



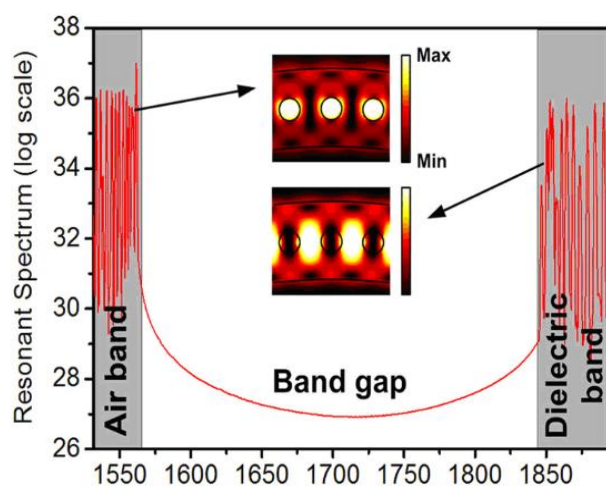
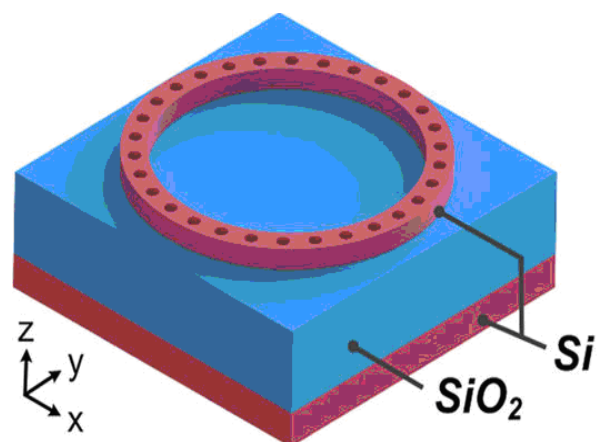
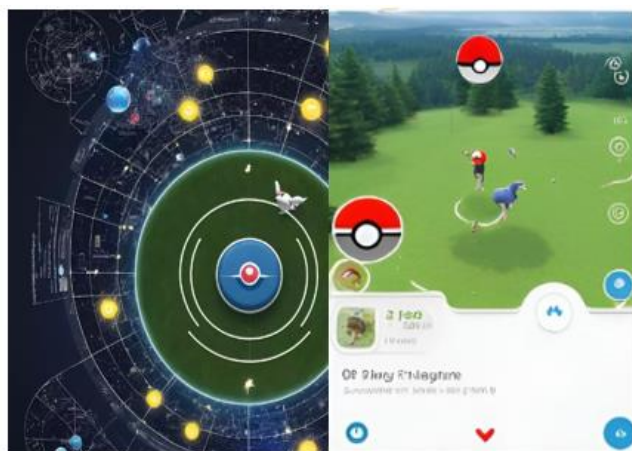
LATIN AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS EDUCATION

www.lajpe.org

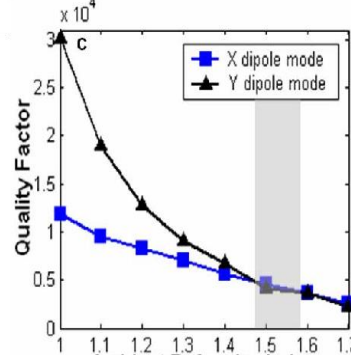
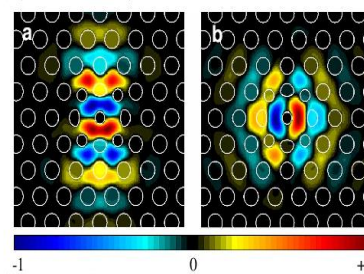
Volume 19

Number 2

June 2025



Scale bar, 2 μm . Inset scale bar, 1 μm .



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

R. Bourbaki

r.bourbaki@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 boubarkic@gmail.com 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: César Mora and C. Bourbaki, Editors in Chief, Instituto Pedagógico Latinoamericano y Caribeño (Cuba), calle 154 No. 12906 entre 129 y

133 Reparto Reynold Garcia, Matanzas, Cuba CP 40100. Phone: 53 45 265794

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)
Freidrich Herrmann, University of Karlsruhe (Germany)
Hiroshi Kawakatsu, Kagawa University (Japan)
Jorge Barojas Weber, Universidad Nacional Autónoma de México (México)
Laurence Viennot, Université Paris 7 (France)
Marisa Michelini, University of Udine (Italy)
Marco Antonio Moreira, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Brazil)
Minella Alarcón, UNESCO (France)
Orhan Karamustafaoğlu, Amasya University, (Turkey)
Pratibha Jolly, University of Delhi (India)
Ton Ellermeijer, (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)
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)
Carlos Bourbaki, Instituto Pedagógico Latinoamericano y Caribeño (Cuba)

ISSN 1870-9095

Copyright © 2025 Latin American Physics Education Network. (www.lajpe.org)

LATIN AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS EDUCATION

Volume 19, Number 2, June 2025

CONTENTS/CONTENIDO

Papers/Artículos

Harmonic Distortion in Radio Frequency Signals Introducing Nonlinear Systems Thonimar V. Alencar	2301
O uso da realidade aumentada no ensino de física: uma investigação no ensino superior Gizele Iank Leite, Alessandra Dutra, Sani de Carvalho Rutz da Silva, Awdry Feisser Miquelin	2302
Novel Concepts of Mode Volume and Quality Factor in Research Applications of Photonic Nanocavities and Ring Resonators Kamal Nain Chopra and Shivani Aggarwal	2303
Elementos de reflexión para el desarrollo de la semiótica en la física, a partir de la semiótica en las matemáticas y del lenguaje. Parte I Rubén Sánchez Sánchez	2304
The Motion of a Hoop with an Attached Mass Causes to Jump Seyedeh Zahra Hosseini, Hossein Vaseei, Amin Reza Mahmoodi, Mahan Fallahpour	2305
The Enigma of the Chirping Echo: Unveiling the Acoustics of Chichen Itza's Pyramid Amin Reza Mahmoodi, Seyedeh Zahra Hosseini, Mahan Fallahpour	2306
The Mechanical Resistance of Eggs to Crack by Tapping Together Mahan Fallahpour	2307
Fundamentos del nano secado por aspersión y su aplicación como etapa de purificación de nanofármacos N. Ramirez-Guerrero, O. Gonzalez-Rodriguez, R. Casañas-Pimentel	2308
“Luz, Cámara ... ¡Acción!” o Luz, Campo magnético, Gravedad Jeremías Romero	2309

LATIN AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS EDUCATION

Volume 19, Number 2, June 2025

CONTENTS/CONTENIDO

Papers/Artículos

Inspiración para implementar la aproximación semiótica a la Educación en Física

Inspiración para implementar la aproximación semiótica a la Educación en Física

Rubén Sánchez Sánchez

2310

Harmonic Distortion in Radio Frequency Signals Introducing Nonlinear Systems



ISSN 1870-9095

Thonimar V. Alencar¹

¹*Departamento de Ciências Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, ES, Brasil.*

E-mail: thonimar.souza@ufes.br

(Received 3 February 2025, accepted 29 May 2025)

Abstract

This paper presents an experiment aimed at introducing undergraduate physics students to nonlinear systems and harmonic generation. By analyzing the spectrum of a radio-frequency signal that has been clipped by silicon diodes, students can explore the differences between linear and nonlinear systems. The experiment demonstrates that asymmetric clipping introduces even harmonics, which are typically absent in symmetrically clipped waveforms. Harmonic distortion, characterized by the addition of unwanted frequency components, is quantified using Total Harmonic Distortion (THD), highlighting its dependence on the degree of clipping. Through this hands-on approach, students gain a deeper understanding of the practical implications of harmonic distortion in electronic circuits and its relevance to fields such as radio communication and audio engineering. By bridging the gap between theoretical concepts and practical observations, this experiment makes the study of nonlinear phenomena and harmonic generation accessible to undergraduate physics education, a subject often reserved for research involving high-power lasers.

Keywords: nonlinear systems, harmonic generation, undergraduate physics education

Abstract

This paper presents an experiment aimed at introducing undergraduate physics students to nonlinear systems and harmonic generation. By analyzing the spectrum of a radio-frequency signal that has been clipped by silicon diodes, students can explore the differences between linear and nonlinear systems. The experiment demonstrates that asymmetric clipping introduces even harmonics, which are typically absent in symmetrically clipped waveforms. Harmonic distortion, characterized by the addition of unwanted frequency components, is quantified using Total Harmonic Distortion (THD), highlighting its dependence on the degree of clipping. Through this hands-on approach, students gain a deeper understanding of the practical implications of harmonic distortion in electronic circuits and its relevance to fields such as radio communication and audio engineering. By bridging the gap between theoretical concepts and practical observations, this experiment makes the study of nonlinear phenomena and harmonic generation accessible to undergraduate physics education, a subject often reserved for research involving high-power lasers.

Keywords: nonlinear systems, harmonic generation, undergraduate physics education

I. INTRODUCTION

The transmission of a signal through a circuit can lead to distortion, which is characterized by a change in the waveform of the signal [1]. This distortion is particularly common when the circuit responds nonlinearly to the input signal, resulting in the generation of harmonics - frequencies that are multiples of the fundamental frequency of the input signal [2, 3, 4, 5]. Understanding the impact of harmonic distortion on radio frequency signals offers a valuable opportunity to introduce students to nonlinear physical systems and the concept of harmonic generation [6, 7, 8, 9, 10].

Nonlinear systems, often represented mathematically by nonlinear differential equations, are prevalent in physics. They encompass a wide range of phenomena, from the motion of an anharmonic pendulum in classical mechanics [11, 12, 13] to the behavior of an LRC circuit in electronics [14].

Unlike linear systems, nonlinear systems often lack analytical solutions, requiring numerical methods for analysis [15, 16, 17].

Harmonic generation, a key characteristic of nonlinear systems, occurs in various physical contexts, such as studying standing waves on strings and acoustic waves in tubes. In electromagnetic waves, harmonic generation arises from the interaction between light and matter, especially in media with nonlinear optical properties [18, 19]. Traditionally, observing harmonic generation has been limited to research laboratories that are equipped with high-power pulsed lasers, making it inaccessible to most undergraduate students.

To address this gap, this paper proposes a novel and accessible experiment that allows students to explore both nonlinear systems and harmonic generation. By utilizing a simple circuit made up of readily available electronic components, a signal generator, and a digital oscilloscope, the

experiment demonstrates how clipping a periodic radio-frequency signal- achieved with two silicon diodes - results in harmonic distortion. Additionally, the experiment facilitates a comparison between linear and nonlinear regimes, giving students a hands-on understanding of the distinct behaviors exhibited by these systems.

To quantify the distortion in the resulting signal, this experiment uses total harmonic distortion (THD), a commonly employed metric in the analysis of sound and radio communication systems [1]. Finally, the relationship between THD and the degree of clipping applied to the input signal is examined. Due to the simplified analysis involved in this experiment, it is well-suited for undergraduate physics students, providing an engaging and intuitive introduction to nonlinear physical systems and the concept of harmonic generation.

II. EXPERIMENTAL SETUP

Figure 1 shows the schematic diagram of the circuit setup. A signal generator produces a 1 kHz sine wave with an amplitude of 5 V, which is carried to a 1 k Ω resistor R . Shunt to the ground are two parallel branches, each including a 1N4007 silicon diode in series with a 10 k Ω potentiometer. The diodes are connected in anti-parallel configuration, with their anodes connected to opposite ends of the resistor R .

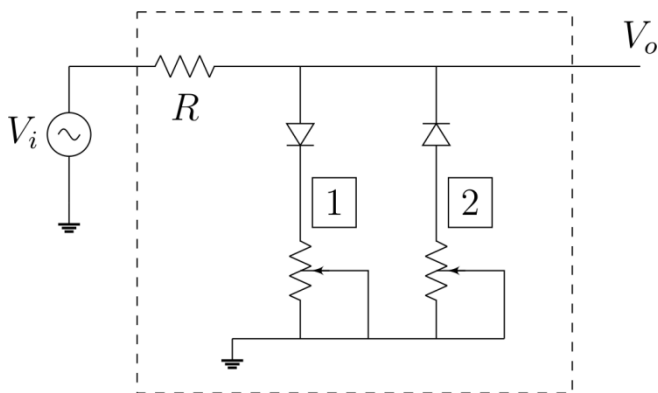


FIGURE 1. Schematic diagram of the circuit. The periodic input signal V_i is subject to harmonic distortion (nonlinear effect) after passing through the system (circuit enclosed by the dashed line). As a result, the output signal V_o may contain harmonics of the input signal.

By adjusting the potentiometer resistance, one can regulate the flow of current through these parallel branches. Each diode rectifies the oscillating signal, allowing current to pass in only one direction, effectively clipping either the positive or negative segments of the waveform's amplitude. In Figure 1, the diode in branch 1 clips the positive part, while the diode in branch 2 clips the negative part. Consequently, depending on the potentiometer resistance, there may be an asymmetry in the upper and lower parts of the resulting waveform. A digital oscilloscope (POL-15DE, Politem), with a sampling rate of 1 GS/s and an input impedance of 1 M Ω , is employed

to measure the voltage after the electrical shunts, revealing the output signal.

III. CLIPPER MODEL

The circuit shown in Figure 1 exhibits a nonlinear response when the output voltage is not directly proportional to the input voltage. Conversely, in a linear regime, the input and output signals are directly proportional, with the output being a scaled and possibly time-shifted version of the input. To illustrate this, consider an input sinusoidal voltage with amplitude A and frequency f , expressed as $V_i(t) = A \sin(2\pi ft + \varphi)$, where φ is the phase constant. For a linear response, the output voltage would be:

$$V_o(t) = GA \sin(2\pi ft + \varphi + \theta) = GV_i(t - \tau)$$

where G is a frequency-independent constant representing the attenuation (or amplification) of the signal. θ represents the phase shift, which introduces a delay τ between the input and output signals.

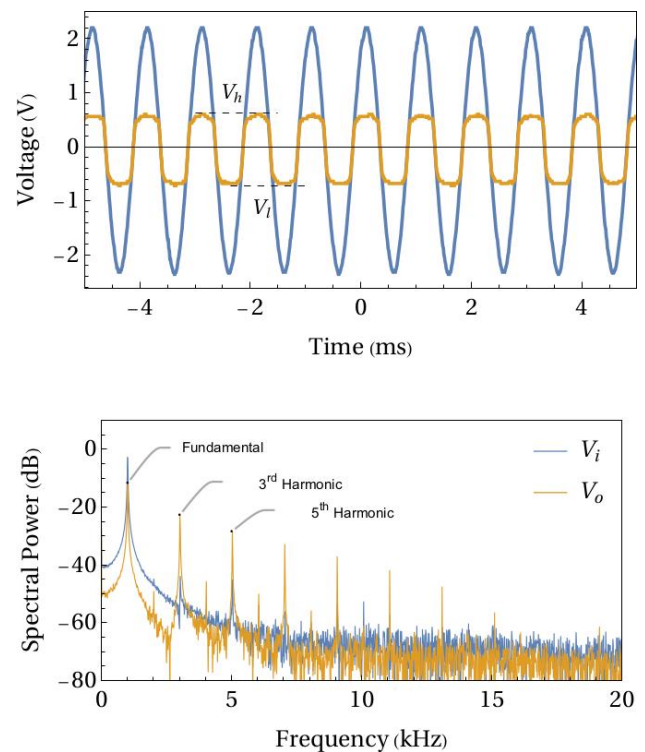


FIGURE 2. Waveforms and their respective Fourier transforms recorded with the oscilloscope. The top panel shows the input sinusoidal signal with 1 kHz frequency and the output signal with clipped amplitude. The amplitudes V_h and V_l are controlled by the potentiometer resistances, affecting the degree of clipping and thus the harmonic content. The bottom panel shows the corresponding frequency spectra, illustrating the presence of harmonics (for example, third and fifth) in the clipped signal, which are absent in the pure sine wave input.

However, for a nonlinear response, the output signal contains not only the scaled and shifted input signal but also additional frequency components that are integer multiples of the fundamental frequency. These additional frequencies are called harmonics, and their presence alters the shape of the waveform. The output signal can thus be expressed as:

$$V_o(t) = GA \sin(2\pi f t + \varphi + \theta) + A_2 \sin(2\pi f_2 t + \theta_2) + A_3 \sin(2\pi f_3 t + \theta_3) + \dots,$$

where $f_n = n f$ are the harmonics of the fundamental frequency f . The nonlinear behavior of the diodes in the circuit, specifically the clipping action, is responsible for the generation of these harmonics. The presence of harmonics is clearly visible in the frequency domain, as shown in Figure 2.

In Figure 2, the output voltage V_o is significantly modified compared to the input V_i , deviating from a simple scaled and shifted version. This alteration in waveform is termed harmonic distortion. To quantify the extent of this distortion, the total harmonic distortion (THD) is often used [1]. THD is defined as:

$$\text{THD (\%)} = 100 \sqrt{\frac{|A_2|^2 + |A_3|^2 + \dots}{|A|^2}}, \quad (1)$$

THD represents the ratio of the total power in the harmonic components to the power of the fundamental frequency. A pure sine wave has a THD of zero, while a signal with significant harmonic distortion will have a higher THD value. In this experiment, the amplitudes of the harmonics can be directly measured from the peak values in the Fourier transform displayed on the oscilloscope.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

Figure 3(a) shows the relationship between the output voltage (V_o) and input voltage (V_i) for both the unclipped signal (no diode influence) and the clipped signal (with diode clipping). In the unclipped case, the relationship is linear, with a slope coefficient of 0.92, indicating a slight attenuation of the input signal. In the clipped case, the relationship deviates from linearity, exhibiting a plateau for input voltages exceeding the clipping threshold. This behavior can be approximated by an error function, which captures the gradual transition from the linear region to the saturated (clipped) region.

Figure 3(b) shows the variation of THD as a function of the inverse of the clipping voltage V_c , for the symmetric case where $V_c \equiv V_h = V_l$. We can observe that the THD ranges from nearly zero, indicating the absence of distortion, to 33.4% when $V_c = 0.67$ V. The results show a linear dependence between THD and the clipping voltage, as indicated by the dashed line obtained through linear fitting. This behavior is expected since, according to Eq. (1), the THD rate is proportional to the inverse of the fundamental mode amplitude, while the clipping voltage is directly proportional to the fundamental.

A key observation from the frequency spectrum in Figure 2 is the absence of even harmonics in the symmetrically clipped

signal. This can be explained by the odd symmetry of the waveform, which means that one half of the waveform is the negative of the other half. Mathematically, this is expressed as $V_o(t) = -V_o(t + T/2)$, where T is the period. The Fourier series representation of such a waveform only contains sine terms with odd multiples of the fundamental frequency, leading to the absence of even harmonics. However, the circuit can be configured to produce asymmetric clipping, where the positive and negative peaks of the waveform are clipped at different levels. This breaks the odd symmetry and introduces even harmonics into the spectrum.

