiration point, which is when the surface tension is zero [8, 9], forming a hole or singularity with section S (Fig. 4). In this case, matter is draining trough the hole as a flow due to the pressure difference, and Bernoulli's equation (4) is reduced to

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2, \quad (25)$$

where ρ is the average of density of matter of the fluid. For the average fluid velocity v , hence

$$\Delta p = p_2 - p_1 = \frac{1}{2} \rho (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \rho v^2, \quad (26)$$

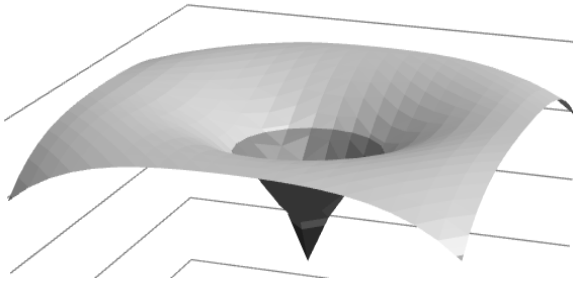


FIGURE 3. Section of a perforated spherical surface in dilation

V. DRAINING FROM A BODY TO OTHER BY THE PRESSURE DIFFERENCE

Let us consider a spherical surface with radius R_B in contraction, where a second spherical surface in dilation with radius R_A is on the spherical surface with radius R_B , where $R_A < R_B$, as shown in Fig. 4. When the pressure difference given by expression (8) is negative, it is when $p_1 > p_2$, and the surface is deformed by the high density of matter at a point of such a surface.

Considering the surface as fluid, a hole on the surface behaviors like a vortex with the vertex that coincides with singularity, where matter in the body m_1 with radius R_1 is drained as a fluid to the body m_2 with radius R_2 .

Furthermore, from the fluid dynamics, we have that the case of two spherical surfaces, one with a radius R_1 under the internal pressure p_1 , and another with radius R_2 under the external pressure p_2 , being connected by a pipe which put in contacts both spheres in communicating, the content of one of them pass to the other due to the difference of pressure between both media. Assuming that $p_1 > p_2$, it is for a negative pressure difference, we have that the content (for instance, a particle with charge q_1) in the spherical body m_1 with radius R_1 is drained towards the body m_2 with radius R_2 through the communicating tube.

The pressure difference between the spheres of radius R_1 and R_2 is given by

$$\Delta p = 2\gamma \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) = \frac{1}{2} \rho v^2, \quad (27)$$

thus, finding out for the square of the velocity, yields

$$v^2 = \frac{4\gamma}{\rho} \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right) = \frac{2\Delta p}{\rho}. \quad (28)$$

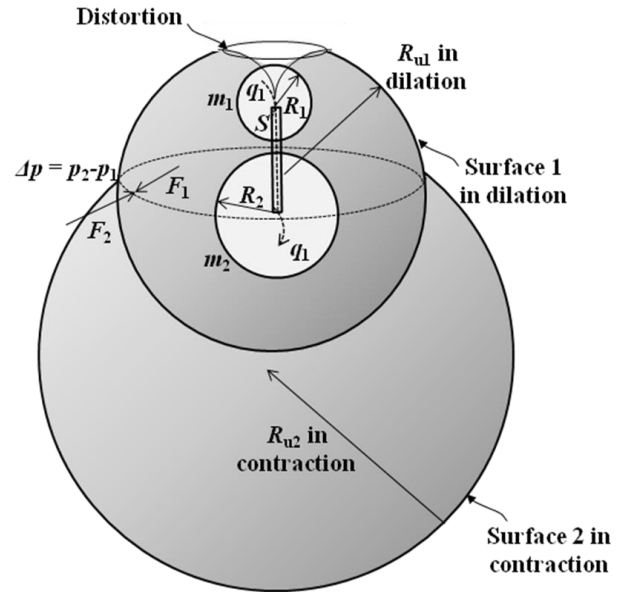


FIGURE 4. Difference of pressure between two bubbles that contain two bodies in contact through a tube like a singularity between them.

As result of the pressure difference, the density of matter ρ_1 within the sphere of radius R_1 flows through to the S cross-section tube that connects both spheres, with a rate given by the Bernoulli's theorem. Contents of volume V_1 in the sphere of radius R_1 is drained in a time dt to the volume V_2 . The volume V_2 of the sphere of radius R_2 increases while the volume V_1 of the sphere of radius R_1 decreases, at a speed v according to

$$dV_1 = A_1 dR_1 = 4\pi R_1^2 dR_1 = S v dt, \quad (29)$$

then,

$$4\pi R_1^2 dR_1 = S \sqrt{\frac{4\gamma \left(\frac{1}{R_2} - \frac{1}{R_1} \right)}{\rho}} dt. \quad (30)$$

Integrating expression (30) and solving the integral by numerical procedures, yields

$$\int_{R_{01}}^{R_1} \frac{x^2 dx}{\sqrt{(V - x^3)^{-1/3} - 1/x}} = \frac{r^2}{4} \sqrt{\frac{4\gamma}{\rho}} t, \quad (31)$$

and volume is given by

$$V = R_1^3 + R_2^3. \quad (32)$$

If a closed system is considered, then the density of total matter in both volumes not change when it is moving from one sphere to the other one (incompressible flow), and the total volume of the system is preserved, so that the sum of the volumes of both bodies is constant, where $R_1^3 + R_2^3 = K$. Knowing the initial radius of the sphere R_2 is calculated at time t when this sphere comes within $R_2 \leq R_1 < V^{1/3}$.

Due to the perforation with section S , mass of radius R_1 behaves according to the Bernoulli's equation (4), where a particle velocity must to overcome the drained velocity (as an escape velocity) in order to out from the body avoiding to be drained. Thus, from the expression (26), square of the escape velocity for any particle which forms part of the spherical body of radius R_1 , will be equivalent to the escape velocity of a mass body, hence

$$v_e^2 R_1 = \frac{2\Delta p R_1}{\rho_1} = \frac{2(2\gamma)}{\rho_1} \therefore R_1 = \frac{2\Delta p R_1}{v_e^2 \rho_1} = \frac{4\gamma}{v_e^2 \rho_1}, \quad (33)$$

where v_e is the escape velocity of the matter within the body with radius R_1 .

VI. CONCLUSIONS

A spherical surface in a pressure difference may be distorted, then having a specific shape and dynamics. Distortion can be related with the quantity of matter on the surface. Thus, when the quantity of matter is very few (like some particles) and the superficial tension supports such a quantity of matter, the surface remains flat. On the other hand, surface could be deformed by a considerable quantity of matter. In addition, if the quantity of matter considerably increases, surface could be extremely deformed and

Dynamics on a spherical surface in accelerated dilation with a pressure difference eventually perforated in a section wherein the matter is drained as a fluid.

Furthermore, free matter about the distorted surface will change their trajectory following the changing of geometry of the surface in dilation, developing a determinate dynamics in the distorted system.

Regarding to the education, dynamics for surfaces and fluids are revisited describing the changes in the spherical surface in dilation, where it is showed the possibility to apply some of the known equivalences to consider another possible results and properties from the classical theories.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author would like to thank Professor Sergio S. Cornejo for the review and comments for this paper.

REFERENCES

- [1] Weinhaus F., Barker W., *On the equilibrium states of interconnected bubbles o balloons*, Am. J. Phys. **46**, 978-982 (1978).
- [2] Goldstein, H., *Classical Mechanics*, 2nd ed. (Addison-Wesley Publishing Company, Inc. Reading, Massachusetts, 1980), pp. 91-103.
- [3] Chanson, H., *Applied Hydrodynamics: An Introduction to Ideal and Real Fluid Flows*, (CRC Press, Taylor & Francis Group 2009).
- [4] Pellicer, J., García-Morales, V., Hernández, M. J., *On the demonstration of Young-Laplace equations in introductory courses*, Phys. Educ. **35**, 126-129 (2000).
- [5] De Gennes, P., Brochard-Wyart, F., Quéré, D., *Capillary and Wetting Phenomena—Drops, Bubbles, Pearls, Waves*, (Alex Reisinger, Springer, The Nether Lands, 2002).
- [6] Tocaci, E., *Relativistic Mechanics, Time, and Inertia*, (C. W. Kilmister Ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1984), pp. 183-251.
- [7] Cornejo, A. G., *The gravity effect hypothesis*, Lat. Am. J. Phys. Educ. **5**, 697-699 (2011).
- [8] Van Eijck, M. A., O' Connor, D., Stephens, C. R., *Critical Temperature and Amplitude Ratios from a Finite-Temperature Renormalization Group*, (2008) [arXiv:hep-th/9411226v1]
- [9] Parola, A., Pini, D., Reatto, L., *Differential theory of fluids below the critical temperature: Study of the Lennard-Jones fluid and of a model of C_{60}* , The American Physical Society, (1995) pp. 2644–2656, [DOI: 10.1103/PhysRevE.52.2644].

Magnetic field of an electric quadrupole moment in non-relativistic motion



Alfonso Queijeiro Fontana

*Departamento de Física, Escuela Superior de Física y Matemáticas.
U.P. Adolfo López Mateos, Edificio 9. Instituto Politécnico Nacional.
México D.F., México 07738.*

E-mail: aquei@esfm.ipn.

(Received 4 November 2013, accepted 27 February 2014)

Abstract

We calculate the magnetic field of an electric quadrupole moment, and identify the magnetic quadrupole moment, in slow motion relative to an inertial reference system.

Keywords: Electric and magnetic moments, relative motion.

Resumen

Calculamos el campo magnético producido por un cuádrupolo eléctrico que se mueve con velocidad no relativista para un sistema de referencia inercial e identificamos el momento cuádrupolar magnético.

Palabras clave: Momentos eléctrico y magnético, movimiento relativo.

PACS: 21.10KY, 33.15Kr.

ISSN 1870-9095

Consider an electric quadrupole moment in rest, located at $\mathbf{r}' = \mathbf{r}_0(t)$. The associated electric dipole moment density (dipole moment per unit volume) is given by [1]

$$\wp'^i = -\frac{1}{6} \frac{\partial}{\partial x'^j} \mathbb{Q}'^{ij}, \quad (1)$$

in terms of the tensor electric quadrupole density $\mathbb{Q}'^{ij} = \mathbb{Q}_0^{ij} \delta^3(\mathbf{r}' - \mathbf{r}_0)$. It is assumed here that the net charge and net dipole moment vanishes, however there is a charge density [2]

$$\rho'(r', t) = -\frac{\partial}{\partial x'^i} \wp'^i. \quad (2)$$

In a reference system where the quadrupole is moving with low velocity $\mathbf{v} = d\mathbf{r}_0/dt$, a current density is measured as [3]

$$\begin{aligned} \mathbf{j} &= \rho \mathbf{v} = \rho' \mathbf{v}, \\ &= -\frac{\partial}{\partial x'^i} \wp'^i \mathbf{v}, \end{aligned} \quad (3)$$

since at low relative velocities coordinates and velocities are the same. Eq. (3) can be written as the sum of two currents

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}_m + \mathbf{j}_p,$$

where

$$\mathbf{j}_m = -\nabla \times (\mathbf{v} \times \wp), \quad (4)$$

and

$$\mathbf{j}_p = -(\mathbf{v} \cdot \nabla) \wp. \quad (5)$$

First, we work with (4) in order to identify the magnetic quadrupole moment $\mathcal{M}$. Using the vector identity

$$\mathbf{a} \times \mathbf{b} = \varepsilon_{ijk} a^i b^j,$$

where ε^{ijk} is the Levi-Civita symbol, and we have assumed the convention sum over repeated indexes, we can write

$$(\mathbf{v} \times \wp)_i = \varepsilon_{ijk} v^j \wp^k.$$

Then,

$$\begin{aligned} (\mathbf{v} \times \wp)_i &= -\frac{1}{6} \varepsilon_{ijk} v^j \frac{\partial}{\partial x'^l} (\mathbb{Q}_0^{lk} \delta(\mathbf{r}' - \mathbf{r}_0)), \\ &= \frac{\partial}{\partial x'^l} (\mathcal{M}^{il} \delta(\mathbf{r}' - \mathbf{r}_0)). \end{aligned} \quad (6)$$

Here

$$\mathcal{M}^{il} = -\frac{1}{6} \varepsilon_{ijk} v^j \mathbb{Q}_0^{lk}, \quad (7)$$

is the tensor magnetic quadrupole moment generated by the motion of the electric quadrupole moment, with v^l the components of the velocity. Substituting (7) in (4) we obtain

$$j_m^i = -\varepsilon^{ijk} \frac{\partial^2}{\partial x^j \partial x^k} (\mathcal{M}_{lk} \delta^3(r - r_0)). \quad (8)$$

Similarly, from (5) we obtain

$$j_p^i = \frac{1}{6} v_j \mathbb{Q}_0^{ik} \frac{\partial^2}{\partial x^j \partial x^k} (\delta^3(r - r_0)). \quad (9)$$

Next, we compute the vector potential due to (8),

$$A_m^i(r) = \frac{1}{c} \int \frac{j_m^i(r')}{|r - r'|} d^3r'.$$

The integration is performed using the well known property of Dirac's delta

$$\int \left[\frac{\partial^n}{\partial x^n} \delta(x) \right] \varphi(x) = (-1)^n \int \delta(x) \left[\frac{\partial^n}{\partial x^n} \varphi(x) \right] dx,$$

then

$$\begin{aligned} A_m^i(r) &= -\frac{1}{c} \varepsilon^{ijk} \mathcal{M}_{jk} \int \frac{\delta^3(r')}{|r - r'|^3} d^3r' \\ &\quad - \frac{3}{c} \varepsilon^{ijk} \mathcal{M}_{lk} \int \frac{(x_j - x'_j)(x_l - x'_l)}{|r - r'|^5} \delta^3(r') d^3r', \\ &= \frac{1}{cr^5} \varepsilon^{ijk} (3x_j x_l - r^2 \delta_{jl}) \mathcal{M}_{lk}, \end{aligned} \quad (10)$$

which has the form of the vector potential due to a magnetic quadrupole moment [3]. The contribution from j_p to the vector potential is

$$A_p^i(r) = \frac{1}{6cr^5} [3(\mathbf{r} \cdot \mathbf{v}) x_k - r^2 v_j] \mathbb{Q}^{ik}. \quad (11)$$

The magnetic field is calculated by

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}.$$

In this way, from (10) we have

$$\begin{aligned} \mathcal{B}_m^i(r) &= \varepsilon^{ijk} \frac{\partial}{\partial x^j} A_{mk}, \\ &= -\frac{1}{cr^7} \varepsilon^{ijk} \varepsilon_{pqk} [r^2 (3\delta_j^p x^l + 3\delta_j^l x^p - 2\delta^{lp} x_j) \\ &\quad - 5x_j (3x^p x^l - r^2 \delta^{lp})] \mathcal{M}^{lq}. \end{aligned}$$

We use the result

$$\varepsilon^{ijk} \varepsilon_{klm} = \delta_l^i \delta_m^j - \delta_m^i \delta_l^j,$$

where δ_l^i is the Kronecker delta symbol, to obtain

$$\begin{aligned} \mathcal{B}_m^i(r) &= \frac{3}{cr^7} [5(x_l \mathcal{M}^{lj} x_j) x^i \\ &\quad - r^2 (\mathcal{M}^{ij} x_j + \mathcal{M}^{ji} x_j + \mathcal{M}_l^l x^i)], \end{aligned} \quad (12)$$

which has the form of the magnetic field due to a magnetic quadrupole moment [3].

From (11) we obtain the corresponding magnetic field contribution

$$\begin{aligned} \mathcal{B}_p^i(r) &= \frac{1}{cr^7} [r^2 (-\mathcal{M}^{im} x_m + \frac{1}{2} \varepsilon^{ijk} x_j \mathbb{Q}_{kl} v^l) \\ &\quad - \frac{5}{6} (\varepsilon^{ijk} x_j \mathbb{Q}_{kl} x^l) (\mathbf{r} \cdot \mathbf{v})]. \end{aligned} \quad (13)$$

Summing (12) and (13) gives the total magnetic field, which we have separated in these terms in order to reproduce known results in the multipole expansion of the vector potential and the magnetic field. We have defined the magnetic quadrupole moment [7] following the same definition for the magnetic dipole moment due to an electric dipole moment in slow motion as in [3]. This leads to the expression (12) for the magnetic field from a magnetic quadrupole moment.

VI. CONCLUSIONS

The conclusions must notice the new and remarkable contributions of the paper. Also the suggestions and shortcomings of the manuscript must be pointed out.

ACKNOWLEDGEMENTS

Author wishes to acknowledge partial support from COFAA-IPN and SEPI-IPN.

REFERENCES

- [1] Heras, J. A., *Radiation by moving quadrupoles*, (Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México, 2000).
- [2] Raab, R. E. and de Lange, O. L., *Multipole theory in Electromagnetism*, Chap. 1 (Clarendon Press-Oxford, UK, 2005).
- [3] Hnizdo, V., *Magnetic dipole moment of a moving electric dipole*, Am. J. Phys. **80**, 645-647 (2012).

Visualización de la propagación electrónica en guías de onda cuánticas



P.A Pantaleón¹, Roberto Romo¹, Alberto Hernández Maldonado²

¹Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Baja California, Carretera Tijuana-Ensenada Km.106, CP 22800, Ensenada, B.C.

²Centro de Ingeniería y Tecnología, Unidad Valle de las Palmas, Universidad Autónoma de Baja California, Tijuana, B.C

E-mail: ppantaleon@uabc.edu.mx

(Recibido el 13 de Noviembre de 2013; aceptado el 20 de Febrero de 2014)

Resumen

La visualización de la propagación espacial y temporal de ondas cuánticas constituye un instrumento muy valioso para entender las principales características de la dinámica del transporte electrónico en estos sistemas, el cual es un fenómeno de gran interés tanto en investigación básica como aplicada de los sistemas de baja dimensionalidad. En este trabajo, analizamos el comportamiento dinámico del transporte electrónico en guías de onda cuánticas, mediante la solución analítica de la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo, con una condición inicial de obturador de Moshinsky cuasi-unidimensional. Mostramos mapas de densidad de probabilidad bidimensionales para exhibir las principales características de la propagación electrónica en guías de onda cuánticas. Desde el punto de vista pedagógico, el presente análisis provee una valiosa herramienta para visualizar el comportamiento de las soluciones de la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo, el cual es un tópico muy importante para estudiantes de física tanto intermedios como avanzados.

Palabras clave: Guías de onda cuánticas, efectos transitorios, funciones de Moshinsky.

Abstract

The visualization of propagation of quantum waves in space and time constitutes a valuable instrument to understand the main features of the dynamics of quantum electron transport, a phenomenon of great interest in basic and applied research in the context of the physics of low-dimensional systems. In this work, we analyze the dynamical behavior of the electronic transport in quantum waveguides based on the analytical solution of the time-dependent Schrödinger equation where we use a quasi-one-dimensional quantum shutter. We show two-dimensional probability density maps that exhibit the main features of the quantum wave propagation along the quantum waveguides. From the pedagogical point of view, the present analysis provides a valuable tool in visualizing the behavior of solutions of the time-dependent Schrödinger equation, which is an important topic of quantum mechanics for both intermediate and advanced physics students.

Keywords: Quantum waveguides, quantum transients, Moshinsky functions.

PACS: 05.60.Gg, 01.50.F, 03.67.Ac

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los aspectos más relevantes, inherentes a toda estructura nanométrica, es el fenómeno de la cuantización de los niveles energéticos de los electrones, el cual ocurre como resultado del confinamiento en alguna dirección espacial [1]. El confinamiento resulta un aspecto crucial en las propiedades físicas relevantes de los sistemas nanométricos, el cual puede ocurrir de diferentes formas. Por ejemplo, si el confinamiento ocurre en una sola dirección espacial, se tiene como resultado lo que en este contexto se conoce como un sistema bidimensional [2]; si el confinamiento ocurre en dos direcciones espaciales, se forma un sistema unidimensional, conocido también como alambre cuántico [3]; si el confinamiento tiene lugar en las tres direcciones espaciales, lo que resulta es una estructura

llamada cero-dimensional conocida como punto cuántico [1, 4].

Existe un régimen intermedio de confinamiento muy interesante, que podemos ubicarlo entre el caso unidimensional y el caso bidimensional. Las estructuras que se ubican en esta categoría suele llamárseles sistemas *cuasi-unidimensionales*. En esta clase de nanoestructuras la propagación electrónica ocurre en una sola dirección, es decir, las ondas electrónicas se ven constreñidas a moverse en dirección perpendicular al confinamiento, razón por la cual a estos sistemas suele llamárseles también con el popular nombre de *guías de onda cuánticas* [5, 6].

El confinamiento lateral que define a las guías de onda juega un papel crucial en las características del transporte longitudinal, ya que los niveles discretos de la energía que resultan de dicho confinamiento, *distribuyen* el transporte a

lo largo de *canales*, llamados *canales de propagación*, que también suele llamárseles *modos transversales* o *sub-bandas*.

La propagación de electrones en los sistemas cuasi-unidimensionales es análogo a la propagación de ondas electromagnéticas o guías de onda ópticas, esto se debe a la naturaleza ondulatoria del electrón, la cual se manifiesta plenamente en los fenómenos que ocurren en este tipo de nanoestructuras. El nombre de guías de onda cuánticas surge precisamente de la analogía con el caso óptico [7, 8].

Es por ello que, inspirados en los fenómenos que ocurren en las guías de onda debido a la cuantización transversal, surge nuestro interés por estudiar el problema de un sistema cuasi-unidimensional, desde un punto de vista dinámico. Para esto usamos una condición inicial de *obturador de Moshinsky* [9], la cual consiste en una onda plana confinada a la región $x < 0$, mediante un obturador (obturador de Moshinsky) colocado en $x = 0$, el cual, al ser removido súbitamente, libera la onda permitiendo que se propague libremente a la región $x > 0$ a lo largo de la guía.

El problema del obturador de Moshinsky ha sido ampliamente estudiado en sistemas unidimensionales, se ha analizado el caso libre [9], se han introducido potenciales arbitrarios [10] y se han hecho estudios detallados de algunos fenómenos como el retraso temporal [11, 12], entre otros. La extensión a sistemas cuasi-unidimensionales involucra efectos adicionales, debido al potencial de confinamiento lateral, el cual induce una cuantización de la energía en la dirección transversal.

El objetivo de este trabajo es mostrar el formalismo básico, acompañado de una visualización gráfica de la propagación electrónica en guías de onda con un potencial de confinamiento de paredes rígidas y una condición inicial de obturador de Moshinsky. Mostramos mapas de densidad de probabilidad para exhibir los efectos de propagación, justo después de la apertura del obturador. Finalmente, mostramos la importancia del número de modos transversales abiertos en el transporte, los cuales influyen en la velocidad de la onda dependiendo del modo transversal en el que se encuentre la onda justo al abrir el obturador.

II. FORMALISMO

A. Ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo para una guía de onda cuántica

Consideremos una onda propagándose en la dirección x en una guía de onda como la mostrada en la Fig. 1, donde la onda está confinada en la dirección transversal y por un potencial de confinamiento $V_c(y)$ simétrico. La ecuación de Schrödinger bidimensional dependiente del tiempo es de la forma,

$$-\frac{\hbar^2}{2m_{ef}} \nabla^2 \Psi_n + V_c \Psi_n = i\hbar \frac{\partial \Psi_n}{\partial t}, \quad (1)$$

donde $m_{ef} = 0.067 m_e$ es la masa efectiva y m_e es la masa del electrón, donde $\Psi_n(x, y, t)$ es la función que representa a la onda dentro de la guía. El subíndice n indica que la onda incide solo en un modo transversal. Para poder resolver la Ec. (1) utilizamos el método de separación de variables y se propone una solución de la forma

$$\Psi_n(x, y, t) = \varphi_n(x, t) \chi_n(y). \quad (2)$$

Al sustituir la Ec. (2) en la Ec. (1) y reordenando términos se obtiene,

$$-\frac{\hbar^2}{2m_{ef}} \frac{\partial^2 \varphi_n(x, t)}{\partial x^2} + \varepsilon_n \varphi_n(x, t) = i\hbar \frac{\partial \varphi_n(x, t)}{\partial t}. \quad (3)$$

La cual es la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo para la parte longitudinal, mientras que para la parte transversal se tiene

$$-\frac{\hbar^2}{2m_{ef}} \frac{\partial^2 \chi_n(y)}{\partial y^2} + V_c(y) \chi_n(y) = \varepsilon_n \chi_n(y), \quad (4)$$

cuyas soluciones dependen del potencial de confinamiento $V_c(y)$.

Las ecuaciones (3) y (4) están acopladas mediante el término ε_n , que proviene de la separación de variables y representa la energía de cada modo transversal n .

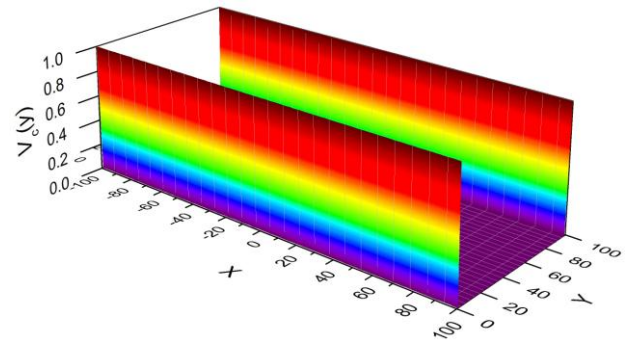


FIGURA 1. Perfil de potencial de una guía de onda. El potencial de confinamiento es de paredes rígidas, la propagación ocurre en la dirección positiva de X .

La energía total del electrón se reparte entre la energía transversal (ε_n) de la sub-banda n y la energía asociada al movimiento longitudinal, es decir,

$$E = \varepsilon_n + \frac{k_n^2 \hbar^2}{2m_{ef}}. \quad (5)$$

donde el número de onda es,

$$k_n = \sqrt{\frac{2m_{ef}}{\hbar^2} (E - \varepsilon_n)}. \quad (6)$$

Los modos del caso electromagnético son comparables con los modos electrónicos o sub-bandas transversales del caso cuántico, que se originan de los estados del confinamiento transversal, los cuales gobiernan el transporte longitudinal [13].

El número de onda en la Ec. (5) describe una onda propagante sólo si k_n es un número real, y su correspondiente sub-banda n se nombra como modo o canal propagante. Por otro lado, cuando el número de onda es imaginario, la correspondiente sub-banda se dice que es un modo o canal *evanescente*.

De acuerdo a lo anterior, para una energía dada E , sólo un número finito de modos son propagantes (aquellos donde

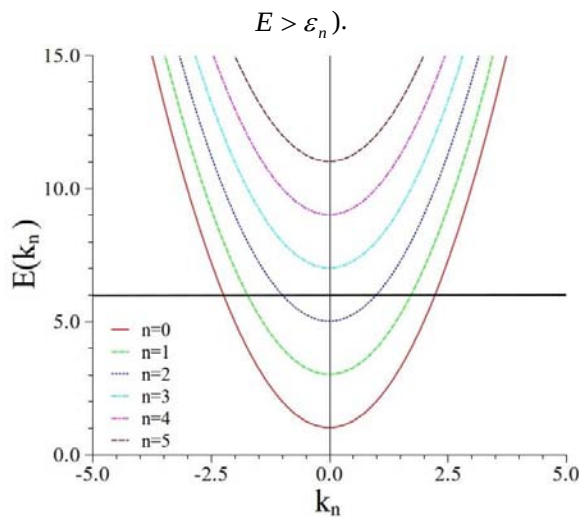


FIGURA 2. Curvas de energía contra número de onda para los niveles de energía transversales en una guía de onda. Para una energía de incidencia dada (línea horizontal), existe un número finito de canales propagantes y una infinidad de canales evanescentes.

En la Fig. 2 se muestra la gráfica de la Ec. (6) para distintos valores de n , donde la línea horizontal continua representa la energía E de incidencia, las energías transversales ε_n debajo de esta energía de incidencia son los modos propagantes, y los que están sobre ella son los modos evanescentes. Lo anterior significa que una onda puede propagarse en un modo n sólo si su energía es mayor a la correspondiente energía ε_n de ese modo.

Por ejemplo, en el caso de las guías de onda, la mínima energía requerida para que una onda se propague es la del primer modo transversal (llamado canal de estado base transversal), por lo cual, si una onda incide con una energía menor a la del tal estado, esta no se transmitirá. Si incrementamos la energía de incidencia de la onda, se incrementa el número de modos propagantes, es decir, habrá

Visualización de la propagación electrónica en guías de onda cuánticas
modos evanescentes que cambian su identidad, pasando a ser propagantes conforme la energía E va rebasando las energías de los modos transversales ε_n .

A. Obturador de Moshinsky cuasi-unidimensional

Un obturador de Moshinsky es una condición matemática que simula un dispositivo que constriñe a una onda plana a una región $x < 0$, dicha onda está en un modo transversal propagante n a una energía E . En $t=0$, se propone una condición inicial de la forma,

$$\Psi_n(x, y, t=0) = \begin{cases} e^{ik_n x} \chi_n(y), & x \leq 0 \\ 0, & x > 0 \end{cases}, \quad (7)$$

A diferencia de la condición inicial introducida originalmente por Moshinsky [9], aquí hemos considerado que la onda está sometida a un potencial de confinamiento lateral, por lo cual la onda inicial está modulada por la función $\chi_n(y)$ asociada al modo transversal n .

Si aplicamos la condición inicial (7) a la Ec. (3), usando el método de la transformada de Laplace como en la ref. [11, 14], obtenemos la solución para la propagación en la dirección longitudinal, la cual es de la forma

$$\varphi_n(x, t) = e^{-\frac{ik_n t}{\hbar}} M(x, k_n, t), \quad (8)$$

donde $M(x, k_n, t)$ es la función de Moshinsky [9].

Finalmente, podemos escribir la solución general a cualquier tiempo t , para una guía de onda con un obturador en $x = 0$ y un confinamiento de paredes rígidas como,

$$\Psi_n(x, y, t) = e^{-\frac{ik_n t}{\hbar}} M(x, k_n, t) \chi_n(y), \quad (9)$$

donde las funciones del confinamiento transversal son

$$\chi_n(y) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi}{L} y\right), \quad (10)$$

con energías

$$\varepsilon_n = \frac{\hbar^2}{2m_e} \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2, \quad (11).$$

donde L es el ancho de la guía de onda.

III. EVOLUCION TEMPORAL DE LA DENSIDAD DE PROBABILIDAD

La evolución temporal de la densidad de probabilidad depende de la energía de incidencia E y el modo de

propagación transversal n . Dicha energía nos indica cuantos modos de propagación están abiertos y el modo de propagación determina el perfil de la onda que se propaga.

Por ejemplo, para una guía de onda cuyo ancho es $L=100$ Å, una energía de incidencia $E = 0.25$ eV, de acuerdo a la Ec. (6) hay dos canales de propagación abiertos, los correspondientes a $\varepsilon_1 = 0.056$ eV y $\varepsilon_2 = 0.224$ eV. Basta con elegir uno de ellos para la propagación, justo como se observa en la Fig. 3. Si la propagación ocurre en $n=1$, como se muestra en la Fig. 3 (a), tenemos un solo frente de onda y la anteceden un conjunto de oscilaciones; en este caso, ha transcurrido un tiempo $t=0.11$ ps desde la apertura del obturador. La barra de colores lateral nos indica el valor de la densidad de probabilidad en función de la posición a un tiempo fijo.

En el caso de la Fig. 3 (b), la propagación ocurre en el modo $n=2$ y ha transcurrido un tiempo $t=0.60$ ps después de la apertura del obturador. A diferencia del caso unidimensional, aquí se observa cómo hay dos frentes de onda, esto se debe a las funciones del confinamiento [Ec. (10)], que modulan el perfil transversal de la onda en la guía.

Un interesante comportamiento es el conjunto de oscilaciones que anteceden el frente de onda, estas oscilaciones provienen de la solución a la parte longitudinal [Ec. (8)] que solo considera la función de Moshinsky y una fase que se anula al calcular el modulo cuadrado. Dichas oscilaciones se observan en el caso unidimensional [9], pero en los sistemas cuasi-unidimensionales son moduladas en la dirección transversal por las funciones del confinamiento. A diferencia del caso unidimensional, en los sistemas cuasi-unidimensionales aparece un conjunto de frentes de onda, dependiendo del modo de propagación, aquí solo se muestra para $n=1$ y $n=2$, pero la extensión a canales superiores mostrará un número de frentes igual al correspondiente modo de propagación.

En la parte inferior de cada gráfica se han incluido mapas de contorno para visualizar la propagación en el plano, este tipo de gráficas son la que usaremos a lo largo de este trabajo.

IV. PROPAGACION EN DIFERENTES CANALES

Dependiendo del modo transversal incidente, habrá cierto número de frentes de onda propagándose a lo largo de la guía. Para visualizar esto, en la Fig. 4 se muestra la propagación a distintos tiempos en el mismo modo transversal $n=1$, a una energía $E = 0.25$ eV. Los tiempos corresponden a $t=0.065$, 0.125 y 0.200 ps para las Figs. 4 (a), (b) y (c), respectivamente. Se observa claramente que un único frente de onda se propaga a lo largo de la guía. Si consideramos tiempos muy grandes, se tiende al caso estacionario, lo cual se muestra en la Fig. 4 (d), en la que

han transcurrido $t=50$ ps después de la apertura del obturador.

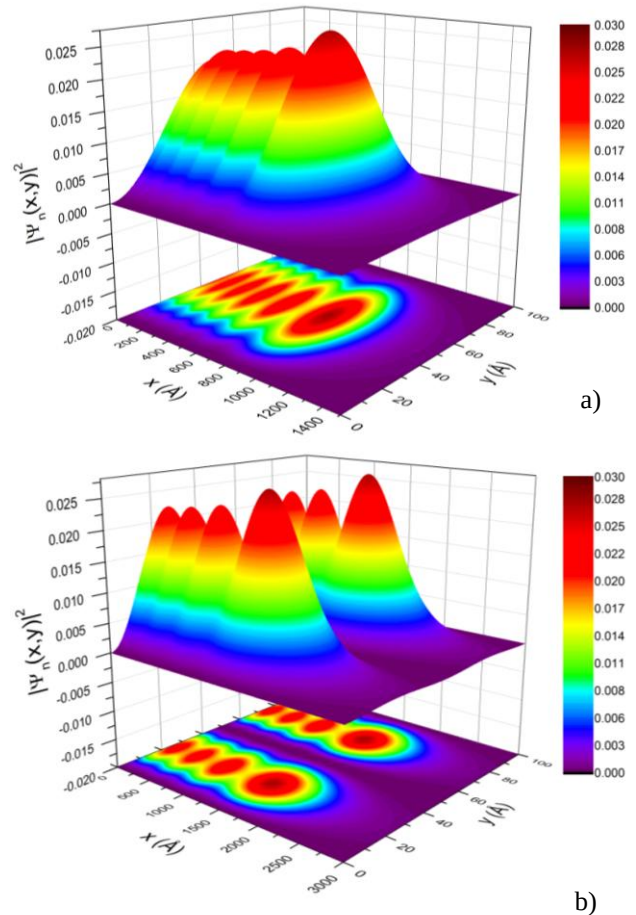


FIGURA 3. Propagación de ondas cuánticas a lo largo del eje x a una energía de incidencia $E = 0.25$ eV, en los canales $n=1$ y $n=2$. En (a) se muestra la propagación de la onda en el primer canal, a un tiempo $t = 0.11$ ps, en (b) la onda viaja en el segundo canal a un tiempo $t = 0.60$ ps.

En la Fig. 5 se muestra la propagación en el segundo modo transversal, en la que se observan dos frentes de onda, la energía de incidencia es la misma que en la Fig. 4, se puede observar como ambos frentes de onda se propagan simétricamente a lo largo de la guía. Los tiempos corresponden a $t=0.150$, 0.350 y 0.600 ps para las Figuras. 5 (a), (b) y (c), respectivamente. Al considerar tiempos grandes ($t=50$ ps) hay una tendencia al caso estacionario, Fig. 5 (d).