V. CONCLUSIONS

In this study, we demonstrated how a simple circuit using silicon diodes can be employed to clip a sine wave, introducing harmonic distortion and creating a nonlinear system. The experimental results clearly illustrate the difference between linear and nonlinear responses, with Total Harmonic Distortion (THD) increasing as the clipping becomes more pronounced. This linear relationship between THD and the inverse of the clipping voltage provides a quantitative measure of the degree of nonlinearity introduced by the circuit.

This hands-on approach serves as a valuable educational tool for undergraduate physics students, allowing them to directly explore the concepts of nonlinearity, harmonic generation, and signal distortion in a practical setting. By manipulating the circuit parameters and observing the resulting waveforms and frequency spectra, students gain a deeper understanding of these fundamental phenomena. Although this experiment provides a simplified model of harmonic distortion, it serves as an excellent starting point for further investigations. Future work could explore the effects of temperature on diode behavior and harmonic generation, investigate different clipping mechanisms, or extend the analysis to include higher-order harmonics. Additionally, the experiment could be adapted to examine other nonlinear phenomena, such as intermodulation distortion or frequency mixing.

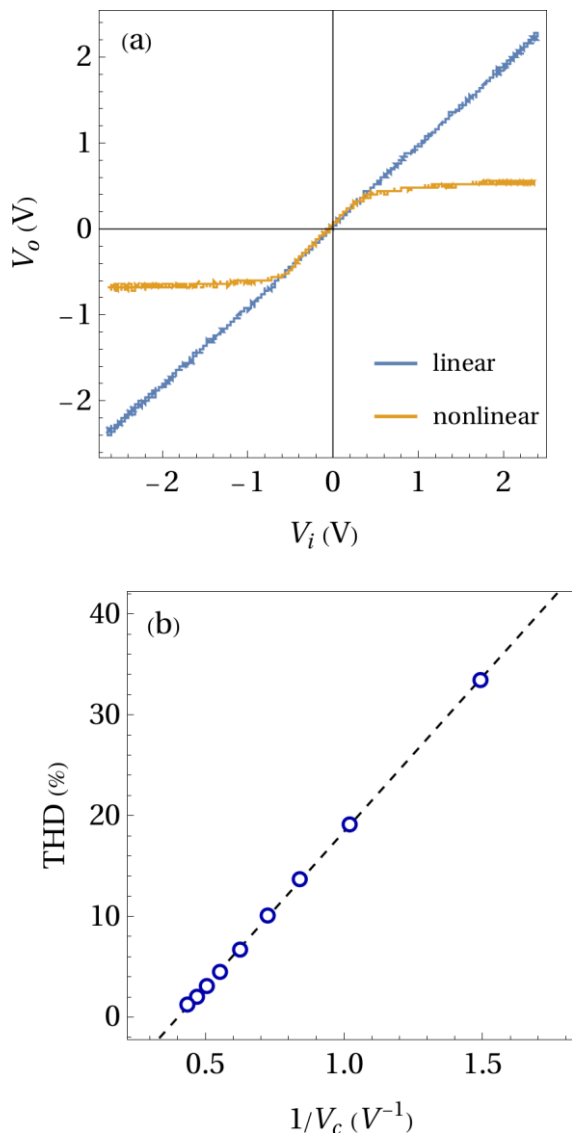


FIGURE 3. (a) Output voltage (V_o) as a function of input voltage (V_i) for the unclipped and clipped signals. (b) Total Harmonic Distortion (THD) as a function of the inverse of the clipping voltage ($1/V_c$) for the symmetric clipping case ($V_c \equiv V_h = V_l$). The dashed line represents a linear fit to the data points.

REFERENCES

- [1] Whitaker, J. C., Bentz, C., Agbo, S. O., Hamann, J. C. and Pierre, J. W., *Signal measurement, analysis, and testing*, in *Electrical Engineering Handbook*, (CRC Press, USA, 2005), chapter 20, pages 2163–2255.
- [2] Maxwell, H. N., *Concerning the Frequencies Resulting from Distortion*, *American Journal of Physics* **20**, 310 (1952).
- [3] Hitchcock, R. C., *Oscilloscope Pictures of Intermodulation Distortion*, *American Journal of Physics* **22**, 187 (1954).
- [4] Leighton, T. G., *The frequency analysis of transients*, *European Journal of Physics* **9**, 69 (1988).
- [5] Lerner, L., *The dynamics of a stabilised wien bridge oscillator*, *European Journal of Physics* **37**, 065807 (2016).
- [6] Matolyak, J., Roberts, R. and Berry, R., *Nonlinear circuit concepts—an elementary experiment*, *The Physics Teacher* **21**, 522 (1983).
- [7] Zheng, T. F. et al., *Teaching the nonlinear pendulum*, *The Physics Teacher* **32**, 248 (1994).
- [8] Wagner, G., *Apparatus for teaching physics: Linearizing a nonlinear spring*, *The Physics Teacher* **33**, 566 (1995).
- [9] Marega Jr., E., Ioriatti, L. and Zilio, S. C., *Harmonic generation and chaos in an electromechanical pendulum*, *American Journal of Physics* **59**, 858 (1991).
- [10] Varjú, K., Johnsson, P., Mauritsson, J., L’Huillier, A. and López-Martens, R., *Physics of attosecond pulses produced via high harmonic generation*, *American Journal of Physics* **77**, 389 (2009).
- [11] Johannessen, K., *An anharmonic solution to the equation of motion for the simple pendulum*, *European Journal of Physics* **32**, 407 (2011).
- [12] Mayer, V. V. and Varaksina, E. I., *An apparatus to demonstrate linear and nonlinear oscillations of a pendulum*, *Physics Education* **51**, 045012 (2016).
- [13] Christian, J. M., *Anharmonic effects in simple physical models: introducing undergraduates to nonlinearity*, *European Journal of Physics* **38**, 055002 (2017).
- [14] Pellicer-Porres, J. and Andrés, M. V., *Non-linear resonance in the simplest RLC circuit*, *European Journal of Physics* **43**, 035204 (2022).
- [15] Gomez-Gesteira, M., Perez-Munuzuri, V. and Perez-Villar, V., *An analytical-numerical technique for solving non-linear differential equations in Fourier space*, *European Journal of Physics* **13**, 9 (1992).
- [16] Meng, D.-X., Hu, M.-Y. and Xu, T., *Approximate bright-soliton solution of the higher-order nonlinear Schrödinger equation*, *European Journal of Physics* **42**, 015301 (2020).
- [17] Tsoy, E. N. and Umarov, B. A., *Introduction to nonlinear discrete systems: theory and modelling*, *European Journal of Physics* **39**, 055803 (2018).
- [18] Boyd, R. W., Gaeta, A. L. and Giese, E., *Nonlinear optics*, in *Springer Handbook of Atomic, Molecular, and Optical Physics*, pages 1097–1110, (Springer, USA, 2008).
- [19] Shen, Y. R., *The principles of nonlinear optics*, Wiley classics library, (John Wiley & Sons, Nashville, TN, 2002).

O uso da realidade aumentada no ensino de física: uma investigação no ensino superior

EDVCATIO PHYSICORVM



ISSN 1870-9095

Gizele Iank Leite¹, Alessandra Dutra², Sani de Carvalho Rutz da Silva³,
Awdry Feisser Miquelin⁴

¹Doutoranda em Ensino de Ciência e Tecnologia pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Ponta Grossa, Paraná, Brasil.

²Professora titular da Universidade Tecnológica Federal do Paraná-UTFPR campus Ponta Grossa, Paraná, Brasil.

³Professora Titular na Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Ponta Grossa, Paraná, Brasil.

⁴Professor Associado IV no DAENS da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Ponta Grossa e professor do PPGET - Mestrado e Doutorado. Brasil.

E-mail: gizele.1096@gmail.com

(Recibido el 12 de febrero de 2025, acepado el 25 de mayo de 2025)

Resumo

A inserção das tecnologias digitais tem ganhado cada vez mais espaço nos ambientes de ensino. Um dos exemplos que representa esta integração é o uso de realidade aumentada na construção de conhecimentos científicos. Com base nestas considerações, este estudo propõe apresentar resultados do uso dos aplicativos Merge Explorer e Pokémon Go no ensino de conteúdos relacionados à mecânica dos corpos, da disciplina de Física Geral Experimental I, ministrado a estudantes dos cursos de Engenharias Civil, Química e Mecânica, de uma instituição privada de ensino superior localizada ao interior do Paraná-PR. Os tipos de pesquisa empregados foram bibliográfica, de campo e analítica. Os resultados mostraram que a realidade aumentada pode ser introduzida no Ensino de Física como mediadora no estudo de simulações e aprendizagem do conteúdo de movimento retilíneo, movimento circular, rotação e translação, com contribuições significativas para melhorar a aprendizagem dos estudantes e tornar o ensino mais relevante e significativo.

Keywords: Ensino de física, realidade aumentada, aprendizagem.

Abstract

The insertion of digital technologies has been gaining more and more space in teaching environments. One example that represents this integration is the use of augmented reality in the construction of scientific knowledge. Based on these considerations, this study proposes to present results of the use of the Merge Explorer and Pokémon Go applications in the teaching of content related to body mechanics, in the discipline of Experimental General Physics I, taught to students of Civil, Chemical and Mechanical Engineering courses, at a private higher education institution located in the interior of Paraná-PR. The types of research used were bibliographical, field and analytical. The results showed that augmented reality can be introduced in Physics Teaching as a mediator in the study of simulations and learning of the content of rectilinear motion, circular motion, rotation and translation, with significant contributions to improving student learning and making teaching more relevant and meaningful.

Keywords: Augmented reality, physics teaching, learning.

I. INTRODUÇÃO

As Tecnologias Digitais de Informação e Comunicação (TDIC) têm apresentado diversas possibilidades e soluções para a sociedade, contribuindo em diversas áreas, por exemplo, na saúde, pela telemedicina, no vestuário, por meio da prototipagem e *design* computacional, na educação, por meio do *e-learning* ou aprendizagem eletrônica, entre outras. No que se refere ao contexto educacional, os recursos tecnológicos oferecem benefícios tanto para alunos quanto para professores, ao proporcionar acesso a recursos diversos, os quais podem transformar significativamente a

aprendizagem de conteúdos, por meio de experiências de aprendizado mais interativas e imersivas.

Em relação ao Ensino de Física, mais especificamente, uma das maneiras de aprender e ensinar que vem transformando a forma como os estudantes aprendem e interagem com os conceitos da disciplina é a Realidade Aumentada (RA). Ao possibilitar a implementação de objetos virtuais ao mundo real, esta ferramenta tem se mostrado pedagogicamente eficaz pelo fato de proporcionar a visualização de conceitos abstratos aos estudantes, oportunizando-os a simular experimentos e a explorar locais e contextos fora do alcance dos envolvidos.

Com base nisso, este estudo tem como objetivo apresentar resultados do uso dos aplicativos Merge Explorer e Pokémon Go no ensino de conteúdos relacionados à mecânica dos corpos, das disciplinas de Física Geral e Experimental I, a estudantes dos cursos de Engenharias Civil, Química e Mecânica de uma instituição privada de ensino superior localizada ao interior do Paraná-PR.

A proposta se justifica pelo fato de os estudantes apresentarem dificuldades em compreender conceitos abstratos de mecânica, como translação, movimento retilíneo uniforme e movimento uniformemente variado. Essas dificuldades são frequentemente atribuídas à falta de conexão entre os conceitos teóricos e suas aplicações práticas no cotidiano desses estudantes, o que pode resultar em um processo de aprendizagem difícil nas aulas de Física.

Para o desenvolvimento das atividades, elencamos como questão norteadora: como a realidade aumentada pode contribuir para o aprendizado de física, relacionando o cotidiano dos acadêmicos com o conteúdo de Mecânica, tornando a aprendizagem dinâmica e eficaz? Partimos da hipótese de que o emprego da realidade aumentada, por meio do Merge Explorer e Pokémon GO, no ensino de conteúdos de movimento para estudantes de engenharia, promove um aprendizado mais significativo, facilitando a compreensão e a aplicação prática dos conceitos teóricos abordados em sala de aula no cotidiano dos acadêmicos.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A realidade aumentada é uma tecnologia que sobrepõe elementos virtuais ao mundo real, criando uma combinação que alterna a experiência física com a digital. Essa tecnologia utiliza dispositivos como *smartphones*, *tablets* ou óculos especiais para exibir objetos digitais, como imagens, vídeos ou textos, no ambiente real.

Para [1], é uma tecnologia emergente que renderiza objetos virtuais bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D) e permite que as pessoas interajam com objetos reais e virtuais ao mesmo tempo, a partir do reconhecimento e rastreamento de marcadores no ambiente real. Esses marcadores são pontos de referência que ajudam o dispositivo a identificar a posição e orientação dos objetos virtuais a serem sobrepostos. Com base nessas informações, o dispositivo de realidade aumentada exibe os objetos digitais em tempo real, permitindo que o usuário interaja com eles.

Uma das aplicações mais comuns da realidade aumentada é na indústria do entretenimento, como em Pokémon Go - jogo eletrônico de realidade aumentada voltado para *smartphones*. [2] relatam que a criação dos recursos digitais deve se diversificar cada vez mais pelo uso crescente de ferramentas que integram a mobilidade e tem sido utilizada em várias áreas, por exemplo, comércio, educação, saúde, arquitetura e muitas outras. [3], o aplicativo Pokémon Go, criado em 2016, ajudou a transformar a comunicação com os usuários e as empresas o utilizam para atrair clientes.

O aplicativo Merge Explorer tem apresentado expressivo potencial, principalmente, para a área do ensino. Esta ferramenta transforma a sala de aula em um ambiente imersivo e interativo de aprendizado. [4] descrevem o Merge Explorer como a ferramenta que permite segurar objetos virtuais 3D, possibilitando nova maneira de aprender e interagir com o mundo digital. Neste sentido, [5] destacam que o Merge Explorer permite compreender diferentes tipos de informação de forma textual e gráfica, como classificar informação de diferentes temas e desenvolver a imaginação. Com base nas informações apresentadas no quadro 1, foi possível identificar várias possibilidades de sua utilização.

Quadro I. Possibilidades de utilização da realidade aumentada.

Área	Utilização
Comércio	A realidade aumentada permite que os consumidores visualizem produtos em suas casas antes de comprá-los, através da sobreposição de imagens virtuais dos produtos no ambiente real. Isso proporciona uma experiência mais imersiva e ajuda os consumidores a tomar decisões de compra mais informadas.
Educação	A realidade aumentada tem sido utilizada para tornar o aprendizado mais interativo e envolvente. Por exemplo, é possível sobrepor modelos tridimensionais de órgãos humanos sobre livros didáticos, permitindo que os alunos explorem e estudem o corpo humano de maneira mais realista, como o uso do SketchAR.
Saúde	A realidade aumentada tem sido utilizada em procedimentos cirúrgicos, permitindo que os médicos visualizem informações vitais sobre o paciente, como pulsação e pressão arterial, enquanto realizam a cirurgia. Isso melhora a precisão e a eficiência do procedimento, reduzindo os riscos para o paciente.
Arquitetura	A realidade aumentada tem sido utilizada para permitir que os arquitetos visualizem as estruturas e os projetos em escala real no local onde serão construídos. Isso ajuda a identificar problemas e fazer ajustes antes da construção, economizando tempo e recursos.

Apesar das vantagens do uso da realidade aumentada, como a melhora no aprendizado, autonomia do estudante, rapidez para apresentar o conteúdo e aumento da criatividade, [6] apontam alguns desafios a serem superados. Um dos principais desafios é a necessidade de dispositivos específicos, como óculos especiais para proporcionar a experiência de realidade aumentada. Isso limita sua adoção em larga escala, uma vez que nem todos possuem acesso a esses dispositivos.

Apesar dos desafios, [7] afirma que a realidade aumentada tem potencial para transformar a forma do indivíduo e interagir com o mundo, tornando-o mais rico e imersivo. Com o avanço da tecnologia e a maior disponibilidade de dispositivos, é provável que ela se torne ainda mais presente

em nosso dia a dia melhorando diversos setores, como entretenimento, educação, saúde e indústria.

Embora, para empregar a realidade aumentada haja a necessidade de óculos, visores e *headsets*, conjunto formado por um fone de ouvido com controle de volume e um microfone acoplado para utilização em computadores multimídia, para atender aos diversos contextos de ensino, muitas experiências podem ser realizadas por meio de *smartphones*, *tablets* e tecnologia *web*, sem a necessidade de aplicativos específicos. O professor pode selecionar a forma de usar a realidade aumentada para ministrar conteúdos científicos da maneira mais acessível aos estudantes.

A. Utilização da realidade aumentada no ensino de física

A realidade aumentada tem potencial para agregar vantagens no ensino de conteúdos científicos da disciplina de física transformando a maneira como os conceitos são apresentados e compreendidos, pelo fato de combinar elementos virtuais com os do mundo real, sobrepor informações digitais ao ambiente físico, através do uso de dispositivos como *smartphones*, *tablets* e óculos especiais.

[8] afirma que, com o uso de aplicativos específicos, os estudantes podem visualizar objetos em três dimensões, simular experimentos e interagir com modelos virtuais, de maneira que antes era impossível. Isso proporciona uma compreensão mais profunda dos conceitos desta disciplina, já que permite que os alunos explorem e visualizem fenômenos físicos de maneira mais real.

De acordo com a aplicação de [9], a realidade aumentada pode ser utilizada para simular experimentos de física em dispositivos móveis. Em vez de realizar experimentos que ocasionam risco aos estudantes, o uso de aplicativos ou dispositivos de realidade aumentada para visualização dos experimentos podem ser realizados e os resultados observados em tempo real. Por exemplo, um aplicativo de realidade aumentada pode permitir que os alunos simulem a queda dos corpos e vejam como a velocidade e a aceleração mudam durante o processo.

Segundo [10], esta tecnologia também pode ser utilizada no trabalho de eletromagnetismo e apresenta contribuição para a visualização dos campos de força e linhas de campo magnético. Esses conceitos abstratos podem ser difíceis de entender apenas pela descrição em um livro didático. No entanto, com a realidade aumentada, os alunos podem visualmente entender como os campos de força interagem com objetos e como as linhas se curvam. Isso torna os conceitos mais concretos e tangíveis, facilitando o processo de aprendizagem dos estudantes.