La propagación en un modo transversal n nos dará n frentes de onda. Ésta dependencia del número de frentes de onda con el modo incidente, es exclusivo de los sistemas cuasi-unidimensionales.

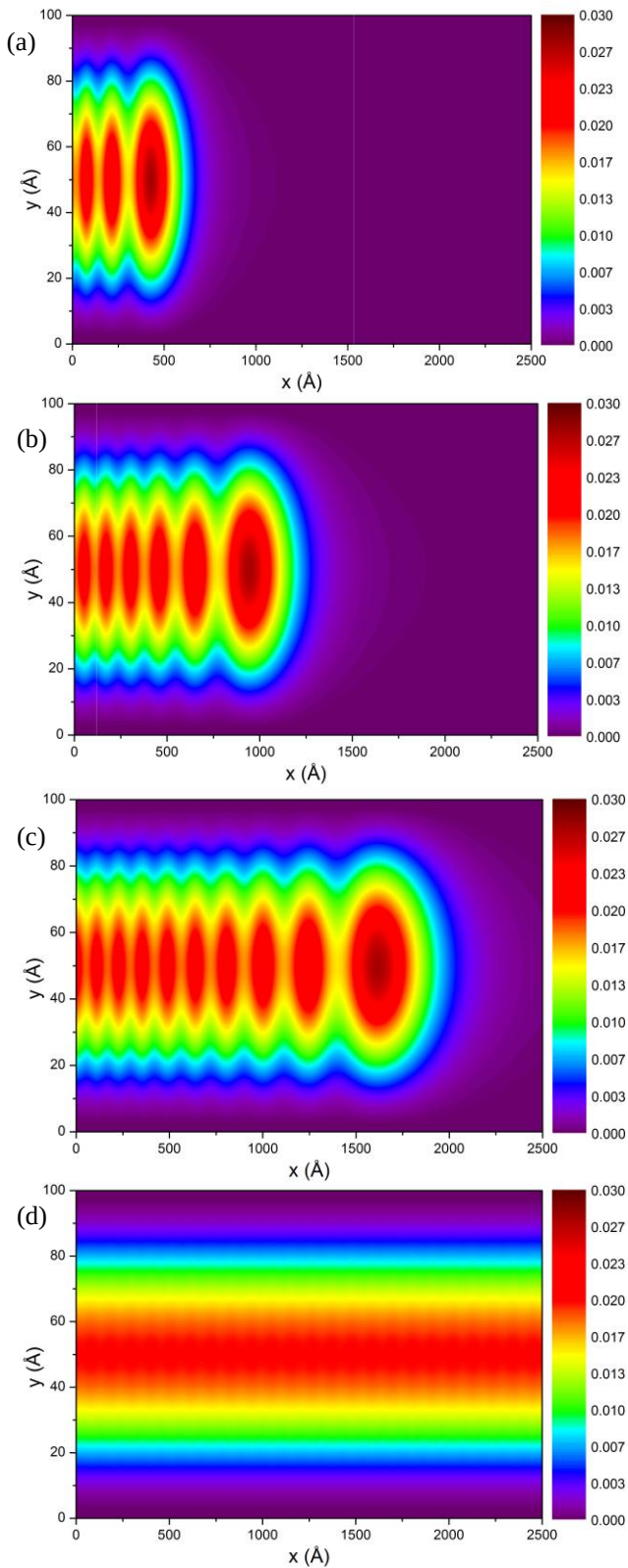


FIGURA 4. Evolución de una onda cuántica a lo largo del eje x , a energía de incidencia $E = 0.25$ eV. La propagación es en el canal $n = 1$, para diferentes tiempos. Se observa un frente de onda propagándose hacia la derecha. Los parámetros se muestran en el texto.

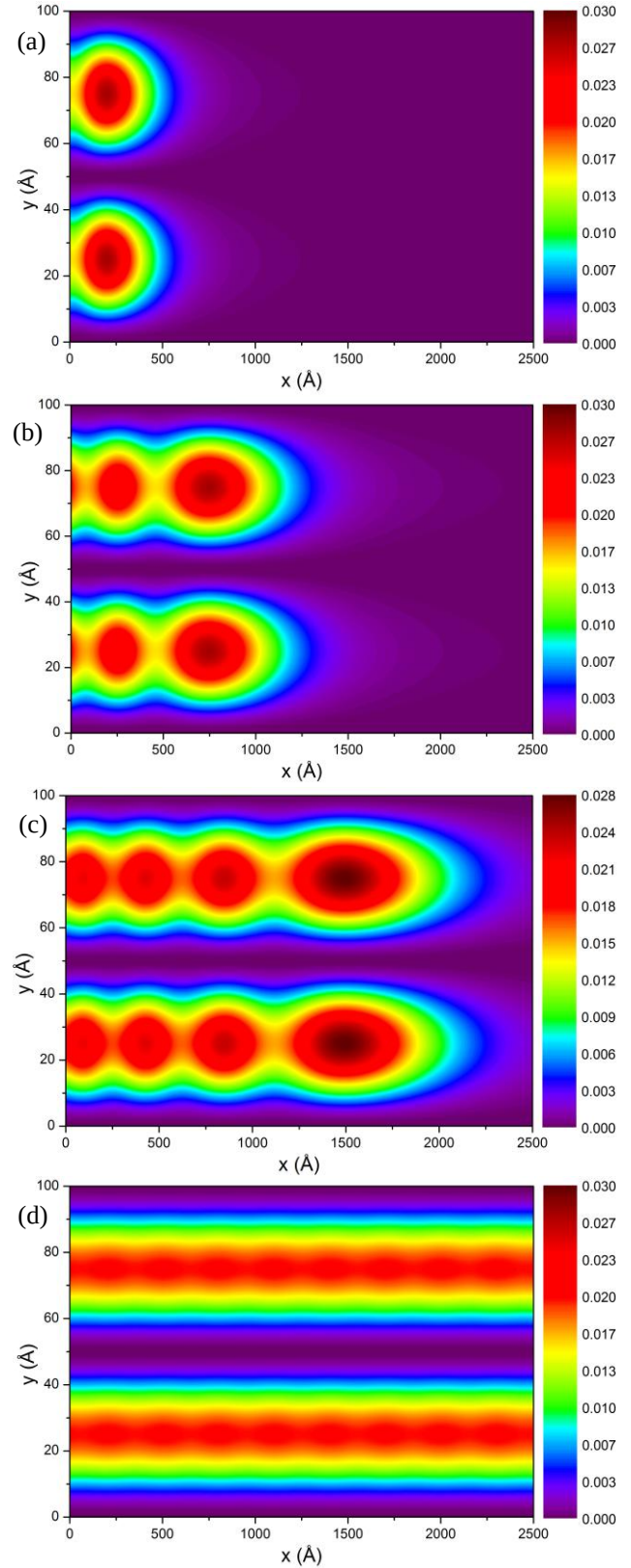


FIGURA 5. Evolución de una onda cuántica a lo largo del eje x , a energía de incidencia $E = 0.25$ eV. Se observan dos frentes de onda debido que la propagación es en el segundo modo transversal. Los parámetros se muestran en el texto.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo presentamos una solución analítica de la ecuación de Schrödinger bidimensional dependiente del tiempo, con condición inicial de obturador de Moshinsky cuasi-unidimensional, para una onda propagándose a lo largo de una guía de ondas. Se muestran gráficas de la densidad de probabilidad como función de la posición x para diferentes tiempos fijos t , después de abrir el obturador. Se observan diferentes frentes de onda, dependiendo del modo de propagación, es decir, si la propagación ocurre en el primer canal ($n=1$), se observa un solo frente de ondas, al cual le anteceden un conjunto de oscilaciones; si ocurre en el segundo canal ($n=2$), aparecen dos frentes de onda y así sucesivamente.

Para que haya propagación, es necesario que la energía de incidencia E , sea mayor que el estado base ($n=1$). Parte de la energía de incidencia E se emplea en alcanzar el estado n , mientras que la energía restante es energía de propagación. El número de canales abiertos o disponibles para la propagación, son aquellos en los que la energía de incidencia E es mayor que la energía correspondiente ε_n de ese modo.

Estos resultados, además de ser novedosos, ayudan a visualizar soluciones de la ecuación de Schrödinger dependiente del tiempo, en un sistema cuasi-unidimensional simple las cuales son de gran apoyo didáctico en la enseñanza de la mecánica cuántica a estudiantes universitarios.

AGRADECIMIENTOS

P. A. Pantaleón agradece al M.C Ramón Carrillo de la UNAM por sus útiles discusiones y al CITEC UABC por su hospitalidad. A. Hernández agradece a la UABC y al CITEC por su apoyo para el presente trabajo.

REFERENCIAS

- [1] Waser, R., *Nanoelectronics and information technology: Advanced Electronic Materials and Novel Devices*, (WILEY-VCH, USA, 2005).
- [2] Davies, J., *The physics of Low-Dimensional semiconductors*, (Cambridge University Press, USA, 1998).
- [3] Ferry, D. K. and Goodnick, S. M., *Transport in Nanostructures*, (Cambridge University Press, USA, 1977).
- [4] Malyshev, A. V., Orellana, P. A. and Dominguez-Adame, F., *Quantum electron splitter based on two quantum dots attached to leads*, Phys. Rev. **B 74**, 033308 (2006).
- [5] Sols, F., Macucci, M., Ravaioli, U. and Hess, K., *On the possibility of transistor action based on quantum interference phenomena*, Appl. Phys. Lett. **54**, 350, (1989).
- [6] Weisshaar, A., Lary, J., Goodnick, S. M. and Tripathi, V. K., *Analysis and modeling of quantum waveguide structure*, J. Appl. Phys. **70**, 355 (1991).
- [7] Kuhn, E., *A mode matching method for solving problems in waveguide and resonator circuits*, Archiv fur elektronik und ubertragungstechnik **27**, 51 516, (1973).
- [8] Hu, H., Sprung, D., Martorell, J. and Klarsfeld, S., *Quantum wire with periodic serial structure*, Phys. Rev. **B**, **44**, 6351-6360 (1991).
- [9] Moshinsky, M., *Diffraction in time*, Phys. Rev. **88**, 625–631 (1952).
- [10] Garcia-Calderon, G. y Rubio, A., *Transient effects and delay time in the dynamics of resonant tunneling*, Phys. Rev **A**, **55**, 5 (1997).
- [11] Hernandez, A., *Delay time for a movable quantum shutter*, Phys. Rev **A 81**, 054101 (2010).
- [12] Garcia-Calderon, G. y Hernández-Maldonado, A., *Delay time as a quantum transient interference effect*, Phys. Rev. **A 86**, 062118 (2012).
- [13] Pantaleón, P. A., *Dispersión por potenciales arbitrarios en guías de onda cuánticas*, Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Baja California, (2010).
- [14] Hernández, A., Ph.D. thesis, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, México, (2004), pp. 47–59.

Efectos físicos del envoltente sobre el colapso gravitacional de un núcleo de gas



Guillermo Arreaga-García¹, Silvio Oreste-Topa²,
Brenda Pérez-Rendón¹, Lorenzo Olguín-Ruiz¹

¹Departamento de Investigación en Física, Universidad de Sonora,
Apdo. Postal 14, 740, C.P. 83,000, Hermosillo, Sonora, México.

²Escuela de Educación Secundaria Agraria N° 1, Av. Ameghino 1,
090, C. P. 8,160, Tornquist, Buenos Aires, Argentina.

E-mail: garreaga@cifus.uson.mx

(Recibido el 19 de Septiembre de 2013, aceptado el 28 de Febrero de 2014)

Resumen

Las estrellas aparecen en nubes de gas como resultado final del proceso de colapso gravitacional. En este trabajo de divulgación estudiamos el colapso gravitacional de una nube de gas con geometría esférica, tal que la nube está compuesta por un núcleo más denso y un envoltente que lo rodea. Simulamos numéricamente el colapso de cuatro modelos de nube de acuerdo con varias extensiones radiales del envoltente. Definimos las razones entre las energías térmica y rotacional de la nube con respecto su energía potencial gravitacional, denotadas como α y β , respectivamente. Graficamos la evolución temporal de estos parámetros dinámicos α y β para probar que caracterizan muy bien la evolución física del modelo de nube y que los eventos importantes, como la ocurrencia de fragmentación en la nube, dejan una huella en estos parámetros dinámicos.

Palabras clave: Envoltente, colapso, fragmentación.

Abstract

Stars appear in gas cloud as the final result of the gravitational collapse process. In this divulgation paper we study the gravitational collapse of a spherical cloud model, such that it is composed of a denser core plus a surrounding gas envelope. We numerically simulate the collapse of four cloud models according with several radial envelope gas extensions. We define the ratios of the thermal and rotational energies with respect to the potential gravitational energy, denoted as α and β , respectively. We plot the time evolution of these dynamic parameters α and β to probe that they characterize very well the physical evolution of the cloud model and that important events, as the fragmentation occurrence in the cloud, leave an imprint on these dynamical parameters.

Keywords: Envelope, collapse, fragmentation.

PACS: 01.40.E, 02.70.-c, 04.25.dk

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Por observaciones astronómicas se sabe que las estrellas nacen en enormes nubes de hidrógeno molecular. El proceso de formación de estrellas poco masivas se inicia con la tendencia del gas a concentrarse cada vez más en el centro de la nube, proceso que se conoce en física como “colapso gravitacional” [1, 2]. Otro detalle muy interesante es que los astrónomos han observado que las estrellas recién nacidas casi siempre están agrupadas en pares y en menor proporción en grupos de más de dos miembros de estrellas. Entonces, en el seno de estas nubes gigantes puede haber miles de estrellas jóvenes apareadas en pequeños grupos binarios y múltiples [3].

En este trabajo nos interesa describir algunas características dinámicas del proceso de colapso gravitacional, haciendo énfasis en la ocurrencia de

fragmentación de la nube, tal que el resultado sea la formación de un sistema binario de proto-estrellas.

Definimos una proto-estrella como un estado intermedio en el proceso de colapso gravitacional de la nube; entonces las proto-estrellas son una acumulación de gas muy densa y caliente, que emite radiación infrarroja por el efecto de su alta temperatura, pero que aun no genera luz propia mediante las reacciones termonucleares típicas de una estrella. Por esta razón, las proto-estrellas sólo se pueden ver usando telescopios que captan luz en el infrarrojo. Si miramos con telescopio óptico hacia una nube de gas en donde hubiese proto-estrellas en formación, solo veríamos una mancha negra en el cielo.

Se sabe que la característica de agrupación en pares observado en la formación de estrellas también se observa en proto-estrellas. Así, la formación de proto-estrellas es un fenómeno físico complejo, tal que un estudio realizado de la manera tradicional implicaría prácticamente la

imposibilidad de visualizar los detalles del proceso. Es aquí en donde las simulaciones numéricas se vuelven una herramienta muy útil, por no decir indispensable, para estudiar el proceso de colapso gravitacional de la nube y la formación de proto-estrellas en detalle [4, 5].

Dado que estas nubes están a temperaturas muy bajas, se pueden representar como cúmulos de gas. Las ecuaciones que gobiernan la evolución de este gas auto-gravitante son entonces las ecuaciones hidrodinámicas de Navier-Stokes. Hemos supuesto adicionalmente que la nube está rotación ya que en general las mismas están alojadas en los brazos de galaxias espirales.

La técnica numérica que usamos para integrar estas ecuaciones y simular la evolución de estos modelos de nube es conocida como Smooth Particle Hydrodynamics [6]. Está basada en seguir la evolución de miles de partículas para representar la evolución del gas. De hecho, en cada modelo usamos aquí 10 millones de partículas.

II. LOS MODELOS

Conviene empezar la discusión con un diagrama de cuerpo libre de la nube para mostrar las fuerzas relevantes en el proceso de colapso gravitacional, ver Fig.1. En este proceso compiten varias fuerzas, por un lado, la prominente fuerza de la gravedad debido al peso de la nube, por la cual toda la masa de la nube tiende a concentrarse en el centro geométrico. Por otro lado, la temperatura del gas hace que la presión del mismo se oponga a la concentración gravitacional de la nube; del mismo modo, la rotación de la nube hace que la fuerza centrífuga ejerza una fuerza sobre el gas que tiende a oponerse también a la fuerza de gravedad.

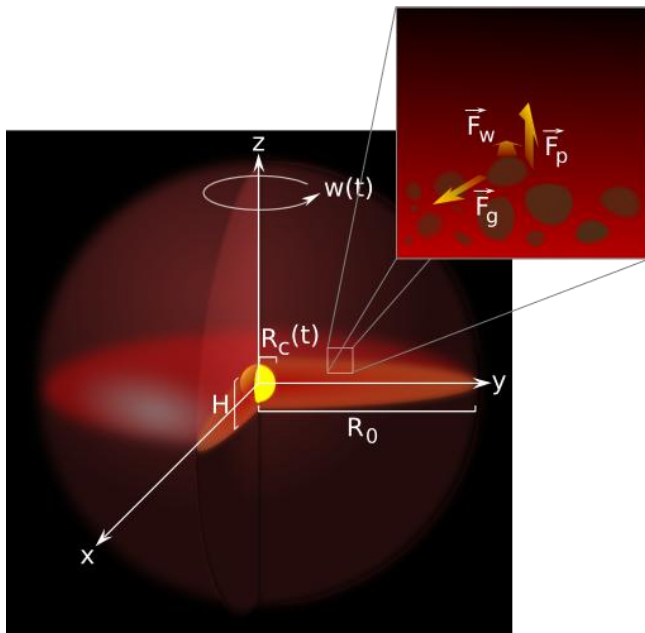


FIGURA 1. Representación esquemática de una nube centralmente condensada y las fuerzas relevantes que actúan.

Nuestro objetivo aquí es estudiar los efectos de la extensión del envoltente sobre el núcleo, cuando toda la nube está en colapso gravitacional. Por lo cual consideramos cuatro modelos de nube etiquetados como A0, A1, A2 y A3, cada uno con diferente extensión radial del envoltente con respecto al radio del núcleo, es decir, $R_0/R_c = 0.5, 1.5, 2.5, 3.7$ respectivamente, en donde R_0 es el radio total de la nube y R_c el radio del núcleo. Ver Fig. 2.

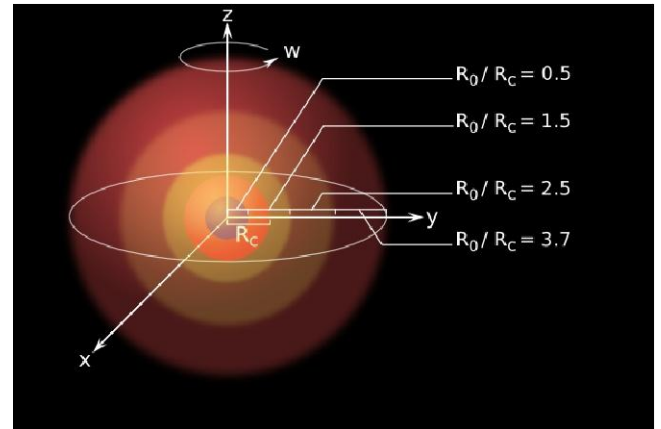


FIGURA 2. Representación esquemática de los modelos indicando la extensión radial del envoltente.

El perfil radial de la densidad para estos 4 modelos se muestra en la Fig. 3. La parte de la curva que se mantiene constante, correspondería al núcleo de la nube, mientras que la parte de la curva que decae correspondería a cada uno de los envoltentes de acuerdo al modelo.

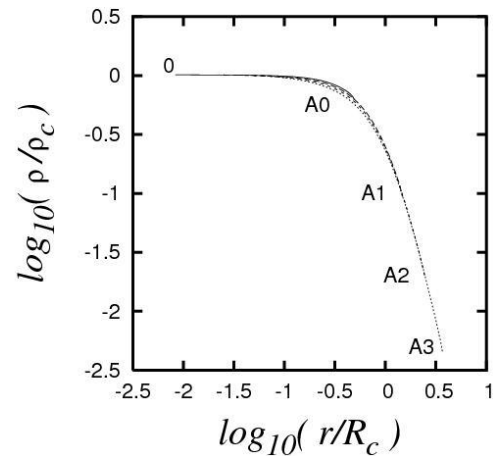


FIGURA 3. Perfil radial de la densidad de la nube. Las letras de cada modelo marcan el final de la curva.

Ahora bien, puesto que la nube se encuentra en la rotación de cuerpo rígido alrededor del eje z , la velocidad inicial de la partícula i está dada por $\vec{v}_i = \vec{\Omega}_0 \times \vec{r}_i = (-\Omega_0 y_i, \Omega_0 x_i, 0)$, en donde Ω_0 es la magnitud de la velocidad angular, que tiene un valor diferente dependiendo del modelo. Otro parámetro

importante en estos modelos es la velocidad del sonido c_0 . Los valores de estos parámetros Ω_0 y c_0 determinan el valor inicial de las razones de energía, las cuales definimos a continuación.

III. LAS ENERGÍAS

La energía potencial gravitacional de una nube esférica de masa M y radio R , está dada aproximadamente por

$$E_{grav} \approx -\frac{3}{5} \frac{G M^2}{R}, \quad (1)$$

en donde G es la constante de la gravitación de Newton. Para un gas ideal, el cuadrado de la velocidad del sonido se puede aproximar por la razón entre presión y densidad, esto es,

$$c_0^2 = \frac{P}{\rho}. \quad (2)$$

Además, se puede poner en relación con la temperatura media de la nube mediante

$$c_0^2 = \frac{k T}{\mu}, \quad (3)$$

en donde k es la constante de Boltzmann y μ es el peso molecular del hidrógeno. Así, la energía térmica promedio se puede aproximar mediante

$$E_{term} \approx \frac{3}{2} N k T = \frac{3}{2} M c_0^2. \quad (4)$$

A su vez, la energía de rotación de la nube se puede aproximar mediante

$$E_{rot} = \frac{1}{2} I \Omega_0^2 \approx \frac{1}{5} M R^2 \Omega_0^2, \quad (5)$$

en donde I es el momento de inercia de la nube.

Las variables dinámicas α y β , con las que esperamos caracterizar la evolución de la nube, se definen entonces como las razones

$$\alpha \equiv \frac{E_{term}}{|E_{grav}|} \text{ y } \beta \equiv \frac{E_{rot}}{|E_{grav}|}. \quad (6)$$

Enfatizamos que todos los modelos de nube tienen inicialmente los mismos valores de las razones α_0 y β_0 . De hecho, en la Tabla I se muestran la velocidad del sonido inicial de c_0 y la velocidad angular inicial Ω_0 tales que cada modelo de nube cumple con los siguientes valores $\alpha_0 = 0.26$ y $\beta_0 = 0.16$. También se muestra el valor de la masa total contenida en la nube y su densidad media, ver asimismo las Figs. 3 y 4.

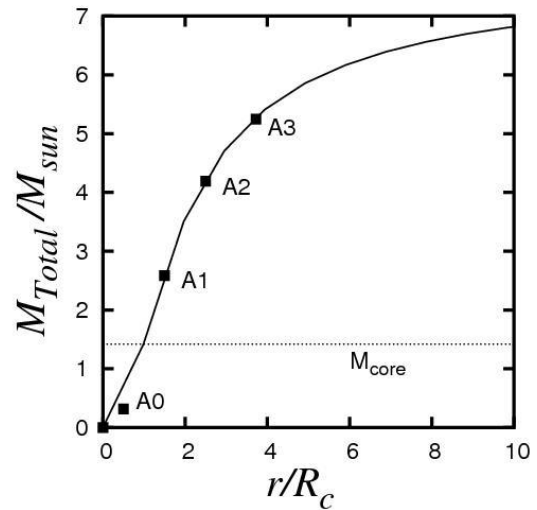


FIGURA 4. Gráfica de la masa acumulada en cada nube. Las letras corresponden a cada modelo.

Enfatizamos que estos valores iniciales α_0 y β_0 se eligieron por dos razones: i) para permitir una comparación de los resultados de los modelos otros autores, ver por ejemplo, [7, 8] y ii) para asegurarnos que la nube entera tiende verdaderamente al colapso gravitacional. Este segundo punto requiere una explicación adicional.

TABLA I. Características de los Modelos.

Modelos	$\frac{R_0}{R_c}$	M_0 (gr)	ρ_0 (gr/cm ³)	Ω_0 ($\times 10^{-13}$ rad/seg)	c_0 (cm/seg)
A0	0.5	6.28×10^{32}	2.23×10^{-18}	5.80	10620.35
A1	1.5	5.14×10^{33}	6.95×10^{-19}	3.90	18751.51
A2	2.5	8.34×10^{33}	2.43×10^{-19}	2.95	19942.80
A3	3.7	1.04×10^{34}	9.22×10^{-20}	2.22	20344.14

Existe una relación muy interesante entre las variables dinámicas α y β , la cual mostramos a continuación. Una

medida de la energía cinética total de la nube es la suma de las energías térmica y rotacional. Como hemos dicho, estas

energías se oponen al colapso mientras que la energía potencial lo promueve. Si la nube estuviese en equilibrio termodinámico, entonces la energía potencial gravitacional debería compensar exactamente a la energía cinética total. De acuerdo con el teorema del virial, en este caso de equilibrio tendríamos que se cumple la siguiente relación entre las energías

$$E_{cinetica} = (E_{term} + E_{rot}) = -\frac{E_{pot}}{2}. \quad (7)$$

Ahora bien, si la energía cinética fuese dominante con respecto a la energía potencial, las partículas podrían escapar de la nube por efecto de su rapidez y porque la masa de la nube no sería suficientemente grande para retenerlas enlazadas gravitacionalmente al centro de la nube. Por otro lado, si la energía cinética fuese muy débil comparada con la energía potencial, entonces el colapso gravitacional hacia el centro de la nube sería tan contundente, que no daría tiempo a la nube ni siquiera de fragmentar.

Los enunciados del párrafo anterior se pueden poner en la notación de α y β , tal que para una nube en equilibrio tendríamos que se cumple la relación

$$\alpha + \beta = \frac{1}{2}, \quad (8)$$

y decimos que hay tendencia al colapso si $\alpha + \beta < 1/2$ y no hay tendencia al colapso si $\alpha + \beta > 1/2$. Nuestras condiciones iniciales α_0 y β_0

IV. RESULTADOS

A. La evolución temporal de los modelos

En esta sección vamos a describir la evolución dinámica que se observa en cada modelo, para la cual usamos gráficas de iso-densidad, ver Figs. 5. Estas figuras son mosaicos formados por 4 paneles cada uno; cada panel corresponde a un tiempo de evolución del modelo de nube, tal que el tiempo aumenta de izquierda a derecha y de arriba hacia abajo. Cada panel muestra –en una misma escala de colores para cada mosaico– la distribución de densidad de la nube tal como se ve desde el eje de rotación (vista superior). Por ejemplo, de acuerdo con la barra de escala de densidad (que aparece en la parte inferior de cada mosaico) el color amarillo indica regiones de la nube con densidades altas; los colores rojo y verde indican regiones con densidades intermedias y por último, el color azul indica regiones de baja densidad en la nube. Las escalas de longitud que aparecen es los ejes de cada gráfica están normalizadas con el radio inicial de la nube y la escala de densidad está normalizada con la densidad inicial de la nube.

Desde un punto de vista dinámico, podemos pensar que los bulbos en color amarillo fuerte que aparecen en la última

figura de cada mosaico, muy probablemente se comportarán de manera muy similar a como lo harían las proto-estrellas reales.

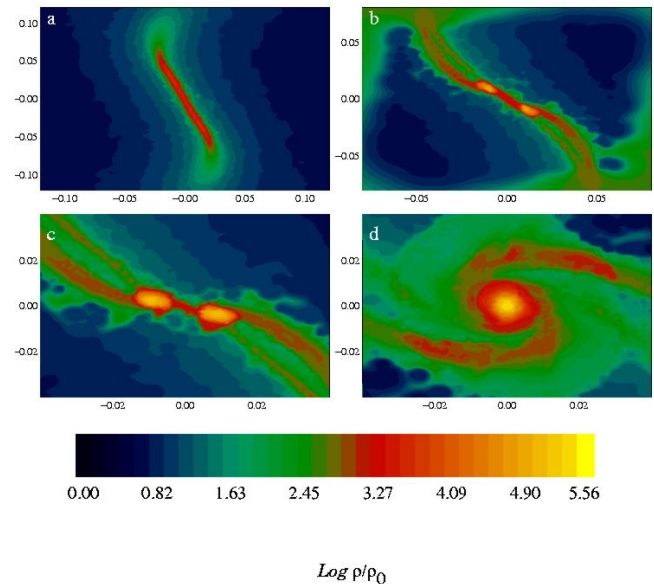


FIGURA 5a. Gráficas de iso-densidad para diferentes tiempos de evolución del modelo A0.

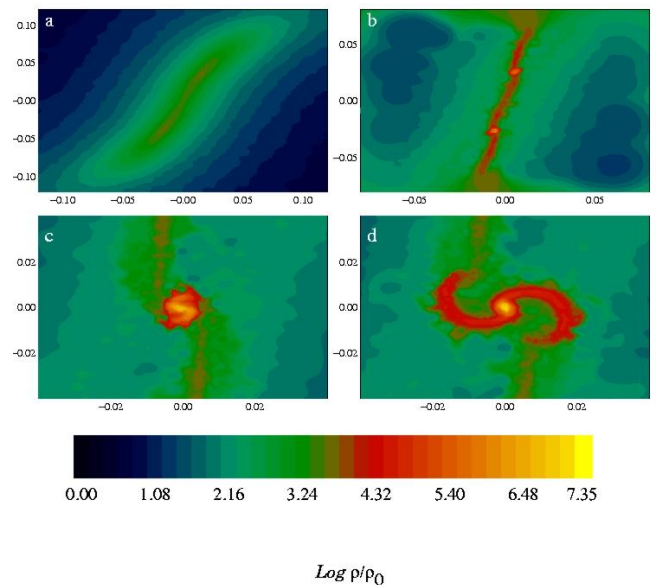


FIGURA 5b. Gráficas de iso-densidad para diferentes tiempos de evolución del modelo A1.

Inicialmente la nube es una esfera de gas que rota en torno a un eje. En la medida en que colapsa, se empieza a aplanar extendiéndose a lo largo del ecuador. Es como un disco grueso girando en una mesa. Si uno ve esta rotación desde el eje de rotación, esperaríamos ver cómo se reduce el radio del disco mientras más colapsa. Pero los resultados de la

simulación computacional nos muestran que la contracción de la nube ya aplanada se lleva a cabo de una manera mucho más sorprendente. En efecto, se forma una barra que se alarga y que después recupera su geometría original de disco. Ilustramos este comportamiento en los primeros paneles de las Figs. 5. La región central de cada modelo conduce a resultados diferentes, como puede verse en el cuarto panel de cada una de las Figs. 5.

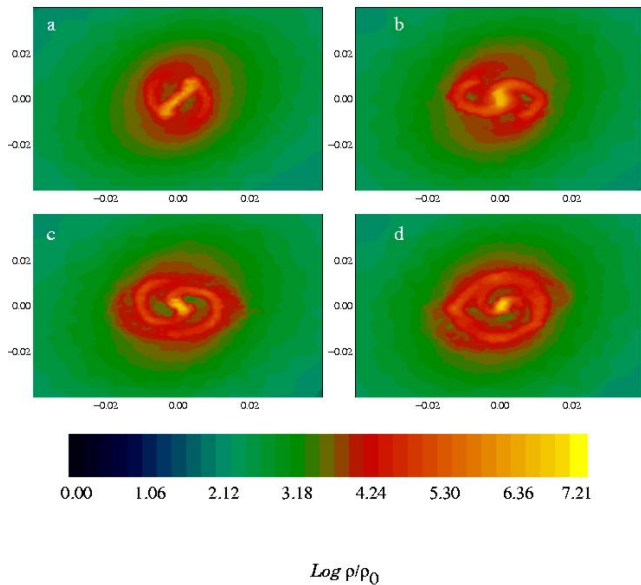


FIGURA 5c. Gráficas de iso-densidad para diferentes tiempos de evolución del modelo A2.

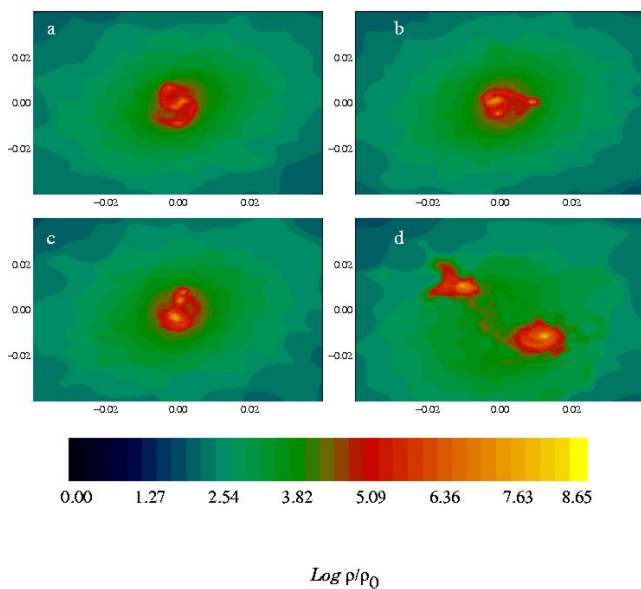


FIGURA 5d. Gráficas de iso-densidad para diferentes tiempos de evolución del modelo A3.

B. La evolución de las variables α y β

En la Fig. 6 ilustramos la evolución dinámica de las razones de energía para cada simulación. Intentaremos usar las curvas α vs β para describir la dinámica de la nube. Naturalmente, esperamos que los eventos importantes de cada modelo, como se ven en las Figs. 5, queden también impresos en el comportamiento de sus parámetros α y β .

Notamos de inmediato que las curvas α vs β se comportan algo diferente para cada simulación, lo que nos indica que los resultados de cada modelo son diferentes. Sin embargo, en estos paneles hay claramente características comunes en todas las curvas, de tal forma que se establece una gran similitud entre el par de curvas de los modelos A0 con A1 y entre las curvas de los modelos A2 con A3. Esta asociación en pares de modelos, es obviamente una consecuencia de la similitud en la extensión de envolvente de gas con respecto al núcleo. Vamos entonces a describir las diferentes etapas que se han etiquetado explícitamente sólo en el primer y tercer panel de la Fig. 6.

Hay una primera etapa marcada por las etiquetas 1 y 2, lo que indica que la evolución temprana del colapso en todos los modelos de nubes procede de manera idéntica; en esta primera etapa el α está disminuyendo como consecuencia del incremento sistemático del potencial gravitacional de la nube. En la etapa común 1-2 la parte central de la nube ya ha perdido su simetría esférica inicial para ya que las partículas más densas se han colocado en un disco grueso de aproximadamente un 10% del radio original de la nube.

Describimos ahora las etiquetas 2-3, que corresponden a una segunda etapa en las curvas de evolución α vs β , en la cual que hay un aumento muy pronunciado de los valores α . En esta etapa nuevos cúmulos densos de gas se están empezando a formar, por las siguientes razones.

Cuando un conjunto de partículas comienzan a agruparse por efecto del colapso gravitacional, la densidad de cada partícula aumenta debido a la presencia de muchas partículas acompañantes. La presión de tales partículas aumenta y entonces podemos esperar que el α de la nube también aumente a pesar de que el potencial gravitatorio también está creciendo en magnitud. No importa en que región de la nube se encuentran estas partículas que están formando cúmulos densos, mediante el aumento de α se puede detectar la formación de nuevos cúmulos en cualquier región.

Por ejemplo, notamos que se forman dos pequeños cúmulos densos en cada extremo de la región alargada en forma de filamento en la parte central de la nube. Poco después, estos pequeños cúmulos se conectan mediante un puente de partículas muy bien definido. Para el primer par de modelos A0 y A1, esta etapa 2-3 se ha ilustrado con el segundo y tercer paneles de la Fig. 5a y 5b, respectivamente.

Ahora bien, a medida que la masa del cúmulo central aumenta, la fuerza centrípeta que actúa sobre el gas también debe aumentar para aquellas partículas que se encuentran muy cerca del centro, con un pequeño radio. Esta tercera etapa en las curvas de evolución α vs β , etiquetada como 3-4 en la Fig. 6, queda señalada por un fuerte aumento de la

energía de rotación. Este aumento de β denota la formación de grandes brazos espirales que rodean al cúmulo central en los modelos A0 y A1.

La etapa 3-4 no se produce ni en el modelo A2 ni en A3, tal como se puede observar en la Fig. 6, a pesar del hecho que los brazos espirales están también formados en estos modelos, aunque con una extensión mucho más pequeña que en modelos A0 y A1.

Todavía hay una etapa 4 para el par de modelos A0 y A1, etiquetada por los números 4-5, en la que los valores de α y β disminuyen, indicando que la región central de la nube está perdiendo tanto energía térmica como rotacional. El principal evento dinámico que ocurre en esta etapa es la fusión de los dos cúmulos ya formados en la región central, como se ilustra en el panel inferior derecho de la Fig. 5a para el modelo A0, y en el panel inferior izquierdo de la Fig. 5b para el modelo A1.

Completamos la descripción dinámica de los modelos A0 y A1 notando que hay una última etapa en la curva α vs β después de la etiqueta 5, en la que se observa la formación de cúmulos exteriores que resultan del rompimiento de los brazos espirales.

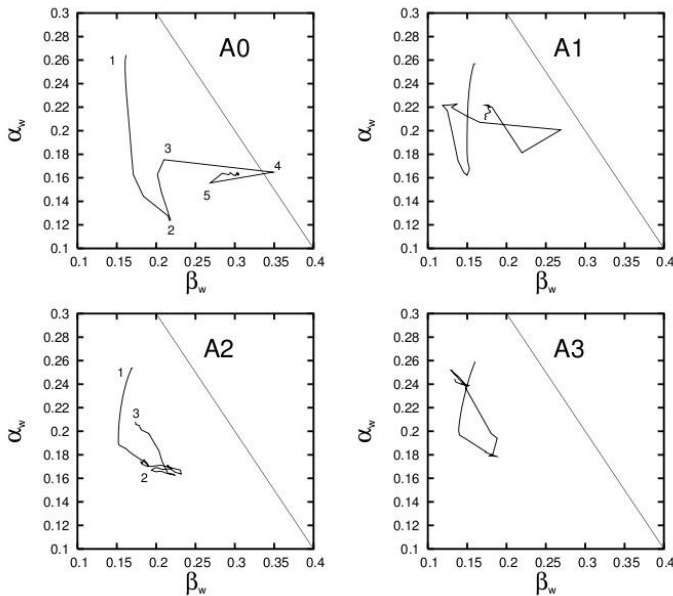


FIGURA 6. Curvas de evolución de las razones de energía definidas en la Sección III. La línea virial definida en la Eq. 8 se muestra como una recta diagonal.

También hay una última etapa para los modelos A2 y A3, que se manifiesta en el comportamiento de zig-zag de la curva α vs β (justo después de la etiqueta 2), en la cual ocurre la fragmentación de la nube mediante pequeños cúmulos que se forman alrededor del cúmulo central. Por ejemplo, en el modelo A2, un anillo de gas que rodea un grupo central formado al final de la primera etapa ahora comienza a fragmentarse, ver Fig. 5c. También se puede reconocer la

ocurrencia de fragmentación en la región central del modelo A3, como se puede ver en el último panel de la Fig. 5d.

C. El desarrollo de brazos espirales

Hay diferencias muy notables en el desarrollo de los brazos espirales para cada modelo, tanto en la extensión como en la fragmentación, como se puede apreciar observando la Fig. 7. Los brazos espirales para el modelo de A0 son largos y masivos. Se forman brazos todavía bien definidos para el modelo A1, pero ahora el movimiento circular de las partículas se distorsiona, que puede ser una señal de próxima fragmentación.

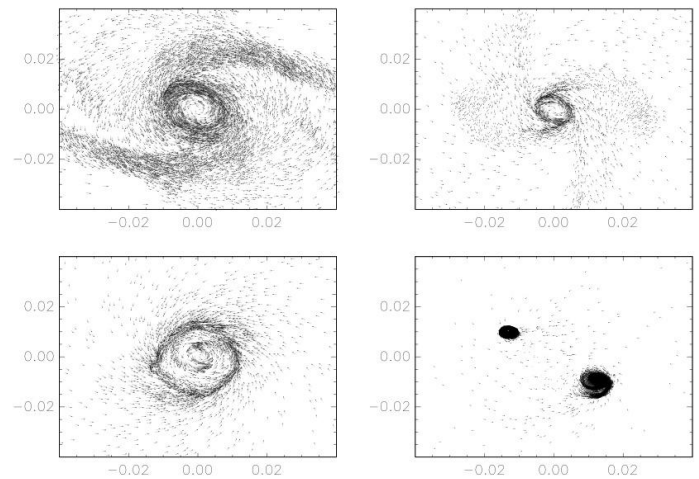


FIGURA 7. Gráficos 2D de la distribución de velocidad para los últimos estados de evolución obtenidos para cada modelo: A0 (panel superior izquierdo); A1 (panel superior derecho); A2 (panel inferior izquierdo); A3 (panel inferior derecho). Los ejes son x/R_c y y/R_c .

Curiosamente, los brazos espirales de los modelos A2 y A3 – que son delgados y cortos, pero todavía bien definidos – son capaces de dar una vuelta completa alrededor del cúmulo central, lo que indica que hay más partículas cayendo en este anillo de gas que se forma a partir de los brazos espirales en lugar del cúmulo central.

V. DISCUSION

La clave para entender el desarrollo de brazos tan diferentes en nuestras simulaciones, es el concepto de energía rotacional del núcleo, como explicamos a continuación. Mencionamos que cada nube fue dotada inicialmente con una misma energía rotacional. También establecimos que cada nube tiene el mismo núcleo central, pero tienen diferente extensión radial del envolvente.

Cuando la nube se pone en rotación de cuerpo rígido, se distribuye la energía rotacional disponible entre el núcleo y el envolvente. Así, un envolvente de mayor extensión va a tomar más energía rotacional y el núcleo quedará con menos

energía rotacional. En la Tabla II, mostramos esta repartición de energía rotacional entre el núcleo y el envolvente, en la que α_c y β_c son las energías térmica y rotacional hasta el radio del núcleo R_c .

Dado que esta energía de rotación del núcleo central es responsable de la extensión alcanzada por los brazos espirales, podemos entender que para las parejas de modelos A0 y A1, la energía de rotación dejada en el núcleo es suficiente para la formación de los brazos espirales, mientras que para los modelos A2 y A3, no es suficiente.

En la tercera columna de la Tabla II reportamos la suma de las razones de energía: Notamos que esta suma siempre queda por debajo de 0.5 para todos los modelos. Como dijimos antes en relación al teorema del virial en la Eq. 8, esta suma nos asegura la tendencia general del núcleo al colapso gravitacional.

TABLA II. Razones de energía calculadas hasta el radio del núcleo.

Modelos	α_c	β_c	$\alpha_c + \beta_c$
A0	0.2643	0.1618	0.4261
A1	0.3002	0.1114	0.4116
A2	0.3350	0.0657	0.4007
A3	0.3547	0.0374	0.3921

VI. CONCLUSIONES

Las simulaciones que nosotros hemos mostrado en este trabajo de divulgación fueron diseñadas para estudiar algunas características de la formación de sistemas binarios de proto-estrellas. Por tal motivo, hemos dejado de lado muchos elementos tanto físicos como computacionales que son muy importantes en el área de formación estelar. Sin embargo, con los elementos dinámicos que sí hemos implementado, a saber: densidad centralmente condensada, rotación de cuerpo rígido y perturbaciones iniciales simétricas, hemos podido observar la fragmentación de la

nube original dando lugar a la formación de sistemas múltiples de proto-estrellas en órbita; el desarrollo de los brazos espirales alrededor de las proto-estrellas; diferencias muy notables en tanto en la extensión como en la fragmentación de los brazos espirales.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a ACARUS-UNISON por las facilidades prestadas para usar el “cluster mezzquite”.

REFERENCIAS

- [1] Bodenheimer, H., *Principles of Star Formation*, (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2011).
- [2] Stahler, S. and Palla, F., *The Formation of stars*, (Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 2006).
- [3] Bergin, E.A and Tafalla, M., *Cold Dark Clouds: The initial conditions for star formation*, Annu. Rev. Astron. Astrophys. **45**, 339-396 (2007).
- [4] Arreaga G., Klapp J. and Gomez F., *The gravitational collapse of Plummer clouds*, Astronomy and Astrophysics **509**, A96 (2010).
- [5] Arreaga, G. y Saucedo, J., *Physical effects of gas envelopes with different extension on the collapse of a gas core*, Revista Mexicana de Astronomía y Astrofísica **48**, 61-84 (2012).
- [6] Springel, V., Yehosida, N. and White, S.M., *GADGET: a code for collisionless and gasdynamical cosmological simulations*, New Astronomy **6**, 79-117, (2001).
- [7] Boss, A. P. and Bodenheimer P., *Fragmentation of a rotating protostar*, Astrophysical Journal **234**, 289-295, (1979).
- [8] Bodenheimer, P., Burkert, A., Klein, R. I. and Boss, A. P. *2000 in Protostars and Planets IV*, ed. Mannings, V. G., Boss, A. P. y Russell, S. S., (University of Arizona Press, Tucson, (2000) p. 675-693.

Fuerza ficticia en un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado



Sergio Diago, Cindy Osorio, Paola Ricardo

Departamento de Física, Universidad Pedagógica Nacional, Calle 72 No. 11- 86, Bogotá, Colombia.

E-mail: sergiodiago@gmail.com

(Recibido el 23 de Septiembre de 2013, aceptado el 19 de Febrero de 2014)

Resumen

Se construyó un dispositivo experimental que consistió en un carro dinámico que poseía un péndulo en su interior, de una cámara de video y del software Tracker Video Analysis; por medio del uso del dispositivo se buscó que los estudiantes de los cursos de taller de mecánica y mecánica II de Licenciatura en Física de la Universidad Pedagógica Nacional comprendieran qué son los marcos de referencia inercial y no inercial para establecer cuando se puede introducir el término de fuerza ficticia en un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. Para lograr este objetivo, con una masa que caía verticalmente y que estaba atada por medio de una cuerda a uno de los extremos del carro, éste fue acelerado a la vista de los estudiantes para que observaran el comportamiento del péndulo, con esto, se buscó que tuvieran claro lo que es el marco de referencia inercial, luego se ubicó una cámara de video en el móvil para grabar el comportamiento del péndulo cuando comenzó su movimiento. Finalmente, por medio del software se desglosó el video registrado en una secuencia de imágenes que sirvieron para ubicar a cada estudiante en el marco de referencia no inercial, además de que se pudo evidenciar la influencia de la fuerza ficticia sobre el péndulo.

Palabras clave: Dispositivo experimental, marcos de referencia inercial y no inercial, fuerza ficticia.

Abstract

Experimental device was constructed consisting of a car that had a pendulum dynamic inside of a video camera and Tracker Video Analysis Software, by use of the device was sought that students of mechanical workshop courses and Bachelor mechanics II Physics National Pedagogical University understand what frames are inertial and non-inertial reference to establish when you can introduce fictitious force term uniformly accelerated rectilinear motion. To achieve this objective, with a mass falling vertically and was tied by a string to one end of the car, this was accelerated in view of the students to observe the behavior of the pendulum, with this, is sought they had clear what is the inertial reference frame, later started a video camera on the mobile to record the behavior of the pendulum when it began its movement. Finally, through the software the recorded video was broken down into a sequence of images that were used to place each student in the non-inertial reference frame, and it was evident that the influence of the fictitious force on the pendulum.

Keywords: Experimental device, inertial reference frames and non-inertial fictitious force.

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Cuando una persona B se transporta en un vehículo, al comenzar su movimiento, siente que algo la aferra al espaldar del asiento; cuando el móvil frena, siente que algo la despegas del espaldar. Para una persona A que se encuentra en reposo y fuera del móvil, esta influencia no va a ser percibida, de este análisis se dice que la persona A está ubicada en un marco de referencia inercial y la persona B se encuentra ubicada en un marco de referencia no inercial, esto ocurre cuando se pone en movimiento o frena el vehículo, por lo que se presenta una aceleración o una desaceleración y la influencia percibida recibe el nombre de *fuerza ficticia*, a la que también se le llama *fuerza inercial* o *seudofuerza* y se caracteriza por la ausencia de interacción física entre cuerpos o partículas.

Para llevar este ejemplo de la cotidianidad al aula de clase, se diseñó un dispositivo experimental, que consiste de un carro dinámico con una cámara de video sujeta a éste y un péndulo en su interior para estudiar su comportamiento cuando el carro es acelerado por una masa atada a uno de sus extremos y que cae verticalmente desde la cima de una mesa. La función principal de la cámara de video es ubicar al estudiante en el marco de referencia no inercial, para que observe la manifestación de la fuerza ficticia en un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. El video grabado, se desglosa en imágenes por medio del software Tracker Video Analysis¹ [1], lo que permite hacer un estudio minucioso del comportamiento del péndulo.

¹ El Software Tracker es libre, es un proyecto de OPS (Open Source Physics) y puede distribuirse y/o modificarse bajo los términos de la Licencia Pública General GNU.

II. MARCO DISCIPLINAR

A. Las fuerzas ficticias

Para comprender claramente lo que son las fuerzas ficticias se formularon dos preguntas centrales: ¿Qué son? y ¿Cuántas existen?

Para la primera: estas fuerzas se manifiestan en la naturaleza cuando no existe interacción física sobre un cuerpo o partícula, para que este fenómeno se lleve a cabo, es necesario que el cuerpo o la partícula en estudio se encuentre en un marco de referencia no inercial, es decir, posea una aceleración; y para la segunda pregunta: dependiendo del tipo de movimiento que describe el objeto se puede establecer una y hasta dos fuerzas ficticias. Si un objeto se mueve con aceleración constante y en línea recta, aparece una fuerza ficticia y cuando un objeto se encuentra en un movimiento circular uniforme o acelerado, aparecen dos fuerzas ficticias, la que hace que el objeto se mueva radialmente hacia afuera llamada fuerza centrífuga y otra que hace que el objeto se mueva en dirección apuesta a la dirección del movimiento llamada fuerza de Coriolis.

B. Sistemas uniformemente acelerados

Si se ubica un observador en un sistema que se acelera a razón de a con respecto a un marco inercial de referencia, se puede afirmar que

$$m\vec{a}_B = m\vec{a}_A - m\vec{a},$$

$$\vec{F}_B = \vec{F}_A + \vec{F}.$$

La fuerza $\vec{F}$ se puede llamar fuerza ficticia y se denota como $\vec{F}_{fict}$, donde

$$\vec{F}_{fict} = -m\vec{a}. \quad (1)$$

La fuerza ficticia experimentada en un sistema acelerado uniformemente es proporcional a su masa, como la fuerza gravitacional.

Estas fuerzas se originan en la aceleración de los sistemas de coordenadas, no en la interacción entre los cuerpos. Un ejemplo claro que explica la aparición de la fuerza ficticia es el de un móvil que se acelera constantemente el cual, en su interior contiene una masa que cuelga de una cuerda como el mostrado en la figura 1.

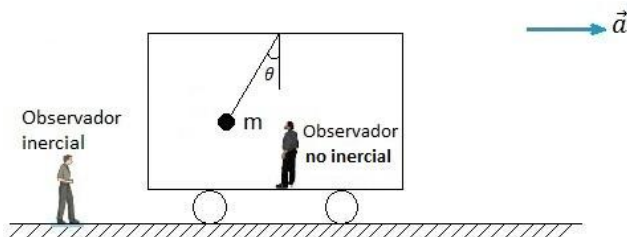


FIGURA 1. Esquema de un móvil que se acelera constantemente, en su interior se encuentra una masa que cuelga de una cuerda y es observada por un observador inercial y otro no inercial.

Si el observador inercial quisiera estudiar las fuerzas que operan sobre la masa m , dibujaría el diagrama de cuerpo libre obteniendo el diagrama mostrado en la figura 2.

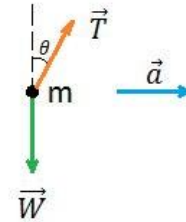


FIGURA 2. Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan sobre la masa m según el observador inercial.

La sumatoria de fuerzas en el eje horizontal $\sum \vec{F}_x$ son:

En forma vectorial

$$\vec{T}_x = m\vec{a}.$$

En forma escalar

$$T \sin \theta - ma = 0. \quad (2)$$

La sumatoria de fuerzas en el eje vertical $\sum \vec{F}_y$ son:

En forma vectorial

$$\vec{T}_y + \vec{W} = 0.$$

En forma escalar

$$T \cos \theta - mg = 0. \quad (3)$$

Si el observador no inercial quisiera estudiar las fuerzas que operan sobre la masa del péndulo, dibujaría el diagrama de cuerpo libre obteniendo el diagrama mostrado en la figura 3.

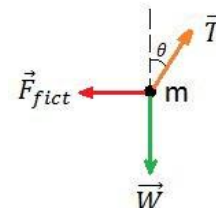


FIGURA 3. Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas que actúan sobre la masa m según el observador no inercial.

Sumatoria de fuerzas en el eje horizontal $\sum \vec{F}_x$ son:

En forma vectorial:

$$\vec{T}_x + \vec{F}_{fict} = 0.$$

En forma escalar:

$$T \sin \theta - F_{fict} = 0. \quad (4)$$

Sumatoria de fuerzas en el eje vertical $\sum \vec{F}_y$ son:

En forma vectorial:

$$\vec{T}_y + \vec{W} = 0.$$

En forma escalar:

$$T \cos \theta - mg = 0. \quad (5)$$

Con el uso de las ecuaciones 2, 3, 4 y 5 se puede hallar el valor de la fuerza ficticia si se conoce el valor de la masa y el ángulo de deflexión del péndulo [2].

III. POBLACIÓN

Se realizó la implementación del dispositivo experimental en los cursos de taller de mecánica y mecánica II de Licenciatura en Física de la Universidad Pedagógica Nacional, los cuales tienen la finalidad de abordar los conceptos de mecánica newtoniana como: movimiento rectilíneo, movimiento circular, leyes de Newton, Principio de conservación de la energía, momentum, entre otros; estas temáticas son imprescindibles para el estudio de las fuerzas ficticias.

IV. METODOLOGÍA

La metodología de trabajo consistió en tres etapas bien definidas: etapa de diseño, etapa de implementación y la etapa de análisis de resultados.

A. Etapa de diseño

Dentro de esta etapa, se diseñó y construyó *el montaje experimental* para el estudio de la fuerza ficticia presente en un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, el cual, consiste en un carro dinámico como el mostrado en la figura 4. Éste posee unos brazos o extensiones que permiten la fijación de una cámara de video, al interior del carro se encuentran: un transportador para medir el ángulo de deflexión del péndulo cuando se presente una aceleración producida por una masa que cae verticalmente y que está atada a uno de los extremos del carro por medio de una cuerda. Este dispositivo posee la cualidad de ser lo suficientemente resistente a una manipulación brusca debido a que está constituido por materiales como el acrílico, lo cual es importante al momento de detener el carro justo antes de que se estrelle contra una polea que permite el cambio de dirección de la tensión producida en la cuerda que lo une con la masa de arrastre que cae verticalmente.

La introducción del montaje experimental al aula de clase tuvo como finalidad que los estudiantes logaran una comprensión clara de los conceptos de: marco de referencia

Fuerza ficticia en un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado inercial, marco de referencia no inercial y fuerza ficticia. También se diseñó un *documento orientador* donde se muestra una ruta de trabajo para los estudiantes como: lectura motivadora sobre los conceptos que se abordan dentro del estudio de la fuerza ficticia presente en un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, descripción de la práctica de laboratorio, descripción del montaje experimental y una serie de preguntas que dieran cuenta del progreso en el aprendizaje del término de fuerza ficticia por parte de los estudiantes; cada una de las preguntas se formularon con una objetivo específico, en la Tabla I se muestran las preguntas con sus respectivos objetivos.



FIGURA 4. Imagen del carro dinámico con un péndulo al interior y una videocámara.

TABLA I. Preguntas y objetivos buscados durante la implementación.

Pregunta	Objetivo
Un móvil que posee en su interior un péndulo se acelera de forma constante en el tiempo. ¿Qué posición cree que tendrá el péndulo?	Conocer el saber inicial de los estudiantes acerca de la influencia de la fuerza ficticia que actúa sobre el péndulo.
¿Qué tipo de movimiento se puede analizar con el montaje experimental?	Establecer los tipos de movimiento que proponen los estudiantes basados en el montaje.
Para aumentar la velocidad del móvil en el tiempo ¿Qué se haría?	Indagar lo que piensan los estudiantes acerca del efecto que produce el aumento del valor la masa de arrastre.
¿Qué ocurre con el péndulo al interior del móvil si este se acelera? y ¿Cuál sería la posición?	Sondear las respuestas de los estudiantes con respecto al fenómeno observado.

• ¿Existe alguna fuerza al interior del móvil cuando este se acelera? ¿Cuál es?	• Evidenciar si los estudiantes introducen el término fuerza ficticia.
• ¿Cómo se podría variar esa fuerza si existe?	• Introducir las causas por las que se puede variar la fuerza ficticia.
• ¿Cuál es la relación que hay entre la deflexión del péndulo y las masas de arrastre?	• Proponer la relación directa entre la masa del péndulo y la masa de arrastre.
• ¿Qué variable es dependiente y cuál es independiente?	• Establecer que la fuerza ficticia es variable dependiente y la aceleración es independiente.
• ¿Qué tipo de gráfica se obtiene de esta relación?	• Deducir el tipo de gráfica que se puede obtener, que en este caso será una línea recta.
• ¿Qué otras variables tanto dependientes como independientes pueden haber?	• Identificar otros tipos de variables tanto dependientes como independientes presentes en el fenómeno como: una variable independiente es la masa del péndulo y las dependientes: el ángulo de deflexión y la tensión sobre en la cuerda del péndulo.
• ¿Cómo se podrían calcular las variables dependientes?	• Mostrar que mediante la dinámica, al realizar el diagrama de cuerpo libre y teniendo en cuenta las componentes de las fuerzas sobre los ejes coordenados se pueden calcular las variables dependientes.
• ¿Qué tipo de gráficas se obtienen de la relación entre las variables dependientes con las independientes?	• Comprender la relación lineal existente entre las variables involucradas en el fenómeno y que las gráficas son líneas rectas.

B. Etapa de implementación

Se realizó una explicación general de los tipos de marcos de referencia enfatizando en las características de los mismos en términos de sus variables (posición, velocidad y aceleración). La clase mantuvo el hilo conductor donde el grupo de trabajo fue guiado por una ruta explicativa con preguntas basadas en la cotidianidad, permitiendo al estudiante plantearse interrogantes y generar su explicación conceptual.

Se conformaron grupos de trabajo de cuatro a cinco personas a los que se les hizo entrega de un documento orientador que brindó una ruta didáctica para introducir al estudiante en el estudio de la fuerza ficticia en un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado.

C. Etapa de análisis

En esta etapa se recopilaron los documentos orientadores que cada grupo de trabajo respondió, luego se hizo la respectiva categorización y triangulación a las respuestas obtenidas para así, obtener conclusiones acerca de lo que los estudiantes lograron aprender acerca de la fuerza ficticia presente en un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado.

V. RESULTADOS

Para facilitar el análisis se tomó cada documento orientador respondido y se enumeró en orden de 1 a 7.

La primera pregunta se formuló para que los estudiantes la respondieran antes del comienzo de la actividad experimental y se obtuvo el siguiente resultado:

Pregunta 1:

- Un móvil que posee en su interior un péndulo se acelera de forma constante en el tiempo. ¿Qué posición cree que tendrá el péndulo?

Seleccione una de las tres opciones posibles y escriba porqué.

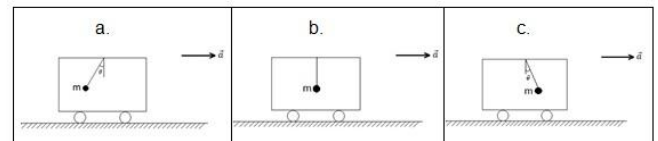


FIGURA 5. Opciones de respuesta a la pregunta 1 del documento orientador.

De siete grupos que respondieron la pregunta se pudo evidenciar que:

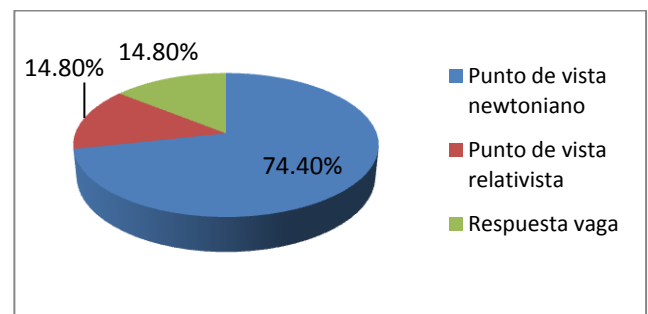


FIGURA 6. Tendencia de respuesta de los grupos a la pregunta 1.

Los siete grupos respondieron la opción **a**, que es la acertada; de ellos, seis la explicaron basándose en las leyes de Newton, algunos nombraron la ley de inercia² y la ley de cambio de movimiento proporcional a la fuerza motriz impresa sobre el objeto³ [3]. Un grupo sólo escribió que a mayor masa, mayor ángulo de deflexión, pero no especificó que masa era, si la del péndulo o la masa que acelera el carro por lo que se considera una respuesta vaga. Otro grupo propuso una explicación desde un punto de vista relativista en donde nombraron dos observadores, el que ese ubica fuera del carro y el que se ubica dentro del mismo donde se describe lo que ocurre al péndulo cuando el carro se acelera.

Las siguientes preguntas formuladas, se respondieron a partir del uso del dispositivo experimental y del software Tracker Video Analysis.

Pregunta 2:

- ¿Qué tipo de movimiento se puede analizar con el montaje experimental?

En la figura 7 se puede evidenciar la tendencia de los resultados obtenidos por los grupos de trabajo.

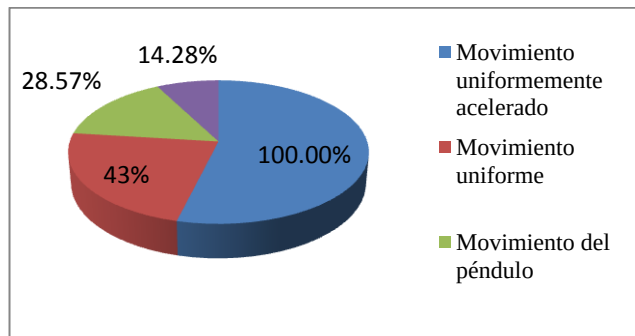


FIGURA 7. Tendencia de respuesta de los grupos a la pregunta 2.

Los siete grupos respondieron que el movimiento que se puede analizar es el rectilíneo uniformemente acelerado, de ellos: tres grupos añadieron que “*el movimiento uniforme*” sin especificar cuál, dos grupos afirmaron que se podía estudiar el movimiento armónico del péndulo y un grupo afirmó la clase de movimiento que se puede analizar según los marcos de referencia son:

- Dentro del carro: movimiento inercial.
- Fuera del carro con velocidad constante: movimiento inercial.
- Fuera del carro con aceleración: movimiento no inercial.

De las afirmaciones anteriores la primera es incorrecta debido a que si el observador se ubica dentro del carro es no inercial.

Pregunta 3:

² Cuatro grupos nombraron la ley de inercia.

³ Un grupo nombró esta ley.

Fuerza ficticia en un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado

- Para aumentar la velocidad del móvil en el tiempo ¿Qué se haría?

Grupo 1.

Respuesta: Incrementando la aceleración del móvil a través de masas colgantes que halan el móvil por medio de una cuerda.

Esta respuesta es válida, solo que faltó afirmar que para aumentar el valor de la aceleración del móvil habría que aumentar el valor de la masa colgante o de arrastre.

Grupo 2.

Respuesta:

- Aumentaría el peso de la polea.
- Disminuiría el ángulo de inclinación.

Las dos respuestas son erradas debido a que la polea lo que hace es cambiar la dirección de la tensión de la cuerda que une el carro con la masa de arrastre y la segunda respuesta hace referencia a un movimiento en un plano inclinado, lo cual, no aplica a la práctica.

Grupo 3:

Respuesta: Aplicar una fuerza externa, colocando una masa mayor a la del carro, o variando la distancia entre las dos masas.

En esta respuesta no especifican dónde se debe colocar la masa mayor a la del carro y la afirmación de “*variar la distancia entre las dos masas*” es vaga, además de incorrecta.

Grupo 4.

Respuesta: Aumentar la distancia, la altura y la masa.

No especifican a qué se le debe aumentar la distancia, ni la altura, ni la masa y tampoco explican el porqué de hacer estas variaciones.

Grupo 5.

Respuesta: Aumentar el desplazamiento del móvil.

Esta respuesta es incorrecta, lo que debieron responder es: aumentar la masa de arrastre.

Grupo 6:

Respuesta: Aumentar la masa que es directamente proporcional a la fuerza, en este caso la velocidad.

Esta respuesta se acerca a la buscada que era aumentar la masa de arrastre.

Grupo 7:

Respuesta: Aumentar la fuerza

Es una respuesta vaga.

De las respuestas anteriores se puede establecer que la mayoría de grupos tuvo idea de cómo se puede acelerar el carro dinámico cuando afirmaron que con el aumento de la masa de arrastre o aumentando la fuerza sobre el carro se logra la aceleración del mismo. Otros estuvieron bastante distantes de la respuesta correcta ya que afirmaron que con el aumento de la distancia se logra variar la velocidad del carro.

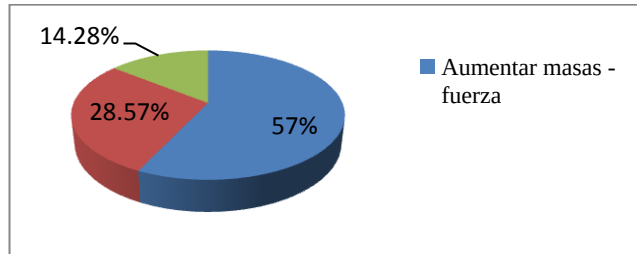


FIGURA 8. Tendencia de las respuestas a la pregunta 3.

Pregunta 4.

- ¿Existe alguna fuerza al interior del móvil cuando este se acelera? ¿Cuál es?

Seis grupos respondieron que la fuera ficticia y uno, especificó que dependiendo del marco de referencia se manifiestan determinadas fuerzas así: *“Depende del marco de referencia. Si es inercial o no inercial; cuando estoy en el marco de referencia inercial si existen fuerzas dentro del carro que son las leyes generales del movimiento; en el marco de referencia no inercial si existen fuerzas llamadas fuerzas ficticias”*.

Todas las respuestas de los grupos fueron acertadas, por lo que se puede afirmar que a medida que transcurrió la práctica, se fue asimilando el concepto de fuerza ficticia y cuándo es que esta aparece.

Pregunta 5.

- ¿Cómo se podría variar esa fuerza si existe?

Los siete grupos respondieron que variando la aceleración, de ellos: dos grupos añadieron que *“variando la masa”*, pero no especificaron si la masa de arrastre o la masa del péndulo, un grupo añadió: *“alargando la cuerda del péndulo”*.

Las respuestas son vagas; los grupos que respondieron que aumentando la aceleración se acercan a la respuesta correcta, pero no explicaron cómo se podría aumentar.

Pregunta 6.

- ¿Qué relación hay entre el péndulo y las masas de arrastre?

Seis de los grupos respondieron que la relación existente entre el péndulo y la masa de arrastre es una proporción directa, a mayor masa se presenta una mayor deflexión del péndulo; un grupo de ellos respondió que entre mayor masa

de arrastre hay una mayor elongación del péndulo. Un grupo no respondió la pregunta.

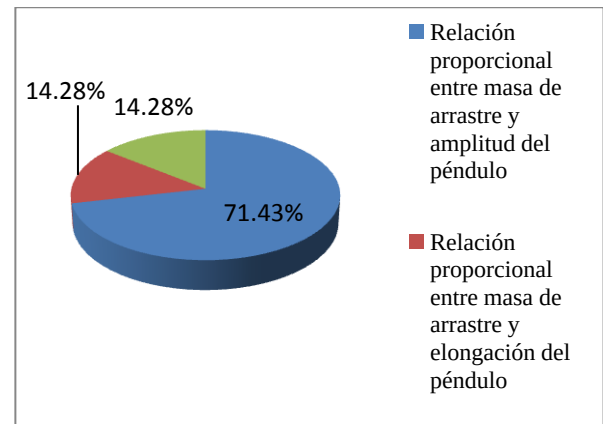


FIGURA 9. Tendencia de respuestas a la pregunta 6.

Ante esta pregunta se puede observar que cinco de los grupos, excepto uno que no respondió la pregunta, están en lo cierto cuando afirmaron que entre mayor masa de arrastre, mayor elongación presenta el péndulo. Uno de ellos afirmó que entre mayor masa, mayor elongación, lo que es una afirmación incorrecta.

Pregunta 7.

- ¿Qué variable es dependiente y cuál es independiente?

De los siete grupos se evidenciaron las siguientes respuestas:

Grupo 1.

Respuesta: Masa es dependiente

Grupo 2.

La variable dependiente es el ángulo que se genera al oscilar el péndulo, y la independiente es la masa.

Grupo 3.

Respuesta: Masa = independiente.

Ángulo péndulo = Dependiente

Grupo 4.

Respuesta: Tiempo y masa (independientes). Aceleración, fuerza, velocidad y ángulo de inclinación (no especifican si son variables dependientes o independientes).

Grupo 5.

Respuesta: Dependiente = Masa y aceleración.

Independiente = Ángulo.

Dos grupos no respondieron.

Según los resultados obtenidos para esta pregunta, resulta difícil para los grupos en general, establecer qué variables son dependientes y cuáles son independientes en la práctica experimental; solo el 28,57 % afirmó que la masa de arrastre

es variable independiente y que el ángulo de deflexión del péndulo es una variable dependiente.

Pregunta 8.

- ¿Qué tipo de gráfica se obtiene de esta relación?

Un grupo respondió que una parábola, otro: que oscilación u onda y otro: una cuadrática. Cuatro grupos no respondieron.

Teniendo en cuenta las pocas respuestas de los grupos, se evidencia que no habían interactuado con este tipo de dispositivo, debido a que son erradas. Se esperaba que afirmaran que la gráfica sería una línea recta.

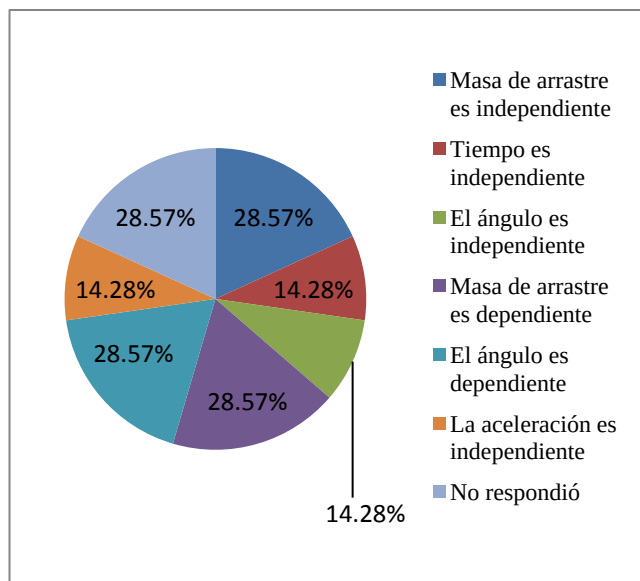


FIGURA 10. Tendencia de respuesta de los grupos a la pregunta 7.