Outra aplicação da realidade aumentada no Ensino de Física é na criação de modelos tridimensionais interativos. [11] afirma que os alunos podem explorar e manipular modelos virtuais de moléculas, estruturas cristalinas ou até mesmo de sistemas solares completos. Isso permite que eles visualizem conceitos abstratos e compreendam melhor as relações espaciais entre os objetos.

Portanto, o uso desta tecnologia é viável e pode ser utilizada com a intenção de criar experiências imersivas, que são possíveis interagir com ambientes virtuais e simulações de fenômenos físicos. Por exemplo, os estudantes podem explorar uma simulação de um campo gravitacional ou de um

sistema dinâmico caótico e observar as mudanças de comportamento à medida que manipulam variáveis. Isso proporciona que os estudantes compreendam de forma mais concreta os conteúdos de movimento, eletromagnetismo, entre outros abordados na disciplina de física.

Além de propiciar condições de aprender conteúdos científicos, a realidade aumentada pode ser empregada como ferramenta de avaliação. Ela permite que os professores apliquem estratégias diversas, como a criação de atividades interativas. Nessas atividades, os estudantes podem visualizar, manipular e explicar fenômenos físicos, além de simular experimentos e resolver problemas em ambientes virtuais, principalmente em modelos de fenomenológicos e práticos que não seriam acessíveis em sua realidade imediata.

Também, os estudantes podem utilizar um dispositivo para visualizar a situação em questão e fornecer respostas mais precisas e fundamentadas de acordo com o conhecimento teórico adquirido por eles, como relatado por [12]. Os autores [13] afirmam que a RA pode ser utilizada também como uma forma de comunicação entre professores e estudantes para demonstrações de conteúdos até mesmo em ambientes virtuais. Isso possibilita que professores criem tutoriais sobre conteúdos específicos e todos que acessarem possam visualizar esses tutoriais em seus dispositivos, em seu próprio ritmo e no momento que acharem conveniente.

No quadro 2 são apresentados trabalhos já desenvolvidos na disciplina de física, os quais abordam vários exemplos de utilização da RA para o ensino de diferentes conteúdos. Os 23 estudos sobre o uso da RA para o ensino de física foram selecionados no Google Acadêmico, Scielo e Scopus, a partir das palavras chaves realidade aumentada, ensino e física, no período de 2011 a 2023.

Este recorte temporal deve-se à relevância dos trabalhos encontrados, considerando as experiências do ensino de física com a utilização da realidade aumentada e a aplicabilidade das propostas em sala de aula.

Quadro II. Propostas de ensino de conteúdos da disciplina de física por meio da RA.

N	Disciplina	Conteúdo	Autores
1	Física	Contexto geral da física para o ensino superior	Neto <i>et al.</i> (2024)
2	Física	Gravitação universal	Chaves (2023)
3	Física	Circuitos elétricos	Coelho <i>et al.</i> (2023)
4	Física	Mecânica	Alves (2023)
5	Física	Robótica	Viana e Ribeiro (2021)
6	Física	Relatividade	Dornel <i>et al.</i> (2021)
7	Física	Modelos atômicos	Feitosa (2020)
8	Física	Física Moderna	Costa <i>et al.</i> (2020)
9	Física	Espectrometria dos gases	Herpich <i>et al.</i> (2020)
10	Física	Eletromagnetismo	Barbosa (2020)

11	Física	Elétrica	Nicolete <i>et al.</i> (2019)
12	Física	Teoria das ações mentais	Perrone (2018)
13	Física	Visualização espacial	Herpich (2018)
14	Física	Astronomia	Costa (2017)
15	Física	Software Layer	Denardin e Manzano (2017)
16	Física	Flutuabilidade – ensino na pós-graduação	Oliveira e Manzano (2016)
17	Física	Sistema solar	Abreu e Souza (2015)
18	Física	Campo magnético	Ribeiro <i>et al.</i> (2014)
19	Física	Energia elétrica	Barcelos <i>et al.</i> (2013)
20	Física	Movimento ondulatório	Gomes <i>et al.</i> (2013)
21	Física	Movimento	Silva <i>et al.</i> (2012)
22	Física	Eletromagnetismo	Souza e Kirner (2011)
23	Física	Óptica	Ávila <i>et al.</i> (s/d)

Dos trabalhos elencados no quadro 2, seis (6) buscam ensinar conteúdos de mecânica, dentre eles, o de [14], ao explorar o uso da RA no ensino de Gravitação Universal, facilitando a compreensão de forças gravitacionais e órbitas planetárias por meio de modelos 3D e o de [15], o qual teve como foco simulações de movimento e forças, tornando o aprendizado mais dinâmico.

[16] aplicaram RA no ensino de Robótica permitindo a visualização de robôs em ambientes virtuais. [17] estudaram o Sistema Solar com RA, mostrando órbitas e gravidade. [18] utilizaram a RA no ensino de Movimento Ondulatório e [19] exploraram conceitos gerais de Movimento com simulações de trajetórias e acelerações.

Dos estudos elencados, seis (6) descrevem aplicações da RA em conteúdos de eletromagnetismo, abordando práticas já realizadas em níveis de ensino médio e superior. A investigação de [20] aplicaram a RA no ensino de Circuitos Elétricos, facilitando a visualização de corrente, tensão e resistência. [21] usa RA no Eletromagnetismo para visualizar campos magnéticos em 3D. O estudo de [22] teve foco na manipulação de circuitos elétricos com RA, enquanto [23] explorou o ensino de Campo Magnético. [24] aplicaram RA em conceitos de Energia Elétrica; [10] utilizaram a RA para visualizar campos magnéticos e elétricos.

Em relação à Física Moderna, três (3) estudos mostraram experiências possíveis. [25] usaram RA para facilitar a visualização de conceitos da relatividade, como dilatação temporal. [26] aplicou a RA no ensino de Modelos Atômicos, permitindo visualizar estruturas em 3D. [27] explorou RA em Física Moderna, simulando fenômenos quânticos e relativísticos.

[28] investigou como a RA pode ajudar na formação de conceitos abstratos em Física. Apenas dois (2) trabalhos apontaram relações sobre a teoria dos gases e dois utilizam a RA no ensino de astronomia. [8] utilizou a RA no ensino de

Espectrometria dos Gases, facilitando a interação com espectrômetros virtuais. [29] aplicaram RA para simular fluidez, ajudando na compreensão de empuxo e hidrostática.

Em astronomia, [30] explorou o uso da RA para aprimorar a Visualização Espacial dos estudantes, essencial na compreensão de conceitos tridimensionais em Física, como vetores e forças. A RA facilitou a interpretação da geometria espacial e a manipulação de objetos em 3D. [27] aplicou a RA no ensino de Astronomia, permitindo que os alunos interagissem com simulações de planetas e estrelas, facilitando a compreensão de órbitas, fases da lua e rotação dos corpos celestes em um ambiente imersivo.

[31] examinaram como a RA pode ser amplamente utilizada no ensino superior de Física, auxiliando na visualização de conceitos abstratos e em simulações de fenômenos físicos. O estudo destacou a capacidade da RA de tornar o aprendizado mais acessível e concreto em aulas de Física Geral. [32] exploraram a aplicação da RA no desenvolvimento de camadas virtuais de *software*, facilitando a visualização de fenômenos complexos como ondas eletromagnéticas e interações de partículas. [33] aplicaram a RA no ensino de Óptica, permitindo a visualização interativa de fenômenos como propagação da luz, refração e reflexão.

Os estudos apresentados demonstraram a versatilidade e o impacto da realidade aumentada no ensino de Física, abrangendo ampla gama de tópicos, desde conceitos fundamentais, como gravitação e mecânica, até áreas mais complexas, como relatividade e espectrometria de gases. Na perspectiva dos trabalhos apresentados, vindo ao encontro de [34], os sistemas de realidade aumentada devem registrar as imagens com precisão de forma a levar o usuário a crer que os mundos real e virtual ocupam o mesmo espaço.

Outro benefício do uso da realidade aumentada no Ensino de Física é a possibilidade de os estudantes explorarem projetos e protótipos virtuais antes mesmo de eles serem construídos. Com a sobreposição de elementos virtuais ao ambiente físico, é possível visualizar o comportamento de uma determinada estrutura em diferentes condições, facilitando a tomada de decisões e agilizando o desenvolvimento de projetos.

Apenas um estudo investigou a inserção de ferramentas de RA para o ensino de física na graduação, ao demonstrar em um contexto geral como a realidade aumentada pode ser utilizada para promover uma compreensão mais profunda de conceitos como movimento, forças e energia, por meio de simulações interativas que aproximaram a teoria de situações cotidianas, facilitando a visualização e a aplicação prática dos fenômenos físicos. No entanto, para empregar a RA para ensinar conteúdos científicos, é importante o desenvolvimento de aplicativos interativos de qualidade.

Dessa forma, é possível investir em capacitação dos professores para que eles possam utilizar a tecnologia no processo de ensino-aprendizagem e, também, em infraestrutura, garantindo que os estudantes tenham acesso aos dispositivos necessários para utilizar esta ferramenta. Os artigos citados no quadro 2, mostraram que se usada adequadamente, essa tecnologia proporciona experiência imersiva, facilita a compreensão dos conceitos, possibilita a realização de experimentos virtuais e agiliza o desenvolvimento de projetos.

III. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia utilizada para a realização desta investigação foi a de intervenção, que de acordo com [35], tem como finalidade contribuir para a solução de problemas práticos. A pesquisa, considerada de campo, foi aplicada a 26 estudantes do 1º ano de três cursos de engenharia (Mecânica, Química e Civil), de uma IES particular.

Primeiramente, foi analisada a Proposta Pedagógica Curricular (PPC) e os Planos de Ensino Aprendizagem (PEA) dos cursos de Engenharia Química, Civil e Mecânica, referentes aos anos de 2022, 2021 e 2020. A análise dos documentos possibilitou identificar que há lacunas, como a dificuldade de explorar relações específicas sobre Mecânica de cada área da Engenharia (química, civil e mecânica) com a futura prática profissional dos estudantes.

No contexto da pesquisa, os materiais disponíveis para as práticas de laboratório das disciplinas de Física Geral Experimental I são limitados ou insuficientes, o que pode impedir os alunos de terem acesso a uma variedade maior de experiências práticas. Essa limitação envolve a falta de equipamentos e recursos adequados para realizar experimentos mais diversificados ou aprofundados, afetando o aprendizado dos alunos. Assim, vimos a possibilidade das ferramentas Pokémon Go e Merge Explorer como alternativas para compensar essa falta e contribuir com o ensino dos conteúdos de Física, como os de mecânica.

A atividade abordou os conteúdos: dinâmica do movimento, dinâmica de rotação e dinâmica de translação, os quais foram aplicados em 9 encontros. O Quadro 3 apresenta a teoria referente a esses conceitos e como a RA foi utilizada para aplicar esses conteúdos na prática. Essa aplicação permitiu desenvolver as relações de movimento abordadas na disciplina de Física Geral e Experimental I, conectando teoria e prática de forma interativa e visual.

Quadro III. Relações entre teoria e prática na utilização da RA para desenvolvimento das relações de movimento na disciplina de Física Geral e Experimental I.

Conteúdo	Elementos da física	Relações com os aplicativos
Dinâmica do movimento retilíneo e do movimento circular	Distância, velocidade, aceleração e trajetória	Utilizando o GPS do <i>smartphone</i> , os alunos podem determinar a distância entre sua localização inicial e o ponto de encontro com o Pokémon; ao capturar Pokémons em diferentes países, podem se familiarizar com diferentes unidades de medida de distância, como metros, quilômetros e milhas; Através do tempo gasto para capturar o Pokémon e da distância percorrida, os estudantes podem

		calcular sua velocidade média.
Dinâmica de rotação	Momento angular, equilíbrio	Observando a rotação de objetos virtuais, os alunos podem perceber como a velocidade angular e o raio de giro influenciam o momento angular; manipulando objetos em rotação rápida, os alunos podem observar a resistência à mudança de direção de rotação; também é possível perceber como a posição do centro de massa influencia a estabilidade do sistema.
Dinâmica de translação	O sistema solar, as órbitas dos planetas e as fases da lua	Manipulando os modelos dos planetas, os estudantes podem analisar suas órbitas elípticas e compreender como a distância entre os planetas varia ao longo do ano; observando a relação entre as fases da Lua e as marés, podem compreender como a gravidade lunar influencia os oceanos; simulando a posição da Lua em relação à Terra e ao Sol, podem compreender como a luz solar incide sobre a superfície lunar, causando as diferentes fases.

No quadro 3, são apresentados os conteúdos explorados a partir do movimento, por exemplo: distância, velocidade, aceleração, trajetória, momento angular, equilíbrio e sistema solar como translação, ou seja, não somente conceitos teóricos, como conceitos físicos - velocidade, aceleração e equilíbrio, aplicando-os a diferentes cenários práticos.

Para a realização das atividades práticas e produção dos relatórios, os 26 estudantes, matriculados nos cursos de Engenharia Civil, Química e Mecânica foram divididos em 6 grupos, com 4 a 5 integrantes cada. No entanto, apenas 19 estudantes participaram de todos os encontros. Para a apresentação e análise dos dados, os grupos foram denominados como G1, G2, G3, G4, G5 e G6.

Nos três primeiros encontros, foram introduzidos os conceitos de movimento retilíneo uniforme, movimento circular, translação e rotação. Esses encontros foram ministrados de maneira expositiva, utilizando apresentações em *slides*, discussões teóricas e fórmulas matemáticas de cada elemento trabalhado. Os conteúdos foram explorados com o

apoio de exemplos e exercícios matemáticos, reforçando a teoria por meio de problemas contextualizados.

A partir do quarto encontro foram apresentados aos estudantes os dois aplicativos - Merge Explorer e Pokémon Go - e propostas diferentes atividades a serem realizadas em grupo. A primeira atividade foi a simulação do movimento retilíneo uniforme no Merge Explorer, com o objetivo de os estudantes visualizarem o movimento retilíneo uniforme (MRU), identificando a relação entre velocidade, tempo e distância. Para isso, os estudantes foram orientados a acessar uma simulação de um objeto movendo-se em linha reta a uma velocidade constante.

Em seguida, foram orientados a realizar as medições do deslocamento, associado ao intervalo de tempo pré-definido por cada equipe. Durante a atividade, eles puderam ajustar a velocidade do objeto e observar como isso afeta o tempo necessário para cobrir distâncias maiores ou menores.

No quinto encontro foi explorado o movimento circular, utilizando o aplicativo Merge Explorer, com o objetivo de compreender as relações entre velocidade angular, raio, tempo e deslocamento. Nesta atividade, os estudantes utilizaram o Merge Explorer para simular um objeto movendo-se em um círculo. A orientação era que poderiam variar o raio da trajetória e a velocidade angular do objeto.

Ao interagir com a simulação, foi possível observar como a alteração do raio ou da velocidade angular modifica o tempo que o objeto leva para completar uma volta. Assim, foram realizados cálculos de medição do tempo necessário para que o objeto completasse uma volta em diferentes raios, discutindo como esse conceito se aplica em situações reais, como o movimento de planetas em torno do Sol ou em dispositivos mecânicos como polias.

No sexto encontro, como atividade extracurricular, os estudantes foram incentivados a aplicar os conceitos aprendidos em sala de aula para facilitar a internalização do conhecimento empregando o uso das ferramentas de RA. Como atividades para aplicação do conteúdo, eles deveriam produzir situações – problemas identificando os elementos do movimento e também apresentando cálculos que embasaram a teoria.

No sétimo encontro, os estudantes utilizaram o aplicativo Pokémon GO para explorar os conceitos de translação e rotação, integrando-os com a realidade aumentada. A atividade consistiu em capturar Pokémon em diferentes locais da instituição, permitindo que os alunos observassem como os avatares no jogo se movimentam ao longo de uma trajetória de translação. Essa dinâmica facilitou a compreensão do movimento no ambiente virtual, conectando os conceitos de física com a experiência prática proporcionada pela RA. Eles puderam notar como a rotação do corpo afeta a orientação do avatar no mapa do jogo.

Durante a atividade, foi solicitado que os estudantes caminhassem em linha reta por um determinado tempo e depois executassem rotações em torno de si mesmos, observando a relação entre o movimento no mundo real e a mudança de posição no ambiente virtual. Através disso, eles deveriam registrar a distância percorrida pelo avatar e o tempo gasto, calculando a velocidade média de translação e comparando esses movimentos com as relações reais, como o movimento de carros, bicicletas e o movimento do sistema solar.

Para finalizar o conteúdo, nos dois últimos encontros os estudantes produziram relatórios detalhados sobre as atividades realizadas sobre a utilização da RA e sua contribuição para a compreensão dos conceitos físicos.

IV. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS DADOS

Nesta seção, serão apresentados e discutidos os resultados da utilização do Pokémon Go e Merge Explorer no ensino de movimento retilíneo uniforme, movimento circular, rotação e translação. Primeiro, serão abordados os três encontros em que os conteúdos teóricos foram trabalhados de forma geral. Em seguida, será realizada análise individual de cada encontro com as atividades práticas.

Nos três primeiros encontros, pôde-se notar que os estudantes já conheciam os conceitos sobre movimento retilíneo uniforme, movimento circular, rotação e translação. Possivelmente, o conhecimento foi adquirido nas aulas de Física do Ensino Médio ou em cursos técnicos, cuja matriz também preconiza a física mecânica. Embora as aulas expositivas tenham possibilitado revisar conceitos, o fato de os estudantes já conhecerem o conteúdo pode ter gerado sensação de redundância. Isso pode resultar em uma percepção de que essas aulas não trouxeram novos desafios ou aprendizagens significativas.

No quarto encontro, foi realizada a primeira atividade utilizando a RA, portanto, os estudantes foram expostos à simulação do movimento retilíneo uniforme (MRU), para que pudessem visualizar a relação entre velocidade, tempo e distância, de forma prática. A possibilidade de interagir com a simulação, ajustando a velocidade do objeto e observando como essa variação afeta o tempo necessário para percorrer determinadas distâncias, ofereceu compreensão mais concreta e intuitiva desses conceitos. Os 26 estudantes puderam visualizar como a velocidade constante influencia diretamente o tempo para percorrer uma distância fixa e como a relação entre essas variáveis pode ser representada de forma matemática, reforçando a fórmula do MRU por meio de uma experiência prática e interativa.

Ao interagir com os estudantes, foi possível notar a curiosidade e o engajamento deles, assim como as dúvidas levantadas. As discussões em grupo também mostraram que eles estavam realizando conexões entre a teoria e a prática, embora o G3 tenha precisado de um suporte extra para consolidar esse entendimento. Isso ocorreu por diversos fatores: uma interpretação inicial menos clara, dúvidas sobre como aplicar os conceitos no contexto das atividades ou até falta de confiança no entendimento dos conteúdos de movimento que foram abordados.

Um dos principais benefícios da aplicação dessa atividade foi a visualização em tempo real das equações de movimento. Em sala de aula, ao invés de trabalhar apenas com equações abstratas no quadro de giz, os 26 estudantes puderam visualizar impacto direto das variáveis, realizando medições apuradas de deslocamento e tempo. Por exemplo, ao ajustar a velocidade de um objeto em uma simulação de movimento retilíneo uniformemente variado, os estudantes dos grupos G1, G3 e G4 observaram que, ao dobrar a aceleração de 6 m/s^2 para 12 m/s^2 , o tempo necessário para percorrer uma

determinada distância diminuiu significativamente. Além disso, os grupos G2, G5 e G6 puderam realizar medições precisas do deslocamento e do tempo, verificando diretamente como essas variáveis se relacionam pela equação, visualizando o trajeto do objeto e os efeitos da aceleração em tempo real.

Essa experiência prática não só consolidou o aprendizado dos conceitos de movimento pelos estudantes, mas também promoveu o desenvolvimento de habilidades analíticas e colaborativas. Isso ocorreu porque cada equipe foi incentivada a estabelecer intervalos de tempo e deslocamentos pré-definidos, o que exigiu que os alunos aplicassem o pensamento crítico para prever e medir os resultados. Cada grupo foi responsável por realizar medições e registrar dados, o que garantiu que todos participassem do processo de aprendizagem. Eles precisaram interpretar os dados gerados pelas simulações, comparar os valores observados com as previsões teóricas e discutir as possíveis causas de diferenças entre os resultados.

Habilidades como resolução de problemas, análise de dados, pensamento crítico e comunicação científica foram desenvolvidas, uma vez que os estudantes tiveram que refletir sobre os resultados, formular hipóteses e colaborar para ajustar as variáveis de maneira a alcançar resultados consistentes com as leis do movimento. As apresentações dos resultados feitas por cada grupo no final do encontro mostraram que todos conseguiram interpretar os dados, identificar tendências e discutir as discrepâncias entre os resultados práticos e as previsões teóricas.

O quinto encontro trouxe uma experiência focada no movimento circular, nesta atividade apenas 19 estudantes estavam presentes. A simulação, que permitiu com que eles manipulassem variáveis como o raio e a velocidade angular, foi essencial para a compreensão das relações entre esses parâmetros e o tempo necessário para completar uma volta. Ao variar o raio e a velocidade angular, os estudantes dos grupos G1, G2, G3, G4, G5 e G6 puderam observar e calcular como essas mudanças impactam o tempo de deslocamento, uma conexão direta com o conceito de movimento circular uniforme.

Também, foi exemplificado através de simulação pelo Merge Explorer, o movimento dos planetas no sistema solar, viabilizando o entendimento dos cálculos de rotação e translação através da visualização do movimento pela RA. Como colocado por [36], “a utilização da RA favorece inovar e integrar recursos tecnológicos com os objetos de conhecimentos dos diversos componentes curriculares, promovendo a conexão com conhecimentos de forma mais lúdica e dinâmica”.

Na pesquisa de [37], o autor destacou que o Merge Explorer não apenas expande os recursos disponíveis em laboratório, mas também estimula a criatividade dos alunos. Em nossa aplicação dessa atividade com estudantes de engenharia, pudemos observar vantagens pedagógicas claras, especialmente durante o quarto e o quinto encontros, onde o uso do Merge Explorer promoveu um aprendizado ativo. Nesses encontros, os estudantes, particularmente dos grupos G3, G4, G5 e G6, deixaram de ser meros receptores passivos e tornaram-se agentes no processo de construção do conhecimento. Esse efeito foi evidenciado em uma das atividades, na qual o grupo G5 sugeriu que, ao dobrar a

velocidade de um objeto, o tempo necessário para percorrer uma distância fixa seria reduzido pela metade. Com o uso da RA, todos os estudantes puderam testar hipóteses, por exemplo, como a variação da velocidade afetaria o tempo em um movimento retilíneo uniforme e observar resultados de maneira imediata, o que lhes permitiu uma compreensão mais clara das relações entre os conceitos físicos.

No sexto encontro, a atividade foi baseada na utilização do Pokémon GO para analisar relações do movimento circular, onde os integrantes dos grupos tinham que caçar Pokémons em suas proximidades, realizando movimentos circulares para conseguir capturá-los. Nesta atividade, estavam presentes 19 estudantes, inicialmente eles escolheram um ponto fixo como uma PokéStop e mantiveram uma distância constante deste ponto enquanto caminhavam ao seu redor. Por ser a primeira atividade com a utilização do aplicativo, 2 estudantes do G1, que ainda não conheciam o Pokémon GO, sentiram dificuldade na familiarização do manuseio da RA.

Durante a atividade proposta neste encontro foi destacado pelos grupos G2, G3 e G6 as principais variáveis encontradas, como velocidade angular, período e frequência, mostrando onde esses pontos são encontrados na vida real. Com os dados da atividade prática, todos os integrantes dos grupos citados acima registraram o tempo necessário para cada volta, a distância percorrida e número de voltas. Em seguida, com esses resultados, calcularam a velocidade angular e a frequência do movimento. Durante esta atividade não foi encontrado nenhum tipo de dificuldade.

Os grupos G1, G4 e G5 apresentaram dificuldades na assimilação da atividade prática com a teoria trabalhada inicialmente em sala de aula. Porém, durante as discussões em grupo, foi possível identificar que, mesmo enfrentando esses desafios, os alunos mostraram um esforço significativo para compreender as relações entre as variáveis. Algumas estratégias, como a troca de conhecimento e a integração entre os demais grupos, ajudaram a esclarecer o conceito de rotação, os cálculos presentes e a prática aplicada na atividade.

No sétimo encontro, também com o aplicativo Pokémon Go, todos os estudantes dos 6 grupos escolheram um ponto fixo em um local aberto da IES como ponto de referência e descreveram um movimento de rotação em torno deste ponto fixo. Enquanto faziam isso, puderam observar o ponto de referência girando para liberar itens, por exemplo.

Após analisarem este tipo de movimento, os estudantes se deslocaram para outro ponto de preferência observando durante o percurso como o jogo acompanhava sua posição no mapa e associaram com o movimento da Terra. Para atrelar o conhecimento teórico com a prática, foi calculado o tempo necessário para a volta completa ao redor do eixo, a distância percorrida, o tempo total do deslocamento e a velocidade média do movimento de translação.

As práticas possibilitadas com o aplicativo Pokémon Go favoreceram a aprendizagem dos estudantes, uma vez que realizar cálculos, escrever relatórios com a resolução de problemas que eles mesmos estabeleceram exigem dedicação, planejamento e disciplina, o que torna o estudante ativo no seu processo de aprendizagem. Corroborando com [38] “todas as ações na interação com um *game* exigem um esforço cognitivo para definir estratégias para uma evolução mais rápida dentro do jogo”.

A figura 1 mostra as figuras capturadas durante a prática do grupo 3, para exemplificar as atividades realizadas através dos dois aplicativos.

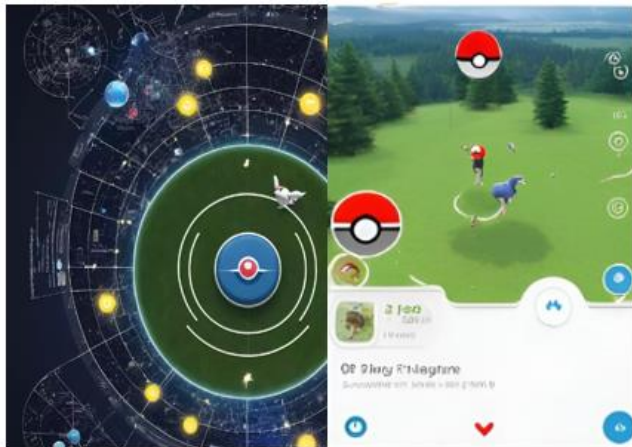


FIGURA I. Capturas de tela do aplicativo Pokémon Go realizado pelos acadêmicos durante a prática de análise do movimento pela RA.



FIGURA II. Capturas de tela do aplicativo Merger Explorer.

As figuras 1 e 2 mostram que é possível perceber a relação de alguns elementos, como rotação, translação e movimento retilíneo associados ao mapa e avatares do Pokémon Go, que contribuíram para a contextualização visual dos conceitos teóricos e matemáticos abordados no conteúdo de movimento retilíneo uniforme, movimento circular, rotação e translação.

A figura 1 mostra o aplicativo Pokémon Go em uso em duas situações diferentes, um durante a noite quando foi utilizado na instituição de ensino e a associação realizada por um dos estudantes durante o dia fora da instituição. A imagem mostra que foi possível exemplificar os conceitos de distância, velocidade, aceleração e trajetória, de acordo com o colocado no quadro 2.

A figura 2 mostra a utilização do aplicativo Merge Explorer, que possibilitou a visualização dos elementos específicos dos conteúdos de rotação e translação como o momento angular, equilíbrio, rotação de diferentes planetas, o comportamento do movimento do sistema solar, as órbitas dos

planetas e as fases da lua. Um dos pontos relevantes da aplicação dessas ferramentas de RA foi o desempenho dos estudantes nas relações práticas para aumentar a compreensão dos conceitos abordados pela docente em sala de aula. Vindo ao encontro de [39], quando a autora coloca sobre a utilização da tecnologia em sala de aula, afirmando que

Com um potencial inovador educativo, permitem explorar as características únicas da tecnologia promovendo novos processos de aprendizagem, como exemplo: pesquisas sobre um tema, num repositório ou biblioteca virtual em sala de aula; visualização de realidade virtual ou 3D; comunicar com pessoas que estão noutro ponto geográfico; simuladores com os mais variados propósitos, que permitem experiências, interação e sensações que através dos meios tradicionais não seriam possíveis. ([39], 2013, p.3).

Isso se deve ao fato da visualização de maneira mais clara dos fenômenos abstratos, facilitando a compreensão dos conteúdos. No entanto, foi observado que nem todos os estudantes tiveram a mesma facilidade. Dos 26 participantes, 6 enfrentaram dificuldades ao relacionar as simulações com os conceitos teóricos necessitando de explicações mais detalhadas sobre o conteúdo teórico e o manuseio dos aplicativos.

A Análise das informações dos relatórios produzidos pelos estudantes

Nos oitavo e nono encontros os estudantes produziram em grupos relatórios a fim de identificar a contribuição do uso de RA no aprendizado e na aproximação da teoria física de situações práticas do cotidiano. Dos 26 participantes, os 19 que participaram de todos os encontros relataram melhora significativa na compreensão dos conceitos que envolvem o conteúdo de movimento. Essa percepção é possibilitada pelos resultados da observação, anotações do diário de campo e relatórios.

O quadro 4 mostra que os estudantes tiveram compreensão maior do conteúdo, por meio do uso da realidade aumentada, em comparação com atividades anteriores propostas por meio de cálculos, listas de exercícios e exposição por vídeos.

Quadro IV. Excertos das considerações dos estudantes descritos nos relatórios que foram produzidos e entregues pelos 6 grupos da turma.

Grupo	
1	O aplicativo Merge Explorer foi uma boa ferramenta para as relações do ensino sobre translação que apresenta conteúdos do Sistema Solar, órbitas planetárias e fases da Lua mais dinâmico, interativo e envolvente. Através da visualização 3D, com simulação de diferentes cenários foi possível explorar conceitos abstratos de forma mais significativa para nós.
2	O uso do Pokémon GO utilizado como um complemento ao ensino comum possibilitou entender de forma divertida e interativa as relações de movimento retilíneo uniforme, movimento uniformemente variado e também abriu novas possibilidades para nossa aprendizagem. Mesmo na graduação foi importante quebrar o modelo de aula

	tradicional e explorar novas ferramentas para nossa compreensão.
3	O uso do Pokémon GO e o Merge Explorer foram ferramentas interessantes para o ensino de Física Geral e Experimental I na Engenharia, juntos a teoria com a prática e conseguimos compreender de um jeito mais fácil até mesmo os cálculos do MRU e MUV. Também foi possível simular o movimento de rotação da terra que se tornou um momento interativo.
4	O Pokémon GO e o Merge Explorer tornaram os conteúdos mais divertidos e atrativos. Foi possível ver na prática os conceitos físicos que estamos aprendendo.
5	Durante as aulas e o uso dos aplicativos com a aplicação de conceitos físicos em cenários reais, como a captura de Pokémons na instituição ou a simulação de experimentos com o Merge Explorer, torna o aprendizado mais relevante para a prática da Engenharia.
6	O ensino tradicional de Física Geral e Experimental I na Engenharia muitas vezes se concentra em conceitos abstratos e teóricos, sem uma conexão clara com a prática. O uso do Pokémon GO e Merge Explore proporcionou uma experiência de aprendizado mais interessante, apresentando na prática os conteúdos estudados. Quando fomos para a sala ficou muito mais fácil de entender a explicação teórica.

Além disso, os estudantes demonstraram suas compreensões ao aplicarem os conceitos aprendidos em situações-problema, propostas durante as atividades práticas e ao explicar os fenômenos observados. Por exemplo, em uma das atividades, foi solicitado que os alunos calculassem o tempo necessário para um objeto se deslocar variando a velocidade inicial. Outra situação-problema envolveu a previsão da trajetória circular, onde cada grupo deveria ajustar os ângulos e a velocidade inicial.

Nessas atividades, foram utilizados os conceitos de velocidade, aceleração e movimento retilíneo uniformemente variado para realizar os cálculos e compará-los com os resultados simulados pela RA, o que lhes permitiu não só resolver os problemas, também explicar os fenômenos observados de maneira clara e fundamentada. De acordo com [15], “a RA não substitui completamente a visão do mundo real, mas adiciona informações digitais em tempo real à visão do usuário [...] isso permite que os usuários vejam o mundo real, mas também interajam com elementos virtuais integrados a ele”.

[40] relatam que movimento é quantificado por grandezas como deslocamento, velocidade e aceleração, e é classificado em diferentes tipos, como movimento retilíneo, circular, e movimento sob a ação de forças variáveis. A associação com estas teorias pode ser observada nos experimentos realizados pelos estudantes, onde eles aplicaram essas noções, como deslocamento, velocidade e aceleração para analisar fenômenos físicos em diferentes contextos.

As reflexões dos estudantes apresentados no Quadro 4 evidenciam a assimilação teórica de todos os conceitos ensinados, dentro do conteúdo de movimento, destacando a capacidade de conectar conceitos abstratos dos livros com situações práticas e reais. Considerando as descrições retratadas nos excertos dos seis grupos, evidencia-se que a inserção dos aplicativos Merge Explorer e Pokémon GO no

ensino de física oferece múltiplos benefícios, como o dinamismo, ao permitir que os estudantes interagissem diretamente com os conceitos por meio de simulações em tempo real, como o ajuste de velocidade, tempo e aceleração em diferentes cenários de movimento.

A interação ao permitir que eles testassem hipóteses, manipulassem os parâmetros das simulações e observassem os resultados imediatos, facilitando a visualização e a compreensão dos conceitos abstratos. Além disso, a aprendizagem é reforçada ao conectar as simulações virtuais com situações cotidianas, tornando o conteúdo relevante para os estudantes. As simulações proporcionaram momentos de interação entre os membros das equipes e aproximaram os experimentos aplicados em laboratórios na realidade, trazendo relevância para os futuros engenheiros na aplicação da RA em cenários atuais.

[31] destacam que

a RA destaca-se como uma poderosa aliada para tornar o ensino de física mais atrativo, concreto, eficaz e alinhado com as necessidades e expectativas dos estudantes à medida que os ajudam a compreender melhor os conceitos, que até então são estudados de forma abstrata, idealizada e ineficaz. A contínua evolução e integração da tecnologia no ambiente educacional pode abrir novas perspectivas para o aprimoramento da aprendizagem, preparando os alunos para desafios futuros. ([31], 2024, p.482).

A ideia exposta por [31] pode ser comprovada pelo excerto do grupo 4, apresentado no quadro 3. Por exemplo, os relatos dos grupos 1 e 2 demonstram como a integração de diferentes ferramentas educacionais pode transformar conceitos teóricos em experiências práticas e interativas. Além disso, a menção do grupo 2 à importância de avançar, além do modelo de aula tradicional na graduação destaca a relevância de explorar novas metodologias que possam se adaptar melhor às necessidades e expectativas dos estudantes na atualidade.

Já os excertos apresentados pelos grupos 3 e 6 reforçam a importância de integrar tecnologias que permitam a vivência prática dos conceitos da física antes de enfrentarem as explicações teóricas mais abstratas. A menção de que essas ferramentas facilitaram até mesmo a compreensão dos cálculos de MRU (Movimento Retilíneo Uniforme) e MUV (Movimento Uniformemente Variado) indica que a experiência de aprendizado contribuiu com a aprendizagem, tornando os conceitos mais tangíveis e menos distantes na assimilação para os estudantes.

Os grupos 4 e 5 relataram que através da utilização do Merge Explorer e Pokémon Go puderam aplicar diretamente os conceitos aprendidos em cenários reais, reforçando a relevância dos conteúdos para a prática da Engenharia, mas também se mantiveram motivados durante os encontros. Este trecho demonstra a importância de conectar o ensino de física a contextos do mundo real e de criar experiências de aprendizado educacional. Tais experiências podem facilitar a compreensão dos conteúdos, além de preparar os estudantes para aplicarem esses conceitos em situações práticas em sua futura carreira profissional.

Os resultados mostraram que os 19 estudantes de engenharia que participaram de todas as atividades se mostraram mais engajados e motivados em aprender os

conteúdos, uma vez que a realidade aumentada proporcionou uma forma mais visual e real de compreendê-los. Além disso, a interatividade oferecida pela tecnologia permitiu a exploração e experimentação dos conceitos físicos de forma prática, o que contribuiu para melhor assimilação do conhecimento.

Portanto, entende-se que a utilização de novas ferramentas no ensino superior permite estabelecer relação efetiva entre teoria-prática como auxílio na aplicação de conceitos teóricos em cenários reais ou simulados, facilitando a compreensão dos conteúdos de Física Geral e Experimental. Como visto nas considerações dos estudantes, a conexão entre teoria e prática, proporcionada pelo uso desses aplicativos, resultou em uma experiência de aprendizado mais interessante.