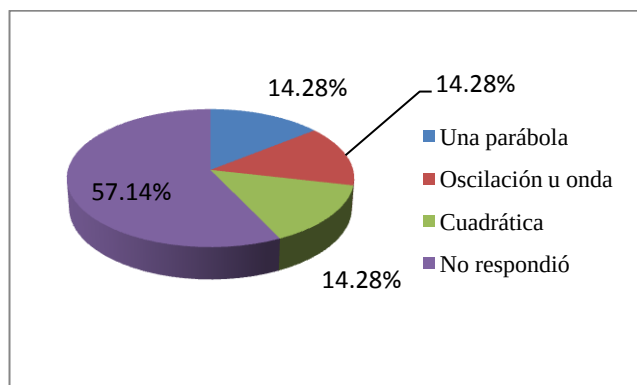


FIGURA 11. Tendencia de respuesta a la pregunta 8.

Pregunta 9

- ¿Qué otras variables tanto dependientes como independientes pueden haber?

Un grupo respondió que: una variable independiente podría ser el largo de la cuerda, otro respondió: velocidad es variable dependiente y aceleración es variable independiente y otro: fuerzas ficticias. Cuatro grupos no respondieron.

Fuerza ficticia en un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado

De las preguntas respondidas, no afirman nada nuevo; la respuesta de uno de los grupos habla acerca de la variación de la cuerda, pero no especifican cuál, si la del péndulo o la cuerda que une al carro con la masa de arrastre.

Pregunta 10

- ¿Cómo se podrían calcular las variables dependientes?

Un grupo respondió que: Tabulando datos y encontrando una relación. Seis grupos no respondieron.

Se puede concluir que debido al desconocimiento por parte de los estudiantes sobre la fuerza ficticia en un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, no respondieron la pregunta y la única respuesta encontrada, no dice nada, solo lo que se podría hacer en caso de que se encontraran más variables en el experimento.

Pregunta 11

- ¿Qué tipo de gráficas se obtienen de la relación entre las variables dependientes con las independientes?

Ningún grupo respondió a la pregunta.

VI. CONCLUSIONES

En la implementación se evidenció un desconocimiento por parte de los estudiantes acerca de los términos de fuerza ficticia y marcos de referencia inercial y no inercial.

Las práctica experimental propició en los estudiantes la reflexión en lo que tiene que ver con el estudio de la fuerza ficticia en un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, de cuándo es que esta aparecen dependiendo del marco de referencia en el que el observador se encuentre ubicado; además ayudó a que ellos asociaran fenómenos involucrados en los experimentos con los que a diario evidencian en la naturaleza como: abordar un medio de transporte y sentir la fuerza ficticia que los empuja hacia atrás cuando este acelera.

El uso del software Tracker sirvió para los estudiantes pudieran evidenciar la relación existente entre la aceleración del carro con el comportamiento del péndulo en su interior, debido a que cuando se hizo el desglose de las imágenes del video, se observó claramente el ángulo de deflexión del péndulo.

La gran mayoría de respuestas dadas por los estudiantes no tenían una explicación clara del fenómeno observado en la práctica, escribieron como respuesta palabras como: aceleración, masa, tiempo, velocidad, distancia, pero no explicaron la forma en que estas variables se comportaron en el dispositivo experimental.

Las últimas preguntas en su mayoría no fueron respondidas debido a la falta de tiempo, ya que los estudiantes tuvieron dificultades para poder asimilar lo que son los marcos de referencia inercial y no inercial al inicio de la práctica, por lo que se debió dedicar bastante tiempo a

aclarar estos términos por parte de los expositores y de la profesora titular.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al profesor Carlos Mario Montes Jiménez por las correcciones y asesorías dadas para la redacción y formulación del documento orientador, la construcción del dispositivo de la práctica y la elaboración del artículo.

A la profesora Marina Garzón Barrios por brindar los espacios de tiempo para realizar la implementación en los cursos de taller de mecánica y mecánica II, además de ayudar a aclarar dudas de los estudiantes.

REFERENCIAS

- [1] Software Tracker Video Analysis and Modeling Tool, <<http://www.cabrillo.edu/~dbrown/tracker/>>, consultado el 14 de septiembre de 2013 de:
- [2] Kleppner, D., & Kolenkow, R. *Noninertial systems and fictitious forces*. International Student (Ed.), An Introduction to Mechanics, (McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., Tokio, 1973), pp. 339 – 375.
- [3] Tipler P. A., *Física tomo 1*, (Ed. Reverte, España, 1994).

ANEXO

DOCUMENTO ORIENTADOR

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

Facultad de Ciencia y Tecnología, Departamento de Física, Taller de mecánica.

FUERZA FICTICIA EN UN MOVIMIENTO RECTILÍNEO UNIFORMEMENTE ACELERADO

OBJETIVO

Establecer la diferencia entre marco de referencia inercial y marco de referencia no inercial para introducir el concepto de fuerza ficticia.

MOTIVACIÓN

Cuando nos transportamos en un vehículo, al comenzar su movimiento, sentimos que algo nos aferra al espaldar del asiento; cuando el móvil frena, sentimos que algo nos despega del espaldar. Para una persona que se encuentra fuera del móvil, esta influencia no va a ser percibida debido a que se encuentra en reposo con respecto la persona ubicada al interior del vehículo, de este análisis se dice que la persona en reposo está ubicada en un marco de referencia

inercial y la persona que se encuentra en el móvil se ubica en un marco de referencia no inercial debido a que cuando se pone en movimiento o frena el vehículo, se presenta una aceleración o una desaceleración.

DESCRIPCIÓN DE LA PRÁCTICA

Mediante el uso de un dispositivo experimental que consiste en un carro dinámico que posee un péndulo en su interior, de una cámara de video y del software Tracker Video Analysis, se pretende que el estudiante se ubique en los marcos de referencia inercial y no inercial para poder establecer cuando se puede introducir el concepto de fuerza ficticia. Primeramente se acelera el carro dinámico a simple vista para observar lo que ocurre al péndulo y así mismo tenga se claro lo que es el marco de referencia inercial, luego se ubica una cámara de video en el móvil, la cual, filmará el comportamiento del péndulo al tiempo que se acelera el carro. Por medio del software Tracker, se desglosa el video registrado en secuencia de imágenes que servirán para ubicar al estudiante en el marco de referencia no inercial en donde podrá darse cuenta de la aparición de la fuerza ficticia.

MONTAJE

En la figura 1 se muestra la imagen del carro dinámico con un péndulo en su interior y una cámara de video sujeta al mismo. La cámara es sujeta por unos brazos móviles que permiten su adecuada ubicación al momento de realizar la grabación. La intención de la práctica experimental es acelerar el carro por medio de una masa que cae verticalmente, con ayuda de una polea se cambia la dirección de la tensión de un hilo o nylon que sujeta el carro y la masa.



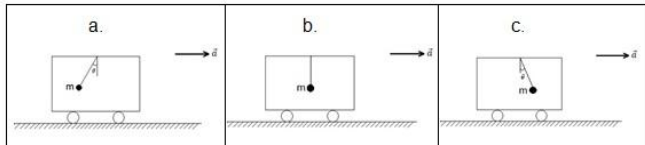
FIGURA 1. Imagen del carro dinámico con un péndulo al interior y una videocámara.

ANTES DE LA PRÁCTICA DE LABORATORIO

Escriba lo que piensa acerca de:

- Un móvil que posee en su interior un péndulo se acelera de forma constante en el tiempo. ¿Qué posición cree que tendrá el péndulo?

Seleccione una de las tres opciones posibles y escriba porqué.



DURANTE LA PRÁCTICA DE LABORATORIO

Analice las siguientes situaciones teniendo en cuenta el montaje experimental de la figura anterior.

- ¿Qué tipo de movimiento se puede analizar con el montaje experimental?
- Para aumentar la velocidad del móvil en el tiempo ¿Qué se haría?
- ¿Qué ocurre con el péndulo al interior del móvil si éste se acelera? y ¿Cuál sería la posición?
- ¿Existe alguna fuerza al interior del móvil cuando este se acelera? ¿Cuál es?
- ¿Cómo se podría variar esa fuerza si existe?

Fuerza ficticia en un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado

- ¿Cuál es la relación que hay entre el péndulo y las masas de arrastre?
- ¿Qué variable es dependiente y cuál es independiente?
- ¿Qué tipo de gráfica se obtiene de esta relación?
- ¿Qué otras variables tanto dependientes como independientes pueden haber?
- ¿Cómo se podrían calcular las variables dependientes?

BIBLIOGRAFÍA

- Hodson, D. (1994). *Aprendizaje de las ciencias, Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio*. Toronto (Canadá): The Ontario Institute For Studies in Education.
- Kleppner, D., & Kolenkow, R. (1973). *Noninertial systems and fictitious forces*. International Student (Ed.), An Introduction to Mechanics. (pp. 339 – 375). Tokio: McGraw_Hill Kogakusha. Ltd.
- Sears, F., Zemansky, M., & Young, H. (1989). *Movimiento en un plano*. Addison – Wesley Iberoamérica (Ed), Física universitaria. (pp. 96 – 134). Mexico: Editora de Periódicos, S. C. L.
- Serway, R., (1992). *Movimiento circular y otras aplicaciones de las leyes de Newton*. McGraw Hill/Interamericana de México, S.A (Ed), Física, tomo 1. (pp. 131 – 154. México: Impresora y Maquiladora de Libros MIG. S.A de C.V.
- Tipler, P. (1990). *Aplicaciones de las leyes de Newton*. Reverté (Ed.), Física, tomo 1. (pp. 175 – 178). Colombia: Presencia.

Grados de libertad ondulatorios no suprimidos en la *difusión* electromagnética



J. D. Bulnes, Vando da C. Moraes

Grupo de Mecânica Quântica, Informação Quântica e Física Aplicada,
Universidade Federal do Amapá, Rod. Juscelino Kubitschek, Km. 2,
Jardim Marco Zero, CEP. 68903-419, Macapá, AP, Brasil.

E-mail: bulnes@unifap.br

(Recibido el 26 de Septiembre de 2013, aceptado el 17 de Febrero de 2014)

Resumen

Presentamos algunos argumentos con los cuales se pretende mostrar que la denominada *difusión electromagnética* no hace referencia a un fenómeno físico nuevo, sino a una expresión consistente con un abuso de lenguaje.

Palabras clave: Ondas electromagnéticas, difusión.

Abstract

We presented some arguments through which to show that the, so talked, electromagnetic diffusion, no is a new physical phenomenon, but one abuse in language.

Keywords: Electromagnetics waves, diffusion.

PACS: 01.55.+b, 03.50.De, 01.90.+g.

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Las ecuaciones de Maxwell de la electrodinámica clásica, uno de los pilares de la física, son definidas dentro de un contexto clásico y suponiendo que los campos físicos no son intensos, lo que es consistente con su carácter lineal. La importancia que las ecuaciones de Maxwell tienen para la física y, a través de ella, para la comprensión del mundo natural y el desarrollo (de parte) del mundo tecnológico es enorme. Por otro lado, las ecuaciones de Maxwell pueden ser formalmente extendidas para incorporar, por ejemplo, un término de corriente magnética (el cual fue incluido recientemente en un modelo geofísico basado en una técnica que usa ondas de radar [1], sin considerar el contexto en el cual este artificio matemático es usado, como luego se aclaró en [2]). Las ecuaciones de Maxwell también admiten generalizaciones con significado físico, como ocurre, por ejemplo, dentro del contexto de los fenómenos simulados en un espacio genuinamente plano, $(2+1)$ -dimensional, con el electromagnetismo de *Proca* o el de *Chern-Simons*, que incluyen un término de masa para el fotón [3] y permiten abordar, entre otros, el fenómeno de la superconductividad a altas temperaturas.

Sin embargo, el modelo electromagnético y las aproximaciones que dentro de ella pueden realizarse, llevan a una situación interesante que es generalmente desconsiderada en la literatura de electrodinámica. Jackson, en la referencia [4], al abordar el tema de los campos magnéticos casi estáticos, usa la denominación ‘difusión de campos magnéticos’, presenta una ‘ecuación de difusión

para el potencial vectorial’ y una ‘función de Green difusiva’. El término *difusión de campo magnético* o, el más general, *difusión electromagnética*, que se encuentra en la literatura de los métodos electromagnéticos usados en geofísica aplicada y que se refiere a una aproximación para la ecuación de ondas electromagnéticas de muy pequeña frecuencia ($f < 5\text{Hz}$) propagándose en buenos conductores, es desconocido en la literatura de física. Pero eso no es todo. En la misma ref. [4] se presenta una figura (su figura 5.23) que es completamente similar a la presentada por Butkov, ref. [5], para las soluciones de la ecuación de difusión que corresponden al proceso de transporte de una pequeña cantidad de sal concentrada inicialmente en un punto y que luego se difunde en un cilindro delgado que, junto con la sal, contiene agua. La figura 1 muestra esas curvas.

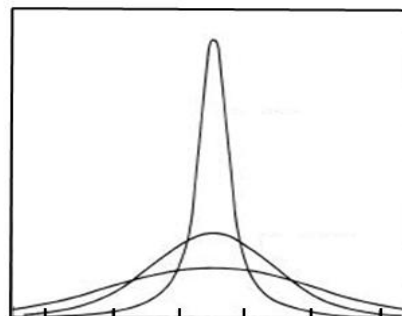


FIGURA 1. Curvas gaussianas de distinto ancho.

Para reforzar lo anterior, Jackson escribe, en la misma ref. [4], el siguiente texto: "...es manifiesta la difusión con el paso del tiempo...". Por otro lado, Landau, en la ref. [6], al abordar el mismo problema, menciona que la ecuación que surge en ese contexto coincide con la de la conducción del calor, pero él no la denomina *conducción de calor electromagnético* o una expresión de ese tipo, tampoco menciona el surgimiento de algún proceso difusivo.

Desde la perspectiva física es nítida y evidente la diferencia que existe entre una propagación ondulatoria y un proceso de difusión. La expresión *difusión electromagnética* parece así carecer de significado físico, pues un proceso difusivo y un fenómeno ondulatorio son muy distintos, presentando propiedades también distintas. La dinámica de aquellos fenómenos físicos responde a ecuaciones diferenciales distintas, caracterizadas por parámetros que también son distintos, ver ref. [5]. El énfasis dado al término 'difusión electromagnética' parecería indicar que se considera que existe un verdadero comportamiento difusivo. Por otro lado, las posibles discusiones sobre el significado físico atribuido a un fenómeno cuya dinámica está representada por esa aproximación están completamente ausentes en las referencias, donde sólo los aspectos matemáticos encuentran espacio. ¿Se trata de un verdadero proceso difusivo? ¿Las ondas dejaron de ser ondas? Considerando que una denominación de ese tipo puede, potencialmente, generar desconfianza y confusión entre los estudiantes desavisados, parece conveniente abordar ese asunto para intentar aclarar si tal expresión corresponde realmente a un proceso difusivo o si es sólo el resultado de un abuso de lenguaje.

En este artículo tenemos el propósito de revisar lo que la literatura de física registra sobre el asunto, presentar un contexto mínimamente adecuado para discutir el mismo y entonces ofrecer una aclaración. En ese sentido, organizamos el artículo de la siguiente manera: En la subsección A presentamos un típico caso de difusión; en la subsección B, revisamos la aproximación que posibilita escribir la ecuación de ondas (para un buen conductor) con la forma de la ecuación de difusión; en la sección C presentamos aspectos del límite $\omega \rightarrow 0$; en la sección II presentamos el argumento de la simetría de *gauge* y el *gauge-fixing* y discutimos el efecto que ellas tienen sobre los grados de libertad no físicos y su irrelevancia para eliminar los grados de libertad ondulatorios; en la sección III presentamos nuestras conclusiones y finalizamos con un apéndice.

A. Un caso de difusión

Consideremos un contexto físico donde la respuesta de los medios materiales a los campos externamente aplicados corresponde al régimen lineal; es decir, cuando los campos físicos actuantes son débiles (en comparación con los atómicos). Supongamos que sobre un conductor isótropo se aplica un campo eléctrico externo; en ese caso, se manifestarán algunos *fenómenos de transporte*, como la transferencia de calor y las corrientes eléctricas, ref. [7]. Esas manifestaciones físicas se explican en función de la

facilidad de movimiento de sus cargas eléctricas *libres*. Para continuar, nos restringiremos al caso de las corrientes eléctricas. Si en el medio conductor existe un gradiente de temperatura, debido a que el mismo no se encuentra en equilibrio termodinámico, entonces se manifestará un proceso de difusión de partículas cargadas hacia las regiones del medio con menor temperatura. A ese proceso difusivo estarán asociadas corrientes eléctricas, con densidad de corriente $\vec{j}_T = \beta \nabla T$, donde β caracteriza el efecto termoeléctrico producido y T es una función de las coordenadas cuyo valor da la temperatura en el punto correspondiente, ref. [7]. Entonces la densidad de corriente eléctrica total se escribe de la siguiente manera,

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} + \beta \nabla T, \quad (1)$$

donde σ es la conductividad eléctrica del medio; así, la ecuación microscópica de Ampere se escribe, dentro del contexto considerado y en el sistema de unidades de Gauss (absoluto), de la siguiente manera,

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{4\pi}{c} (\sigma \vec{E} + \beta \nabla T) + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} (\epsilon \vec{E}), \quad (2)$$

donde ϵ es la constante dieléctrica del medio.

B. La ecuación de ondas con la forma de la de difusión

Las ecuaciones microscópicas de Maxwell para el campo electromagnético en un medio de conductividad eléctrica σ , permeabilidad magnética μ y constante dieléctrica ϵ , ref. [7], se expresan (en el sistema de unidades de Gauss) de la siguiente manera,

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{H} = 0, \quad (4)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \frac{4\pi}{c} \sigma \vec{E} + \frac{\epsilon}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (5)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\mu}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}. \quad (6)$$

Las ecuaciones anteriores corresponden a la aproximación "casi-estática" o "casi-estacionaria" de las ecuaciones de Maxwell.

Usando la bien conocida identidad vectorial (aquí aplicada al vector eléctrico $\vec{E}$),

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla (\nabla \cdot \vec{E}) - \nabla^2 \vec{E}, \quad (7)$$

y tomando en consideración que la operación de derivación temporal y el operador ∇ conmutan (pues actúan sobre

variables distintas) se puede escribir, después de usar (3), (6) y (7),

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{\mu}{c} \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \vec{H}). \quad (8)$$

Seguidamente, usando (5) en (8), se obtiene la bien conocida ecuación,

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{4\pi\mu\sigma}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\mu\epsilon}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}. \quad (9)$$

Consideremos el caso en el que el campo eléctrico E cambia muy lentamente (porque la frecuencia de la onda es muy pequeña), entonces su variación temporal, $\partial E/\partial t$, es pequeña y la variación temporal de esta variación, $\partial^2 E/\partial t^2$, es aún más pequeña. Además, si el medio en el que se propaga la onda es un buen conductor a bajas frecuencias, la conductividad eléctrica σ tendrá un valor significativo; en ese caso, el término del extremo derecho en la ecuación (9) podrá ser ignorado y será válida la siguiente *aproximación*,

$$\nabla^2 \vec{E} = \frac{1}{\nu} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}, \quad (10)$$

donde $\nu = c^2/(4\pi\mu\sigma)$. La forma de la ecuación (10) coincide con la de la *ecuación de difusión*; sin embargo, hasta aquí, sólo tenemos derecho de afirmar que se trata de una coincidencia matemática. Así, surgen las preguntas: ¿La ecuación (10) podría corresponder a un verdadero proceso difusivo?

C. El límite de la frecuencia pequeña para el caso de un medio conductor

En la electrodinámica clásica se demuestra que la ecuación de ondas para un medio conductor incorpora, a diferencia de la ecuación de ondas para el espacio libre, una constante dieléctrica compleja. Ello se hace claro al considerar, en (9), la dependencia explícita del tiempo, en la forma $\vec{E}(\mathbf{r}, t) = \vec{E}(\mathbf{r})e^{-i\omega t}$, ref.[8], lo que conduce directamente a identificar la constante dieléctrica $\epsilon(\omega)$ con la forma,

$$\epsilon(\omega) = 1 + i \frac{4\pi\sigma(\omega)}{\omega}, \quad (11)$$

donde $\sigma(\omega)$ es la conductividad AC, que está definida, a su vez, por la expresión,

$$\sigma(\omega) = \frac{\sigma_0}{1 - i\omega\tau}, \quad (12)$$

siendo $\sigma_0 = ne^2\tau/m$ la conductividad DC y τ es un tiempo (de relajación) característico asociado con el camino libre medio de los electrones en un metal, todo ello de acuerdo con el modelo de Drude para la conductividad eléctrica en metales, ver ref. [8]. En el caso de que la ecuación de ondas

corresponda a la propagación de ondas electromagnéticas de frecuencia muy pequeña¹ la constante dieléctrica es (esencialmente) imaginaria $\epsilon(\omega) \sim (4\pi\sigma_0/\omega)i$,

Hasta aquí no ha surgido nada que sea característico de un proceso difusivo.

II. DISCUSIÓN

Aquí vamos a considerar un aspecto aún no abordado en la sección anterior. Las ecuaciones de Maxwell tienen una propiedad que es esencial para aclarar el presente problema; se trata de la simetría de *gauge*. La expresión ‘simetría de *gauge*’ significa que las ecuaciones de Maxwell son invariantes de *gauge*; es decir, que son invariantes con relación a la elección de un *gauge*. Así, sin afectar a los campos físicos, es posible imponer una condición para fijar el *gauge* (*gauge-fixing*), la que posibilita eliminar grados de libertad espurios (no físicos) que surgen naturalmente en el modelo electromagnético de Maxwell. Por otro lado, es bien sabido que un campo 4-vectorial que obedece las ecuaciones de Maxwell² tiene asociado dos sectores: el longitudinal, caracterizado por un espín $S = 0$ y el transversal, con espín $S = 1$, lo que puede verse, por ejemplo, en ref. [9]. El espín $S = 0$, siendo una propiedad únicamente matemática del modelo de Maxwell, constituye, por eso mismo, un grado de libertad espurio que es eliminado por el *gauge-fixing*. En cambio, el espín $S = 1$ sí tiene significado físico, correspondiendo a una *propiedad física* de un *campo físico*. De otra parte, los grados de libertad físicos, que no son afectados por el *gauge-fixing*, corresponden, en el caso del campo electromagnético que se propaga libremente, a los modos de polarización ortogonales entre sí y a la dirección de su propagación.

Por otro lado, como puede verse en el Apéndice A, Molchanov consigue construir ecuaciones para los potenciales físicos que tienen la forma de ecuaciones de difusión con fuentes, pero ello es alcanzado después de elegir un *gauge* adecuado, ver apéndice A. Entonces, partiendo de las ecuaciones de Maxwell, puede alcanzarse una ecuación del tipo difusiva, pero eso no significa que esa aproximación matemática traiga consigo la física de la difusiva; es decir, que esa ecuación surja conectada con un verdadero proceso difusivo. Debemos percibir que para poder describir un proceso difusivo a través de las ecuaciones de Maxwell (suponiendo que ello tenga significado físico) la elección de un *gauge-fixing* sería irrelevante, pues con ello sólo podemos suprimir los grados de libertad espurios; lo que se necesitaría es de un mecanismo que, dentro del contexto teórico, suprima los *grados de libertad físicos*, aquellos que son característicos de la propagación ondulatoria, el mismo que debería ser

¹ En ese caso la conductividad AC coincide con la conductividad DC o estática: $\sigma(\omega \rightarrow 0) \rightarrow \sigma_0$. Un valor de la frecuencia de, por ejemplo, $f = 0.5\text{Hz}$ corresponde a ese régimen.

² En el electromagnetismo de Maxwell el “fotón longitudinal” es una propiedad matemática que surge dentro del modelo electromagnético que no tiene un elemento correspondiente en el mundo físico.

complementado con un mecanismo que sea capaz de incorporar grados de libertad exclusivamente difusivos, lo que no se ha realizado en [10]. Por lo tanto, las ecuaciones en la ref. [10] corresponden a un proceso que puede parecer relacionado con un proceso difusivo pero que podría presentar polarización.

III. CONCLUSIONES

Hemos discutido y presentado un argumento con el que mostramos que la expresión *difusión electromagnética* corresponde a un abuso de lenguaje, la misma que, por la manera como se la presenta en cierta literatura, parece corresponder a un verdadero fenómeno físico. La *difusión electromagnética*, que encuentra sustento en las ecuaciones, es sólo una propiedad matemática del modelo electromagnético que no tienen una propiedad correspondiente en la naturaleza. Teniendo en cuenta que la vigencia de los abusos tiene origen en el uso los mismos, se recomienda evitar su uso.

REFERENCIAS

- [1] Ellefsen, K. et al., *Frequency-domain Green's functions for radar waves in heterogeneous 2.5D media*, Geophysics **73**, J13-J22 (2009).
- [2] Bulnes, J. D., Peche, L. y Travassos, J., *Comment on 'Frequency-domain Green's functions for radar waves in heterogeneous 2.5D media'*, Geophysics **75**, X5-X5 (2010).
- [3] Helayël, J. A., *Aspectos de dimensionalidade no Eletromagnetismo*, <<http://www.cbpf.br/~dcp/papers>>, consultado el 06 de julio de 2013.
- [4] Jackson, J. D., *Classical Electrodynamics* (Wiley & Sons, USA, 1962).
- [5] Butkov, E., *Mathematical Physics* (Addison-Wesley, USA, 1968).
- [6] Landau, L., Lifchitz, *Electrodynamics of continuum media*, (Editorial MIR, Moscú, 1986).
- [7] Brédov, M., Rumiántsev, V., Tóptiguin, I., *Electrodinámica Clásica*, (Editorial MIR, Moscú, 1986).

- [8] Ashcroft, N., Mermin, D., *Solid State Physics*, (Holt Rinehart and Winston, 1976).
- [9] Helayel, J. A., *Aspectos dimensionais do Eletromagnetismo*, (CBPF, Brasil, 1998).
- [10] Molchanov, O., Kulchitsky, A. and Hayakawa, M., *Inductive seismo-electromagnetic effect in relation to seismogenic ULF emission*. Natural Hazards and Earth System Sciences **1**, 61-67 (2001).

APENDICE A

En la ref. [10] se consideran las ecuaciones para los campos físicos (eléctrico y magnético) y los potenciales vectorial y escalar,

$$\vec{H} = \nabla \times \vec{A}, \quad \vec{E} = -\mu \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \varphi, \quad (13)$$

y se considera la constante dieléctrica compleja,

$$\varepsilon' = \varepsilon \left(1 + \frac{i\sigma}{\omega\varepsilon} \right). \quad (14)$$

Con ellos, el *gauge* se construye a partir de la ecuación,

$$\nabla \cdot \vec{A} + \varepsilon' \frac{\partial \varphi}{\partial t} \equiv \nabla \cdot \vec{A} + \varepsilon \frac{\partial \varphi}{\partial t} + \sigma \varphi = 0, \quad (15)$$

y entonces se obtienen dos ecuaciones, para los potenciales vectorial y escalar, con la forma de una ecuación de difusión con fuentes,

$$\frac{1}{D} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla^2 \vec{A} = \vec{j}_s, \quad (16)$$

$$\frac{1}{D} \frac{\partial \varphi}{\partial t} - \nabla^2 \varphi = -\nabla \cdot \vec{j}_s / \sigma, \quad (17)$$

donde D es el denominado coeficiente de *difusión* electromagnética.

Enseñanza de plasmas físicos en el nivel medio superior



**Fidel Benjamín Alarcón Hernández¹, María del Pilar Segarra Alberú²,
Jorge Barojas Weber²**

¹*Instituto Profesional de la Región Oriente, Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Cuernavaca, Morelos, México.*

²*Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F.*

E-mail: honorato@unam.mx

(Recibido el 23 de Noviembre de 2013, aceptado el 15 de Febrero de 2014)

Resumen

Se presenta una experiencia didáctica sobre el tema de plasmas físicos realizada con dos diferentes grupos de alumnos del Nivel Medio Superior del sistema de la UNAM. Un grupo con estudiantes de cuarto año de la Escuela Nacional Preparatoria del plantel # 8 Miguel E. Schulz y el otro con estudiantes de sexto semestre del Colegio de Ciencias y Humanidades (CCH-Sur), ambos del turno matutino. La experiencia consistió en la ejecución de una secuencia didáctica presentada como un plan de clase en la cual se conjugan el trabajo en equipos, la realización de experimentos y la discusión de ideas, todo bajo el esquema del modelo didáctico "Enseñar para la Comprensión. Los resultados obtenidos al final de la aplicación de la propuesta muestran aspectos positivos en cuanto a lo procedimental, la conceptual y lo actitudinal, aún cuando el tema presentado (plasmas físicos) es totalmente nuevo en este nivel.

Palabras clave: Plasmas Físicos, Enseñanza para la Comprensión.

Abstract

We present a didactic experience on the subject of physical plasmas developed with two different groups of UNAM's high school students. One with fourth grade students of the National Preparatory School campus # 8 Miguel E. Schulz and the other with students in the sixth semester of the College of Sciences and Humanities (CCH South), both in the morning shift. The experiment consisted in the implementation of a teaching sequence presented as a lesson plan in which we combine teamwork, performing experiments and discussion of ideas, all directed by the scheme of the didactic model "Teaching for Understanding. The results obtained at the end of the implementation of the proposal show that procedural, conceptual and attitudinal aspects evolve in a positive way, even when the topic presented (physical plasmas) is totally new to this level.

Keywords: Physical Plasmas, Teaching for Understanding.

PACS: 01.40.-d, 01.40.gb, 52.50.b

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Cada vez son más las nuevas tecnologías y por lo tanto también más los contenidos académicos que dan explicación a la forma de operación de los aparatos con estas tecnologías, los cuáles no son revisados en los diferentes colegios del país. Tratar de hacerlo implica un gran trabajo; en principio sería replantear los contenidos curriculares de alguna manera, o la forma en la cual se abordan los diferentes temas de los planes de estudio. Hacer lo anterior es necesario; pues se entiende que la educación y en particular la educación científica es uno de los caminos que contribuyen de manera importante en los procesos de mejoramiento de las personas y, por lo tanto de las sociedades.

Las transformaciones de los últimos años que tienden a reformar y fortalecer los planes y programas de estudio en diversos países y en particular en México, muestran que el

ámbito educativo está buscando con estos cambios promover el desarrollo de los estudiantes para dotarlos de las herramientas y los conocimientos, así como de las habilidades y valores que los eduquen para "aprender a aprender, aprender a hacer, aprender a vivir juntos y aprender a ser", los cuales se considera deben ser los ejes rectores que ordenen el proceso formativo durante la vida¹, de tal forma que sea posible la conformación de sociedades más justas, conscientes, y participativas.

Algunos estudios [1] señalan que la ciencia tal como se enseña actualmente, no resulta atractiva para los jóvenes. En México, la situación general respecto de la educación en ciencias en el nivel medio superior es un tema preocupante, pues los resultados obtenidos en las diferentes pruebas que

¹ Cuatro pilares de la educación según la UNESCO (1991).

evalúan las competencias necesarias para la vida actual en lectura, matemáticas y ciencias, no son los deseados; se observa que los estudiantes (alrededor del 50%), no están siendo preparados para una vida productiva y eficiente en la sociedad actual [2].

Nuestro país tiene muy pocos estudiantes en los niveles más altos (menos de 1%), lo que significa que los alumnos de mejores resultados no están obteniendo las competencias que se requieren para desarrollar puestos de alto nivel en los diversos ámbitos de la sociedad [3].

De acuerdo con la prueba ENLACE 2012 [4], en lo que se refiere a habilidades matemáticas un gran porcentaje de los estudiantes se encuentran con un nivel de dominio insuficiente o elemental; en consecuencia las ciencias (en particular física) no pueden estar mejor, pues existe entre ambas una interrelación temática y de desarrollo. Que suceda así, puede deberse a que generalmente los estudiantes en el nivel medio superior perciben la educación escolar como algo ajeno a su vida, lo aprecian como dos mundos diferentes, por un lado están las creencias y concepciones acerca de los fenómenos que observan en su contexto y por otro lado están las clases de ciencias que reciben en los colegios, donde se supone se estudia a la naturaleza en donde viven y los sucesos que ellos perciben.

Es necesario pensar y posiblemente replantear la manera de enseñar física para poder presentar una alternativa diferente, en la que el conocimiento escolarizado no esté descontextualizado, que no sea poco útil o poco motivante, que no esté centrada en contenidos declarativos y principalmente, que no haya una desconexión entre la teoría y la práctica [5].

“Desde hace tiempo, se ha visto la necesidad de incorporar a la enseñanza de las ciencias el estudio de los problemas y necesidades de la sociedad, a fin de que la escuela forme personas preparadas científicamente y tecnológicamente, que sean capaces de responder a las demandas de un mundo cada vez más tecnificado”.

La educación en las muchas etapas de la formación de un estudiante tiene propósitos diferentes, y en particular el nivel medio superior se puede considerar como una oportunidad para terminar de mejorar, los saberes fundamentales y de cultura general que un individuo debería manejar. En este punto, la educación científica es una de las vertientes imprescindibles que contribuyen con el entendimiento y cuidado de todo lo que se es, se hace o se piensa.

Si lo que se busca es formar ciudadanos capaces de solventar dificultades, habitantes consientes y sabedores de las complicadas situaciones que se aproximan; es necesario reconsiderar la dirección y meta a la cual se quiere llegar con la educación escolar. Si lo que se necesita es la transferencia de los conocimientos adquiridos en las aulas a situaciones reales que requieren de la aplicación de lo aprendido, es necesario afrontar y vivir tal escenario. Tal contexto, puede suceder e iniciar en las aulas y laboratorios [6], como lo muestra la secuencia didáctica aquí analizada.

En particular, el avance tecnológico ha evolucionado de manera muy rápida en las últimas décadas, lo que se puede

observar en nuestra forma de vida, tenemos como ejemplos cotidianos el uso de teléfonos celulares, los ipod, los iphone, las televisiones de plasma, las calculadoras solares, la comunicación por fibra óptica, los localizadores y muchas cosas más. De entrada conocemos y podemos utilizar estos aparatos, sin embargo ignoramos los principios físicos de su manera de funcionar.

El contenido y estructura de la propuesta se planteó como una secuencia didáctica que se exhibe como un plan de clase, la cual se rige por la interacción de los alumnos y dispositivos experimentales con características de plasmas físicos, la discusión, el análisis, la respuesta de cuestionarios, la retroalimentación y la metacognición constante; todo mediante el trabajo en equipos.

El contenido, es para el profesor y busca brindarle una propuesta práctica y clara para presentar el tema de estudio. La manera en la que se despliegan las actividades, los cuestionarios y los experimentos, están pensados para favorecer el aprendizaje significativo y la constante interacción entre alumnos y profesor².

Dado que el tema de plasmas no está considerado en ningún plan de estudios del Nivel Medio Superior del país y que su inclusión es por lo tanto totalmente nueva dentro del sistema; la propuesta se construyó a partir de casos cotidianos en lo que si bien no se consideran aspectos matemáticos, si se resaltan los aspectos físicos y cualitativos de los plasmas logrando así retomar directa o indirectamente varios de los temas de un curso intermedio de física.

II. SOBRE LA PROPUESTA

En el nivel medio superior en México, de acuerdo con diferentes programas de estudio³ se pretende una enseñanza que permita al estudiante modificar sus estructuras de pensamiento, mejorar sus procesos intelectuales y adquirir nuevos conocimientos útiles y actualizados del área en cuestión.

El último proceso de revisión de 1996 de los programas de estudio en la Escuela Nacional Preparatoria (ENP) y el Colegio de Ciencias y Humanidades (CCH), permitió que el nivel medio superior de la UNAM se actualizara significativamente. Por otra parte, aunque en algunos otros bachilleratos buscando complementar los conocimientos en ciencia se imparten de manera optativa las asignaturas de Física III y IV, el papel que cumplen es principalmente propedéutico y/o de profundización de temas ya vistos, lo cual no da espacio a que se puedan presentar temas relativamente nuevos o relevantes tecnológicamente hablando.