Ressalta-se que nem todas as experiências foram satisfatórias, pois quando se trata de tecnologias, internet e aparelho celular, podem ocorrer instabilidades para a aplicação em aula. Houve momentos em que o aplicativo apresentou problemas de conectividade, dificultando a visualização dos objetos virtuais. Além disso, oito alunos sentiram certa dificuldade em se adaptar ao uso da tecnologia, principalmente aqueles com pouca familiaridade com dispositivos eletrônicos. Porém, de acordo com Barchinski [40], e baseado nos dados analisados durante as atividades e relatórios, evidencia-se que com a integração tecnológica e utilização recorrente em outros conteúdos esta dificuldade poderá ser aos poucos sanada.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa demonstrou que a realidade aumentada é uma ferramenta com potencial para contribuir com o ensino do conteúdo de movimento, através das simulações por realidade aumentada, oferecendo uma experiência de aprendizagem interativa para os estudantes do ensino superior. Os aplicativos utilizados durante esta pesquisa permitiram a visualização tridimensional de conceitos abstratos, leis e fenômenos físicos, facilitando a compreensão dos conteúdos.

O uso dos aplicativos de realidade aumentada, Pokémon GO e Merge Explorer, apresentou resultados que reforçaram a troca de ideias e a construção conjunta de conhecimento, permitindo que os estudantes discutissem os conceitos e problemas da física, resultando em uma compreensão integrada dos conteúdos trabalhados. Durante a aplicação das atividades, algumas dificuldades foram observadas que podem impactar a eficácia do uso da realidade aumentada no ensino de física.

Embora a maioria dos estudantes tenha participado das atividades utilizando seus dispositivos móveis, alguns enfrentaram limitações de acesso à internet ou a dispositivos compatíveis com os aplicativos utilizados, como o Merge Explorer e Pokémon GO. Outro desafio foi o fato de que nem todos os alunos tinham familiaridade com as ferramentas de realidade aumentada, exigindo um período inicial de adaptação. Essa fase, embora necessária, pode ter comprometido o ritmo das atividades, especialmente nos primeiros momentos das atividades propostas em cada encontro.

Para superar essas dificuldades e aprimorar futuras investigações, sugere-se que novas pesquisas explorem estratégias de inclusão digital, buscando maneiras de garantir que todos os estudantes tenham acesso às tecnologias necessárias. Além disso, é recomendável incluir o uso da realidade aumentada em sala de aula como metodologia de avaliação, pois de acordo com os resultados nota-se que a compreensão dos conteúdos se torna mais eficaz.

Por fim, a realização de estudos em um prazo maior acompanhando o impacto da realidade aumentada no aprendizado em diferentes momentos ao longo da formação acadêmica pode atribuir uma visão mais aprofundada dos benefícios e desafios dessa tecnologia, permitindo ajustes mais precisos em sua implementação.

AGRADECIMENTO

A CAPES pelo auxílio da Bolsa de Doutorado para que a dedicação com as pesquisas seja possível. A Universidade Tecnológica Federal do Paraná campus Ponta Grossa por apoiar a pesquisa e destinar verbas como também ambiente próprio para nosso estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] Leite, B. S., *Aplicativos de realidade virtual e realidade aumentada para o ensino de Química*, Educitec-Revista de Estudos e Pesquisas sobre Ensino Tecnológico **6**, e097220-e097220, (2020).
- [2] Kenski, V. M., Medeiros, R. A., Ordéas, J. *Ensino superior em tempos mediados pelas tecnologias digitais*, Trabalho & Educação **28**, 141-152, (2019).
- [3] Moraes, V. C., *Como empresários estão lucrando com o Pokémon GO e atraindo consumidores*, (2016). Recuperado em 03 de outubro, 2016, de <http://blog.pr.sebrae.com.br/empreendedorismo/como-empresarios-estao-lucrando-com-opokemon-go-e-atraindo-consumidores>.
- [4] Rodrigues, M. C., Tori, Da Silva, B. H., Pontes. *Sólidos geométricos-Pirâmides com Realidade Aumentada*, Anais dos Trabalhos de Conclusão de Curso Pós-Graduação em Computação Aplicada à Educação Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação (Universidade de São Paulo, Brasil, 2020).
- [5] Martín, S. C., González, M. C., *Proposta didática com realidade aumentada no programa Digicraft*, Simpósio Internacional de Educação e Comunicação-SIMEDUC, 10 (2021).
- [6] Silva, L. G. P., Rufino, H. L. P., *O ensino de história e o uso de realidade aumentada*, Revista Intersaberes **16**, 138-159 (2021).
- [7] Silva, G. V. da et al., *Novas práticas utilizando realidade aumentada no ensino de biologia em escolas de ensino fundamental*, (Universidade Federal de Santa Catarina, 2023).
- [8] Herpich, F., *Recursos educacionais em realidade aumentada para o desenvolvimento da habilidade de visualização espacial em física*, (2019).

- [9] Malbos, A. N. A. et al., *Aplicação da Realidade Aumentada para simulação de experimentos físicos em dispositivos móveis*. In: 014 11th International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation (REV). IEEE, 231-235 (2014).
- [10] Souza, R. C., Kirner, C., *Ensino e Aprendizagem de Eletromagnetismo usando Recursos de Realidade Aumentada*, RENAME 9, 1 (2011).
- [11] França, C. R., *O potencial da realidade virtual e aumentada na concepção de objeto de visualização para aprendizagem de Física*, (2019).
- [12] Queiroz, A. S. et al., *Realidade Aumentada no Ensino da Química: Elaboração e Avaliação de um Novo Recurso Didático*, Revista Eletrônica Argentina-Brasil de Tecnologias da Informação e da Comunicação 1, 2 (2015).
- [13] Ferreira, C. E. A. et al., *Realidade Aumentada como apoio ao ensino de Ciências no contexto da pandemia por Covid-19: um estudo de caso*, Research, Society and Development 11, 12 (2022).
- [14] Chaves, J. et al., *O uso da realidade aumentada como ferramenta experimental para o ensino da gravitação universal*, (2023).
- [15] Alves, J. P. A. S. V., *Utilização de realidade virtual e aumentada no ensino de Física*, Trabalho de Conclusão de Curso, (UNESP, Brasil, 2023)
- [16] Viana, G. O., Ribeiro, R. J., Figueiredo, G.V. C., *Robótica aumentada: Interação entre robôs reais e cenários virtuais projetados com aplicação no ensino de Física*, Ensino e Tecnologia em Revista 5, 108-124 (2021).
- [17] Abreu, R. O., De Souza, P. H., *O uso da realidade aumentada como recurso didático para o estudo do sistema solar*, Anais da Semana de Licenciatura, 299-309 (2015).
- [18] Gomes, C. B. C., *Transição de fase Superfluido-Isolante de Mott em redes ópticas via modelo de Jaynes-Cummings-Hubbard*, (2013). 95 f. Tese de Doutorado em Física – (Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2013).
- [19] Silva, R. L. de S., Viegas, M. AC., Vieira, M. B., *Ferramenta de Apoio ao ensino de Física utilizando Realidade Aumentada*, Revista Brasileira de Informática na Educação 20, 60 (2012).
- [20] Coelho, P. H. L. et al., *Uso da realidade aumentada e o QR CODE com o auxílio do aplicativo AR CIRCUITS 4D PHYSICS como recurso didático para o ensino de Física: Uma sequência didática para circuitos elétricos*, (2023). 131 f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Rede - Ensino de Física em Rede Nacional/CCET) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2023
- [21] Barbosa, B. K. N., *Realidade aumentada como ferramenta de apoio para ensinar eletromagnetismo*, Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Pará, Faculdade de Física, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Física, Belém, (2020).
- [22] Nicolette, P. C. et al., *Estudo exploratório sobre realidade aumentada e laboratório remoto no ensino de física*, Revista Novas Tecnologias na Educação 17, 345-355 (2019).
- [23] Ribeiro, A. A S., De Oliveira Siqueira, A. B., Da Hora Macedo, S. *Realidade aumentada aplicada ao ensino e aprendizagem do campo magnético*. In: Congresso de Ensino Pesquisa e Extensão-CONEPPE. (2014).
- [24] Barcelos, M. et al. *Uso de realidade aumentada na visualização de componentes de subestações de energia* Lat. Am. J. Phys. Educ. Vol. 19, No. 2, June, 2025
- elétrica. In: XI Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica. sn, (2013).
- [25] Dornel, A. P. et al. *Eclipses, relatividade geral e sobral: Uma abordagem usando realidade aumentada*, XI Encontro Científico de Física Aplicada, 7 (2021).
- [26] Feitosa, A. M., *Realidade aumentada no ensino de física*. 2020. 165 f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática) – Centro de Educação, Programa de Pós Graduação em Ensino de Ciências e Matemática, (Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2021).
- [27] Costa, T. Q., Rabello, D. L. S., *Investigação Didática de Ambientes com Realidade Virtual e Realidade Aumentada na Aprendizagem de Física Moderna Contemporânea: uma abordagem semiótica*, IF-Sophia: Revista Eletrônica de Investigações Filosófica, Científica e Tecnológica 6, 105-124 (2020).
- [28] Perrone, B. M. S., *A formação de conceitos científicos em física: uma proposta de ensino delineada pela teoria das ações mentais utilizando realidade aumentada*, 118f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática) — Centro de Ciências Exatas. Universidade Federal do Amazonas. Manaus, (2018).
- [29] Oliveira, L. D., Manzano, R., Cid., *Aplicações de realidade aumentada no ensino de Física a partir do software LAYAR*, Revista Novas Tecnologias na Educação 14, 1, (2016).
- [30] Herpich, F et al., *Realidade Aumentada no Desenvolvimento da Habilidade de Visualização Espacial em Física*. In: Anais dos Workshops do Congresso Brasileiro de Informática na Educação, (2018) p. 345.
- [31] Neto, M. G., Barros C. et al., *Aplicabilidade da realidade aumentada no ensino de física*, Brazilian Journal of Development 10, 470-483 (2024).
- [32] Denardin, L., Manzano, R. Cid., *Desenvolvimento, utilização e avaliação da realidade aumentada em aulas de física*, Revista Novas Tecnologias na Educação 15, 2 (2017).
- [33] Meyer, Y. A. de Souza, E. L., de Ávila, L. F., Artero, G. G., Borges, J. I., dos Santos, J. R., & da Costa, L. C. S., *Iniciação Científica no Ensino Médio: A construção de um aparato experimental de baixo custo para estudo da lei de lambert-beer a partir de um circuito montado com fotodiodo LDR*, Revista de Estudos Aplicados em Educação 3, 5 (2018).
- [34] Bajura, M. & Neumann, U., *Dynamic registration correction in video-based augmented reality systems*, IEEE Computer Graphics and Application, 9, September, (1995).
- [35] Gil, A. C. *Métodos e Técnicas de Pesquisa Social*. Atlas, São Paulo, (2011).
- [36] Espedito, F. L. C. et al., *A gamificação no ensino de Astronomia nos anos finais e na EJA do Ensino Fundamental: uma estratégia para a aprendizagem significativa*, Dissertação de mestrado em Astronomia, (Universidade Estadual de Feira de Santana, 2021).
- [37] Góes, M. S., Teixeira, M. S., *Arte e cultura digital na Educação Infantil: a galáxia na palma da mão*, Olhar de professor 24, 1-20 (2021).
- [38] Alves, L. R. G., Torres, V., *Jogos digitais, entretenimento, consumo e aprendizagens: uma análise do Pokémon Go*. (EDUFBA, Salvador, 2017).
- [39] Franco, C. C. C., *A utilização de recursos educativos digitais na sala de aula: Um componente fundamental no* <http://www.lajpe.org>

Ensino, (Universidade Nova de Lisboa, Relatório de estágio, 2013).

[40] Tipler, P. A. e Mosca, G., *Física para Cientistas e Engenheiros*, Volume 1 Mecânica, Oscilações e Ondas Termodinâmica, (Ed. LTC, Rio de Janeiro, 2009).

[41] Barchinski, K. C., *Construção de objetos com movimento nas formas digital e não-digital: onde está a matemática?* Dissertação de mestrado, (Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2022).

Novel Concepts of Mode Volume and Quality Factor in Research Applications of Photonic Nanocavities and Ring Resonators



ISSN 1870-9095

Kamal Nain Chopra¹ and Shivani Aggarwal²

¹*Former Professor Applied Sciences Department, Maharaja Agrasen Institute of Technology, Rohini, GGSIP University, New Delhi - 110086, India;
Former Research Scientist, Photonics Group, Department of Physics, Hauz Khas, New Delhi-110016, India; and
Former Scientist G, Laser Science and Technology Centre, Metcalfe House, Delhi-110054, India;*

²*Applied Sciences Department, Maharaja Agrasen Institute of Technology, Rohini, GGSIP University, New Delhi - 110086, India.*

E-mail: kchopra2003@gmail.com

(Received 11 February 2025, accepted 25 May 2025)

Abstract

Novel Concepts of Mode Volume and Quality Factor in Research Applications of Photonic Nano cavities and Ring Resonators have been technically discussed in the present paper. The Localized Modes induced by structural defects have been briefly described. The cases of Air-mode photonic crystal ring resonator and Ultra-compact active hybrid plasmonic resonator have been investigated in detail. Different approaches for modeling the nano cavities have been presented and technically discussed. Some of the important recent experimental breakthroughs in the topic have been qualitatively reviewed by briefly discussing their results. The paper should be really useful for the researchers and designers in this evolving important field.

Keywords: Photonic Nano cavities, Mode volume, Air-mode photonic crystal ring resonator, Ultra-compact active hybrid plasmonic resonator.

Resumen

En este artículo se abordan técnicamente nuevos conceptos de volumen modal y factor de calidad en aplicaciones de investigación de nanocavidades fotónicas y resonadores de anillo. Se describen brevemente los modos localizados inducidos por defectos estructurales. Se investigan en detalle los casos de resonadores de anillo de cristal fotónico en modo aire y resonadores plasmónicos híbridos activos ultracompactos. Se presentan y discuten técnicamente diferentes enfoques para el modelado de las nanocavidades. Se revisan cualitativamente algunos de los avances experimentales recientes más importantes en este tema, analizando brevemente sus resultados. Este artículo resultará de gran utilidad para investigadores y diseñadores en este campo en constante evolución.

Palabras clave: Nanocavidades fotónicas, Volumen modal, Resonador de anillo de cristal fotónico en modo aire, Resonador plasmónico híbrido activo ultracompacto

I. CAPABILITY OF CONFINING AND MANIPULATING PHOTONS AT NANOMETER SCALES

It has now been well established that the capability of confining and manipulating photons at nanometer scales has opened up numerous opportunities in (i) classical and quantum information processing technologies, and (ii) life sciences. Though many research papers have appeared, which demonstrate the submicron light confinement, yet the critical problem lies in the form of challenges in understanding the new device concepts and developing technologies which can operate reliably at nanometer scales. Already, researchers are engaged in making efforts in this

direction. In practice, it is found that the large aggregated bandwidths of the optical interconnects are required for the memory and delay components for launching, buffering, and collecting optical signals at the nodes. One of the suggestions has been the use of the two-dimensional coupled nanocavity array structures, having flat electromagnetic bands implying that the frequency variation with the wave vector is minimized in all crystal directions. It is also known now that such structures with reduced rotational symmetries are suitable for strongly controlling the polarization of light. One of the very important uses has been the improvement in the performance of lasers w.r.t. their speed and efficiencies, which can be dramatically enhanced by using nanocavities, because of the fact that the spontaneous emission rate is

enhanced by the modification of vacuum field density in a cavity. Ultra-fast lasers with turn on and turn-off times ~ 1 -2 ps. have already been developed, which are able to direct signal modulation speeds >100 GHz, which is even more than an order of magnitude higher than the semiconductor laser speeds.

It is important to note that the speed enhancements of this order have been possible by the ~ 75 -fold enhancement of spontaneous emission. Nanocavity lasers with still higher output powers and efficiencies have been achieved by the development of a new device composed of coherently coupled nanocavity laser array. Such devices have been realized by nanofabrication procedures developed for Indium Phosphide and Silicon material systems. It is to be noted that the nanocavities are able to increase sensitivity of bio and chemical sensors. Successful efforts have also been made to integrate the network of such nanocavity detection centers with micro fluidic circuits for high throughput and compact lab-on-a-chip systems. These have also been found useful for detecting the refractive index changes in nanocavities with high sensitivity levels.

II. GUIDING OF LIGHT BY A PHOTONIC CRYSTAL

The band gap in photonic crystals is the forbidden energy range, and hence, wave behaving photons are unable to transmit through the material. Clearly, it is possible to tailor the specific band gap of a structure by defining a pattern with repeating regions i.e. by imitating the periodicity of photonic crystals. This is typically done by forming a structure with holes in a square or hexagonal arrangement, alternating between materials with high and low dielectric constant. The results of Simulation showing how light propagates in photonic crystals, which are available in the literature, have been reproduced below:

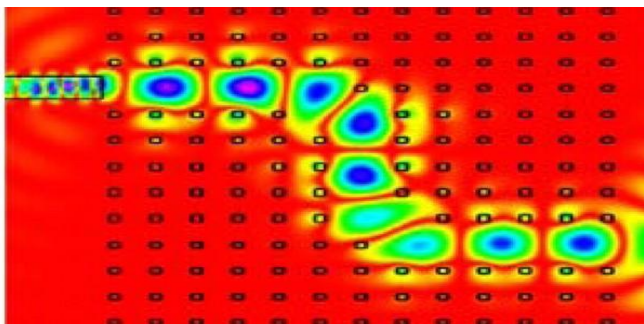


FIGURE 1. Simulation showing how light propagates in a photonic crystal. Figure courtesy <http://www.phoenixbv.com>.

As illustrated in the above figure, a photonic crystal can be used to guide the light in different directions.

III. MODELING OF PHOTONIC NANOCAVITIES

An important application of photonic crystals is the realization of the optical nanocavities, which are able to trap the light in very small mode volume ($V \approx 2(2/2n)^3$, where n is the refractive index. This small mode volume can lead to significant enhancement of spontaneous emission rates in semiconductor nano-cavities due to the Purcell effect. The spontaneous emission modification factor, also known as the Purcell factor, scales inversely with the cavity mode volume. In nanoscale lasers, enhanced emission together with a reduced number of cavity modes relative to large lasers can have significant effects, especially on sub-threshold behavior and for a long period of time, proportional to the cavity quality factor Q . The underlying physics is simple: The strong light localization in photonic crystal nanocavities results in dramatically increasing the light-matter interaction, and the photon-photon interaction, which leads to their use in a wide range of applications in basic science and engineering. An important strange offshoot is that by combining photonic crystal lattice defects in a linear configuration, we can construct very compact waveguides capable of sharply bending with very low losses; and finally an efficient coupling of these waveguides and cavities on chip, is important for the realization of compact and high bandwidth optical integrated circuits. In addition, the devices can be made in standard electronic materials, in a planar geometry, which can be integrated with electronics to achieve a higher level of functionality.