² Quien esté interesado en conocer o leer la propuesta, puede solicitarla a la dirección electrónica: honorato@unam.mx

³<http://www.cch.unam.mx/programasestudio/>,
<http://dgenp.unam.mx/planesdeestudio/>,
<http://www.bachilleratosead.net/sitio/html/planh02.html>,
<http://www.cbti65.edu.mx/planes.html>,
http://www.dgeti.sep.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=263&Itemid=665.

Particularmente, el contenido de Plasmas no aparece explícitamente en los temarios de física de los diferentes bachilleratos de nuestro país y en general; no aparece en los temarios de física de los colegios de nivel medio superior de la UNAM⁴, sin embargo puede ser considerado.

Desarrollar el tema de plasmas físicos para nivel medio superior, fue básicamente por tres causas principales:

- Está ausente en la mayoría de los programas de estudio del país de nivel medio superior. No se considera aunque los alumnos preguntan sobre él desde la secundaria.
- Es generalmente desconocido por los estudiantes de nivel medio superior, así como por la mayoría de personas adultas.
- Se buscó trabajar en algo relativamente no muy tratado en México en este nivel⁵, pero que está presente en la tecnología utilizada diariamente.

El tema es interesante y en nuestro país novedoso, pero además permite presentar a los estudiantes y recordar a los profesores, que la física en principio, es una ciencia de carácter experimental, que está relacionada con el mundo en que vivimos y que no es algo puramente abstracto y sin relación con la naturaleza [7].

La enseñanza del tema permite entender y conocer aplicaciones tecnológicas cada vez más cotidianas y variadas, y en general ayuda a una más detallada descripción cualitativa del universo en que vivimos (el 99% del universo es un plasma) [8]. Un conocimiento básico de este tema es fundamental para el enriquecimiento de la cultura general de las personas.

III. MARCO TEÓRICO

La reflexión sobre las propuestas de enseñanza y aprendizaje de las ciencias experimentales y los resultados académicos de aprovechamiento obtenidos en cada una de ellas, induce a buscar un modelo coherente entre la teoría, la práctica y el ambiente de trabajo, que optimice y asuma los aspectos de planificación y desarrollo, y sea consecuente al mismo tiempo con la forma de aprender de quienes van a construir el nuevo conocimiento. Hoy en día, existen varias propuestas que consideran diferentes modelos didácticos, cuyas características son particulares y responden a diferentes planteamientos. Se tiene el modelo didáctico tradicional, el didáctico tecnológico, el didáctico alternativo, el comunicativo-interactivo, el activo situado, el colaborativo, el de enseñar para la comprensión y varios más.

En esta propuesta, se considera la implementación y el desarrollo del modelo didáctico de perfil constructivista:

Enseñar para la Comprensión [9,10], con el cual se busca contribuir al logro de aprendizajes significativos en los alumnos que estudien alguno de los temas de Física como puede ser el tema de “Plasmas”. Se eligió el modelo de enseñar para la comprensión por su estructura y finalidad, pues considera el comprender, promueve el aprendizaje, el pensamiento y la creatividad. Da oportunidades para rehacer el trabajo una y otra vez y la evaluación de lo aprendido es constante y hecha por el mismo estudiante y sus compañeros.

El modelo didáctico “Enseñar para la Comprensión”, consta de cinco elementos que se respaldan en la corriente filosófica llamada “Aprender Haciendo” [11]: Hilos conductores, Tópicos generativos, Metas de comprensión, Desempeños de comprensión, y Evaluación diagnóstica continua⁶. De forma general, establece el modo en el cual se aprende de manera factible, ordenada y sistemática.

Un grupo de investigadores colaboradores del proyecto conocido como “*Projet Zero*” de la Universidad de Harvard, desarrolló el marco conceptual de “Enseñanza para la Comprensión” (EpC). El trabajo fue el resultado de un proyecto de colaboración directa entre investigadores y docentes que tomó bases teóricas desarrolladas por investigadores del mismo *Project Zero* como: David Perkins, Howard Gardner, Vito Perrone, S.J Bruner, R. F. Elmore, y M. W. McLaughlin [9].

“El aprendizaje para la comprensión se produce por medio de un compromiso reflexivo con desempeños de comprensión que se presenta como un desafío. Estos desempeños siempre se producen a partir de comprensiones previas y de la nueva información ofrecida por el entorno institucional. Aprender para la comprensión exige una cadena de desempeños de comprensión, de variedad y complejidad creciente; es pensar y actuar a partir de los conocimientos previos que el individuo tiene y de la nueva información y experiencias propuestas por el contexto institucional y social.”

No se comprende solo cuando se escucha a otro o al informarse, aunque estas acciones puedan resultar útiles en distintos momentos del proceso de comprensión; siempre la comprensión de un tema implica la elaboración de acciones de *comprensión*, es decir; la parte central del aprendizaje para la comprensión debe ser la realización de dichas acciones [12].

La Enseñanza para la Comprensión considera de principio que los estudiantes siempre tienen alguna idea sobre aquello que se desea que comprendan, aunque tales ideas intuitivas sean preconceptos que los estudiantes poseen de su entorno y de la manera que este funciona [13]. La enseñanza para la comprensión por su estructura, se considera un *enfoque constructivista* [14], que comparte con otros enfoques la idea con respecto a la construcción de

⁴ Programas de Estudio de Física I a IV, Área de Ciencias Experimentales, Colegio de Ciencias y Humanidades; Universidad Nacional Autónoma de México. Programas de Estudio de Física I a IV, Área I, Escuela Nacional Preparatoria; Universidad Nacional Autónoma de México.

⁵ La mayoría de los libros de texto de física sugerido como bibliografía básica en los programas de estudio y utilizado por los diferentes colegios de nivel medio superior en nuestro país, no tratan el tema de plasmas físicos; algunos ni siquiera lo mencionan.

Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 8, No. 1, March 2014

⁶ La evaluación diagnóstica continua, se refiere a la consideración y comparación del estatus inicial de conocimientos, actitudes o cualquier elemento a evaluar de un alumno, con respecto al que tenga en un momento determinado en el proceso de enseñanza y aprendizaje. Tal comparación se debe llevar a cabo durante toda la actividad y busca colocar al individuo en su zona de desarrollo próximo.

los conceptos que internaliza quien aprende, pero su aporte particular consiste en *conceptualizar los desempeños* que permiten tal construcción.

La enseñanza para la comprensión (EpC) tiene como herramienta básica el compromiso con la metacognición [15, 16], es decir, el proceso de pensar sobre la propia comprensión que se produce a través de un acto reflexivo e intencional. Responde fundamentalmente a tres preguntas:

1. ¿Qué es lo que realmente se quiere que los alumnos comprendan?
2. ¿Cómo se sabe que los alumnos comprenden?
3. ¿Cómo saben ellos que comprenden?

La primera pregunta se resuelve a través de tres elementos fundamentales de la propuesta: *hilos conductores, tópicos generativos y metas de comprensión*. Las dos últimas interrogantes dan lugar a los otros elementos de la propuesta: *desempeños de comprensión y evaluación diagnóstica continua*.

En particular para la propuesta planteada, se hace una descripción detallada de cada uno de estos elementos en la sección llamada implementación.

IV. METODOLOGÍA

El desarrollo de esta propuesta se llevó a cabo en dos etapas: la etapa de instrumentación y la de implementación.

La selección del material a considerar fue modificado paulatinamente hasta quedar en lo aplicado a los estudiantes de cuarto año de la Escuela Nacional Preparatoria del plantel # 8 Miguel E. Schulz del turno matutino; así como con a los estudiantes de sexto semestre del turno matutino del Colegio de Ciencias y Humanidades (CCH-Sur).

Tras la interacción con ambas poblaciones de estudiantes y el trabajo con la secuencia didáctica, la planeación de la presentación del tema de plasmas se proyectó finalmente para un total de seis sesiones de 50 minutos de clase presencial; más cuatro adicionales para resolver tareas y cuestionarios en casa.

A. Instrumentación

La instrumentación de la propuesta se llevó a cabo considerando entre otros, los siguientes elementos: *Estilos de aprendizaje de los alumnos, trabajo en equipo y conocimientos previos sobre electromagnetismo*. Lo cual definió la manera de trabajar con los diferentes grupos.

Por otra parte, la cantidad de material considerado referente al contenido de plasmas dentro de la secuencia didáctica, se determinó con base a que el tema es relativamente desconocido por los estudiantes de nivel medio superior, así como por la mayoría de personas adultas. Es decir, se consideró necesario presentar como primer paso *una introducción al conocimiento de los plasmas desde una perspectiva cualitativa*, y hacerlo de una manera que permita a los estudiantes y recuerde a los

profesores que la física en principio *es una ciencia de carácter experimental*, que está relacionada con el mundo en que vivimos y que no es algo puramente abstracto y sin relación con la naturaleza; además, que un conocimiento básico de este tema es fundamental para la cultura general de las personas.

Básicamente, el contenido considerado es el siguiente:

- Importancia del concepto de plasma y lugares en el universo en donde hay plasmas.
- Descripción de los aspectos físicos básicos de los plasmas.
- Discusión y análisis de los efectos físicos relevantes en los plasmas.
- Entendimiento de la generación de los plasmas desde el punto de vista físico.
- Diferentes tipos de plasmas.
- Conocimiento y comparación de las diferentes aplicaciones tecnológicas.

A1. Estilos de Aprendizaje

Con el fin de optimizar desde un punto de vista pedagógico la planeación y diseño de la secuencia didáctica; se aplicó a los estudiantes el test de *Estilos de Aprendizaje* de Honey-Alonso. Dicho test es anónimo [17, 18]. Este test, permite conocer la manera predominante de aprender de los estudiantes con los que se trabaja, y define y/o determina con un sustento más, la planeación de los diversos elementos de la secuencia didáctica.

De acuerdo con el test, las personas pueden ser asociadas con algún estilo según la siguiente descripción: Estilo Activo, Estilo Reflexivo, Estilo Teórico y Estilo Pragmático.

A1.1. Resultados del cuestionario CHAEA

(Cuestionario Honey-Alonso sobre Estilos de Aprendizaje)

Los resultados del test aplicado permiten al docente definir cuál es la manera predominante de aprender de los alumnos de cada grupo. Así como de entender mejor los comportamientos, las actitudes y las respuestas que cada alumno puede dar a las actividades realizadas, logrando con ello una mejor evaluación.

Es importante notar que con la aplicación de este test se determina normalmente el estilo *predominante* de aprender de cada individuo, lo que no descarta la presencia en menor o igual porcentaje de los demás estilos.

En particular, la población de estudiantes con la que se trabajó tuvo un estilo de aprendizaje predominantemente reflexivo. En el caso del CCH-Sur, el estilo reflexivo y el pragmático tuvieron un mismo porcentaje, seguido por el teórico, y con menor presencia el activo. Para la ENP el estilo activo ocupó el segundo lugar, seguido por el práctico y al final el teórico.

Lo anterior muestra claramente la presencia de todos los estilos de aprendizaje, lo que indica que una planeación adecuada debería considerar variedad en las actividades a realizar.

A2. Trabajo en equipo

Los grupos se dividieron en equipos de cuatro integrantes por dos razones principales. La primera es referente a la cantidad de equipos experimentales disponibles para trabajar, y la segunda tiene que ver con el control general.

El número de dispositivos experimentales disponibles para llevar a cabo la clase era limitado, lo cual obligó a organizar el material como lo muestra la secuencia didáctica definitiva.

Sobre el control de grupo, se sabe que tener equipos permite dar instrucciones particulares y tener más atención de cada uno de los alumnos, estimula la participación activa y se logra observar con mayor claridad el comportamiento y actitud personal de cada estudiante. Además, ayuda a producir conocimiento desde el principio mediante la interacción entre pares y estimula el desarrollo del pensamiento reflexivo, la comunicación y socialización del pensamiento, la formulación de juicios, la distinción de valores y la apreciación de la opinión del otro. Asimismo, para aquellos alumnos que presentan problemas de aprendizaje y que en un contexto de clase tradicional corren el riesgo de salir mal; con esta metodología (trabajo en equipos), se les facilita la creación de estructuras que favorecen el desarrollo cognitivo. Formar parte de un grupo les permite superar sus propias deficiencias e inseguridades así como mejorar sus posibilidades de cara al futuro, pues el trabajo grupal *"tiene efectos que podrían considerarse terapéuticos sobre los alumnos que han desarrollado un patrón motivacional de miedo al fracaso"* [19].

Considerando lo anterior, se permitió que los equipos fueran formados por los alumnos según criterios propios.

A3. Conocimientos previos sobre electromagnetismo

Para determinar cuánto saben los estudiantes sobre los conocimientos básicos necesarios para entender la física desde un punto de vista *cualitativo* del tema de plasma, se aplicó un cuestionario de preguntas abiertas. A los alumnos que no tenían los conceptos claros, se les recordó la definición y el significado cualitativo mediante un análisis de las respuestas dadas, contestando en grupo y guiados por el profesor.

El cuestionario tenía como objetivos lograr que el alumno recuerde, escriba y asocie conceptos previos de física que están relacionados con el tema de plasmas, así como, que participe en un análisis dentro del salón de clase sobre los temas de estudio. Por otro lado, el objetivo operativo de la aplicación de tal cuestionario, era el de determinar el nivel conceptual y epistemológico del cual partir en el estudio del tema de plasmas.

A3.1. Resultados del Cuestionario Diagnóstico

- La mayoría de los alumnos conocen la definición de campo eléctrico y magnético pero no les queda clara la idea conceptual.

- Entienden lo que es un ion y pueden explicar cuál es su característica principal, sin embargo no distinguen claramente entre la ionización y la excitación.
- Muchos alumnos desconocen o no les es posible mencionar las propiedades físicas de la luz. Tampoco conocen la manera de generar ondas electromagnéticas.
- Los alumnos pueden decir que es un imán y cuáles son sus características, pero utilizan el concepto de metal indistintamente. Expresan que los imanes pueden atraer a cualquier *metal*.
- El concepto de vacío de *materia* es adecuadamente manejado.
- Más del 90% de los alumnos no manejan el concepto de potencial eléctrico. Tampoco el de diferencia de potencial.
- El modelo atómico de Bohr es bien conocido.

De la información obtenida mediante el cuestionario diagnóstico, se desprende que era necesario llevar a cabo una revisión de algunos de los conceptos examinados para poder seguir adelante en la aplicación de la secuencia didáctica de plasmas. Se trabajó con todos los conceptos, pero en particular se hizo con el concepto de excitación y su diferencia con la ionización. Así mismo, se aclaró la manera en la que se pueden generar ondas electromagnéticas y cuáles son sus principales características. Finalmente, se explicó lo que es el potencial y su diferencia y se aclaró experimentalmente que los imanes no atraen a todos los metales.

B. Implementación

Se describe la forma en la cual se llevó a cabo la implementación final de la secuencia didáctica propuesta.

Dado que el modelo didáctico EpC observa cierta estructura para su aplicación, se detalla a continuación cada uno de los componentes y su respectivo elemento de aplicación utilizado en la secuencia didáctica.

Los *hilos conductores* elegidos son cuatro y se presentan a manera de preguntas:

- ¿Qué es un plasma físico y cuáles son sus características?
- ¿Cómo se puede generar un plasma?
- ¿Existen los plasmas en el universo?
- ¿Se utilizan los plasmas en el hogar? Y ¿en la tecnología?

El *tópico generativo* es el tema principal: los Plasmas Físicos.

Las *metas de comprensión* que deben ser alcanzadas por los alumnos son varias (13); están ordenadas por clase (primera, segunda y tercer clase) y se pueden observar en la secuencia didáctica. Van desde recordar y relacionar conceptos, hasta explicar fenómenos naturales y tecnología utilizada que se relacionen con el tema de estudio.

Durante el desarrollo de la propuesta y por sesión, se presentan de forma estratégica las *actividades de enseñanza* seguidas por el profesor, así como las *actividades de aprendizaje* efectuadas por los estudiantes, y en las cuáles se describen los *desempeños de comprensión* que los

alumnos deben realizar para demostrar y construir el entendimiento de las Metas de Comprensión.

Sobre las actividades de aprendizaje son variadas, van desde trabajar con dispositivos experimentales y responder cuestionarios, hasta escribir un ensayo. Las preguntas que constituyen a los cuestionarios son de diferentes tipos, hay de tipo conceptual, en estas los alumnos describen y tratan de explicar la idea relativa a algún concepto; también las hay de aplicación de ideas y de demostración de lo comprendido. Para las segundas, el intervalo de respuestas posibles es muy amplio y puede ser enfocado de diferentes maneras por cada estudiante, por lo que no hay una sola respuesta determinada y queda a criterio del profesor los comentarios posibles. Sobre las últimas, referente a la demostración de lo comprendido, se da la respuesta esperada a las preguntas planteadas en los cuestionarios de cada una de las actividades sugeridas. Tal respuesta se presenta en los anexos correspondientes de la secuencia didáctica.

En cada uno de ellos se describe de manera detallada los siguientes puntos para cada experimento propuesto:

1. Teoría del experimento.
2. Descripción del experimento propuesto.
3. Respuestas del cuestionario sugerido.
4. Bibliografía.

Es importante comentar que la teoría necesaria para responder los cuestionarios, exponer adecuadamente el contenido presente y guiar a los estudiantes durante el avance de la secuencia didáctica, se encuentra en los libros de texto y artículos de divulgación sugeridos [8, 20, 21, 22].

Dado que la secuencia tiene un enfoque apoyado en el *aprender haciendo*, la evaluación del aprendizaje se basa en criterios que son públicos y se conectan visiblemente con las Metas de Comprensión, es formal e informal y se observa al realizar los Desempeños de Comprensión. Cuenta con diferentes fuentes de retroalimentación (docentes, pares, el estudiante mismo) y algo muy importante; muestra el progreso y ofrece información para una futura planeación, logrando así ser una *evaluación diagnóstica continua*.

IV. RESULTADOS

Dado el tamaño de la muestra y el tiempo de aplicación de la propuesta, los resultados obtenidos son cualitativos y cuando más se pudieron observar tendencias generales de la mayoría y en algunos casos porcentajes de participación. Se analizan en función de cuatro diferentes puntos: Enseñanza para la Comprensión, Estilos de Aprendizaje, Trabajo en equipos y Avance conceptual.

A. Enseñanza para la Comprensión

Sobre el aspecto psicopedagógico y didáctico; el modelo Enseñanza para la Comprensión permite motivar a los estudiantes y acompañarlos en el proceso de educación, conocer la ubicación en la cual se encuentran respecto de su

avance y aprovechamiento, da las herramientas necesarias para establecer la planeación de lo que los alumnos deben realizar para lograr alcanzar las metas de comprensión y se consigue la formación integral de los estudiantes, pues en cada actividad se busca esté presente la metacognición. Considera la inclusión de los tres diferentes tipos de contenidos; el actitudinal, el declarativo y el procedimental de manera natural y promueve la investigación.

Este modelo por su estructura ayuda al profesor a tener mayor dominio de la materia en el salón y a tomar en cuenta entre otras cosas, las transformaciones en la disciplina, el conocimiento en su dimensión cultural y tecnológica, y el manejo de extensiones éticas como los valores y la actitud.

El modelo es muy flexible, y por lo tanto no necesariamente se deben de encasillar las cosas y seguir un desarrollo lineal de cada uno de sus componentes. Puede ser adaptado, y por lo mismo considerado en cualquier área de la enseñanza, pues da margen a trabajar con él de manera abierta y sistemática.

Desde el punto de vista disciplinario, el modelo permite a los estudiantes comprender, aprender y retener de manera significativa los conceptos básicos tratados, así como reconsiderar sus ideas previas y analizarlas a la luz de la experimentación en el trabajo con sus pares, logrando con ello una constante retroalimentación y crecimiento académico y personal.

Finalmente, desde la perspectiva socio-educativa, se logra que los alumnos tengan la habilidad de apoyar al conocimiento y de construirlo, en lugar de solo memorizar datos, procedimientos y fórmulas. Ayuda a que den sentido a lo observado, a que comprendan las relaciones que existen entre los experimentos y los conceptos; que razonen reflexivamente para poder determinar analogías, y a obtener conclusiones generales de situaciones en otros contextos, todo ello a partir de ideas y actitudes específicas aprendidas en las aulas.

Asimismo, es importante destacar que el trabajo en equipos, frente a grupo y de un tema que casi nadie conocía; permitió en los estudiantes la relativa libertad de expresión de ideas, generando en ellos el desarrollo de una actitud crítica, de responsabilidad y principalmente de compromiso.

B. Estilos de aprendizaje

Es importante comentar que los grupos con los que se trabajó, de acuerdo con el cuestionario CHAEA tenían una inclinación hacia el estilo de aprendizaje reflexivo, aunque también se observa que no solamente tienen uno, sino que están presentes los demás; lo que permitió que las diferentes actividades realizadas durante el desarrollo de la secuencia fueran bien aprovechadas, productivas e interesantes.

En general, en las clases se tienen alumnos con diferentes formas de aprender y aunque en este caso predomina el estilo reflexivo, lo cual sirve como un punto de referencia; siempre es importante considerar una propuesta que involucre una multitud variada de actividades

C. Trabajo en equipos y realización de experimentos

de enseñanza así como de aprendizaje, tratando de lograr que las clases sean interactivas y benéficas para todos.

Durante la aplicación de esta propuesta se notó claramente la diferencia de los distintos estilos de aprendizaje de los alumnos, los cuales, definieron la manera en la que impactó y funcionó en ellos la aplicación de esta propuesta. Hubo alumnos que estuvieron aparentemente muy cómodos y participativos durante la realización de los experimentos, y no tanto cuando tenían que ser espectadores; hubo otros que se desenvolvieron muy bien cuando hicieron las presentaciones de los resultados encontrados, pero no participaban mucho en la realización de los experimentos. También se observó a algunos alumnos que no participaban mucho en la realización de experimentos y tampoco en las presentaciones públicas de resultados, pero comentaban discretamente sus observaciones con algunos compañeros para que ellos las dijeran al grupo o indicaban que era lo que se podía hacer para observar algún fenómeno de su interés. Se notó también a algunos alumnos que buscaban hacer todas y cada una de las actividades y querían estar siempre supervisando lo que los demás hacían.

Dado que la respuesta a la aplicación de los cuestionarios que permite determinar los distintos estilos de aprendizaje fue anónima, no se pudo contrastar y confirmar qué alumno tiene qué comportamiento según su estilo de aprendizaje. Sin embargo se notó (por grupo) que prevalecía un estilo de aprendizaje determinado (el reflexivo), lo cual se manifestó al observar las respuestas dadas a los cuestionarios.

De las preguntas planteadas en cada uno de ellos, algunas se resuelven dando una descripción de los experimentos, o haciendo alguna actividad y observando, otras mediante la aplicación de conceptos y recurriendo a la teoría conocida, las cuales de manera general fueron correctas. También están las preguntas número cuatro de cada uno de los cuestionarios, en estas se pidió según la actividad experimental propuesta, una respuesta clara que dé explicación al acontecimiento físico que estaban presenciando. Para contestarla correctamente, los alumnos necesitaban observar y reflexionar, analizar detalladamente las diferentes características del fenómeno y tratar de entender lo que podría estar ocurriendo. Esta pregunta fue contestada correctamente por la mayoría de los alumnos y permite considerar según la dificultad de las respuestas que el grupo en general tenía un estilo de aprendizaje reflexivo.

Por otra parte, algo muy notorio durante la realización de esta propuesta y que permite afirmar que el integrar diferentes actividades y acciones para la optimización del aprendizaje de los alumnos los cuales tienen diferentes estilos de aprendizaje es muy importante, fue que en las respuestas dadas a los cuestionarios, en la participación de la presentación final y en la realización del ensayo, la respuesta de los alumnos fue en general muy buena y positiva. Lo cual hace ver que en definitiva cada alumno puede ser motivado a aprender un mismo tema con una actividad diferente, según su estilo de aprendizaje y su personalidad.

En cada equipo de trabajo, se observó el acomodo de los estudiantes al rol que más se acoplaban; se notó el estudiante que fungía como coordinador y organizaba, el que tomaba nota y hacía preguntas, el que hacía una y otra vez el experimento, y finalmente el que participaba con todos. También, por ser equipos de cuatro personas se notó en algunos de ellos que un elemento no sabía qué hacer y de qué manera contribuir, convirtiéndose por algunos momentos en sólo un espectador. Tal situación se resolvió al pedirles a los estudiantes en cuestión que cambiaran la actividad que desarrollaban dentro del equipo y llevaran a cabo una diferente.

Sobre la implementación y realización de los experimentos específicos por equipos, casi todos los estudiantes los llevaron a cabo sin ningún conflicto aparente y participaron activamente. Algunos equipos presentaban actitudes de leve resistencia a la realización de los experimentos y al uso de los dispositivos, no sabían que considerar o anotar cuando efectuaban las actividades y les costaba trabajo determinar qué era lo importante de su actividad. Fue hasta que se les dio el cuestionario a contestar referente a su experimento, que se observó se conducían con interés, de manera activa y buscando en particular obtener las respuestas que se les pedían, obteniendo con ello no solo lo pedido sino además explicaciones a algunos aspectos de los experimentos de sus compañeros.

Las presentaciones de sus observaciones las hicieron de forma clara frente al grupo, y estaban dispuestos a responder lo que podían según lo que entendían. Las respuestas de los cuestionarios de cada experimento, fueron entregadas sin falta y no solo con lo visto en clase, sino con información nueva y conceptualmente correcta.

De manera general, la organización por equipos permitió a los estudiantes integrarse a la realización de una actividad particular, la cual impulsó la colaboración entre ellos y que desarrollaran una actitud de compañerismo, respeto y responsabilidad.

Por otra parte, al profesor facilitó por un lado el control del grupo, y por otro la identificación y manejo de los alumnos que parecía no estaban motivados y requerían de un estímulo extra para integrarse y participar activamente en clase. Sin embargo, aunque las actividades en equipo permitieron un aprendizaje en conjunto fuertemente enriquecedor para todos los integrantes debido a que cada nueva propuesta es explorada y enriquecida por varias ideas, diferentes mentes y muchas historias distintas unas de las otras; el trabajo de orientación (realizado por el profesor) requirió de más paciencia y tiempo, pues se deben de escuchar todas las opiniones y considerar las múltiples respuestas que generalmente siempre son en parte correctas.

D. Avance conceptual

En general, los resultados que aquí se comentan se apoyan en la interpretación cualitativa de la información obtenida

de los materiales de evaluación (cuestionarios, realización de experimentos, comentarios y escritura del ensayo).

Por ser un tema totalmente nuevo en el programa de estudios del nivel medio superior del país, los estudiantes consideraban que no tenían conocimientos previos relativos al tema de plasmas como tal; sin embargo los alumnos expresaron algunas ideas de éste que tenía una gran relación con el tema.

Durante la realización del experimento demostrativo llevado a cabo por el profesor, los estudiantes reunidos por equipos tenían una actitud participativa, preguntaban, hacían comentarios y expresaban hipótesis sobre lo que creían que pasaría o pasaba al realizar algún cambio. Las hipótesis planteadas tenían que ver con sus experiencias con la electricidad. A continuación se presentan.

- *Cuando se aplique la diferencia de potencial en las terminales del dispositivo experimental, se generaran descargas eléctricas entre ellas y la superficie del dispositivo.*
- *Se escuchará un zumbido como el que caracteriza a los cables de las torres de alta tensión.*
- *Si acercamos nuestras manos o algún objeto, se verá un rayo que va de las terminales hacia el objeto.*
- *No pasará nada.*

Ningún estudiante pudo predecir la emisión de luz por el dispositivo al aplicarle la diferencia de potencial y después de haber hecho un vacío relativo. Los estudiantes se sorprendieron mucho cuando se generó la luz del plasma debido a que no se tenía un circuito cerrado. Respecto del movimiento de la luz generada en el experimento al acercar un imán de alta intensidad, solo cinco estudiantes pudieron describir de entrada cual es la razón por la que aparentemente parece que es movida. Cuando se dio la explicación de la razón física de estos fenómenos, se pudo notar que el trabajo de las explicaciones al cuestionario diagnóstico permitió a los estudiantes comprender mejor que es lo que estaba pasando y les ayudó a poder expresar sus ideas utilizando conceptos como: ionización, voltaje, vacío, ondas electromagnéticas y excitación.

Este experimento definitivamente hizo que los estudiantes utilizaran los conceptos que se habían repasado y permitió que se dieran cuenta de su aplicación y significado físico, consiguiendo con ello que tuvieran un punto de asociación y el andamiaje de conocimientos se reforzara cuando dieron explicaciones particulares a los experimentos que cada equipo realizó.

Las respuestas correspondientes dadas a cada cuestionario según la actividad experimental que realizaron, en general fueron buenas, tenían un sustento físico y se notó que habían investigado en diferentes fuentes.

Para el experimento de la esfera de plasma, fue muy significativa la discusión que se generó para dar respuesta a la pregunta número cuatro: ¿De qué depende que la luz que emite la esfera de plasma sea de diferente color?

Los estudiantes consideraron diferentes experiencias (el plasma de aire) y los dispositivos que estaban manejando sus compañeros (lámpara ahorradora). Consultaron manuales de operación y especificaciones de fabricación. Algunos alumnos, lograron argumentar utilizando el

concepto de energía de ionización de cada elemento y la frecuencia de emisión de luz según los niveles atómicos.

Por otra parte, para el experimento de la flama del mechero de Bunsen lo que más les llamó la atención fue el movimiento de la flama cuando se somete a una diferencia de potencial. De entrada creían que no pasaría nada, sin embargo al ver lo que ocurría iniciaron con la formulación de hipótesis. Pensaron en campos magnéticos dado el comportamiento aparente de atracción y repulsión, sin embargo fueron desechados como tal al darse cuenta que no atraía un trozo de fierro colgado de una madera. Consideraron la definición de potencial eléctrico y lograron deducir entonces que una flama está formada en parte por iones.

Para el experimento de la lámpara ahorradora, les interesó mucho (quizá porque ya lo habían visto) que la lámpara se prendiera al acercarla a la esfera de plasma; sin embargo se sorprendieron mucho de que pasara lo mismo cuando observaron que no importaba el tamaño de la lámpara, o que se pusieran más de una, cerca de la esfera de plasma.

Por un lado, tras investigar el funcionamiento de estas lámparas pudieron dar repuesta al porque sucedía así, y por otro, lograron hacer uso y aplicación adecuado del Principio de Conservación de la energía, entendiendo que para que las lámparas emitieran energía en forma de luz, debían de estarla usando y obteniendo de algún otro lugar.

Respecto del experimento del tubo de Lenz, fue muy notorio que los alumnos pudieran responder adecuadamente a la pregunta número cuatro del cuestionario correspondiente. Utilizaron la Ley de Faraday, así como la de Ampere, y trataron de dar una explicación del por qué sucedía lo que observaron.

Finalmente, en la presentación del tema “Plasmas en el universo” llevada a cabo por el profesor, los estudiantes prestaron atención y tomaban nota de lo que les interesaba, hicieron comentarios, preguntas, y buscaban responder a lo que se les cuestionaba.

Sobre la escritura del ensayo relativo al tema de plasmas que se les solicitó y guiados por las ideas principales a considerar que se les indicaron; se podría decir que hicieron un trabajo adecuado, los conceptos nuevos que se trabajaron estaban presentes y en su gran mayoría con suficiente claridad. No se podría afirmar algo a favor o en contra, pues el tema se acababa de presentar; pero por otra parte, se les solicitó un trabajo que requirió de gran esfuerzo, en el cual debían de ordenar sus ideas, entender lo que querían decir, escribirlo correctamente y hacerlo al momento.

V. CONCLUSIONES

Con esta experiencia se puede afirmar que una secuencia como la aquí presentada, orientada por la interpretación constructivista y regida por la propuesta didáctica “Enseñanza para la Comprensión”, ayuda, apoya y guía adecuadamente a los docentes en el trabajo diario dentro de las aulas, y permite a los estudiantes colocarse en su zona

de confort y de desarrollo próximo [23]; aún con un tema totalmente nuevo y desconocido para ellos.

Es significativo destacar que las actividades experimentales tienen un valor e importancia muy amplio dentro de la enseñanza de las ciencias, y se da uno cuenta de ello al analizar el desarrollo y actitud de los alumnos tanto en las actividades experimentales como en las de resolución de cuestionarios que solicitan teoría.

Al realizar los experimentos, los alumnos valoran mucho más el trabajo llevado a cabo por ellos mismos y la ejecución de lo que ellos deciden relativo al tema, que los que se les impone o indica y no les interesa. Es trascendental entender, que el laboratorio, la realización de experimentos, la discusión y análisis de ellos por parte de los alumnos guiados por el profesor; son indispensables para un buen inicio del aprendizaje y la comprensión.

En general, se concluye que la propuesta didáctica presentada, impacta positivamente en el proceso de aprendizaje de los alumnos, y permite al profesor ubicar a los estudiantes que requieren de algún tipo ayuda.

Se puede afirmar que la situación en la cual se halla la enseñanza de las ciencias, no encuentra dificultades y complicaciones insalvables en los contenidos, o en la manera en la que son organizados e introducidos a los estudiantes; sino en la forma en cómo se enseñan. Prueba de esta afirmación, fueron las respuestas dadas por los estudiantes a las diferentes actividades planteadas.

Es fundamental por tanto, identificar los aciertos y errores durante el quehacer diario con los alumnos como un primer paso para avanzar hacia la transformación de la labor docente, así como de la forma de involucrarse en el proceso educativo. La problemática asociada con el aprendizaje y la enseñanza, requiere indispensablemente de una aproximación a diversas áreas del conocimiento humano como son la pedagogía, la psicología, la epistemología, la didáctica, los aspectos disciplinares, las implicaciones sociales, etcétera; de tal manera que ello permita entender al docente las experiencias que vive el alumno cuando se involucra en cualquier actividad de aprendizaje. Que la enseñanza de la física se realice de diferentes maneras pero con características que proyecten a la materia como algo teórico o como fuera del contexto de lo cotidiano y sin aplicación real, ya no tiene cabida en la enseñanza. Las asignaturas de ciencias deben ser impartidas con un enfoque consideré la parte experimental, así como la pluralidad de modalidades de enseñanza y aprendizaje.

Una visión multidisciplinaria, indudablemente ayudará al docente a reconocer que su papel ya no puede limitarse a pedir a los alumnos que reproduzcan los contenidos del programa curricular, sino que debe asumir su papel de acompañante a través del camino cognitivo que permita a los aprendices lograr avances importantes en la construcción de nuevos saberes, en donde ellos tengan una participación activa en ese proceso constructivo.

Por otra parte, para que la eficiencia de aprendizaje en toda actividad incrementalmente, se requiere del interés por aprender de los alumnos, interés que de alguna manera promueve y motiva el profesor con la planeación adecuada y multifactorial que realiza. Se necesita pues de un

Enseñanza de plasmas físicos en el nivel medio superior compromiso entre las dos partes donde prevalezca la cooperación y comunicación, amable, respetuosa y motivada [24].

REFERENCIAS

- [1] Rocard, M., Csermely, P., Jorde, D., Lenzen, D., Walberg-Henriksson, H., e Hemmo, V. http://www.oei.es/salactsi/Informe_Rocard.pdf, Consultado el 10 de Agosto de 2010.
- [2] www.journals.unam.mx/index.php. Consultado el 16 de Agosto de 2010.
- [3] U.S. Department of Education, *The Final Report of the National Mathematics Advisory Panel*, (2008).
- [4] http://www.enlace.sep.gob.mx/ms/informes_de_resultados. Consultado el 06 de Enero de 2012.
- [5] Díaz Barriga, F., *Enseñanza situada: Vínculo entre la escuela y la vida*, (Mc Graw Hill. México, 2006).
- [6] Peralta, J. A., *Los signos, la enseñanza, la historia*, Lat. Am. J. Phys. Educ. **6**, 655 - 660 (2012)
- [7] Newman, R. J., *El mundo de las matemáticas*, Vol. 5, (Grijalbo, España, 1980).
- [8] Bravo S., *Plasmas en todas partes*, (FCE, Colección La Ciencia desde México, México, 2001).
- [9] Pogrè, P., *Escuelas que enseñan a pensar: enseñanza para la comprensión, un marco teórico para la acción*, 1ª Ed, (Colihue, Buenos Aires, 2004).
- [10] Stone W. M., *Enseñanza para la Comprensión, Vinculación entre la investigación y la práctica*, (Paidós, Buenos Aires, 1999).
- [11] Brubacher, J. S., John Dewey. En: J. Château (dir). *Los Grandes Pedagogos*. (Fondo de Cultura Económica, México, 2000).
- [12] Perkins, D. & Blythe, T. *Putting understanding up front*. Educational Leadership **51**, 4-7 (1994).
- [13] Campanario, J. M. y Otero, J. *Más allá de las ideas previas como dificultades de aprendizaje: las pautas de pensamiento, las concepciones epistemológicas y las estrategias metacognitivas de los alumnos de ciencias*, Enseñanzas de las Ciencias **18**, 155-169 (2000).
- [14] Carretero, M., *Constructivismo y educación*, (Luis Vives, España, 1993).
- [15] Sanjurjo, L. O., La metacognición: Un concepto estructurante para la didáctica. En *Fundamentos psicológicos de una didáctica operativa*, Aebli, H., Colussi, G. y Sanjurjo, L., (Homo Sapiens, Buenos Aires, 1995). Cap. III, pp. 77-93.
- [16] Colussi, G., Las investigaciones en metacognición. Reconsideraciones teóricas. En *Fundamentos psicológicos de una didáctica operativa*. Aebli, H., Colussi, G. y Sanjurjo, L. (Homo Sapiens, Buenos Aires, 1995). Cap. III, pp. 77-93.
- [17] Alonso C. M., Gallego D.J. y Honey P. *Estilos de Aprendizaje. Procedimientos de diagnóstico y mejora*. Universidad de Deusto. Edit. Mensajero. Bilbao, 1999.
- [18] Alonso C. M., Gallego D. J. y Honey P. <http://cvonline.uaeh.edu.mx/Cursos/Especialidad/Modulo2/PDF/ESTEM02T05P04.pdf>.

Fidel Benjamín Alarcón Hernández et al.

- [19] Huertas J. A., *Motivación, Querer aprender*, (Aique Grupo Editor S. A, Argentina, 1997).
- [20] Forrest, I. B., *Plasmas en el laboratorio y en el cosmos*, (Reverté, España, 1968).
- [21] Rodríguez, Y., Martínez, H., *Plasmas, aplicaciones en la vida diaria. Narraciones de la ciencia*, Inventio; La génesis de la cultura universitaria en Morelos, No 5, 49-53 (2007).

- [22] Martínez, H., Alarcón H. F. B., *La sangre del Universo: El plasma*. Hypatia - Revista de Divulgación Científico - Tecnológica del Estado de Morelos, No 43, 6-7, (2012).
- [23] Vigotsky, L. *El desarrollo de los procesos psicológicos superiores*, (Editorial Crítica, México, 1988).
- [24] Huertas, J. A., *Motivación, Querer aprender*, (Aique Grupo Editor S.A, Argentina, 1997).

El inicio de las representaciones gráficas en el campo de la física



J. M. Rivera-Juárez¹, J. Madrigal-Melchor¹, T. Saucedo-Anaya¹,
E. Cabrera-Muruato²

¹Unidad Académica de Física, Universidad Autónoma de Zacatecas,
Calzada Solidaridad esq. Paseo a la Bufa s/n, CP 98060, Zacatecas, México.

²Unidad Académica de Preparatoria, Universidad Autónoma de Zacatecas

E-mail: jmadrigal.melchor@fisica.uaz.edu.mx

(Recibido el 9 de Septiembre de 2013, aceptado el 23 de Febrero de 2014)

Resumen

La estructura de la ciencia, la naturaleza de la metodología científica y la validación de los juicios de los científicos, son algunos de los aspectos en los que la historia y la filosofía de la ciencia en general y de la física en particular pueden representar un componente de alta motivación en el binomio enseñanza – aprendizaje de las ciencias. Para diversos autores es importante hacer un paralelismo entre las ideas históricas de los conceptos físicos y las de los alumnos, pues ello puede arrojar luz sobre diversos obstáculos epistemológicos en el aprendizaje de la física. Por tal razón esta investigación entre otros fines, tienen el de acercar a los profesores de física de los diferentes niveles educativos a lo que se considera el inicio de la representación gráfica en el campo de la física.

Palabras clave: Historia de la Ciencia, Representación Gráfica, Física.

Abstract

The structure of science, the nature of scientific methodology and validation of the judgments of scientists, are some of the ways in which the history and philosophy of science in general and physics in particular may represent a component high motivation in the dual education - learning of science. For several authors is important to make a parallel between historical ideas and physical concepts of students, as this may shed light on various epistemological obstacles in learning physics. For this reason, this research is aimed at bringing physics teachers from different educational levels to what is considered the beginning of the graphic representation in the field and physics.

Keywords: History of Science, Graphic Representation, Physics.

PACS: 01.65.+g, 01.40.-d,

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de esta investigación serán analizados los comienzos de la representación gráfica de datos, su evolución y su estrecha relación con los avances del conocimiento científico, así como remarcar las influencias socio-culturales en el transcurso de su historia de estas representaciones.

Villafane [1] en su estudio de la cultura egipcia muestra que lo que hoy conocemos como coordenadas, fue empleado en la Agrimensura por los egipcios antiguos, los romanos y por los griegos en el levantamiento de mapas; así tenemos por ejemplo, lo que se considera el “primer mapa mundial” elaborado por Anaximander en el año de 550 a.C. De especial interés para este trabajo es el mapa del geógrafo Claudius Ptolemy (90-160 d.C.) que data del 150 d.C., que fue uno de los primeros en utilizar el principio de coordenadas para la construcción de mapas.



FIGURA 1. Imagen del mapa que se considera el más antiguo. Actualmente se encuentra en el museo Konya de Turquía. (Friendly, Michael. Denis, Daniel J. Milestones in the History of Thematic Cartography, Statistical Graphics, and Data Visualization. York University, Canada).

Los primeros ejemplos de representación gráfica de datos a lo largo de la historia están orientados a diagramas geométricos, tablas de posición de las estrellas y otros cuerpos celestes, etc. Funkhouser [2], considera que alrededor de 950 d.C. aparece lo que él considera la primera <http://www.lajpe.org>

construcción gráfica. Estaba estructurada en una cuadrícula y acompañaba una descripción de los movimientos planetarios a través del zodiaco en función del tiempo. Por el contrario para el historiador Paul Mijksenaar (1944 -) [3], el trabajo de Nicole Oresme (1322 – 1382) constituye la primera representación gráfica de datos.

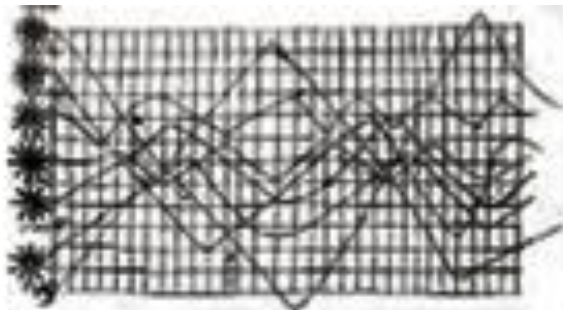


FIGURA 2. Esta imagen representa gráficamente los movimientos planetarios a través del zodiaco. Lo interesante de este gráfico es que está estructurado dentro de una cuadrícula que permite crear una organización visual de los elementos. A la izquierda, están ordenados verticalmente los planetas del sistema solar: Venus, Mercurio, Saturno, Sol, Marte, Júpiter, Luna. Para Funkhouser este gráfico, que data del año 950 DC, constituye la primera construcción gráfica. (Beautiful Evidence, Edward Tufte).

Hasta mediados del Siglo XIV las representaciones gráficas de datos correspondían a conocimientos que el ser humano tenía del mundo, sin basarse en explicaciones científicas o teóricas, no es aventurado considerar que correspondían a un conjunto de normas sistemáticas o patrones preestablecidos.

En el marco de la controversia entre Funkhouser y Paul Mijksenaar, todo hace suponer que en el siglo XIV fue Nicole de Oresme el primero que se anticipó a otro aspecto de la geometría al representar ciertas leyes físicas mediante el gráfico de una variable dependiente, a la que llamo *latitud*, contra una variable independiente a la que llamo *longitud*, cuando a esta última se le permite tomar ciertos incrementos pequeños. En este Siglo, se crearon técnicas e instrumentos para precisar la observación y la medición de cantidades físicas.

II. LAS VARIACIONES DE INTENSIDAD DE LAS CUALIDADES

La cuantificación de las cualidades, es uno de los logros más importantes del Siglo XIV y se le ha considerado como el primer paso hacia el surgimiento de la Física Matemática. Lo que hacía falta era encontrar un método que permitiera la cuantificación de las cualidades, el trabajo fue realizado por los “Calculadores de Oxford”.

El primer método para la cuantificación de las cualidades no es mas que el “álgebra de palabras” de Bradwardine en la que se empleaban las letras del alfabeto

para sustituir a las cantidades de las variables, mientras que las operaciones se describen con palabras. El “álgebra de palabras” de Bradwardine, representa uno de los primeros intentos concientes de introducir un formalismo algebraico, si bien a niveles aún muy elementales.

Los “calculadores” perfeccionan el método, con lo que pretenden demostrar la forma en que aumenta o disminuye una cualidad respecto de una escala que ha sido fijada previamente. Laman *forma* a cualquier cualidad o cantidad variable de la naturaleza y suponen que la *intensio* (intensidad) de una *forma* es el valor numérico que hay que asignarle. Hablan de la velocidad con que cambia la *intensio* con respecto a otra *forma* conocida, a la que llaman *extensio* (extensión). Respectivamente en el esquema de Oresme son la, latitud y longitud.

En el segundo método utilizado para cuantificar cualidades, Nicole Oresme es uno de los principales expositores del mismo. Era básicamente un método geométrico que recurría al uso de gráficas. La *extensio* se representaba mediante una línea recta horizontal (longitud) y cada grado de la *intensio* se representaba mediante una línea vertical de altura determinada (latitud). La línea que une los extremos de estas líneas verticales determina la velocidad y el modo de cambio de la *intenso*. Lo que se pretende con este método gráfico es construir gráficas que representen la cantidad de cualidad, de manera que las propiedades del gráfico (equivalencia, etc.) representen propiedades características de la cualidad.

Ambos métodos, y el intento de cuantificar las cualidades son una muestra clara de un cambio de paradigma en el Siglo XIV con respecto a la época. Son el antecedente de muchos de los planteamientos que apuntalaron la construcción de la ciencia moderna. A diferencia de los trabajos de los Siglos XVI y XVII son absolutamente teóricos, no hay ninguna referencia en los trabajos de Oxford y Paris a experimentos que no sean imaginarios.

III. LA REPRESENTACIÓN GRÁFICA EN LA OBRA DE ORESME

En el siguiente apartado se mostrarán algunos ejemplos del método de representación gráfica de las variaciones de las cualidades de Oresme. Señala que las propiedades de la cualidad se estudian con mayor claridad y facilidad cuando se representan en una figura plana. En cada una de las figuras planas que obtiene de las variaciones de las cualidades realiza transformaciones geométricas simples en la búsqueda de propiedades invariantes, lo que lo conduce a una clasificación de las curvas.

Oresme trata de dar una aplicación práctica del método de representación gráfica de las variaciones de las cualidades en varios campos. Así por ejemplo, en el caso de la biología plantea que el calor natural de un león actúa de forma diferente al de un burro o un buey. “Le da más energía, no sólo porque es más intenso, sino también porque su representación gráfica es muy diferente”.

En la figura 3 se muestra la representación gráfica de las variaciones del calor en un cuerpo. En palabras de Oresme “la figura geométrica hace que resulte más fácil estudiar las variaciones del calor, así la variación no es homogénea, sino que varía dependiendo del lugar en donde se haya realizado la medición”.

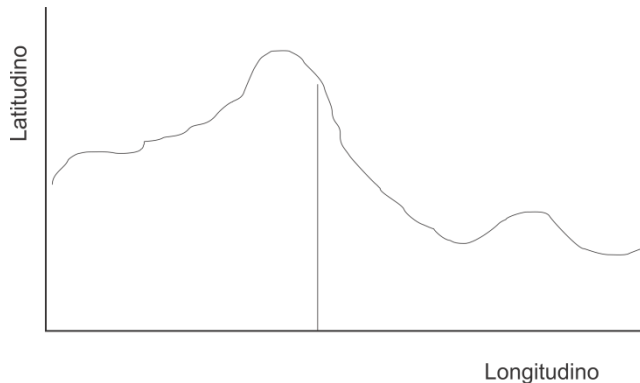


FIGURA 3. Representación gráfica de las variaciones del calor en un cuerpo.

Al aplicar este método al estudio del movimiento Oresme da una muestra de su genialidad. Para estudiar y describir el movimiento tuvo la idea de representar la velocidad del móvil en función del tiempo. En la línea horizontal coloca graduaciones proporcionales a la velocidad del móvil en el momento correspondiente. Lo que enfatiza en las construcciones gráficas es el área de la superficie barrida, llegando a la conclusión de que el área de la superficie barrida por las perpendiculares es proporcional a la distancia recorrida por el móvil durante ese intervalo de tiempo, como lo sabemos hoy en día. Sin embargo, Koyre plantea que Oresme no fue capaz, a pesar de tener todos los elementos, de llegar a esa conclusión [4].

En el marco de la controversia entre Duhem y Koyre de si Oresme llegó o no a esa conclusión, mostramos y analizamos, en la Figura 4, la representación gráfica de la velocidad en función del tiempo de acuerdo con la doctrina de Oresme.

Si M es el punto medio de AB, el área del trapecioide ABCD es igual al área del rectángulo ABC'D'. Basándose en la premisa anterior concluye que la distancia recorrida por el móvil en el intervalo AB es la misma que si se moviera a una velocidad constante e igual a la que tenía al llegar al punto M. Esto representa un resultado particular de su trabajo de gran importancia para la física, conocido como el teorema de la velocidad media (teorema de Merton). “Toda cualidad uniformemente diforme tiene la misma cantidad total que si afectase uniformemente al sujeto según el grado de su punto medio”[4].

El inicio de las representaciones gráficas en el campo de la física

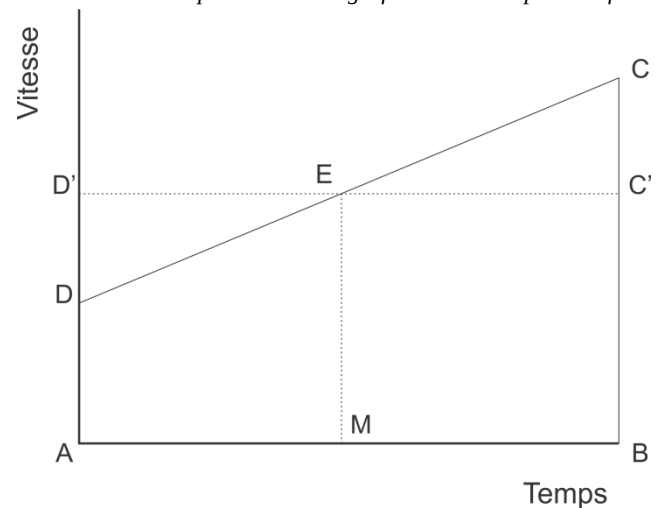


FIGURA 4. Representación gráfica de la velocidad en función del tiempo

En la notación actual el teorema se refiere a un movimiento uniformemente acelerado con velocidad inicial v_0 y final v durante un tiempo t . El teorema establece que la distancia recorrida es la misma que recorrería el móvil en el mismo tiempo con una velocidad constante e igual a la velocidad media entre v_0 y v . Logró Oresme, valiéndose de la regla del grado medio, relacionar el movimiento “uniformemente diforme” (o de aceleración Uniforme) con el “uniformemente uniforme” (o uniforme). Sin embargo todas las conclusiones que se derivaron de ello no pasaron de ser meros ejercicios mentales permaneciendo en un plano teórico, sin conectarse con la realidad [5].

Desde nuestra perspectiva, y analizando solamente los trabajos de Koyre y Duhem, creemos que Oresme, si llegó a la conclusión correcta con estas representaciones gráficas.

IV. LA REPRESENTACIÓN GRÁFICA EN LA OBRA DE GALILEO

Galileo conservó algunas ideas de los trabajos de los mertonianos como la “regla del grado medio” y la representación del triángulo que le sería de gran ayuda para la elaboración de su ley de caída.

No hay que olvidar que el álgebra comienza a desarrollar sus aplicaciones hasta finales del siglo XVII y que antes de ello las relaciones entre las magnitudes se expresaban en forma de proporciones siguiendo los lineamientos dados por Euclides.

Al estudiar el movimiento “naturalmente acelerado” (uniformemente acelerado), Galileo hace una representación abstracta de tipo geométrico del mismo, dicha representación aparece en la figura 5, la línea vertical corresponde al tiempo transcurrido, mientras que la horizontal son las velocidades en cada instante. Así, transcurrido un tiempo AE, el “grado de velocidad” (valor de la velocidad en lenguaje moderno) es PE y en el momento inicial A, el “grado de velocidad” es cero.



FIGURA 5. Representación gráfica del movimiento “naturalmente acelerado”.

El triángulo rectángulo permite deducir fácilmente la relación de proporcionalidad que hay entre la velocidad y el tiempo. Así, para dos intervalos de tiempo cualesquiera AE y AD, con sus respectivos grados de velocidad PE y OD, se cumple que $PE/OD = AE/AD$, en notación algebraica moderna $v_2/v_1 = t_2/t_1$.

La forma como Galileo expuso la relación entre velocidad y tiempo no corresponde al modo griego de pensamiento que intentaba establecer relaciones entre cualidades de la misma especie y no relaciones entre cualidades de especie diferente. Las relaciones del último tipo entraron en uso en el siglo XVI, momento en el que por primera vez se presenta una definición consistente de velocidad por parte de los matemáticos escolásticos [6].

Una vez aclarada la relación v - t , Galileo obtiene la correspondiente relación s - t , relacionando el movimiento “uniformemente diforme” (o de aceleración uniforme) con el movimiento “uniformemente uniforme” (o uniforme) valiéndose de la “regla del grado medio”. La figura 6 es la representación gráfica del planteamiento de Galileo para obtener la relación s - t .

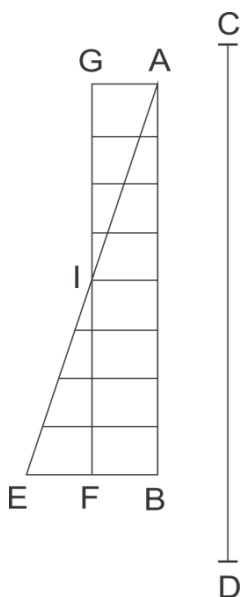


FIGURA 6. Representación gráfica del planteamiento de Galileo para obtener la relación s - t .

Todas las líneas horizontales (como EB) que se tracen desde cada punto de AB y limitadas por el triángulo AEB, representan los grados de velocidad en incremento del movimiento “uniformemente diforme”. De manera análoga, todas las líneas horizontales (como FB), limitadas por el rectángulo AGFB, representan los grados de velocidad invariables del movimiento “uniformemente uniforme”.

A pesar de que las áreas de las figuras dan cuenta del espacio recorrido, Galileo puso el énfasis en las líneas que muestran los grados de velocidad, limitados por los triángulos y rectángulos. Según Koyré [7] esto se debió a que Galileo estaba consciente de que la representación de la distancia por una superficie era poco natural e iba a ser origen de críticas. Por ello en la figura 6 aparece a la derecha una línea CD, que es el espacio recorrido en la caída.

Una vez establecida la equivalencia entre el movimiento “uniformemente diforme” y “uniformemente uniforme” a Galileo sólo le restaba establecer la relación s - t , para lo que se auxilio de la representación gráfica que aparece en la figura 7.

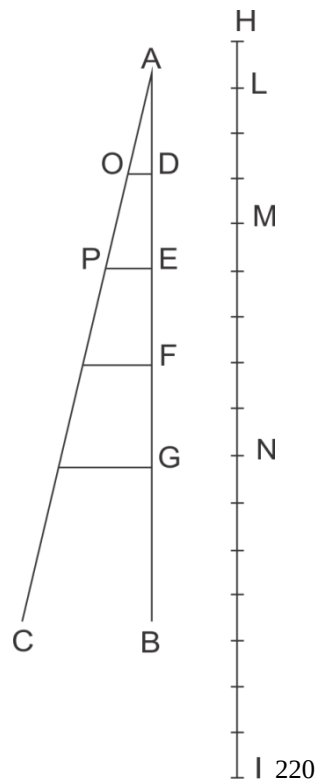


FIGURA 7. Representación gráfica del planteamiento de Galileo para obtener la relación s - t .

A partir de la figura 7 y tomando en cuenta el teorema IV del libro I para el movimiento “uniformemente uniforme” y la proporción que se obtiene de la figura 2, $PE/OD = AE/AD$, obtiene finalmente la siguiente proporción: $HM/HL = AE.AE/AD.AD$, que en notación algebraica moderna se escribe de la siguiente forma: $s_2/s_1 = t_2^2/t_1^2$, donde se expresa claramente la relación de proporcionalidad entre los espacios recorridos y los cuadrados de los tiempos.

IV. COMENTARIOS FINALES

Oresme estudió el movimiento uniformemente acelerado, representó gráficamente la velocidad en función del tiempo (diríamos en coordenadas cartesianas unos 250 años antes que Descartes) y en el triángulo que obtuvo al hacerlo llegó a descubrir que la velocidad media es la velocidad del tiempo medio (preparando con ello el camino a Galileo).

Además de esto, a manera de conclusión, podemos decir que las representaciones gráficas han jugado y juegan un papel fundamental en el análisis y entendimiento de los fenómenos físicos, así como, en todas las ciencias exactas y sociales.

REFERENCIAS

- [1] Villafañe Gallego, J., *Fundamentos metodológicos de la teoría de la imagen (referidos a la imagen fija)*, Tesis Doctoral. (Editorial de la Universidad Complutense de Madrid, 1981).
- [2] Funkhouser, H. G. *Historical Development of the Graphical Representation of Statistical Data*. *Osiris* **3**, 272-464 (1937).
- [3] Mijksenaar, P., *Una introducción al Diseño de la información*, (Ediciones GG, Barcelona, 1997).
- [4] Serres, M., *Historia de la Ciencia*, (Cátedra, París, 1989) <http://es.ecribd.com>
- [5] Grant, E., *La Physique au moyen age*, (Presses Universitaires de France, Paris, 1995).

El inicio de las representaciones gráficas en el campo de la física
[6] Sepúlveda Soto, A., *Los conceptos de la física – evolución histórica –*, (Editorial Universidad de Antioquía, Colombia, 2003).

- [7] Koyré, A., *Études galiléennes*, (Hermann, Paris, 1966).
- [8] Acevedo-Díaz, J. A., Vázquez-Alonso, A., Manassero-Mas, M A., y Acevedo-Romero, P., *Revista EUREKA sobre Enseñanza y Divulgación Científica* **4**, 202 (2007).
- [9] Cleminson, A., *Establishing an epistemological base for science teaching in the light of contemporary notions of the nature of science and of how children learn science*, *Journal in Science Teaching* **27**, 429-445 (1990).
- [10] Duschl, R. A., in *Improving Science Education- The contribution of Research*, edited by Millar, R. Leach, J. and Osborne, J., (Open University Press, Buckingham, 2000), pp. 187-206.
- [11] Matthews, M. R., *Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science*, (Routledge, Nova Iorque, 1994).
- [12] McComas, W. F., Clough, M. P. and Almazora, H. in *The Nature of Science in Science Education*, edited by. McComas, W. F., (Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 2000), pp. 3-39.
- [13] Rudge, D. and Home, E., *The history of the concept of electromotive force in electrical circuits and the choice of the learning indicators*, *The Science Teacher* **71**, 52 (2004).
- [14] Wandersee, J. H., *The historicity of cognition: Implications for science education research*, *Journal of Research in Science Teaching* **29**, 423 (1992).
- [15] Solano, I., Jiménez, E., Marín, E., *Análisis de la metodología utilizada en la búsqueda de “lo que el alumno no sabe” sobre fuerza*, *Enseñanza de las Ciencias* **18**, 309-328 (2000).

Interdisciplinariedad en la carrera de Ingeniería Agrónoma: un enfoque desde la disciplina de Física



Yáima Rodríguez Peña

*Departamento de Matemática-Física, Facultad de Ingeniería,
Universidad de Sancti Spíritus, Avenida de los Mártires No. 360,
C.P. 60,100, Cuba.*

E-mail: yaima@suss.co.cu

(Recibido el 27 de Septiembre de 2013, aceptado el 11 de Febrero de 2014)

Resumen

La interdisciplinariedad como metodología dentro del proceso docente se considera imprescindible en los primeros años de cualquier carrera universitaria. A continuación se exponen algunas relaciones interdisciplinarias, entre la Física y otras materias que forman parte del plan de estudio de la especialidad de Agronomía. El sistema de actividades elaboradas durante el proceso investigativo fue incorporado a las horas de práctica del primer año de la carrera de Ingeniería Agrónoma. Siendo éste su principal resultado. Para evaluar la factibilidad de este trabajo interdisciplinario se utilizó el método Delphi en la interpretación cuantitativa y cualitativa de un grupo de expertos seleccionados por su experiencia docente y científica.

Palabras clave: Física, investigación sobre Física educativa, ingeniería.

Abstract

Interdisciplinarity as educational methodology within the teaching process is very important in the first year of studies. The following investigation exposes some interdisciplinary relationships between Physics and different agronomy matters fulfilling the study plan of Agronomy as such. The system of activities of this research was incorporated to the practical hours of first year Agronomy engineering students; this is its principal outcome. To assess the feasibility of this interdisciplinary work, the Delphi Method was used in the quantitative and qualitative interpretation carried out by a group of experts chosen due to their teaching and scientific experience.

Key words: Physics, Physics Education research, engineering.

PACS: 01.40.gb, 01.40.Fk, 0155+b

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Grandes pedagogos latinoamericanos se han referido a la idea de asociar el contenido de enseñanza de las diferentes asignaturas entre ellas mismas, a la necesidad de establecer una educación para la vida, en la que todo puede ser ocasión para desarrollar las capacidades del individuo. En el mundo actual, el progreso en cualquier ciencia depende de la utilización de los logros de otras ramas del conocimiento.

La interdisciplinariedad es la interacción entre dos o más disciplinas, producto de la cual las mismas enriquecen mutuamente sus marcos conceptuales, sus procedimientos, sus metodologías de enseñanza y de investigación [1].

Se concuerda con [1], ya que la esencia de la interdisciplinariedad radica en la actividad de las personas que la llevan a cabo, se caracteriza por la cooperación orgánica y la flexibilidad entre los miembros del equipo; la comunicación y la desaparición de barreras; el enriquecimiento mutuo de saberes; la exaltación de valores como la solidaridad, la honestidad, la laboriosidad, la tenacidad y el respeto. Todo ello con el fin de avanzar en la búsqueda de nuevos campos de la investigación.

Para algunos pedagogos la interdisciplinariedad supera las disciplinas que la componen, rompen la estructura de éstas, suponen el estudio de las relaciones entre las mismas. Pero en este trabajo se defiende la idea de que este proceso debe desarrollarse sin sacrificar la profundidad que alcanzan las disciplinas en un área determinada del saber. Se concibe el mismo como los nexos entre ciencias que tienen núcleos de conocimientos comunes, el intercambio mutuo, que incida en la manera de pensar, el comportamiento de los estudiantes y en la forma de enfrentar la vida.

En su artículo [2] expone que el ingeniero agrónomo es un profesional que, haciendo uso racional de los recursos humanos, físicos, químicos, matemáticos, biológicos y sociales, debe dirigir el proceso de producción agropecuaria con una lógica que implica: diagnosticar, pronosticar, planificar, organizar, aplicar, ejecutar y controlar el mismo. De aquí se deduce la importancia del enfoque interdisciplinario en la formación de este profesional.

En "Diseño curricular" [3] explica que en cada proceso de renovación curricular, siempre estará presente la integración de los conocimientos, a lo que se le ha llamado enseñanza integrada o enfoque interdisciplinario. Esta

concepción se encuentra en la base de la organización del diseño curricular.

¿Por qué a los docentes les resulta difícil la integración de los conocimientos? Actualmente los planes de estudio de las carreras de ingeniería, declaran la interdisciplinariedad como un aspecto importante a tener en cuenta en la formación del profesional; pero no explican cómo hacerlo. Los docentes presentan dificultades para determinar y materializar las relaciones interdisciplinarias.

En todas las disciplinas del plan de estudio de la carrera de Ingeniería Agrónoma, se distribuyen horas de docencia y de práctica. La disciplina de Física tiene 80 y 32 horas respectivamente. De ellas le corresponden a la asignatura Física I 40 y 16. Esta materia está ubicada en el primer año de estudio, cuando los estudiantes no han recibido gran parte de las disciplinas vinculadas estrechamente con su especialidad. Esta es una de las causas que entorpecen el trabajo interdisciplinario en la referida carrera; otra es la autopreparación del profesor con respecto a los temas relacionados con la Agronomía, enfrentando una situación de escasa bibliografía y pobre acceso a Internet; por último la formación disciplinar de los docentes es otro factor incidente. Sin duda el establecimiento de relaciones intermaterias permitirá al profesor de Física demostrar a los alumnos la importancia de esta disciplina de formación básica. Siendo el objeto de investigación la interdisciplinariedad en el proceso de enseñanza aprendizaje de la Física I para la carrera de Agronomía.

Se aplicaron los siguientes métodos teóricos:

El histórico-lógico, que nos permitió indagar en el objeto de la investigación, sus antecedentes y desarrollo hasta nuestros días.

La modelación, que constituyó un método para la comprensión de cómo relacionar los modelos de la Física con los fenómenos y procesos estudiados por la Agronomía, y elaborar el sistema de actividades.

El análisis-síntesis, para la sistematización de las ideas relacionadas con el objeto de estudio y para establecer las múltiples relaciones entre las disciplinas y demás factores que intervienen en el proceso de enseñanza aprendizaje que se analiza.

Método sistémico, que proporcionó la orientación general para el estudio y solución integral del problema.

Entre los métodos empíricos se encuentran:

Análisis documental, para sistematizar las referencias bibliográficas, que permitió el enfrentamiento a un buen número de referentes teóricos.

Fueron utilizadas la observación, las entrevistas, las encuestas y la valoración de especialistas. Estos permitieron recoger evidencias, criterios e informaciones que permitieron evaluar cualitativamente el sistema de actividades interdisciplinarias.

II. DESARROLLO

La realización de la interrelación sistemática entre las ciencias [4] convence a los alumnos de que entre las diferentes esferas de los conocimientos no existen límites bien marcados, de que ellas no están separadas unas de

otras, sino que, desde diferentes puntos de vista, cada una de ellas, con sus propios métodos, estudia el mundo material; el conjunto de resultados obtenidos por ellas nos proporciona una representación general sobre el mismo. En el libro "Las relaciones intermaterias, una vía para incrementar la calidad de la educación" [4] se propone amplias líneas directrices. En el análisis realizado de las mismas prevalece el criterio de que todas ellas se resumen en la relación intermateria a partir de los nexos entre ciencias que tienen núcleos de conocimientos comunes.

Las relaciones intermaterias [5] pueden concretarse en tres tipos de nexos fundamentales: nexos de los hechos, nexos de teorías y nexos de conceptos. La interrelación entre la Física y las asignaturas de la especialidad de Agronomía se puede realizar sobre la base de los nexos de los hechos, que implican la relación intermateria a partir de hechos estudiados por diferentes asignaturas y que sirven de base común; y nexos de conceptos, estos constituyen el tipo fundamental de nexos entre las diferentes asignaturas, son múltiples, abarcan casi todo el contenido de las disciplinas y su acción se propaga a un volumen considerable.

Se refiere [5] anteriormente a pasos metodológicos, para la realización de un trabajo interdisciplinario, los cuales se han aplicado en carreras pedagógicas, y para el desarrollo de esta investigación:

Formular un marco teórico referencial (MTR): en él se han de integrar, organizar y articular los aspectos puntuales y fragmentarios que se estudian desde cada una de las asignaturas, de donde se derivan los pasos y actividades a realizar coordinadamente.

Trabajar con un esquema de investigación (EI): teniendo en cuenta que la integración de conocimientos tiene como objetivo fundamental la formación de una correcta concepción científica del mundo, debe situarse al nivel del problema práctico que se corresponda con el método de resolución a través de la investigación.

Explicitar y programar las actividades a realizar (SA): surgen del propio marco referencial y dependen de la naturaleza de cada experiencia concreta.

En el MTR se tuvo en cuenta que la disciplina de Física para estudiantes de ingeniería, debe desarrollar un conjunto de habilidades lógicas, experimentales y en la solución de problemas teóricos que, contribuyan a la formación de los modos de actuación del ingeniero. En ella se establecen leyes y principios básicos de la naturaleza necesarios para la comprensión de la Biología, los procesos que ocurren en el suelo, en las plantas y en la atmósfera. Fundamenta el funcionamiento de las máquinas agrícolas y crea las condiciones para asimilar el constante desarrollo de la tecnología. Además su sistema de conocimientos contiene, conceptos, leyes y principios relacionados con las asignaturas de Química, Matemática, Riego y Drenaje, Mecanización Agropecuaria, Botánica, Fisiología vegetal, Práctica Agrícola, entre otras.

Se determinó que las asignaturas Riego y drenaje, Mecanización agropecuaria y Física I, pertenecen a diferentes disciplinas pero entre ellas existen relaciones intermaterias. Se seleccionaron un conjunto de situaciones

comunes entre ellas y que pueden ser tratadas en las clases de Física I.

En la tabla I se observa la selección de situaciones prácticas del ingeniero agrónomo, que están relacionadas a la vez con los contenidos de Física I y de las asignaturas de la especialidad escogidas, para ello se tuvieron en cuenta diferentes temas.

TABLA I. Relación de temas de la asignatura Física I y situaciones seleccionadas.

Tema de la asignatura.	Situación seleccionada.
Cinemática	Circulación del agua en canales de riego trapezoidales y tuberías horizontales de sección transversal constante.
Dinámica	Fuerzas que actúan sobre el arado en la tierra. Funcionamiento de un sistema de riego por aspersores de pivote central.
Trabajo y energía	Funcionamiento de las bombas centrífugas. Utilización de fuentes renovables de energía.
Mecánica de los fluidos	Circulación del agua en tuberías de sección transversal variable. Pérdidas por rozamiento. Mecanismos hidráulicos.
Termodinámica	Procesos termodinámicos en seres vivos. Motores térmicos y refrigeración.

El esquema de investigación seguido (EI) es el aprendizaje como investigación dirigida o enseñanza problémica. Se abordará el tratamiento de los nuevos conocimientos en una variedad de situaciones profesionales, incluyendo aquellas que permiten detectar y esclarecer preconcepciones, esto hará posible la profundización y afianzamiento de estos conocimientos. Ello exige un conjunto de actividades con una lógica interna, totalmente intencionadas sin espacio para la improvisación. El profesor debe atraer la atención del alumno hacia la actividad, la tarea o el tema docente, para despertar el interés cognoscitivo y otros motivos que impulsen su actividad, su dificultad cognoscitiva debe resultar asequible, por lo tanto un diagnóstico psicopedagógico de los estudiantes será imprescindible. Es importante descubrir ante el estudiante la contradicción que existe entre la necesidad cognoscitiva que ha surgido en él y la imposibilidad de satisfacerla mediante los conocimientos, las habilidades y los hábitos que posee. Se debe ayudar al alumno a trazar el plan para hallar las vías de solución de la dificultad, lo que lo conduce a una actividad de búsqueda.