The studies of the Mode of photonic-crystal-slab single-defect cavity structures have drawn the attention of the researchers for suggesting their use as a good candidate for a high-quality factor (Q) and small-mode volume (V) resonant mode. Ryu et al (1) have optimized the structural parameters to obtain very large of even higher than with small effective of the order of cubic wavelength in material, by using the finite-difference time-domain calculations. It has been suggested by the Fourier-space investigation of resonant modes, that such a high from the hexapole mode is achieved due to the cancellation mechanism related to hexagonally symmetric whispering-gallery-mode distribution and also to the mode delocalization mechanism.

One of the techniques for fabricating Photonic crystal nanocavities is based on modifying one or more holes in a perfectly periodic lattice, which is done by changing the hole size or the refractive index. In fact, a break of this type in the periodicity of the lattice introduces new energy levels within the photonic band gap, in the same way as the creation of energy levels within the semiconductor energy band gap by the addition of the doping atoms in semiconductor crystals. Interestingly, an increase in the hole sizes enhances the energy of the modes held in the slab, and thus pulls up the defect states from the dielectric band into the band gap, the modes created in this being called the acceptor modes. On the other hand, a reduction in the hole sizes decreases the energy of the mode, and hence pulls down the defect states from the air band into the band gap, defect modes of this type being called the donor modes. The Schematic of the point-defect

nanocavity in a 2D photonic crystal (PC) slab is shown below:

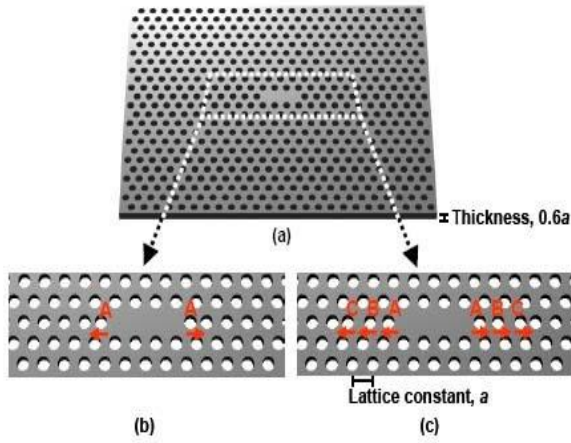


FIGURE 2. Schematic of the point-defect nanocavity in a 2D photonic crystal (PC) slab. The base cavity structure is composed of three missing air holes in a line. The PC structure has a triangular lattice of air holes with lattice constant a . The thickness of the slab and the radius of the air holes are $0.6a$ and $0.29a$, respectively. (b) The designed cavity structure created by displacing two air holes at both edges in order to obtain high- Q factor. (c) The designed cavity structure created by fine-tuning the positions of six air holes near both edges to obtain an even higher Q . Figure courtesy Akahane Yoshihiro, Asano Takashi, Song Bong-Shik, and Noda Susumu, Fine-tuned high- Q photonic-crystal nanocavity, *Optics Express*, Vol. 13, Issue 4, pp. 1202-1214, (2005), <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.001202>.

Akahane et al (2) have studied Fine-tuned high- Q photonic-crystal nanocavity. Following the approach supported by them, the Q factors for cavities with a range of air hole displacements at positions A, B and C. can be calculated by applying 3D-FDTD method. The structure is discretized on a 3D mesh and Mur's second-order absorbing-interface condition is applied to the outer surface of the computational domain. For the case of the base 2D-PC slab composed of Silicon with a triangular lattice of air holes having lattice constant a , and for the parameters: slab thickness of $0.6a$, air hole radius of $0.29a$, slab index of 3.4 and an air clad index of 1; the Q factor of the cavity modes can be expressed as follows:

$$Q \equiv \{\omega_0(t)\} / \{-dU(t)/dt\}, \quad (1)$$

where, ω_0 is the angular frequency of the cavity mode, and $U(t)$ is the total energy stored in the cavity. Eq. (1) can be used to derive the following equation:

$$(t) = [U(0)\exp[-(\omega_0 t)/Q]], \quad (2)$$

and, the magnetic field $H(t)$ can be expressed as follows:

$$\ln[H(t)] = \ln[H(0)] - [\omega_0/(2Q)]t. \quad (3)$$

As can be seen in Eq. (3), the Q factor can be calculated by measuring the slope of the exponential decay of the magnetic field (or the electric field) of a given cavity mode. Q factor is calculated from the slope and ω_0 is derived by using the FT of $H(t)$. This method is useful for relatively low Q factors. However, for higher Q factors, the slope $\{\omega_0/(2Q)\}$ is very small which results in larger errors. The second method calculates both the energy losses radiated from an interface surrounding the cavity and the energy stored in the cavity. The Q factor is determined by substituting both values into Eq. (1). For the cavity modes of the analyzed structures, a little discrepancy between the two methods, proving the validity of the results based on these approaches.

In addition, the modal volume of the cavities can be estimated by inserting the calculated electric field distributions into the following equation:

$$V = [\{\varepsilon(r)|E(r)|^2 d^3r\} / \{\max[\varepsilon(r)|E(r)|^2\}], \quad (4)$$

where $\varepsilon(r)$ is the dielectric constant, and $E(r)$ is the electric field. The integration region in Eq. (4) is $\pm 14a$ in the x -direction, $6\sqrt{3}a$ ($\approx \pm 12$ rows) in the y -direction, and $\pm 4.3a$ in the z -direction from the center of the cavity. It has been confirmed that the size of the region is sufficiently large for calculating Eq. (4). The electric field distribution (E_y) of the fundamental mode for a cavity without air hole displacement at both edges has been reproduced in the following graph:

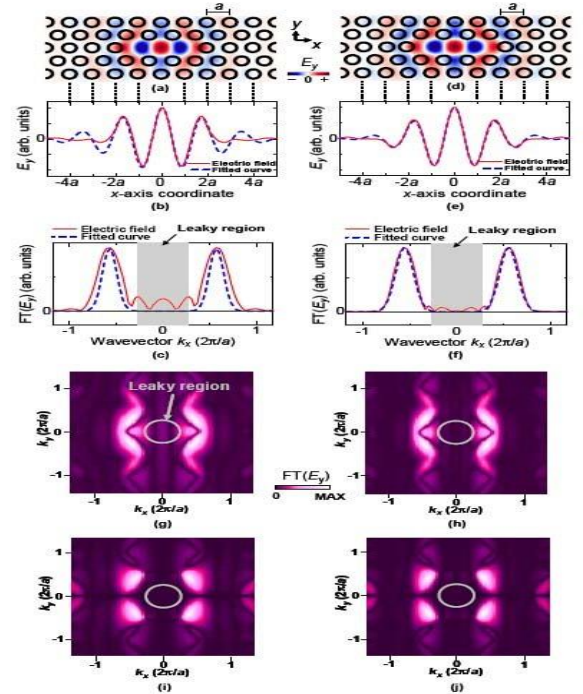


FIGURE 3. (a) The electric field distribution (E_y) of the fundamental mode for a cavity without air hole displacement at both edges. (b) The profile of (a) along the center line of the cavity and the fitted curve corresponding to the product of a fundamental sinusoidal wave and a Gaussian envelope function. (c) The 1D FT spectra of (b). The leaky region or light cone is indicated by the gray area. (d), (e), (f) The electric field distribution (E_y), the E_y profile along the center line and the fitted curve, and the 1D FT spectra, respectively, for the cavity structure shown in Fig. 3(b). The

displacement of air holes at the edges is set at $0.20a$. (g), (h). The 2D FT spectra of (a) and (d), respectively. (i), (j) The 2D FT spectra of E_x for cavities of (a) and (d), respectively. Figure courtesy Akahane Yoshihiro, Asano Takashi, Song Bong-Shik, and Noda Susumu, Fine-tuned high-Q photonic-crystal nanocavity, *Optics Express*, Vol. 13, Issue 4, pp.1202-1214 (2005), <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.001202>.

Asano et al. (3) have studied Photonic crystal nanocavity with a Q factor exceeding eleven million, and presented their results of Decay curves of photons (Fig 4) in a nanocavity just after the fabrication (black solid line), after the first oxidization process (blue solid line), and after the subsequent oxide removal (DHF) process (red solid line). The cavity is excited by an input pulse with a width of 10 ns (gray dashed line). Their results have been reproduced below:

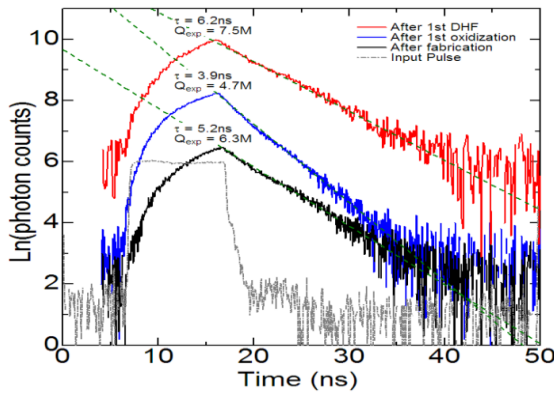


FIGURE 4. Decay curves of photons in a nanocavity just after the fabrication (black solid line), after the first oxidization process (blue solid line), and after the subsequent oxide removal (DHF) process (red solid line). The cavity is excited by an input pulse with a width of 10 ns (gray dashed line). The small dip at around 20 ns is attributed to the influence of the tail of the input pulse. We evaluated photon lifetimes (τ) from the later part (>25 ns) of the decay curves. Figure courtesy Akahane Yoshihiro, Asano Takashi, Song Bong-Shik, and Noda Susumu, Fine-tuned high-Q photonic-crystal nanocavity, *Optics Express*, Vol. 13, Issue 4, pp. 1202-1214, (2005), Figure courtesy Asano Takashi, Ochi Yoshiaki, Takahashi Yasushi, Kishimoto Katsuhiko, and Noda Susumu, Photonic crystal nanocavity with a Q factor exceeding eleven million, *Optics Express*, Vol. 25, Issue 3, pp. 1769-1777, (2017), <https://doi.org/10.1364/OE.25.001769>.

Figure 4 shows the photon lifetime curve of one of the prepared nanocavities just after fabrication, that after the first oxidization process and that after the first DHF process. It is seen in the figure that τ decreased from 5.2 ns to 3.9 ns after the oxidization and increased to 6.2 ns after the DHF treatment. The corresponding Q_{exp} values are 6.3, 4.7 and 7.5 million, respectively. Simultaneously, the resonant wavelength changed from 1567.5 nm to 1567.26 nm and 1565.30 nm for each treatment step. The blue shifts of the resonant wavelength are caused by the decrease of the refractive index by surface oxidization, and the decrease of the slab volume by oxide removal. The total blue shift of the resonant wavelength (2.2 nm) observed for this process corresponds to the uniform removal of silicon at the cavity

surface (including inner walls of the air holes) by about 0.5 nm according to the 3D-FDTD calculation. The decrease of τ after the oxidization is due to the formation of interface states at the Si/SiO₂ interface, and the increase of τ after oxide removal is attributed to the removal of the interface states and termination of the Si surface with hydrogen. More importantly, one cycle of this treatment increased τ or Q_{exp} by 19%, which demonstrates the effectiveness of this cleaning method. Following the approach of Asano et al (3), $(1/Q_{imp})$ can be obtained from the statistical analysis of Q_{exp} . For this analysis, first step is to remove the loss determined by the design (Q_{des}) by using the following relation:

$$(1/Q_{exp}) = \{1/Q_{des} + 1/Q_{imp}\}. \quad (5)$$

By using a Q_{des} value of 4×10^7 , which is determined from the 3D-FDTD calculation including the load of the excitation waveguide; the evaluated average loss due to the imperfections $[Avg.(1/Q_{imp})]$ and its standard deviation $[S.D.(1/Q_{imp})]$ can be calculated. $(1/Q_{imp})$ can be divided into scattering loss $(1/Q_{scat})$ and absorption loss $(1/Q_{abs})$ as follows:

$$(1/Q_{imp}) = \{1/Q_{scat} + 1/Q_{abs}\}. \quad (6)$$

$(1/Q_{scat})$ is mainly determined by the fluctuations of the structure, and $(1/Q_{abs})$ is determined by the light absorption of the material. The magnitude of $(1/Q_{scat})$ due to random air-hole variations can be calculated by using the FDTD simulations. In this calculation, random nanometer-scale variations in the positions and radii have to be applied to all the air holes in the calculation space in such a way that the probability of the variations followed a normal distribution with a standard deviation of σ_{hole} . This requires lot of expertise of the designer, and his knowledge of the subject. The calculation for different fluctuation patterns is done to obtain the statistical relationship between σ_{hole} (in nm) and $Avg. (1/Q_{scat})$ and $S.D. (1/Q_{scat})$ as follows:

$$Avg. (1/Q_{scat}) = 7.5 \times 10^{-7} \times (\sigma_{hole}^2), \quad (7)$$

and

$$S.D. (1/Q_{scat}) = 3.0 \times 10^{-7} \times (\sigma_{hole}^2). \quad (8)$$

By assuming that the fluctuations of $(1/Q_{imp})$ are mostly determined by the variation of air holes and that the fluctuation of absorption loss can be ignored, i.e. $S.D.(1/Q_{imp}) = S.D.(1/Q_{scat})$, σ_{hole} is of the order of 0.24 ~0.26 nm. The designer has to design the mode volume and the quality factor of nanocavities, which are suitable for a particular application. Obviously, the lateral loss can be suppressed easily by increasing the number of photonic crystal layers around the cavity operating at the frequency inside the band gap. Therefore, the vertical loss mostly determines the total of the cavity. A single defect cavity formed by missing a hole in a square lattice, is known to support three types of defects modes: quadrupole, dipole, and monopole. The quadrupole mode has the highest quality factor with a, with 5 photonic crystal periods around the defect.

It has been established that small group velocity is very useful in many applications, like on-chip optical delay components, and the observation of non-linear phenomena at very low power levels. Besides, the reduced group velocity implies a larger density of photon states, which fact reduces the lasing threshold. Also, since the spatial modulation of the dielectric constant in photonic crystals is periodic, their dispersion behavior is different from that observed in case of uniform materials, as apart from the usual formation of bands and band gaps, it is also possible to obtain a large group velocity anomaly and a high density of optical states (DOS) at the band edges of bulk photonic crystals and of photonic crystal waveguides; though this anomaly is limited only to a very narrow range of wave vectors and for one particular direction of propagation.

Two-dimensional arrays of coupled photonic crystal nanocavities exhibiting flat band i.e. small group velocity or large optical density of states, in the whole range of wave vectors and in all crystal directions (4) have also been reported. Since there is a large group velocity anomaly in any photonic crystal direction, these arrays are able to give even higher output powers while preserving low lasing thresholds. Another advantage is that the electrical pumping in these structures is much easier. Also, these structures in combination with nonlinear optical materials can be used for exploring the 2D discrete solitons (5, 6), and constructing optical switching arrays. Interestingly, coupled resonator optical waveguides (CROWs) in photonic crystals have also been reported (7) as able to reduce the group velocity. In fact, a coupled-resonator optical waveguide simply consists of a chain of resonators in which light propagates by tunneling from one resonator to its adjacent resonators, and hence, the group velocity can be controlled by changing the distance between the resonators. An important factor to be taken care is that though the CROW is able to reduce the group velocity in a wide range of wave vectors, it has to be ensured that this propagates in the direction of the coupling of the cavities, which is quite difficult, and requires the skill of the designer, who has to align the input beam in one particular direction, and also to couple it efficiently into a cross sectional area.

The formation of the Localized Modes Induced by Structural Defects has been discussed by Dai (8). As explained in this paper, there are no propagating (real k) modes inside the band gap. However, for the case of the complex wave vector, $H(x)$ is given by:

$$H(x) = e^{ikx}u(x) = e^{ik_0x}u(x)e^{-\kappa x}, \quad (9)$$

which is decaying exponentially. The upper band near the gap can be approximated by expanding $\omega_2(k)$ in powers of k about the zone boundary $k = \pi/a$. Because of the time-reversal symmetry, the expansion cannot contain odd powers of k , and the following expression can be written:

$$\Delta\omega = \omega_2(k) - \omega_2(\pi/a) = \alpha(k - \pi/a)^2 = \alpha(\Delta k)^2. \quad (10)$$

Hence, clearly for frequencies lower than the top of the gap, i.e., within the gap, $\Delta\omega < 0$, $\Delta k = ik$ is purely imaginary. As the gap is traversed, the decay constant κ grows as the frequency reaches the mid-gap, then disappears at the gap

edges, and subsequently disappears at the gap edges. In case of the perfect photonic crystals, because of the translational symmetry, the evanescent modes cannot be excited. Interestingly, however, a defect is able to sustain such a mode, because the corresponding translational symmetry is broke; and hence, a localized evanescent mode can be created within the photonic band gap. This concept is used for explaining the formation of photonic-crystal cavities and photonic-crystal waveguides. It has also been explained that by suitably perturbing the lattice sites, it can be assured that only a single mode or sets of closely spaced modes can be permitted that have frequencies in the gap. In addition, these modes have the characteristic of decaying exponentially away from the defect, and hence are confined. This explains the concept of photonic-crystal cavity based on photonic band gap confinement. The selected site may be perturbed, by various ways including (i) removing it from the crystal, and (ii) replacing it with another whose size or dielectric constant is different. Since the point defects in photonic crystal can be used to trap photons, the light can also be guided from one location to another by using line defects, i.e., by changing the dielectric constant along a line in a photonic crystal to generate modes lying within the band gap. In this way, lights of corresponding frequencies can be confined, and directed along the waveguide. Therefore, the $k = -\pi/a$ mode lies at an equivalent wave vector to the $k = \pi/a$ mode, and at the same frequency. So there is a degeneracy at the zone boundary, $k = \pi/a$. The E-fields can be expressed at the boundary as $e(x) = \cos(\pi x/a)$ and $o(x) = \sin(\pi x/a)$, a linear combination of $E(x) \sim e^{\pm ikx}$, both at $\omega = c\pi/a$. ϵ can also be perturbed so that it is nontrivially periodic with periodicity a ; for example, $\epsilon(x) = 1 + \Delta\epsilon \cos(2\pi x/a)$. It is important to note that the photonic crystals have also found application in the development of ring resonator. Gao et al (9) have proposed and demonstrated an air-mode photonic crystal ring resonator (PhCRR) on silicon-on-insulator platform. In this study, they have utilized the air mode to confine the optical field into photonic crystal (PhC) air holes, and have confirmed this by the three-dimensional finite-difference time-domain simulation. PhCRR structure has been employed to enhance the light-matter interaction by combining the whispering-gallery mode resonance of ring resonator with the slow-light effect in PhC waveguide. They have reported that in the simulated and measured transmission spectra of air-mode PhCRR, nonuniform in free spectral ranges (FSRs) are observed near the Brillouin zone edge of PhC, which indicates the presence of the slow-light effect. Also, they have experimentally obtained a maximum group index of 27.3, and a highest quality factor of 14600 near the band edge. It has been emphasized that benefiting from the strong optical confinement in the PhC holes and enhanced light-matter interaction in the resonator, the demonstrated air-mode PhCRR is expected to have potential applications in refractive index sensing, on-chip light emitting, and nonlinear optics by integration with functional materials, which shows their utility in research work. The proposed air-mode PhCRR, the geometrical parameters of the PhCRR structure, and the simulated resonant spectrum of the PhCRR

by 3D FDTD (9), have been reproduced in Fig.5 below:

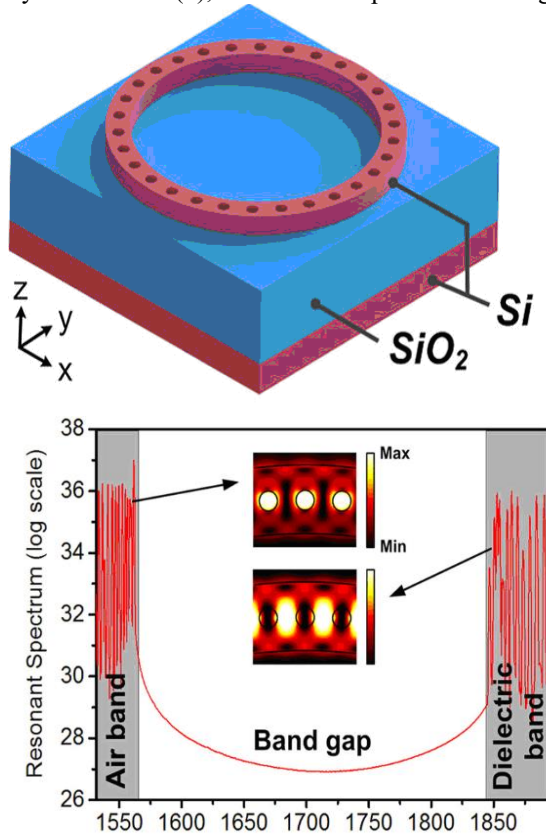


FIGURE 5. (Top) Proposed air-mode PhCRR; (Middle) Geometrical parameters of the PhCRR structure; and (Bottom) Simulated resonant spectrum of the PhCRR by 3D FDTD. Figure modified from the figure courtesy Gao et al Scientific Reports 6 (2016), Article number: 19999.

The simulated resonant spectrum of the air-mode PhCRR shows that (i) in 3D FDTD simulation, a TE-like polarized light excited by a dipole source in the ring resonator propagates through the PhCRR and then is monitored on the other side; and (ii) wavelength ranging from 1563 to 1845 nm corresponds to the photonic bandgap (PBG) region. It can also be noticed that (i) the resonant peaks on two sides of the PBG region are located in the air band and dielectric band, respectively; and (ii) close to the Brillouin zone edge, the resonant modes in the two bands both exhibit nonuniform free spectral ranges, indicating the presence of the slow-light effect. From the simulated band-edge resonant mode profiles shown in the insets, it can be seen that the optical field of the dielectric-band resonant mode is mainly localized in the dielectric region, while that of the air-band resonant mode has a good field overlapping with the PhC air holes. Faraon et al (10) have observed that Semiconductor quantum dots integrated in nano-cavities exhibit atom-like properties that can make them useful for the design of functional quantum information networks. Their Quantum network on a PC chip has been shown below:

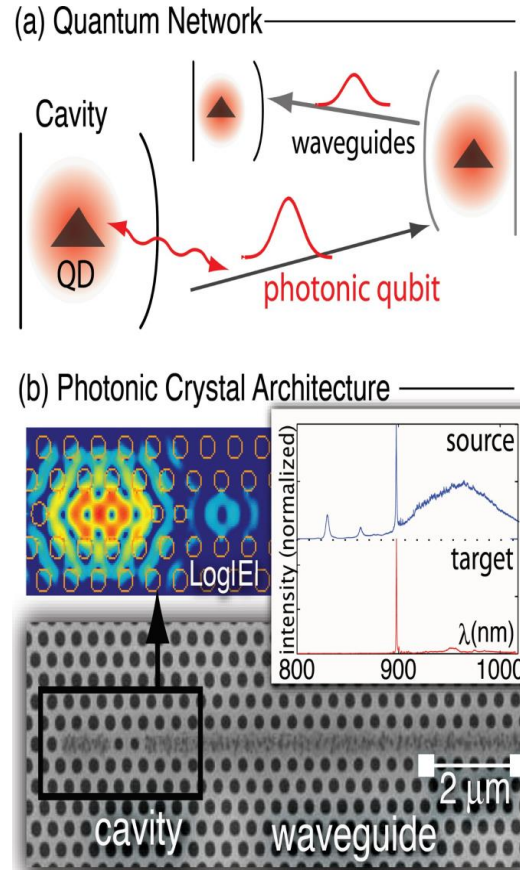


FIGURE 6. Quantum network on a PC chip. (a) Cavity-coupled quantum dots (QD) exchange qubits via waveguides. (b) Scanning electron micrograph of a PC structure combining cavities and waveguides. Insets: Electric field intensity and measured spectral filtering of cavity-waveguide-cavity structure. Figure courtesy Faraon Andrei, Englund Dirk, Fushman Ilya, and Vuckovic Jelena, Quantum information processing on photonic crystal chips, Conference on Quantum Optics, OSA Technical Digest (CD) (Optica Publishing Group, 2007), paper CMH3,15 April 2008.

IV. IMPORTANT EXPERIMENTAL BREAKTHROUGHS AND CONCLUDING REMARKS

An ultra-compact active hybrid plasmonic ring resonator has recently drawn interest for research work and device applications. Xiang et al (11) have designed an ultra-compact active hybrid plasmonic ring resonator for lasing applications at deep sub-wavelength scale, and have emphasized that the combined contributions of hybrid plasmonic mode, circular-shaped cross section of nanowire, and ring resonator structure with round-trip whispering-gallery cavity, result in reduced metallic absorption loss, tight mode confinement, and enhanced cavity feedback, and hence achieving high quality factor, small mode volume, high Purcell factor, low threshold gain, and ultra-small footprint with sub-micron size. Their results on the dependence of the Q factor and the mode volume (μm^3) on the gap height for both HP and PH modes at a resonance in the lasing wavelength band have been reproduced below:

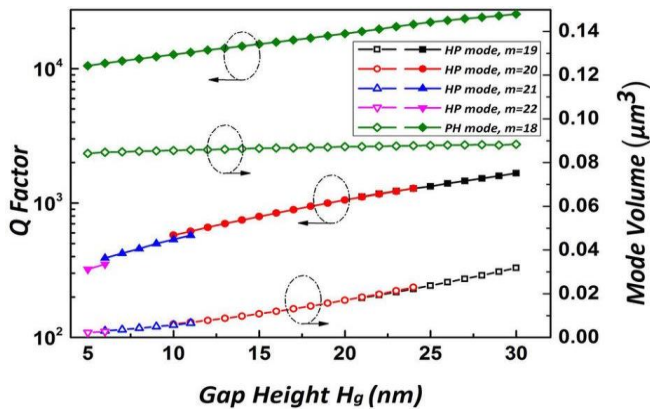


FIGURE7. Q factor and the mode volume (μm^3) for both HP and PH modes at a resonance in the lasing wavelength band 100 nm, = 800 nm). Figure courtesy Xiang et al Scientific Reports 4 (2014), Article number: 3720.

This figure clearly shows the dependence of the new factor and the mode volume (μm^3) on the gap height for both HP and PH modes at a resonance in the lasing wavelength band 100 nm to 800 nm). It is seen that with an increase of gap height from 5 to 30 nm, the factor increases from 300 to 1650 for the HP mode, due to less mode energy distributed in the silver substrate and the resultant low absorption loss. In case of the PH mode also, the factor increases as the gap height increases. Xiang et al. (11) have explained this phenomenon as: When the nanowire is lifted away from the metal substrate, less mode energy leaks into the metal substrate, which results in the reduction in the total loss of the resonator and the increase in the factor. Further, since the HP mode is tightly confined in the small gap region, the mode volume can be ultra-small (~ 0.0022) at sub-wavelength scale under a small a gap height of 5. The results show that (i) the mode volume changes from 0.0022 to 0.0318 as the gap height increases from 5 to 30 nm; and (ii) the mode volume of the PH mode, remains almost unchanged ($0.0842\text{--}0.0884\ \mu\text{m}^3$), showing larger mode volume compared to the HP mode and less dependency of mode volume of the PH mode on the gap layer.

The importance of the photonic nanocavities has led to many recent experimental studies on the subject. Yaseen et al (12) have numerically and experimentally investigated the lateral coupling between photonic crystal (PhC) nanobeam (NB) cavities, pursuing high sensitivity and figure of merit (FOM) label-free biosensor. They have numerically carried out 3D finite-difference time-domain (3D-FDTD) and the finite element method (FEM) simulations, and have shown that when two PhC NB cavities separated by a small gap are evanescently coupled, the variation in the gap width significantly changes the coupling efficiency between the two coupled NB cavities, and the resulting resonant frequencies split. Also, they have fabricated laterally-coupled PhC NB cavities using (InGaAsP) layer on the InP substrate, and have shown that the laterally coupled PhC NB cavities sensor exhibits higher sensitivity than the single PhC NB cavity, which has been explained as due to the strong evanescent coupling between nearby PhC NB cavities, as it

depends on the gap width, and is attributed to the large confinement of the electromagnetic field in the gap (air or liquid). In fact, the lateral coupling leads to the existence of both even (symmetric) and odd (asymmetric) modes. It has been shown that the even modes are more sensitive than odd modes. Therefore, the fabricated PhC NB cavity has been characterized and examined as a label-free biosensor, which is observed to exhibit high figure of merit due to its high -factor. This in fact, illustrates a potentially useful method for optical sensing at nanoscale.

Nakamura et al. (13) have presented a useful method for improving the quality factors of two-dimensional photonic crystal nanocavities using a three-dimensional finite-difference time domain calculation. It has been discussed that the leaky area for a high- nanocavity mode is visualized in a real cavity structure by extracting the leaky components within a light cone in momentum space and by transferring them back into real space using an inverse Fourier transformation. It has been emphasized that the factor is remarkably improved by appropriately shifting the positions of air holes at the leaky area. Nakamura et al. (13) have designed three-missing-air-hole and zero-cell-defect nanocavities with factors of 5,000,000 and 1,700,000, respectively, and also have demonstrated their performance. Ee et al. (14) have discussed that though the surface plasmon polariton modes often excited in metallic nanocavities enable the miniaturization of photonic devices, even beyond the diffraction limit, yet their severe optical losses deteriorate device performance; and have proposed a design of metallic nanorod cavities coupled to plasmonic crystals with the aim of reducing the radiation loss of surface plasmon modes. They have suggested that (i) the periodic Ag disks placed on an insulator-metal substrate open a substantial amount of plasmonic band gaps (e.g., $\sim 290\text{nm}$ at $\sim 1550\text{nm}$) by modifying their diameter and thickness; (ii) when an Ag nanorod with a length of $\sim 400\text{nm}$ is surrounded by the periodic Ag disks, its -factor increases up to 127, yielding a 16-fold enhancement compared with a bare Ag nanorod, while its mode volume can be as small; and (iii) Ag nanorods with gradually increasing lengths exhibit high -factor plasmonic modes that are tunable within the plasmonic bandgap. It has been emphasized that these numerical studies on low-radiation-loss plasmonic modes excited in metallic nanocavities are expected to promote the development of ultra small plasmonic devices.

Maeno et al. (15) have experimentally studied the photonic crystal L3 nanocavities whose design factors have been improved with the visualization of leaky components design method. It has been reported that the experimental values (Q_{exp}) are monotonically increased from 6,000 to 2,100,000 by iteratively modifying the positions of some of the air holes, as determined by the referred design method. In addition, the tolerance to imperfections in the fabricated samples has been investigated, which shows that the cavities improved by the visualization method tend to lose some tolerance to structural differences between the fabricated samples and the design values. These results are of tremendous importance in the research work using such nanocavities.

Another important study has been reported for the case of the high-quality Lithium niobate (LN) photonic crystal nanocavities. Liang et al. (16) have discussed that the Lithium niobate exhibits unique material characteristics, which have been found to be very useful indeed for many important applications. It has been explained that the scaling of LN devices down to a nanoscopic scale dramatically enhances the light-matter interaction, which in fact enables the nonlinear and quantum photonic functionalities, that is not possible by the conventional means. However, it is quite difficult to develop the LN-based nanophotonic devices, and so far, in spite of significant efforts made for the purpose; the researchers have met with only limited success, since the LN photonic crystal structures developed till recently had only low quality (Q). Liang et al. (16) have demonstrated LN photonic crystal nanobeam resonators with optical as high as 105105, which is more than two orders of magnitude higher than other LN photonic crystal nanocavities reported earlier. It has been emphasized that the high optical, together with tight mode confinement, leads to an extremely strong nonlinear photorefractive effect, with a resonance tuning rate of ~ 0.64 GHz/aJ or equivalently ~ 84 MHz/photon, which is three orders of magnitude greater than other LN resonators. Interestingly, Liang et al. (16) have made the observation of an intriguing quenching of photo refraction, which has in fact been reported for the first time. An important conclusion of the study is that the demonstration of high- LN photonic crystal nanoresonators paves a crucial step toward LN nanophotonic, that could integrate the outstanding material properties with versatile nanoscale device engineering for diverse and intriguing functionalities; which will be extremely useful in future research and novel applications. Jannesari et al. (17) have presented a design for a high factor photonic crystal ring resonator (PCRR), based on 2D pillar type photonic crystals, which consist of a hexagonal array of silicon rods. The cavity has been created by removing elements from the regular PhC grid. It has been emphasized that the advantage of this PCRR is that it is possible to achieve strong confinement of light intensity in the low index region (filled with the gaseous analyte), and hence the interaction of light and analyte, which can be a liquid or a gas, is enhanced, due to the high quality factor of the cavity ($=1.2 \times 10^4$), along with strong overlap between the field of the resonant mode and the analyte, as well as the low group velocity of PCRR modes. It has been suggested that an enhancement factor of 1.149×10^5 compared to the bulk light absorption in a homogenous material provides the potential for highly sensitive gas detection with a photonic crystal ring. Witmer et al (18) have discussed that (i) the future quantum networks, in which superconducting quantum processors are connected via optical links will require microwave-to-optical photon converters that preserve entanglement; and (ii) a doubly-resonant electro-optic modulator (EOM) is a promising platform to realize this conversion. Witmer et al (15) have presented their progress towards building such a modulator by demonstrating the optically-resonant half of the device, and have demonstrated high quality (Q) factor ring, disk and photonic crystal resonators using a hybrid silicon-on-lithium-niobate material system. It has been stated that the Optical factors up to 730,000 have been achieved,

corresponding to propagation loss of 0.8 dB/cm. Witmer et al (18) have also used the electro-optic effect to modulate the resonance frequency of a photonic crystal cavity, which is able to achieve electro-optic modulation coefficient between 1 and 2pm/V. It has been emphasized that in addition to quantum technology, these results are expected to be useful both in traditional silicon photonics applications and in high-sensitivity acousto-optic devices.

Lee et al. (19) have studied Deterministic coupling of delta-doped NV centers to a nanobeam photonic crystal cavity. As emphasized by them, the negatively charged nitrogen vacancy center (NV) in diamond has generated significant interest as a platform for quantum information processing and sensing in the solid state. Since, for most applications, high quality optical cavities are required to enhance the NV zero-phonon line (ZPL) emission. An outstanding challenge in maximizing the degree of NV-cavity coupling is the deterministic placement of NVs within the cavity, they have reported photonic crystal nanobeam cavities coupled to NVs incorporated by a delta-doping technique that allows nanometer-scale vertical positioning of the emitters. In addition, they have demonstrated cavities with Q up to $\sim 24\,000$ and mode volume $V \sim 0.47(\lambda/n)^3$ as well as resonant enhancement of the ZPL of an NV ensemble with Purcell factor of ~ 20 . They have claimed that their fabrication technique provides a first step towards deterministic NV-cavity coupling using spatial control of the emitters. The Resonant enhancement and lifetime reduction of NV ZPL. (a) A two-dimensional intensity plot (log scale) of the PL spectrum at different cavity tuning steps has been reproduced below:

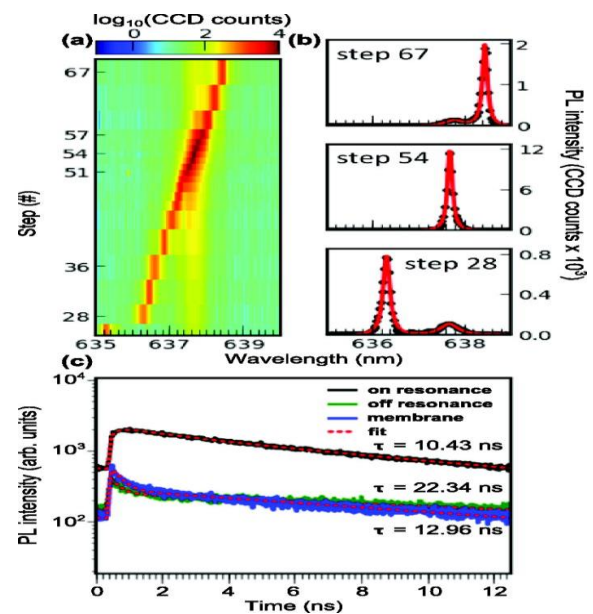


FIGURE 8. Resonant enhancement and lifetime reduction of NV ZPL. (a) A two-dimensional intensity plot (log scale) of the measurements e PL spectrum at different cavity tuning steps. (b) PL spectrum when the cavity mode is off-resonance, on-resonance, and then off-resonance. The cavity mode starts at a wavelength shorter than the NV ZPL (step 28).

The intensity of the NV ZPL is enhanced by ~ 40 times when the cavity mode is tuned on resonance. The NV ZPL intensity then decreases as the cavity mode is tuned off-resonance. (c) Lifetime of NV centers are performed when the cavity mode is off resonance (green curve), and on resonance (black curve). NV lifetime is also measured from an un-patterned membrane (blue curve). Lifetime reduction is observed when the NV center is on-resonance with the cavity mode. The lifetime curves are best fit with a double exponential decay (red dotted curve). Figure courtesy Lee Jonathan C, Bracher David, Cui Shanying, McLellan ClaireA., Zhang Xingyu, Andrich Paolo; Alemán Benjamin, Russell Kasey J., Magyar Igor Aharonovich, Bleszynski JayichAnia, Awschalom David, Hu Evelyn L, and Ohno Kenichi, Deterministic coupling of delta-doped NV centers to a nanobeam photonic crystal cavity, *Appl. Phys. Lett.* **105**, 261101 (2014) <https://doi.org/10.1063/1.4904909>.