Para la confección de programas de actividades [5] recomienda estos acertados aspectos que se tuvieron en cuenta:

- Presentar situaciones problemáticas abiertas de un nivel de dificultad adecuado, correspondiente a su zona de desarrollo potencial.
- Plantear una reflexión sobre el posible interés de las situaciones propuestas que de sentido a su estudio, considerando su relación con la ciencia y la técnica, la naturaleza y la sociedad.
- Prestar atención a potenciar las actitudes positivas y que el trabajo se realice en un clima próximo a lo que es una

investigación colectiva (situación en la que opiniones de cada individuo cuentan) y no en un clima de sometimiento a tareas impuestas por el profesor.

- Se plantea la emisión de hipótesis y hacer explícitas, funcionalmente, las preconcepciones.

- Es necesario el análisis detallado de los resultados, a la luz del cuerpo de conocimientos disponible y de las hipótesis manejadas.

- Se pide un esfuerzo de integración que considere la contribución del estudio realizado a la construcción de un cuerpo coherente de conocimientos, las posibles implicaciones en otros campos de conocimientos.

- Se potencia la dimensión colectiva del trabajo científico, organizando en equipos el trabajo y facilitando la interacción entre ellos. Se hace ver que los resultados de una sola persona o un solo equipo no son suficientes para confrontar una hipótesis.

El SA confeccionado contiene una serie de conferencias que se mencionan en la tabla II; se impartieron en las horas destinadas a la docencia. En cada una de ellas se orienta una guía de estudio para que los estudiantes apliquen los conocimientos adquiridos que luego serán evaluados en próximos encuentros.

TABLA II. Relación de conferencias impartidas y objetivos propuestos.

Conferencias.	Objetivos.
Velocidad del agua en canales y tuberías.	Determinar la velocidad del agua y el caudal, en canales de riego trapezoidales y tuberías horizontales de sección transversal constante, a partir de análisis físicos cinemáticos.
Fuerzas en la tierra y riego por aspersores.	Determinar las fuerzas que actúan sobre un arado de vertedera en plena faena en el campo, a partir de análisis físicos dinámicos. Valorar la importancia de la fuerza de tensión superficial en el cuidado de las plantaciones. Determinar magnitudes de la cinemática de la rotación, y la cantidad de agua que vierte un sistema de riego por aspersores de pivote central.
Bombas centrífugas.	Describir la estructura y funcionamiento de una bomba centrífuga a partir de un análisis energético. Determinación de la potencia absorbida, la eficiencia y la carga de una bomba centrífuga.
Mecánica de los Fluidos.	Determinar la velocidad del agua en tuberías de sección transversal variable y las pérdidas por rozamiento en sistemas de riego, aplicando métodos físicos. Explicar el principio físico de funcionamiento de los mecanismos hidráulicos.
Termodinámica técnica.	Describir el ciclo termodinámico de un motor térmico y un refrigerador, para un mejor entendimiento del funcionamiento de las instalaciones frigoríficas.

	Describir procesos termodinámicos en seres vivos.
--	---

En el anexo 1 se encuentran ejemplos de actividades de diferentes guías de estudio orientadas en las conferencias. La distribución de las actividades elaboradas por cada tema y por horas de práctica se encuentra en la tabla III, se observa que se intercalaron momentos de investigación y experimentación, de acuerdo a las condiciones objetivas materiales.

TABLA III. Relación de actividades elaboradas por tema y horas de práctica.

Sema-na	Horas	Actividad	Tema
3	3	Investigación	Velocidad del agua en canales y tuberías.
5	2	Trabajo de laboratorio	Medición de aceleración II. Relación entre masa y fuerza I.
6	3	Investigación	Fuerzas en la tierra y riego por aspersores.
7	2	Trabajo de laboratorio	Determinación de la aceleración de la gravedad. Ley de conservación del momento lineal.
8	2	Investigación	Bombas centrífugas. Fuentes renovables de energía.
11	2	Investigación	Circulación del agua en tuberías de sección transversal variable. Pérdidas por rozamiento. Mecanismos hidráulicos.
12	2	Investigación	Termodinámica técnica.

Se coincide con lo planteado por [6] pues no se puede reducir la actividad investigativa a trabajo experimental, junto a los momentos de trabajo experimental se intercalarán otros de recepción a través de la lectura o una conferencia. Teniendo presente en todo este tratamiento las complejas relaciones ciencia y técnica- naturaleza-sociedad que enmarcan el desarrollo científico. Pueden incluirse así actividades como la lectura y discusión de noticias científicas, visitas a laboratorios y otros centros educacionales o de investigación, estudio de situaciones de interés en la vida práctica o la toma de decisiones en cuanto a situaciones conflictivas.

III. EVALUACIÓN POR LOS EXPERTOS

La constatación de la factibilidad de este trabajo interdisciplinario se realizó mediante el “criterio de expertos”, utilizando el Delphi. El cual es muy usado en las investigaciones educativas [7].

La aplicación del método se inicia con la selección de los expertos o evaluadores, como explica [8]. Se

caracterizaron como tal 12 profesores cuyo coeficiente de competencia resulta mayor que 0,70. De ellos, el 92% son doctores o maestros en ciencias. Con relación a la categoría docente el 50%, son profesores titulares o auxiliares y el resto profesores asistentes. Con respecto a los años de experiencia en la docencia se obtiene un promedio de 19,1 años. De los resultados obtenidos puede asegurarse que la muestra de expertos seleccionada tiene una alta competencia.

Luego de la selección, se entregó a los evaluadores este trabajo interdisciplinario y un instrumento para evaluar la factibilidad del mismo. Los indicadores por dimensión para valorar la propuesta se encuentran en el anexo 2.

Valoración de los indicadores: para valorar, en una escala ordinal, cada uno de los indicadores, se utilizó el escalamiento tipo Likert; que consiste en proponer un conjunto de afirmaciones o juicios, ante los cuales se solicita la opinión de los sujetos a los que se les aplica. Se asume una escala que se interpreta de la siguiente manera: muy adecuado (M.A), bastante adecuado (B.A), adecuado (A), poco adecuado (P.A), insuficiente (I).

Es decir, se pide al sujeto que en cada juicio elija una de las cinco alternativas de la escala. Cada experto obtiene una puntuación total que está dada por la suma de los valores correspondientes a cada juicio seleccionado.

El procesamiento estadístico de los resultados obtenidos se realiza mediante el método “Jorgerson” que permite asignar un valor de escala a cada aspecto y determinar límites entre cada categoría para llegar a una escala ordinal en la que cada aspecto corresponda a una categoría semejante a la que se utiliza para recoger la opinión de los expertos.

Se confeccionan las tablas de frecuencia de las categorías por indicador, donde resulta que los indicadores 2, 3 y 7 son los más favorecidos por los expertos; ellos son: los fundamentos teóricos que respaldan la propuesta, la correspondencia de la propuesta con los requerimientos establecidos para un trabajo interdisciplinario y la contribución de la propuesta a la actividad laboral e investigativa propia de los modos de actuación del profesional respectivamente.

Los indicadores 4, 5 y 6 fueron medianamente favorecidos ya que tres de los expertos consideran los mismos como poco adecuados, el resto los valora como muy adecuado y bastante adecuado; ellos son: el carácter instructivo, educativo y desarrollador de la propuesta, las actividades elaboradas y forma de organización de la propuesta para lograr la interdisciplinariedad, además de las posibilidades prácticas de aplicación de la propuesta.

El indicador 1 es el menos favorecido por los expertos, pues existe un consenso de once de ellos que le otorgan la categoría de adecuado; sólo uno considera que es bastante adecuado.

Finalmente tres indicadores obtienen la categoría (M.A) y cuatro la categoría (B.A), este resultado permite el paso a la fase de aplicación. El procesamiento estadístico de los resultados de la siguiente fase se realizará en el mes de septiembre próximo.

IV. CONCLUSIONES

La realización de una selección de las asignaturas de la especialidad que manejan leyes y conceptos relacionados con la disciplina de Física, permitió la elaboración de situaciones prácticas del ingeniero agrónomo, que están relacionadas a la vez con los contenidos de Física I y de las materias de la especialidad escogidas anteriormente; confeccionándose un sistema de actividades integrador, que se sitúa al nivel del problema práctico y se corresponde con el método de resolución a través de la investigación.

La factibilidad de este trabajo interdisciplinario está corroborada por los análisis cualitativos y cuantitativos que realizan los expertos que la evalúan; hecho que permite el paso a la fase de aplicación; realizando ajustes al Plan calendario de la asignatura Física I.

REFERENCIAS

[1] Perera, L. F., *La formación interdisciplinaria de los profesores de ciencias: un ejemplo en el proceso de enseñanza- aprendizaje de la Física*, Tesis en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Pedagógicas. I.S.P. “Enrique J. Varona”. La Habana. Cuba. (2000).

[2] Mena, J. L. y otros, *Concepción didáctica para una enseñanza - aprendizaje de las ciencias básicas centrada en la integración de los contenidos en la carrera de Agronomía*, Pedagogía universitaria **XVI**, No. 4. (2011).

[3] Addine, F. y otros, *Diseño curricular*, (Instituto Pedagógico Latinoamericano y Caribeño, La Habana, Cuba, 2000).

[4] Fiallo, J., *Las relaciones intermaterias, una vía para incrementar la calidad de la educación*, (Editorial Pueblo y Educación, La Habana, Cuba, 1996).

[5] González, L., *Metodología para la integración de los conocimientos biológicos y metodológicos en el proceso de enseñanza- aprendizaje de la metodología de la Biología*, Tesis de maestría, ISP “José de la Luz y Caballero”. Holguín. Cuba. (2000).

[6] Gil, D., *Temas escogidos de la didáctica de la Física*, (Editorial Pueblo y Educación, La Habana, Cuba, 1996).

[7] Cruz, M., *El método Delphi en las investigaciones educacionales*, (Editorial Academia, La Habana, Cuba, 2007).

[8] Crespo, T., *Respuestas a 16 preguntas sobre el empleo de expertos en la investigación pedagógica*, (Editorial San Marcos, Perú, 2007).

[9] Pacheco, J. y otros, *Riego y Drenaje*, (Editorial Félix Varela, La Habana, Cuba, 2006).

ANEXO 1

Ejemplos de actividades de diferentes guías de estudio:

- Problema de la guía No. 1. Tomado del libro “Riego y drenaje” [9].

Una tubería horizontal llena de diámetro 0,4 m, descarga el agua dentro de un recipiente hasta llenarlo completamente. Se realizaron las mediciones con una regla en forma de escuadra y se determinaron las coordenadas $x = 20$ cm e $y = 35$ cm. Determine:

- El tiempo en que se llena completamente el recipiente.
- El gasto.

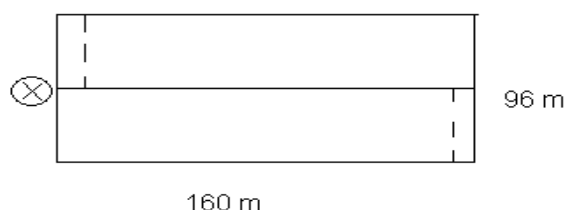
- Problema de la guía No. 2

Un obrero agrícola se encuentra arando la tierra con tracción animal, en un tramo del surco donde el coeficiente de fricción entre el suelo arenoso seco y la reja del arado es 0,35 la aceleración del mismo será $0,6 \text{ m/s}^2$. La masa del arado de vertedera que se está utilizando es de 40 kg.

- Determine la tensión en el enganche si el ángulo de inclinación es de 30° .
- Si se quiere aumentar la aceleración ¿qué cambios harías en el sistema?

- Problema de la guía No. 4

La figura muestra las dimensiones de un campo sembrado de tomate. Determine las pérdidas de energía por fricción si se trata de tuberías de aluminio de 15 años de explotación con $f = 0,033$ y $C = 120$.



Diámetro principal: 8 in
Diámetro lateral: 6 in
 $Q = 600 \text{ gpm}$

ANEXO 2

Indicadores por dimensión para valorar la propuesta.

Dimensión 1: Fundamentación teórica y metodológica de la propuesta.

Indicadores:

1. Nivel en que valoran la variedad, uso y manejo de la Bibliografía.
2. Nivel en que valoran los fundamentos teóricos que respaldan la propuesta.

Dimensión 2: Estructura y organización de la propuesta.

Indicadores:

3. Nivel en que valora la correspondencia de la propuesta con los requerimientos establecidos para un trabajo interdisciplinario.
4. Nivel en que valora el carácter instructivo, educativo y desarrollador de la propuesta.
5. Nivel en que valora las actividades y forma de organización de la propuesta para materializar la interdisciplinariedad.

Dimensión 3: Aplicabilidad y efectividad de la propuesta.

Indicadores:

6. Nivel en que valora las posibilidades de aplicación práctica del trabajo interdisciplinario.
7. Nivel en que valora la contribución de la realización de la propuesta a la actividad laboral e investigativa propia de los modos de actuación del profesional.

Noble metal nanoparticles and composites for nonlinear optics and its applications - A technical analysis and short review



Kamal Nain Chopra

*Applied Physics Department, Maharaja Agrasen Institute of Technology, Rohini,
GGSIP University, New Delhi - 110086, India.*

E-mail: kchopra2003@gmail.com

(Received 10 July 2013, accepted 11 December 2013)

Abstract

Designing of the experiments and devices based on the nonlinear optics is a new and emerging field, which is finding newer applications. Technical analysis of the phenomenon associated with the nonlinear optics (NLO), like, for example: Second harmonic generation, Sum frequency generation, difference frequency generation, optical parameter amplification, 'N' wave mixing, and nonlinear polarization, has been presented in this paper. The important materials studied and used for this fascinating field, the experimental results available in the literature and the related applications have also been reviewed. Optical nonlinear properties of noble metal nanoparticles and composites, and their applications for ultra-fast active plasmonics, and medical therapy have been discussed. The paper should be of great use for the new researchers entering this field, and also for the experts engaged in designing of the NLO based devices.

Keywords: Nonlinear optics (NLO), optical nonlinear properties of Noble Metal nanoparticles and composites, ultra-fast active plasmonics.

Resumen

El diseño de los experimentos y los dispositivos basados en la óptica no lineal es un campo científico nuevo y emergente, que está encontrando nuevas aplicaciones. El análisis técnico del fenómeno asociado a la óptica no lineal (ONL), como, por ejemplo: La segunda generación de armónicos, la generación de la suma de frecuencias, la generación de diferencias de frecuencias, la amplificación del parámetro óptico, la ola de mezcla tipo 'N', y la polarización no lineal, se han presentado en este artículo. Los importantes materiales estudiados y utilizados en este fascinante campo de estudio, los resultados experimentales disponibles en la literatura y las aplicaciones relacionadas también han sido revisadas. Se han discutido las propiedades no lineales ópticas de nanopartículas de metales nobles y materiales compuestos, y sus aplicaciones para los activos ultra-rápidos plasmónicos, y el tratamiento médico. El artículo debe ser de gran utilidad para los nuevos investigadores que entran en este campo de estudio, y también para los expertos que participan en el diseño de los dispositivos basados en ONL.

Palabras clave: Óptica no lineal (ONL), propiedades ópticas no lineales de nanopartículas de Metales Nobles y aleaciones, plasmónica activa ultrarápida.

PACS: 81.07.-b, 81.16.Mk, 81.40.-z

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCTION

The nonlinear optics is different from the linear optics, in the sense that whereas the linear optics is the 'optics of weak light', in which the light is deflected or delayed but its frequency is unchanged, the nonlinear optics is the 'optics of intense light', in which we observe and study the effects induced by the light itself, as it propagates through the medium. The important breakthroughs connected with this field, made in the early 1960s are: (i) Discovery of Optical second harmonic generation, (ii) Discovery of Stimulated Raman scattering, and (iii) Stimulated Brillouin scattering, which is now used as an efficient technique for the

generation / amplification of the coherent optical radiation with small frequency shift.

The understanding of the NLO concept can be done by starting from consideration of the meaning of the index of refraction (n). In the linear region, the electric field is much weaker than the intra-atomic field, and thus n is independent of the light intensity (I). However, in case of the nonlinear region, the interaction of light in matter is studied, and it is found that it is possible to control n by the light itself, and also to manipulate one beam with the other, which in fact leads to many technical innovations. This nonlinearity is observed only at very high light intensities *i.e.* values of the electric field must be comparable to the inter-atomic electric

fields, typically 10^8 V/m, and these are provided by pulsed lasers

The light wave acts differently on a molecule for the linear optics (LO) and nonlinear optics (NLO). In the first case, light wave acting on a molecule, vibrates it that in turn emits its own light wave, which then interferes with the original light wave. In the second case, the irradiance is high enough, resulting in the production of the vibrations at all frequencies corresponding to all energy differences between populated states. This difference in action is clearly understood by the following figure:

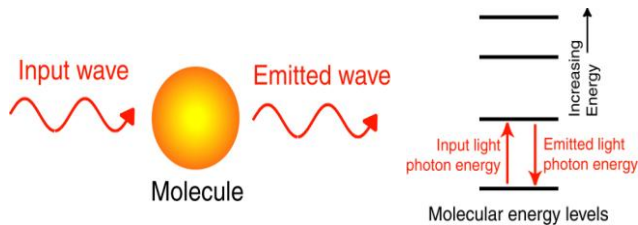


FIGURE 1a. Action of a light wave (linear optics) on a molecule.

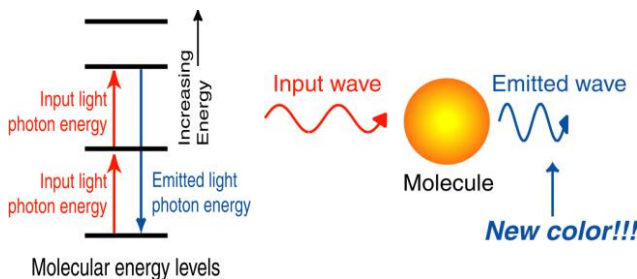


FIGURE 1b. Action of a light wave (linear optics) on a molecule. FIGURE courtesy M/s. Google.

This difference makes the NLO very important, which in fact, makes it possible to do the optical wave manipulation, which is one of the future technologies for optical processing. It may be noted that in case of the NLO, the refractive index, and thus the speed of light in a nonlinear optical medium is a function of the light intensity. Also, the well known principle superposition does not hold well in a nonlinear optical medium. In addition, the frequency of light is changed after it passes through a nonlinear optical medium; it can change its colour. Interestingly, photons interact inside a nonlinear optical medium, and thus the light can itself be used to control light. However, it should be well understood that the nonlinear (NL) optical behavior is not observed when light travels in free space, and displays itself only when it travels through the NL medium. The interaction of light with light results by the nonlinear medium, since the presence of an optical field modifies the properties of the medium, which causes another optical field, or even the original field itself. The NLO has many applications in fiber optics communications, and optoelectronics, which has resulted in making it an increasingly important topic in electrical engineering.

In studying the material response to light, we have to consider the induced polarization density P of the medium, which is given by:

$$P = \epsilon_0 c(1)E + \epsilon_0 c(2)E.E + \epsilon_0 c(3)E.E.E$$

where ϵ_0 is the electric permittivity of free space, E is the electric field, and $c(i)$ is constant. The electric displacement D is given by:

$$D = \epsilon_0 E + P + \epsilon E.$$

It is important to note that the relation between p and E is linear when E is small, but becomes nonlinear when E has values comparable to interatomic electric fields, i.e. $\sim 10^6$ to 10^8 V/m. Another origin of a nonlinear response of an optical material to light, that is possible, is the dependence of the number density N on the optical field. Suppose that an optical field E_0 is incident on a nonlinear medium confined to some volume. This field creates a radiation source $S\langle E_0 \rangle$, which radiates an optical field E_1 , and in turn the corresponding radiation source $S\langle E_1 \rangle$ radiates a field E_2 , and so on, though only 2-3 terms are significant. In case of the linear optics, $n_2 = 1 + c(1)$. However, in case of NLO, nonlinear terms have to be considered. If we consider the second order term $c(2)E.E$, we can understand the phenomena – frequency doubling, and sum and difference frequency generation. In case, we consider the third order term $c(3)E.E.E$, we can understand the third harmonic generation, and thus the phenomena like Raman scattering, Brillouin scattering, Self focusing, and Optical Phase Conjugation. We start our discussion by considering an optical beam with frequency ω and a DC field given by: $E = E_0 + E_0 \cos(\omega t)$. In that case, we have to consider the term $c(2)E_0 E_0 \cos(\omega t)$, which leads to the linear electrooptic effect, called the Pockels effect, according to which n can be modified by applying a DC field, that, in fact can be used for optical switching and phase modulation of light. If we consider more terms e.g., (i) $c(2)E \omega_2$, we find that a static voltage appears across the sample, (ii) $c(2)E_2 \cos(2\omega t)$, and $c(3)E_0 2E_0 \cos(\omega t)$, we observe the quadratic electro optic effect (DC Kerr effect), (iii) $c(2)E \omega_2 \cos(2\omega t)$, which is equal to $c(3)E \omega_3 \cos(3\omega t)$, we get the optical (AC Kerr effect). This explains that the refractive index depends on the optical field strength i.e., $n = n_0 + n_2 I$, which leads to the phenomena - self-focusing and self-phase modulation.

The polarization produced in the two cases is respectively governed by the Equations (1) and (2), which are given below:

$$P = \epsilon_0 \chi E, \quad (1)$$

and

$$P = \epsilon_0 [\chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \dots], \quad (2)$$

where P is the induced polarization of medium, and $\chi(i)$ is the susceptibility of the i -th order.

In case of the Two Wave Mixing, two beams of same frequency are combined to create a stationary interference pattern, which leads to the energy coupling between the two beams, and thus results in the beam amplification, due to the pumping of energy by one beam into the other.

The harmonic generation is of many types - like (i) Second harmonic generation (SHG), or frequency doubling, resulting in the generation of light with a doubled frequency, and hence half the wavelength, in which two photons are destroyed to create a single photon at two times the frequency; (ii) Third harmonic generation (THG), which results in the generation of light with a tripled frequency i.e. one-third the wavelength. and in this process, three photons are destroyed for creating a single photon at three times the frequency; and (iii) High harmonic generation (HHG), in which case, the generation of light with frequencies much greater than the original ~100 to 1000 times greater, takes place. NLO is a really very interesting concept, which has many associated phenomena - (i) Second harmonic generation, (ii) Sum frequency generation, (iii) Difference frequency generation, and (iv) the DC rectification. These are briefly explained mathematically below.

(i) SECOND HARMONIC GENERATION The Eq. (2) explains the effect of the nonlinear terms, as given below:

Since

$$E(t) \propto E_0 \exp(i\omega t) + E_0^* (-i\omega t),$$

hence

$$E(t)^2 \propto [\exp^2(2i\omega t) + 2|E_0|^2 + \exp^2(-2i\omega t)]. \quad (3)$$

This adds extra terms in the intensity of light, which leads to the formation of second order harmonic generation. Very commonly, this second harmonic generation is used to get the laser output at the frequencies, not easy to get otherwise e.g. a laser beam at 1064 nm, when passed through a second order nonlinear crystal, produces the laser output at twice the frequency, and hence at half the wavelength, which is 532 nm.

(ii) SUM AND DIFFERENCE FREQUENCY GENERATION. Let us consider the case, when there are two beams of different colors present at the same time in a nonlinear medium. The different colours have different wavelengths, and hence different frequencies ω_1 and ω_2 . The Equation for the electric field is then given by:

$$E(t) \propto [E_1 \exp(i\omega_1 t) + E_1^* \exp(-i\omega_1 t) + E_2 \exp(i\omega_2 t) + E_2^* \exp(-i\omega_2 t)]. \quad (4)$$

Hence, the intensity is given by the following equation:

$$\begin{aligned} E(t)^2 \propto & E_1^2 \cdot \exp(2i\omega_1 t) + E_1^{*2} \exp(-2i\omega_1 t) + E_2^2 \cdot \exp(2i\omega_2 t) + \\ & E_2^{*2} \exp(-2i\omega_2 t) + 2E_1 E_2 \cdot \exp(i[\omega_1 + \omega_2]t) + \\ & 2E_1^* E_2^* \cdot \exp(-i[\omega_1 + \omega_2]t) + 2E_1 E_2 \cdot \exp(i[\omega_1 - \omega_2]t) + \\ & 2E_1^* E_2^* \cdot \exp(-i[\omega_1 - \omega_2]t) + 2|E_1|^2 + 2|E_2|^2. \end{aligned} \quad (5)$$

The terms in the various rows in the above Equation represent respectively the second harmonic generation, second harmonic generation, Sum-frequency generation, Difference- frequency generation, and the dc rectification.

II. MATERIALS USEFUL IN NLO

Many types of materials have been found useful for the NLO applications, each being suitable for a particular transmission range, and particular laser systems. LBO is useful in the 0.16-3.3mm transmission range, and finds applications in the High power lasers harmonics generation and OPO pumped by Nd:YAG harmonics. BBO is useful in the 0.19-3.3mm transmission range, and finds applications in the Solid State and Dye laser harmonics generation with output in the range 200-532 nm; - OPO/OPA pumped by Nd:YAG harmonics with 295-3000 nm output. KTP is useful in the 0.38-4.4 mm transmission range, and finds applications in the Harmonics generation in UV and VIS. KD*P is useful in the 0.26-1.6mm transmission range, and finds applications in the Harmonics generation in VIS range. LiNbO3 is useful in the 0.4-4.5 mm transmission range, and finds applications in the SHG and OPO pumped by Nd:YAG laser. LiIO3 is useful in the 0.3-6.0 mm transmission range, and finds applications in the SHG and THG of Nd:YAG, and DFM with output in 3-5 mm transmission range. AgGaS2 is useful in the 0.53-125 mm transmission range, and finds applications in the Harmonics generation and DFM with wide tunable output in 3-9 mm, IR visualization. AgGaSe2 is useful in the 0.73-18 mm transmission range, and finds applications in the SHG of CO2 lasers, OPO with 3-12 mm output. GaSe is useful in the 0.65-18mm transmission range, and finds applications in the SHG of CO and CO2 lasers, and DFM with output in 7-16 mm. CdSe is useful in the 0.75-25 mm transmission range, and finds applications in the DFM with tunable output up to 25 mm. AgAsS3 is useful in the 0.6-13 mm transmission range and finds applications in the IR visualization, DFM, and OPO. Te is useful in the 3.8-32 mm transmission range, and finds applications in the DFM with output in 15-30 mm.

In view of the growing importance and utility of the NLO, many useful studies [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12] have recently been conducted on the materials, their synthesis and characterization, and other related aspects, which provide a deep insight into the subject.

III. APPLICATIONS OF NLO

There are numerous applications of the NLO in optics and optoelectronics. In fact, the NLO is responsible for bringing revolutionary progress in these fields. Some of the important applications are: (i) Optical phase conjugation, (ii) Optical parametric oscillators, (iii) Photorefractive effect, (iv) Self-focusing, (v) Optical solitons, and (vi) Optical computing. These are briefly discussed below:

(i) **OPTICAL PHASE CONJUGATION (OPC)** The Optical Phase Conjugation refers to the technique of generating a time-reversed replica of the wave, just like the action of the mirror. If there is an electric field $E = A \cos(\omega t - kz - f)$, then after phase conjugation, it becomes $E_c = A \cos(\omega t + kz + f)$, where both k and f are changed into negative, i.e. the time reversal of the wave takes place. Obviously, this technique has applications in processes like lensless imaging, and distortion correction, since they are associated with a frequency shift. The advantage of the NLO technique is that it can be done in real time.

In the generation of the Phase conjugate waves, four wave mixing (FWM) is used. Also, the case of the Degenerate Four Wave Mixing (DFWM) is similar to that of holography. It should be noted that the nondegenerate FWM, produces large frequency shift, which can be used for the stimulated scattering processes. However, the Brillouin scattering involves acoustic waves with small frequency shift. The case of Raman scattering is different in the sense that there are molecular vibrations or optical phonons with larger frequency shift.

The OPC technique is very useful for unraveling the distortions occurred in passing through a distorting medium. It is interesting to note that OPC takes place with the mixing of four waves of the same frequency. The waves 1 and 4 create an interference pattern, and thus produce an intensity dependent refractive index, which behaves like a phase grating, and finally, the wave 3 creates a phase conjugate of wave 2. For phase matching, the parameter wave vector k has to be equal to $-k$.

DFWM involves a third order nonlinear optical process, in which the grating induced by two input waves scatters the third wave, and thus generates the fourth wave. Interestingly, in this case, the inputs are two antiparallel, high power pumps, along with a weaker probe wave, which produce an output which is both amplified and conjugated. This technique differs from the conventional holography gratings, which are recorded in a photographic emulsion. Four Wave Mixing (FWM) is explained below:

In the case of three optical fields present in a nonlinear medium, mixing takes place, resulting in the creation of four waves, as shown in the figure 2.

Let us now discuss the Raman and Brillouin scattering processes mentioned above.

During the mixing of mechanical oscillations with a light beam in a nonlinear medium, there are mechanical variations i.e. variations of intra-atomic distance in a molecule, or variations of density in a solid or liquid. As a result, frequency spectrum of light is modified along with

the emission or absorption of phonons. In case of the Brillouin scattering, the parameter n is a function of density, as this involves the Debye-Sears effect, which means that an acoustic wave scatters light with a Doppler shift. Therefore, the electronic polarization creates pressure variations. So in this case, light can pump a sound wave, and then can get scattered back with a slightly different frequency. Therefore, in case of the stimulated Brillouin scattering, interaction of photons with acoustic phonons takes place. The case of Raman scattering is also very interesting, in which the intraatomic distance in the molecule is changed, when the electron cloud is displaced. So this involves the vibration state of molecules. Also, in case of the Raman scattering, interaction of photons with optical phonons, takes place. The important difference between the two is that the variables in Raman scattering are microscopic, while in case of the Brillouin scattering, these are macroscopic.

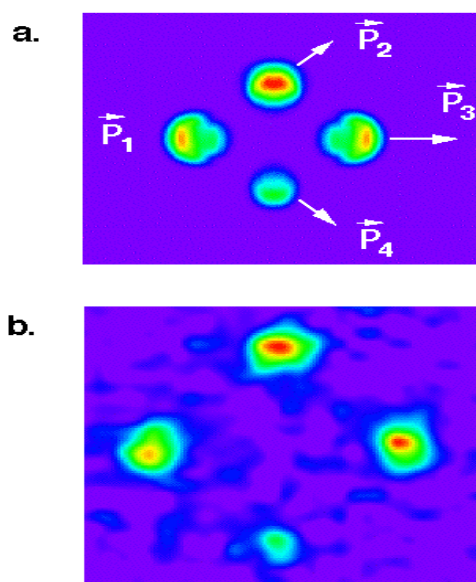


FIGURE 2. Four Wave mixing (FWM) – (a) and (b). Figure courtesy M/s. Google.

Imaging and Aberration correction using phase conjugate mirror (PCM) is very important for the case of the optical systems working in the turbulent media, and also for telescopic observations. For this imaging and aberration correction, the following setup is used:

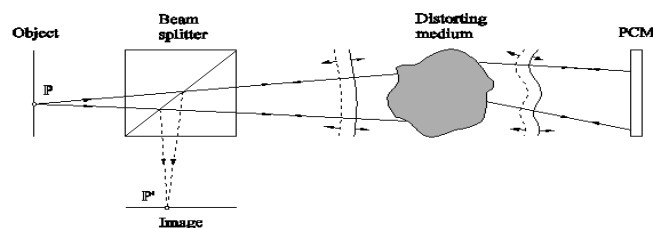


FIGURE 3. Basic two-pass schematic for imaging and aberration correction using a PCM.

The light from an object is incident on a beam splitter, and sends out a wavefront shown by the continuous line, which on passing through the distorting medium is distorted, as shown, and then is incident on the PCM. The reflected wavefront, after passing through the distorting medium restores the original wavefront and hence forms the corrected image in spite of the aberrations present in the medium. The image restoration can be done by the using the PCM. It has been observed that severely distorted laser beams can be corrected for the distortions produced after passing through the imperfect optics. The high power amplifiers are known for often distorting the laser beams, which makes them unsuitable for conducting the experiments. These distortions are corrected by double passing the amplifier using a PCM.

In some cases, the frequency of the conjugate wave taken is different from that of the signal wave. If we consider the pump waves are of frequency $\omega_1 = \omega_2 = \omega$, and the signal wave is of higher frequency, so that $\omega_3 = \omega + \Delta\omega$, then the conjugate wave produced is of frequency $\omega_4 = \omega - \Delta\omega$, and this is known as frequency flipping. The NLO can be used to exactly reverse the propagation direction and phase variation of a beam of light, and the reversed beam is called a conjugate beam, and therefore, this technique is called the optical phase conjugation. The process can also be looked as time reversal, wavefront reversal, and retroreflection of light.

It is very interesting to understand the three-wave-mixing process and from a photon-optics perspective as a process of three photon interaction, in which two photons of lower frequency, ω_1 and ω_2 are annihilated, and a photon of higher frequency ω_3 is created. Sometimes, the reverse happens - the annihilation of a photon of high frequency ω_3 is accompanied by the creation of two low-frequency photons, of frequencies ω_1 and ω_2 . It can be seen that $\hbar\omega$ and $\hbar k$ are respectively the energy and momentum of a photon of frequency ω and wave vector k , $\hbar$ being the reduced Planck's constant. Thus, the conservation of energy and momentum, in either case, requires that: $\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 = \hbar\omega_3$, and $\hbar k_1 + \hbar k_2 = \hbar k_3$, where k_1 , k_2 and k_3 are the wave vectors of the three photons. These equations show that they represent the frequency matching and, the phase matching conditions.

(ii) OPTICAL PARAMETRIC OSCILLATORS (OPOs). It is really very interesting for the optical engineers to know that the OPC converts the pump wave into two coherent light waves, both with longer wavelengths. The schematic for this device is shown below:

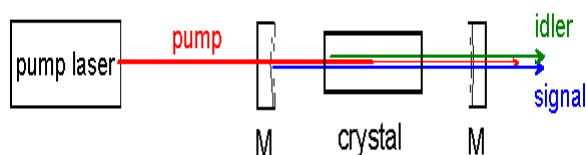


FIGURE4. Schematic of the Optical Parametric Oscillator.

The OPO consists of the NLO crystal placed between two mirrors, as shown in the figure. The OPC is able to convert the pump wave into two coherent light waves, both with longer wavelengths, and also shifted from the original path. One is called the 'idler' and the other the 'signal'. This is really very useful and handy for the researchers and scientists, as it has many applications including Light detection and ranging (LIDAR), High resolution spectroscopy, Medical research, Environmental monitoring, Display technology, and Precision frequency metrology.

(iii) PHOTOREFRACTIVE EFFECT. Photorefractive Effect is the phenomenon of a change of the local index of refraction due to the illumination of a beam with spatial variation of intensity, which is observed by passing the laser beams through electro optic crystals like - LiNbO₃, BaTiO₃, KNbO₃, and LiTaO₃. The Model for Photorefractive effect is very simple, and is based on the fact that there are impurities with energy levels around the middle of band gap *i.e.* donors. Obviously, the electrons get excited by the enough photon energy, which migrate and get trapped at nearby sites in the dark side. Due to the space charge separation, E field is affected, and this causes a change in the refractive index n . The photorefractive effect can create a periodic medium, and is associated with many important phenomena involving the scattering of light from gratings or holograms. Apart from the wave mixing, and phase conjugation, the NLO has applications in the dynamic holography. The medium having dielectric constant a periodic function of position acts like a grating.

The nonlinear optics technique is used to produce many exotic events, like – (i) changing the color of a light beam, and also changing its shape in space and time, (ii) switching telecommunications systems, and (iii) creating the shortest events *e.g.* transmitting IR radiation through a crystal yields the display of green light, as shown in the following figure:

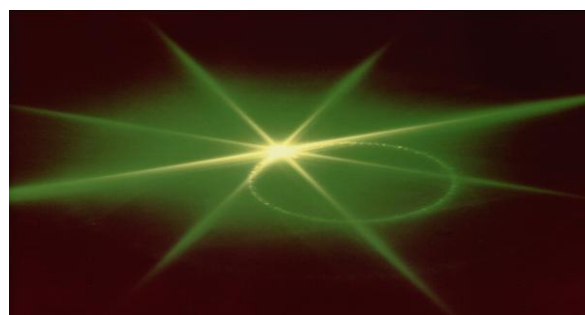


FIGURE 5. Display of green light by transmitting IR radiation through a crystal. FIGURE courtesy M/s. Google.

(iv) SELF-FOCUSING. Self-focusing is the phenomenon due to the Optical Kerr effect, and the higher order nonlinearities, which are caused by the spatial variation in the intensity, and hence create a spatial variation in the refractive index.

(v) OPTICAL SOLITONS. In the optical solitons, there is an equilibrium solution for either an optical pulse *i.e.*

temporal soliton or the spatial mode *i.e.* the spatial soliton, which does not change during propagation due to a balance between diffraction and the Kerr effect *e.g.* by self-phase modulation for temporal and self-focusing for spatial solitons.

(vi) OPTICAL COMPUTING. The optical techniques can provide a number of ways of extending the information processing capability of electronics. In fact, it is now well understood that large quantities of data can be generated from different resources, and hence powerful computers are required to process them. For this type of work, the use of electronics is not sufficient, and therefore, it has to be augmented by the use of optics for providing the solutions. This has led to the fabrication of digital optical computer, which requires the use of nonlinear optics.

IV. NLO PROPERTIES OF NOBLE METAL NANOPARTICLES AND COMPOSITES

Recently, a lot of work is going on for studying and using the NLO properties of Noble Metal Nanoparticles and Composites. The emphasis is on understanding and applying the nonlinear phenomena in bulk and nanosized metals. Cao and Brongersma [13] have suggested the use of Noble Metal Nanoparticles and Composites for faster and smaller data processing technology.

Let us first consider the linear optical properties, and discuss the permittivity of the metals (ϵ_m), which is given by the following equation:

$$\epsilon_m = \epsilon_{inter} + \epsilon_{intra}, \quad (6)$$

where ϵ_{inter} and ϵ_{intra} are respectively the permittivities due to the interband and intraband transitions.

$$\epsilon_{intra} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - i\gamma)}, \quad (7)$$

and

$$\epsilon_{inter} = 1 + \frac{\omega_p^2}{(\omega_0^2 - \omega^2) - i\gamma\omega}. \quad (8)$$

Where ω_p is the plasma frequency, τ is the mean free time between collisions *i.e.* electron-lattice collision time, γ is the damping constant, which in the quantum mechanical description, is replaced by $1/\tau$.

Papadopoulos *et al.* [14] have studied the variation of the mod of Fermi distribution function $f(\omega)\tau\lambda$ (nm) in the visible region for the cases of Ag: vacuum, Au:Al₂O₃, Au:SiO₂, and Au: vacuum. Their results are quite interesting, and have been reproduced below.

It is observed that whereas, the first case shows the maximum in the UV region, the other three show the distinct maxima in the visible region, with the different amplitudes, and at different wavelengths though quite close to each other.

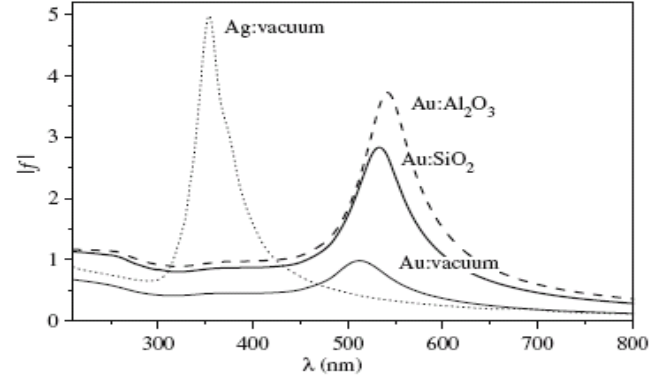


FIGURE 6. Variation of amplitude of $f(\omega)\tau\lambda$ (nm). FIGURE courtesy Papadopoulos M. G., Sadlej A. J. and Leszczynski J., Non-Linear Optical Properties of Matter—From Molecules to Condensed Phases, (Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2006).

After including the terms for NLO effect, these equations are modified as below:

$$P = \epsilon_0 [\chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \dots], \quad (9)$$

$$P^{(3)}(\omega) = 3\epsilon_0 \chi^{(3)}(\omega) |E(\omega)|^2 E(\omega), \quad (10)$$

for the Optical Kerr Effect, and

$$P^{(3)}(3\omega) = \epsilon_0 \chi^{(3)}(3\omega) E^3(\omega), \quad (11)$$

for the Third Harmonic Generation (THG). The refractive index n and the molecular polarizability α are modified as

$$n = n_0 + n_2 I, \quad (12)$$

and

$$\alpha = \alpha_0 + \alpha_2 I. \quad (13)$$

Where α = (dipole moment μ / local field). So the values of the $\chi^{(i)}$ for the real and imaginary parts are respectively given by:

$$\text{Real } \chi^{(3)} = (4/3) \epsilon_0 c n_0^2 n_2, \quad (14)$$

and

$$\text{Imaginary } \chi^{(3)} = (2/3k) \epsilon_0 c n_0^2 \alpha_2. \quad (15)$$

(i) NLO PROPERTIES OF THE NANOPARTICLES (NPs), POLYMERS, AND LIQUIDS. There are many types of NPs like – CdSSe in glass, Gold in glass, polymers like – polydiacetylenes (PTS, BCMU), and liquids like – Acetone, Benzene, Ethanol, Methanol. They have refractive index n , $\chi^{(3)}$ in esu, and n_2 in cm²/W respectively in the ranges 1.5 – 1.7, 1.5×10 to the power minus 8 – 8.0×10 to the power minus 14, and 2×10 to the power minus 10 – 8×10 to the power minus 16. Some of them (PTS and 4BCMU) have even negative values of $\chi^{(3)}$ in esu, and n_2 in cm²/W. There are also NPs of crystals like – CdS, GaAs, and ZnSe,

and glasses like – Fused Silica, BK7, and As2S3 glass having these values in the ranges $1.4 - 2.48$, 1.0×10 to the power minus $10 - 4.4 \times 10$ to the power minus 15 , and 3.3×10 to the power minus $13 - 9.0 \times 10$ to the power minus 17 . The NLO engineers choose the particular material according to the requirement and specifications. Sometimes, the results are not completely in agreement with the theoretically predicted values, and hence after the feedback, the corrections are applied to achieve the optimized results.

Voisin *et al.* [15] have studied the NLO properties of such materials, by investigating the ultrafast electron-electron scattering and energy exchanges in noble-metal nanoparticles. They have investigated the conduction electron energy exchanges in gold and silver nanoparticles with average size in the range from 2 to 26 nm, embedded in different matrices, and also have performed the experimental studies by following the internal thermalization dynamics of photoexcited nonequilibrium electrons with a femtosecond pump probe technique. It has been observed in both the metals, that the measured electron thermalization times are close to the bulk ones for nanoparticles larger than 10 nm, but interestingly are sharply decreasing for smaller ones. Their results show an increase of the efficiency of the electron-electron energy exchanges in small nanoparticles. It has now been established that the origin of intrinsic nonlinearity is due to the thermal and electronic contribution, and also we have to notice the size dependencies.

Recently, noble metals have been finding many applications in the nonlinear optics. In case of the noble metals, the *d*-bands of the electronic structure are filled. Based on this definition, only copper, silver and gold are noble metals, as all *d*-like bands are filled and do not cross the Fermi level. Band structure of the noble metals is shown below:

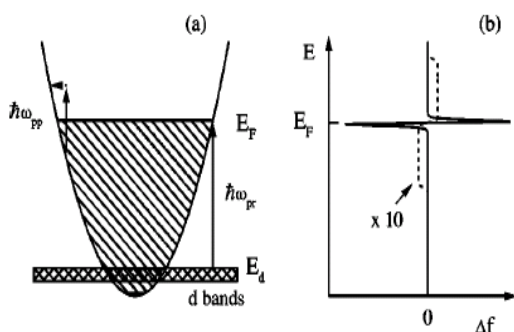


FIGURE 7. Band structure of noble metals. E_d and E_F , shown in this FIGURE represent the energies corresponding to the *d* bands, and the Fermi level.

Takeda *et al.* [16] have measured the variation in ϵ of the effective medium, and the variation in intrinsic ϵ of the metal nanoparticles. Takeda *et al.* [17] have experimentally evaluated the optical nonlinearity of Cu nanoparticle materials by measuring the transient optical spectra employing the pump-probe method. Also, they have

analysed the wavelength dispersions of nonlinear dielectric function on the hot electron contribution using the Maxwell Garnett model with the Drude model for intraband transition and the first principles calculation for interband transition. It has been emphasized that the evaluated dispersion does not directly reflect the local field factor. Some important observations have been made: (i) The experimental dispersions are quite consistent with the calculated values based on hot electron contribution; (ii) The interband transition term in hot electron contribution dominates the dispersion, and attains the lower photon energy beyond the absorption edge, and (iii) The intrinsic interband contribution is not negligible. It has been observed that there are well defined peaks for all the cases – interband term, intraband term, and the total term, both on the positive side and negative side, in the photon energy band from 1.6 eV to 2.6 eV. The variations in ϵ' and ϵ'' are such that in general, when one is positive, the other is negative. The modulus of the interband curve peaks is larger than that of the intraband curve peaks. Of course, as expected, the modulus of the total term curve peaks is much larger.

V. SOME IMPORTANT APPLICATIONS OF THE NLO

Though, the NLO has many applications for research in the physical and medical sciences, some of the important ones are discussed here. One of the most important ones is the use of the gold nanoparticles (NPs) for photothermal therapy in treating cancer. Huang *et al.* [18] have shown the potential use of the enhanced nonlinear properties of gold nanospheres in photothermal cancer therapy by applying this technique based on the SHM, and using 800nm excitation, which is transparent to skin. It has been observed that this technique requires ~ 20 times lower energy to destroy cancer cells, as compared to the earlier techniques, and hence does not have serious harmful sideeffects. Three types of cases - NPs in solution, NPsIgG in solution, and NPsIgG on cell, have been investigated, and the variation of the optical density with wavelength in the 450nm – 800nm have been studied (Figure 8a). The peak optical density equal to unity is available in the 500 nm – 550 nm range in each case. The technique has been found to be useful in treating cancer cells (Figure 8b). These results have been reproduced below.

The other important application is for All-optical switching in subwavelength metallic grating structure containing Au:SiO₂ composite material, which is based on the optical Kerr effect. Min *et al.* [19] have proposed and numerically investigated the all-optical switching based on a subwavelength metallic grating structure containing nonlinear optical materials. They have used the metal-dielectric composite material in the switching for its larger third-order nonlinear susceptibility ($\sim 10^{-7}$ esu) and the ultrafast response properties. It has been observed that the calculated dependence of the signal light intensity on the pump light intensity has a bistable behavior, which results in a significant switch effect. The study of this switching

structure has established many novel advantages like - smaller size, requirement of lower pump light intensity, and shorter switching time $\sim$ picosecond level.

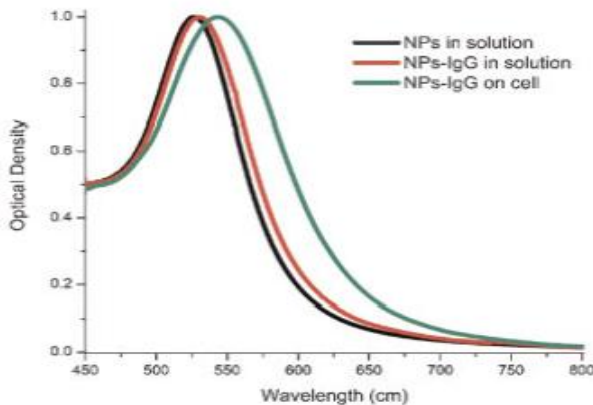


FIGURE 8a. Variation of the optical density with wavelength for the NPs.

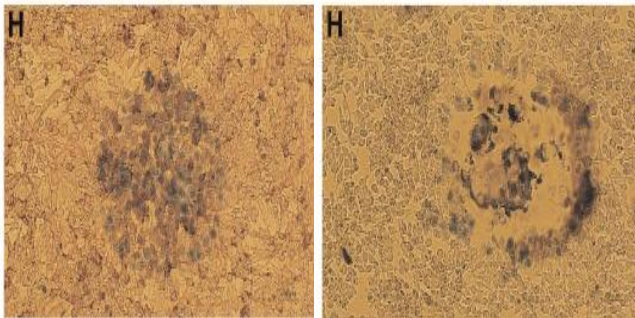


FIGURE 8b. Photothermal cancer therapy using gold nanoparticles. Figure courtesy Huang X., Qian W., El-Sayed I. H., and El-Sayed M. A., *Lasers in Surgery and Medicine*, **39**, 747 – 753 (2007).

The experimental arrangement and the switching in subwavelength metallic grating structure, have respectively been shown in the Figures 9a and 9b. The variation of signal transmission with time (ps) and wavelength (nm), and the variation of transmission with wavelength (nm) have respectively been shown in the LHS and the RHS of the Figure 9c.

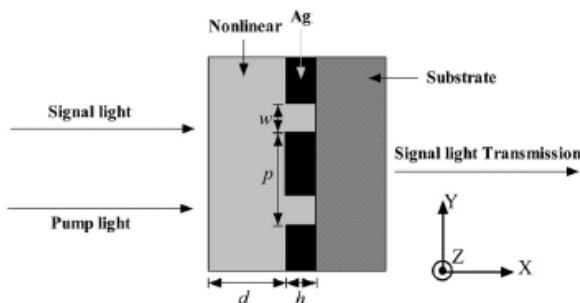


FIGURE 9a. Schematic of the subwavelength metallic grating structure.

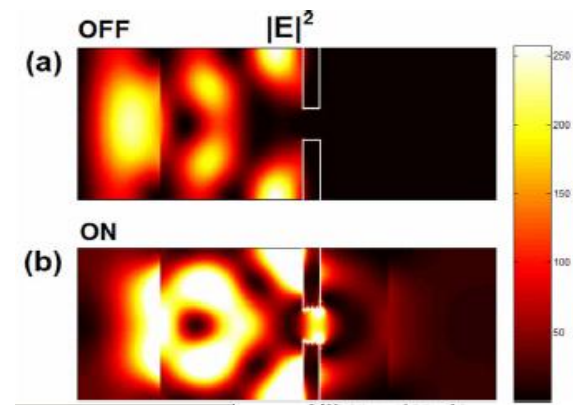


FIGURE 9b. Illustration of the ‘All-optical switching’.

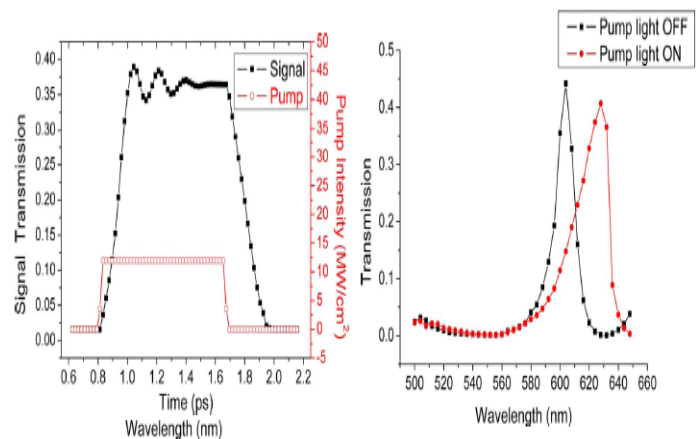


FIGURE 9c. The variation of signal transmission with time (ps) and wavelength (nm) –left; and the variation of transmission with wavelength (nm) –right. FIGURE courtesy Min C., Wang P., Chen C., Deng Y., Lu Y., Ming H., Ning T., Zhou Y., and Yang G., *Opt. Lett.* **33**, 869-871 (2008).

It is observed that the signal transmission increases more than three times, and the transmission peaks are slightly shifted (~ 35 nm) wrt the other. Also, the peak value is slightly reduced (by $\sim 15\%$) in pump light on position from that in the pump light off position. These observations are really crucial for the all-optical switching.

There is an increasing need for faster and smaller data processing technology, and understanding nonlinear phenomenon in bulk and nanosized metals. The concept of the “Ultra-fast active plasmonics” has been explained recently by MacDonald *et al.* [20], who have reported the results of their investigations on (i) the dependence of optical conductivity on energy, (ii) the dependence of SPP signal modulation (a.u.) on the pump-probe delay (ps), and (iii) the variation of the SPP signal modulation on the pump fluence (mJ/cm^2). They have emphasized that the surface plasmon polaritons, propagating bound oscillations of electrons and light at a metal surface, have great potential as information carriers for the highly integrated nanophotonic devices of the next generation. They have reported that the femtosecond optical frequency plasmon pulses can propagate along a metal–dielectric waveguide, and that they

can be modulated on the femtosecond timescale by direct ultrafast optical excitation of the metal, and hence have concluded that it is possible to have terahertz modulation bandwidth, which is an astonishingly great speed - at least five orders of magnitude faster than the earlier existing technologies.

The curves of the dependence of the signal SPP modulation on the pump-probe delay, display well defined peaks centred at zero pump probe delay, and have been reproduced in the figure given below:

The variation of the signal SPP modulation with the pump fluence (mJ/cm^2) for the fast component and the slow component are observed to be of the similar form, but in the ratio (the fast component to the slow component) of 2 or more at each value of the pump fluence. Caspers *et al.* [21] have extended this work by studying the silicon based ultrafast active plasmonics near the $1.5 \mu\text{m}$ wavelength.

VI. CONCLUSIONS

On the basis of the research work carried out so far on the NLO, it has been established that the noble metals are promising candidates for nonlinear optics, ultra-fast active plasmonics, and medical therapy applications. The NLO designers consider their size, surrounding medium and excitation characteristics so as to engineer them to have optimum desired response. Research work is progressing for providing further insight to quantum metallic systems, by using ultrashort high power pulses, and the nonequilibrium electron distribution studies. Recently, Cai *et al.* [22] have done a remarkable study, and have shown the electrically controlled nonlinear generation of light with plasmonics, which is expected to be of great use in many plasmonics based NLO devices.

Serious efforts are expected to be made in various other fields like - Optical Computing, Fourier Optics using FWM, Image Subtraction, Optical Interconnection, Amplification, Dispersion cancellation, Optical switches with dynamic holography (1 ms recording time). Optics has an important role to play in optical computing *e.g.* digital optical computers, based on the NLO technology. Some newer ideas and applications in nonlinear optics have been reported [23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31] during the last decade. Soljacić and Joannopoulos [23] have investigated and discussed in detail the enhancement of nonlinear effects using photonic crystals. Cowan and Young have [24] suggested a good technique of the mode matching for second-harmonic generation in photonic crystal waveguides. Mookherjee and Yariv [25] have shown the second-harmonic generation with pulses in a coupled-resonator optical waveguide. Sun *et al.* [26] have given a very novel idea of the photonic nonlinearities via Quantum Zeno blockade. Soljacić *et al.* [27] have provided a technique of the photonic crystal slow light enhancement of nonlinear phase sensitivity. Soljacić *et al.* [28] have been able to show the optimal bistable switching in nonlinear photonic crystals. Xu *et al.* [29] have done a detailed Quantum analysis and the classical analysis of spontaneous emission

in a microcavity. Payam *et al.* [6] have analysed the Type-0 second order nonlinear interaction in monolithic waveguides of isotropic semiconductors. Another important study has been made by Yaniket *et al.* [30], who have established the high contrast all-optical bistable switching in photonic crystal microcavities.

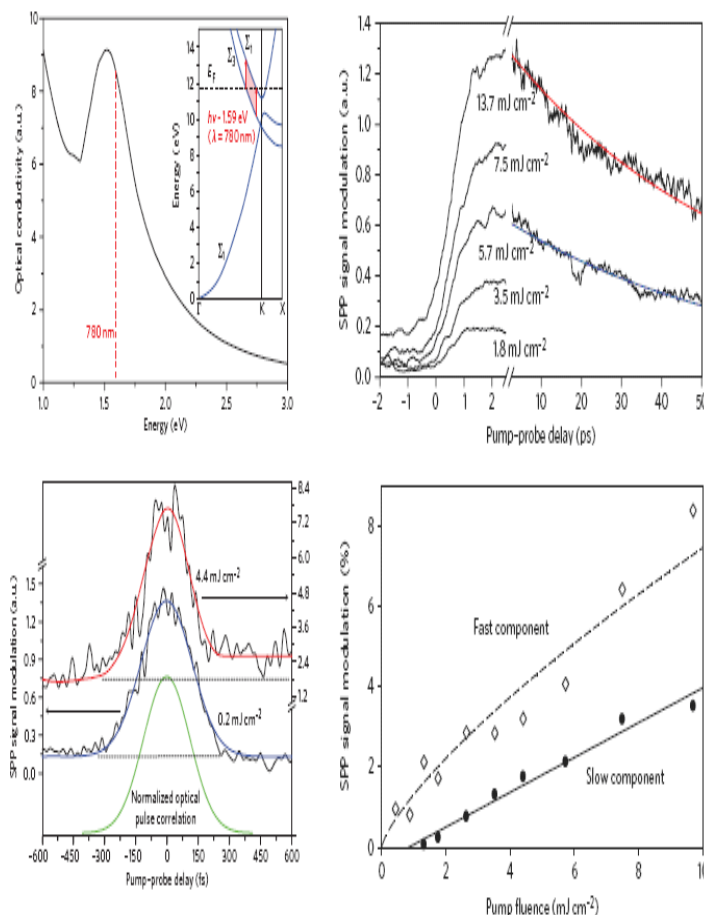


FIGURE 10. The curves of the dependence of the signal SPP modulation on the pump-probe delay, display well defined peaks centred at zero pump probe delay. FIGURE courtesy MacDonald, K. F., Sámson, Z. L., Stockman, M. I. and Zheludev, N. I. *Nature Photon.* 3, 55–58 (2009).

Optical Techniques associated with the NLO, provide many ways of extending the information processing capability of electronics, because of the fact that huge quantities of data can be generated from different resources, which require a powerful computer for processing them. Some solutions in this direction can be obtained not by electronics alone, and hence, the NLO systems are very usefully employed in these cases. Some of the commonly used materials for the NLO applications are - GaSe, CdSe, AgAsS₃, and LiIO₃ with transmissions in the different regions and having utility for different applications. Efforts are being made to find newer elements and also to improve the performance of the devices based on these materials.

Though the topic of Nonlinear Optics at preset has grown into a vast and active field with a lot of potential for technological applications, the NLO materials capable of

giving the optimized components, have still to be realized in practice. The organic nonlinear optical materials are expected to play an important role in the future applications of the NLO. Various new nonlinear optical materials and devices have been developed, but are still in the infancy stage, and efforts are being made to improve their performance. Research efforts are focused on realizing the efficient purely optical information processing systems. Thus, it can be safely concluded that the topic of the NLO is on a firm footing, and expected to be used in the newer and important applications.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author is grateful to the Dr. Nand Kishore Garg, Chairman, Maharaja Agrasen Institute of Technology, GGSIP University, Delhi for providing the facilities for carrying out this research work, and also for his moral support. The author is thankful to Dr. M. L. Goyal, Director, for encouragement. Thanks are also due to Dr. V. K. Jain, Deputy Director, for his support during the course of the work. The author is also thankful to M/s Google and the listed agencies for providing the images. The author is also grateful to Prof. V. K. Tripathi, Department of Physics, Indian Institute of Technology, Delhi for showing interest in the work. The author is sincerely grateful to Prof. Dr. Cesar Mora, Editor-in-Chief of Latin American Journal of Physics Education, for his encouragement and various useful suggestions, which contributed a lot towards the improvement in the presentation and readability of the paper.

REFERENCES

[1] Guillet Y., Rashidi-Huyeh M. and Palpant B., *Phys. Rev. B* **79**, 045410 (2009).
 [2] Novotny L. and Hecht B., *Principles of Nano-Optics*, (Cambridge University Press, New York, 2006).
 [3] Boyd, R., *Nonlinear Optics (3rd ed.)*, (Academic Press, United Kingdom, 2008).
 [4] Shen, Yuen-Ron, *The Principles of Nonlinear Optics*, (Wiley Interscience, Hoboken, New Jersey, 2002).
 [5] Agrawal, G., *Nonlinear Fiber Optics (4th ed.)*, (Academic Press, San Diego, CA, 2006).
 [6] PayamAbolghasem, Han Junbo, BijlaniBhavin J. and Helmy Amr S., *Type-0 second order nonlinear interaction in monolithic waveguides of isotropic semiconductors*, *Opt. Express***18**, 12681–12689 (2010).
 [7] Tsai, H. C., Kuo, W. J. and Hsiue, G. H., *Highly Thermal Stability Main-chain Nonlinear Optical Polyimide Based on Two-Dimensional Carbazole Chromophores*, *Macromol. Rap. Commun.* **26**, 986 (2005).
 [8] Sheikshoaie, I., Nia, S. S., Monadi, N. and Khabazzadeh, H., *Some Quantum Chemical Study about the Second-Order Non-linearity of Two Imino Chromophores Containing Salen Group*, *J. Appl. Sci.* **7**, 145 (2007).

[9] Handayani, S. I. and Arty, I. S., *Synthesis of Hydroxyl Radical Scavengers from Benzalacetone and its Derivatives*, *J. Phys. Sci.* **19**, 61 (2008).
 [10] Janarthanan, S., Rajan, Y. C., Umarani, P. R., Jayaraman, D., Premanand, D. and Pandi S., *Synthesis, Growth, Optical and Thermal Properties of a New Organic Crystal Semicarbazone of P-anisaldehyde (SPAS)*, *Ind. J. Sci. Tech.* **3**, 885 (2010).
 [11] Huang, J. P. and Yu, K. W., *Enhanced nonlinear optical responses of materials: Composite effects*, *Phys. Rep.* **431**, 87–172 (2006).
 [12] Lippitz, M., van Dijk, M. A., Orrit, M., *Third-harmonic generation from single gold nanoparticles*, *NanoLett.* **5**, 799–802 (2005).
 [13] Cao, L. and Brongersma, M. L., *Active Plasmonics: Ultrafast developments*, *Nature Photonics* **3**, 12 – 13 (2009).
 [14] Papadopoulos, M. G., Sadlej, A. J. and Leszczynski, J., *Non-Linear Optical Properties of Matter—From Molecules to Condensed Phases*, (Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2006).
 [15] Voisin, C., Christofilos, D., Loukakos, P. A., Fatti, N. D., Vallée, F., Lermé, J., Gaudry, M., Cottancin, E., Pellarin M., and Broyer, M., *Ultrafast electron-electron scattering and energy exchanges in noble-metal nanoparticles*, *Phys. Rev. B* **69**, 195416 (2004).
 [16] Takeda, Y., Plaksin, O. A. and Kishimoto, N., *Dispersion of nonlinear dielectric function of Au nanoparticles in biblical glass*, *Opt. Express* **15**, 6010-6018 (2007).
 [17] Takeda, Y., Momida, H., Ohnuma, M., Ohno, T. and Kishimoto, N., *Wavelength dispersion of nonlinear dielectric function of Cu nanoparticle materials*, *Opt. Express* **15**, 7471-7479 (2007).
 [18] Huang, X., Qian, W., El-Sayed, I. H. and El-Sayed, M. A., *The potential use of the enhanced nonlinear properties of gold nanospheres in photothermal cancer therapy*, *Lasers in Surgery and Medicine* **39**, 747 – 753 (2007).
 [19] Min, C., Wang, P., Chen, C., Deng, Y., Lu, Y., Ming, H., Ning, T., Zhou, Y. and Yang, G., *All-optical switching in subwavelength metallic grating structure containing nonlinear optical materials*, *Opt. Lett.* **33**, 869-871 (2008).
 [20] MacDonald, K. F., Sámson, Z. L., Stockman, M. I. and Zheludev, N. I., *Ultrafast active plasmonics*, *Nature Photon.* **3**, 55–58 (2009).
 [21] Caspers, J. N., Rotenberg, N. and van Driel, H. M., *Silicon based ultrafast active plasmonics near 1.5 μm* , *IEEE Xplore*, ieeexplore.ieee.org/iel5/5876646/5950009/05951425.
 [22] Cai, W., Vasudev, A. P. and Brongersma, M. L., *Electrically controlled nonlinear generation of light with plasmonics*, *Science* **333**, 1720-1723 (2011).
 [23] Soljacić, M. and Joannopoulos, J. D., *Enhancement of nonlinear effects using photonic crystals*, *Nat. Mater.* **3**, 211–219 (2004).
 [24] Cowan, A. R. and Young, J. F., *Mode matching for second-harmonic generation in photonic crystal waveguides*, *Phys. Rev. B, Condens. Matter* **65**, 085106 (2002).

- [25] Mookherjea, S. and Yariv, A., *Second-harmonic generation with pulses in a coupled-resonator optical waveguide*, Phys. Rev. E, Stat. Phys. Plasmas Fluids Relat. Interdiscip. Top. **65**, 026607 (2002).
- [26] Sun, Yu-Zhu, Huang, Yu-Ping, Kumar, Prem., *Photonic Nonlinearities via Quantum Zeno Blockade*, Phys. Rev. Lett. **22**, 110 (2013).
- [27] Soljacić, M., Johnson, S. G., Fan, S., Ibanescu, M., Ippen, E. and Joannopoulos, J. D., *Photonic-crystal slow-light enhancement of nonlinear phase sensitivity*, J. Opt. Soc. Amer. B, Opt. Phys. **19**, 2052–2059 (2002).
- [28] Soljacić, M., Ibanescu, M., Johnson, S. G., Fink, Y. and Joannopoulos, J. D., *Optimal bistable switching in nonlinear photonic crystals*, Phys. Rev. E, Stat. Phys. Plasmas Fluids Relat. Interdiscip. Top. **66**, 055601R (2002).
- [29] Xu, Y., Lee, R. K. and Yariv, A., *Quantum analysis and the classical analysis of spontaneous emission in a microcavity*, Phys. Rev. A, Gen. Phys. **61**, 33 808 (2000).
- [30] Yanik, M. F., Fan, S. and Soljacić, M., *High-contrast all-optical bistable switching in photonic crystal microcavities*, Appl. Phys. Lett. **83**, 2739–2741 (2003)

LATIN AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS EDUCATION

Volume 8, Number 1, March 2014

CONTENTS/CONTENIDO

Editorial	1-2
Papers/Artículos	
Analizing high school students' problem solving through their personal epistemologies Coleoni Enrique Andrés, Buteler Laura María, Perea María Andrea	3-12
Organization and realization of the experimental cycle of scientific cognition at Physics study Natalia Podoprygora	13-21
Actividad de Investigación Científica en ambiente universitario: un estudio de sus contribuciones para estudiantes de la Enseñanza Media Ariane Baffa Lourenço, Pedro Donizete Colombo Junior, Marcello Rubens Barsi Andreeta, Juan Julián Guíllarón, Antonio Carlos Hernandes	22-30
Conceptos y preconceptos de cinemática y dinámica en ingresantes a carreras de ingeniería Gloria E. Alzugaray, Claudio M. Enrique, Carlos R. Esterkin	31-37
Questões interdisciplinares com enfoque CTS: uma proposta para o ensino médio Edmundo Rodrigues Junior, Adriana G. Dickman, Cassiana B. Hygino, Marília P. Linhares	38-51
Enseñanza de la Física y desarrollo del Pensamiento Crítico Antonio Lara-Barragán Gómez, Guillermo Cerpa Cortés	52-59
El aprendizaje significativo de la mecánica considerada como una estructura compleja Mateo Barkovich	60-64
Adaptación y validación del Scale of Attitudes Towards Physics (SAP) en una muestra de estudiantes chilenos de ingeniería Jorge Pinochet, Maximiliano Rivera	65-74

continued/continuación

LATIN AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS EDUCATION
Vol. 8, Number 1, March 2014

contents/contenido

Physics courses for non-physicists; what should (and should not) be done F. A. Horta Rangel, T. González Cruz and A. González Arias	75-80
El modelo TPACK como encuadre para enseñar electrostática con simulaciones Garcia, Daiana; Domínguez, Alejandra; Stipcich, Silvia	81-90
La potencialidad de las simulaciones de campo eléctrico desde la perspectiva de la teoría de los campos conceptuales de vergnaud Gloria E. Alzugaray, Marta B. Massa, Marco A. Moreira	91-99
The Wimshurst machine as an electric circuit Horacio Munguía Aguilar	100-103
Tráfico de vehículos con autómatas celulares Ramón Sebastián Salat Figols	104-108
Spring-magnet oscillations through a boredconductive plate Celso L. Ladera, Guillermo Donoso and Pablo Martín	109-117
Amplificadores com transistores bipolares na configuração Darlington para pequenos sinais Francisco José Arnold, Rony da Silva Albano, Talía Simões dos Santos	118-125
Puntualizaciones en las aplicaciones didácticas de la ley de Stokes Ricardo Fernández Cruz, José Luis Hernández Pérez, Jaime Solá de los Santos	126-131
On the back of the clouds Tamás Stonawski	132-135
Sistemas de referencia en la enseñanza de la Astronomía. Un análisis a partir de una revisión bibliográfica Diego Galperin, Andrés Raviolo	136-148

continued/continuación

LATIN AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS EDUCATION
Vol. 8, Number 1, March 2014

contents/contenido

A Tutorial on the Technical Analysis of Dye Lasers and short Review of their Novel Applications Kamal Nain Chopra	149-154
Analytical solutions to the fractional wave equation with variable dielectric function H. Yépez-Martínez, J. M. Reyes and I. O. Sosa	155-161
Solitons propagation in a self-refractive waveguide O. Díaz-Hernández, G. J. Escalera Santos, S. Mendoza, R. Arceo and A. Zuñiga-Segundo	162-166
Dynamics on a spherical surface in accelerated dilation with a pressure difference Adrián G. Cornejo	167-171
Let us derive Lorentz Transformation Equations through a more heuristic way for students Farzan Momeni	172-174
Magnetic field of an electric quadrupole moment in non-relativistic motion Alfonso Queijeiro Fontana	175-176
Visualización de la propagación electrónica en guías de onda cuánticas P.A Pantaleón, Roberto Romo, Alberto Hernández Maldonado	177-182
Efectos físicos del envolvente sobre el colapso gravitacional de un núcleo de gas Guillermo Arreaga-García, Silvio Oreste-Topa, Brenda Pérez-Rendón, Lorenzo Olguín-Ruiz	183-189
Fuerza ficticia en un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado Sergio Diago, Cindy Osorio, Paola Ricardo	190-198

continued/continuación

continued/continuación

LATIN AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS EDUCATION
Vol. 8, Number 1, March 2014

contents/contenido

Grados de libertad ondulatorios no suprimidos en la <i>difusión</i> electromagnética J. D. Bulnes, Vando da C. Moraes	199-202
Enseñanza de plasmas físicos en el nivel medio superior Fidel Benjamín Alarcón Hernández, María del Pilar Segarra Alberú, Jorge Barojas Weber	203-212
El inicio de las representaciones gráficas en el campo de la física J. M. Rivera-Juárez, J. Madrigal-Melchor, T. Saucedo-Anaya, E. Cabrera-Muruato	213-217
Interdisciplinariedad en la carrera de Ingeniería Agrónoma: un enfoque desde la disciplina de Física Yaíma Rodríguez Peña	218-223
Noble metal nanoparticles and composites for nonlinear optics and its applications -A technical analysis and short review Kamal Nain Chopra	224-234