As in case of Optical technology, which has seen a revival from the previous decade, in terms of innovations and research, especially relating to optical integrated circuits, Photonic Crystals (PCs) are one of the main contenders for the purpose. Therefore, the research work of Rehman et al. (20) implicates different arrangements of the 3-Dimensional PC units based on the employment of a varying radius PC-cavity and its position i.e., at the beginning and within the middle of the PC-lattice. Researchers have recently focused on studying the effects of these PC-cavities, investigating higher shifting in resonant wavelength, a narrower line width around $0.0061 \mu\text{m}$ and a quality factor of 99.59, comprising of a PC-cavity of radius $0.300 \mu\text{m}$ using input signal only i.e., coupled into the optical structure using the phenomenon of the Guided-mode-resonances (GMR). They have computed the structures by using an open-source FDTD platform, employing a stripe-model-based structure utilizing the Periodic Boundary Condition to save time and computational resources and later the PML for the realization of the Finite models. Most importantly, they have demonstrated the concluded structures based on the position of the PC-cavity, for the design of the all-optical-amplification device, executing a control signal reporting an 8% of the amplification in the output of the input signal. This result is of tremendous utility in the research and development work regarding Photonic crystals. Their results of arrangements based on the sum of the PC-units have been reproduced below:

A comparative study of the photonic crystals-based cavities and usage in all-optical-amplification phenomenon, *Photonics and Nanostructures Fundamentals and Applications*, Volume 61, September 2024, 101298, Ali et al. (21) have Illustrated the potential of the novel concepts by fabricating nanostructures that are impossible to make with any other known method: waveguide-coupled high-Q silicon photonic cavities that confine telecom photons to 2 nm air gaps with an aspect ratio of 100, corresponding to mode volumes more than 100 times below the diffraction limit. Scanning transmission electron microscopy measurements confirm the ability to build devices with sub-nanometre dimensions. Our work constitutes the first steps towards a

new generation of fabrication technology that combines the atomic dimensions enabled by self-assembly with the scalability of planar semiconductors.

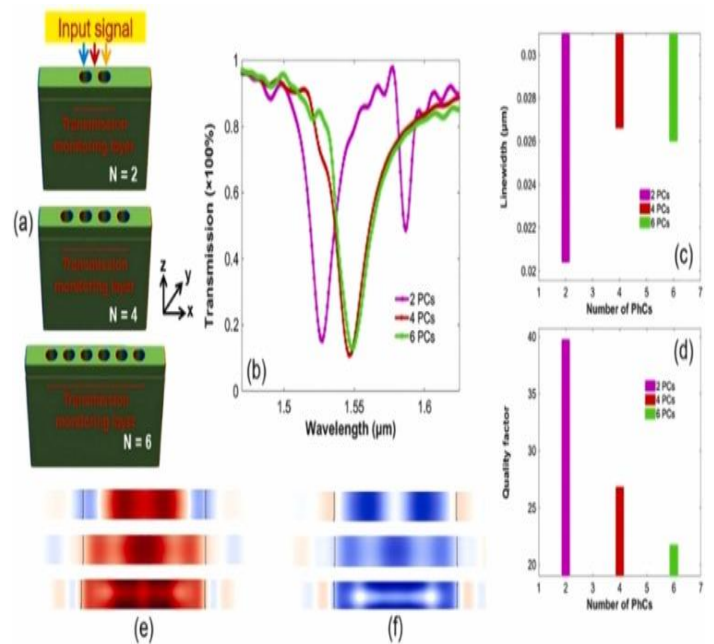


FIGURE 9. (a) Arrangements based on the sum of the PC-units i.e., 2, 4 and 6 (b) Output transmission spectra of the structures comprising of 2, 4 and 6 PC-units (c) Linewidth of the 2, 4 and 6 PC-units (d) Quality factor-based on the sum of the PC-units i.e., 2, 4 and 6 (e) Electric field confinement by 2, 4 and 6 PC-units (f) Magnetic field onfinement by 2, 4 and 6 PC-units, respectively. Figure courtesy Rehman Atiqur, Khan Yousuf, Ahmad Umair, Muhammad Irfan, Muhammad Rizwan Amirzada, and Muhammad Ali Butt,

A comparative study of the photonic crystals-based cavities and usage in all-optical-amplification phenomenon, *Photonics and Nanostructures Fundamentals and Applications*, Volume 61, September 2024, 101298, Ali et al. (21) have Illustrated the potential of the novel concepts by fabricating nanostructures that are impossible to make with any other known method: waveguide-coupled high-Q silicon photonic cavities that confine telecom photons to 2 nm air gaps with an aspect ratio of 100, corresponding to mode volumes more than 100 times below the diffraction limit. Scanning transmission electron microscopy measurements confirm the ability to build devices with sub-nanometre dimensions. Our work constitutes the first steps towards a new generation of fabrication technology that combines the atomic dimensions enabled by self-assembly with the scalability of planar semiconductors.

Maine et al. (22) have discussed in detail Optically triggered Q-switched photonic crystal laser. The results of Photonic crystal cavity modes and simulated Qs, as given in the literature have been reproduced below:

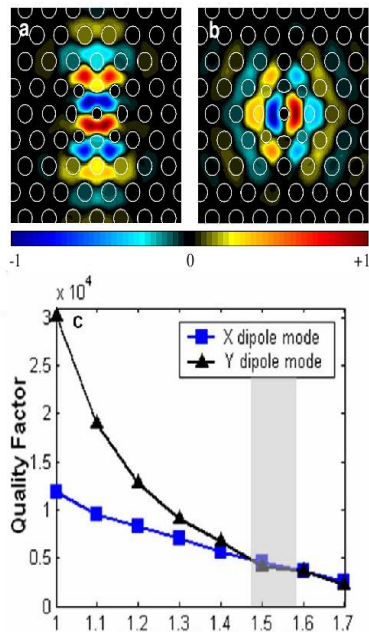


FIGURE 10. Photonic crystal cavity modes and simulated Qs. Finite-difference time-domain simulation of Z component of magnetic field for a, X-polarized and b, Y-polarized modes c, Simulated Q for X and Y-polarized cavity modes as a function of the ambient refractive index. Although the X-polarized mode has a Q significantly below that of the Y-polarized mode in air, both possess comparable Qs above 4000 even at an ambient refractive index of $n \sim 1.5$. Shaded region denotes ambient refractive index accessible by the infiltrated LC. Figure modified from the Figure courtesy researchgate.net.

13th International Conference (23) on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics, Paris, France was held recently, where the novel concepts and applications of nanomaterials were discussed. The fields of Metamaterials (engineered materials that have properties not found in naturally occurring materials, "meta" in Greek meaning "beyond") and Plasmonics. Nanophotonics (optical interactions with nanostructures and nanomaterials) have opened new opportunities for controlling electromagnetic waves in the sub-wavelength regime. Study and application of these interactions involve various scientific disciplines, i.e. engineering, physics, chemistry, material science, biology, medicine, information technology, energy, and communications. 14th International Conference (24) on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics was held in Toyama, Japan. Another International Conference (25) on Nanoscience, Nanotechnology and Advanced Materials (IC2NM-2024) is going to be held in Brisbane, Australia. Thus, it can be concluded that the subject of nanotechnology is evolving very rapidly for novel applications and research work.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to Dr. Nand Kishore Garg, Founder 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 authors are thankful to Dr. M. L. Goyal, Vice Chairman (Academic) and Dr. Satvir Singh Deswal, Dean (Academic) for encouragement. The authors are also thankful to the listed researchers and agencies for providing the images.

REFERENCES

- [1] Ryu, H.-Y., Notomi, M. and Lee, Y.-H., *High-quality-factor and small-mode-volume hexapole modes in photonic-crystal-slab nanocavities*, Appl. Phys. Lett. **83**, 4294 (2003).
- [2] Akahane, Y., Asano, T., Song, B.-S. and Noda, S., *Fine-tuned high-Q photonic-crystal nanocavity*, Optics Express **13**, 1202-1214 (2005), <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.001202>.
- [3] Asano, T., Ochi, Y., Takahashi, Y., Kishimoto Katsuhiko, and Noda Susumu, *Photonic crystal nanocavity with a Q factor exceeding eleven million*, Optics Express **25**, 1769-1777 (2017), <https://doi.org/10.1364/OE.25.001769>.
- [4] Altug, H. and Vuckovic, J., *Two-dimensional coupled photonic crystal resonator arrays*, Appl. Phys. Lett. **84**, 161-163 (2004).
- [5] Fleischer, J. W., Segev, M., Efremidis, N. K. and Christodoulides, D. N., *Observation of two-dimensional discrete solitons in optically induced nonlinear photonic lattices*, Nature (London) **422**, 147-150 (2003).
- [6] Christodoulides, D. N. and Efremidis, N. K., *Discrete temporal solitons along a chain of nonlinear coupled microcavities embedded in photonic crystals*, Opt. Lett. **2**, 568-570 (2002).
- [7] Yariv, A., Xu, Y., Lee, R. K. and Scherer, A., *Coupled-resonator optical waveguide: a proposal and analysis*, Optics Lett. **24**, 711 (1999).
- [8] Dai, B., *Manipulating Light with Photonic Crystal*, May 21, 2008; (Submitted as coursework for Applied Physics **273**, Stanford University, Spring, 2007); <http://large.stanford.edu/courses/2007/ap273/dai1/>.
- [9] Gao, G., Zhang, Y., Zhang, H., Wang, Y., Huang, Q. and Xia, J., *Air-mode photonic crystal ring resonator on silicon-on-insulator*, Scientific Reports **6**, 19999 (2016).
- [10] Faraon, A., Englund, D., Fushman, I. and Vuckovic, J., *Quantum information processing on photonic crystal chips*, Conference on Coherence and Quantum Optics, OSA Technical Digest (CD) (Optica Publishing Group, 2007), paper CMH3, 15 April (2008).
- [11] Xiang, Ch., Chan, Ch.-K., and Wang, J., *Proposal and numerical study of ultra-compact active hybrid plasmonic resonator for sub-wavelength lasing applications*, Scientific Reports **4**, 3720 (2014).
- [12] Yaseen, M. T., Yang, Y.-Ch., Shih, M.-H. and Chang, Y.-Ch., *Optimization of High-Q Coupled Nanobeam Cavity for Label-Free Sensing*, Sensors **15**, 25868-25881 (2015).

- [13] Nakamura, T., Takahashi, Y., Tanaka, Y., Asano, T. and Noda, S., *Improvement in the quality factors for photonic crystal nanocavities via visualization of the leaky components*, Optics Express **24**, 9541-9549 (2016).
- [14] Ee, H.-S., Park, H.-G. and Kim, S.-K., *Design of high-Q-factor metallic nanocavities using plasmonic bandgaps*, Applied Optics **55**, 1029-1033 (2016).
- [15] Maeno, K., Takahashi, Y., Nakamura, T., Asano, T. and Noda, S., *Analysis of high-Q photonic crystal L3 nanocavities designed by visualization of the leaky components* Optics Express **25**, 367-376 (2017).
- [16] Liang, H., L., R., He, Y., Jiang, H. and Lin, Q., *High-quality lithium niobate photonic crystal nanocavities*, Optica **4**, 1251-1258 (2017).
- [17] Jannesari, R., Grille, T. and Jakoby, B., *Gas sensing with a high-quality-factor photonic crystal ring resonator*, *Proceedings Volume 10242*, Integrated Optics: Physics and Simulations III; 1024205 (2017); Event: SPIE Optics + Optoelectronics, 2017.
- [18] Witmer, J. D., Valery, J. A., Arrangoiz-Arriola, P., Sarabalis, Ch. J., Hill, J. T. and Safavi-Naeini, A. H., *High-Q photonic resonators and electro-optic coupling using silicon-on-lithium-niobate*, Scientific Reports **PMC5390248**; Sci Rep. **7**, 46313 (2017).
- [19] Lee, J. C, Bracher, D., Cui, Sh., McLellan, C. A., Zhang, X., Andrich, P., Alemán, B., Russell, K. J., Magyar, I., Aharonovich, B. J., Awschalom, D., Hu, E., L. and Ohno, K., *Deterministic coupling of delta-doped NV centers to a nanobeam photonic crystal cavity*, Appl. Phys. Lett. **105**, 261101 (2014) <https://doi.org/10.1063/1.4904909>.
- [20] Rehman, A., Khan, Y., Ahmad, U., Muhammad, I., Muhammad, R. A. and Muhammad, A. B., *A comparative study of the photonic crystals-based cavities and usage in all-optical-amplification phenomenon*, Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications **61**, 101298 (2024).
- [21] Ali, N. B., Thor, A. S. W., Konstantinos, T., Shima, K., Guillermo, A. , Babak, V. L. and Søren, S., *Self-assembled photonic cavities with atomic-scale confinement*, Nature **624**, 57–63 (2023).
- [22] Maune, B., Witzens, J., Baehr-Jones, T., Kolodrubetz, M., *Optically triggered Q-switched photonic crystal laser*, Optics Express **13**, 4699-707 (2015), DOI:10.1364/OPEX.13.004699.
- [23] META 2023, *13th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics*, Paris, France, July 18 – 21, 2023. META 2023.
- [24] *14th International Conference on Metamaterials, Photonic Crystals and Plasmonics*, Toyama, Japan, July 16 – 19 (2024).
- [25] *International Conference on Nanoscience, Nanotechnology and Advanced Materials (IC2NM-2024)*, 8th Oct 2024 Brisbane, Australia (2024).

Elementos de reflexión para el desarrollo de la semiótica en la física, a partir de la semiótica en las matemáticas y del lenguaje. Parte I



Rubén Sánchez Sánchez

Centro de Investigación en Ciencia Avanzada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Legaria. Calzada Legaria No. 694, Colonia Irrigación, Alcaldía Miguel Hidalgo, C.P. 11500. Ciudad de México, México

ISSN 1870-9095

E-mail: rsanchezs@ipn.mx

(Recibido el 2 de abril del 2025, aceptado el 5 de mayo del 2025)

Resumen

En este estudio se repasan los conceptos fundamentales de la semiótica aplicados a la lingüística y a las matemáticas, el análisis de las propiedades de la semiótica y el uso que se hace desde la perspectiva del aprendizaje de los conceptos abstractos de las matemáticas y del lenguaje en general, nos sirven de ejemplo y modelo para proyectarlo en su uso de su aplicación en el campo del conocimiento de los fenómenos naturales y de la física. Se pretende abordar un esquema general para una programación de su aplicación dentro de las actividades didácticas del aprendizaje, con el objetivo de mejorar la comprensión tanto de los conceptos abstractos de la física como lo son por ejemplo, fuerza, campo, curvatura espacio-temporal, etcétera. Y también lograr comprender como se relacionan estas cantidades o conceptos físicos en las ecuaciones matemáticas que sintetizan de manera correcta y exacta el funcionamiento de la naturaleza. Esta habilidad será fundamental para la formación en física, tanto de ingenieros aplicados como de científicos que estudien e investiguen los nuevos temas de la física clásica, moderna y contemporánea.

Palabras clave: Semiótica, semiosis, física, matemáticas.

Abstract

This study reviews fundamental semiotics concepts applied to linguistics and mathematics, analyzing their properties and uses in learning abstract mathematical and linguistic concepts, and applying then to the study of natural phenomena and physics. The aim is to develop a general scheme for programming its applications within didactic learning activities, with the aim of improving understanding of abstract physical concepts such as force, field and space-time curvature., and to understand how these quantities or physical concepts are related in the mathematical equations that accurately describe the way nature functions. This skill will be fundamental to training applied engineers and scientists in the study and investigation of new topics in classical, modern and contemporary physics.

Keywords: Semiotics, semiosis, physics, mathematics.

I. INTRODUCCIÓN

La semiótica admite varios nombres que son sinónimos entre ellos sémica, semiología, o signica [1]. La podemos identificar como una rama del conocimiento que se ocupa del origen y el uso de los signos en la sociedad, contribuyendo así a comprender mejor los sistemas de comunicación humana que comprendan palabras, sonidos, gestos, señas, imágenes, símbolos, etc. Resumiendo, podemos realizar una definición corta de la semiótica como sigue: La semiótica es la ciencia que estudia los diferentes sistemas de producción del significado [2, 3]. Véase la figura 1.

A partir de un objeto pueden generarse varios elementos que se refieren a él, a través de signos, íconos o símbolos; todos éstos elementos son objeto de estudio en la semiótica. En este escrito se busca explorar las características que tiene la semiótica, con el fin de definirla de manera precisa, y posteriormente poderla aplicar en el terreno de la educación y la emancipación del conocimiento.

Sobre el significado del término semiótica: El estudio científico de la semiótica nos permite entender la dinámica humana de la comunicación, y cómo su empleo puede transformar nuestra realidad y cómo podemos obtener de ella, varios frutos para mejorar nuestras vidas.

Otro término que conviene aclarar es “semiosis” el cual, se refiere al mecanismo a través del cual se crea un significado, utilizando el “signo”.

El término o palabra semiótica es un vocablo que proviene del griego “semenion” que significa “signo”, y fue acuñado por el filósofo inglés John Locke.

Sin embargo, la disciplina tiene antecedentes muy antiguos en la tradición filosófica occidental, con aportes de Platón, Aristóteles y otros pensadores. La semiótica fue formalmente desarrollada como disciplina científica por Ferdinand de Saussure y por Charles Peirce en el siglo XIX, el último de los cuales la definió como la doctrina formal de los signos.

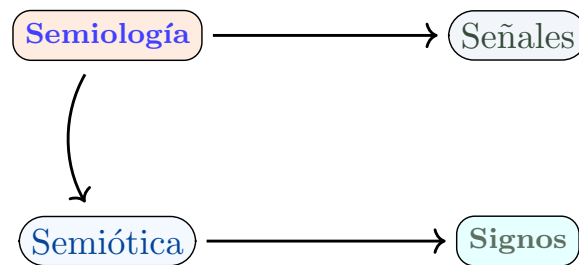


FIGURA 1. Semiótica y semiología. La semiótica es la parte de la semiología que estudia la comunicación en sistemas cerrados, mientras la semiología estudia todos los medios de comunicación en sistemas más amplios y abiertos. Las señales funcionan en sistemas abiertos, mientras los signos juegan un papel en convenciones de sistemas abiertos.

II. REPRESENTACIONES DE UN CONCEPTO

Según Saussure se tienen los elementos de significante y significado. Una forma de representar esto, es mediante un ejemplo sencillo. Por ejemplo, si podemos tener diferentes

signos, para un mismo concepto, entonces podemos tener un solo significado con varios signos, lo cual lo podemos ilustrar con el número ocho, expresado en escritura maya, romana, árabe y con figuras [4, 5, 6, 7].

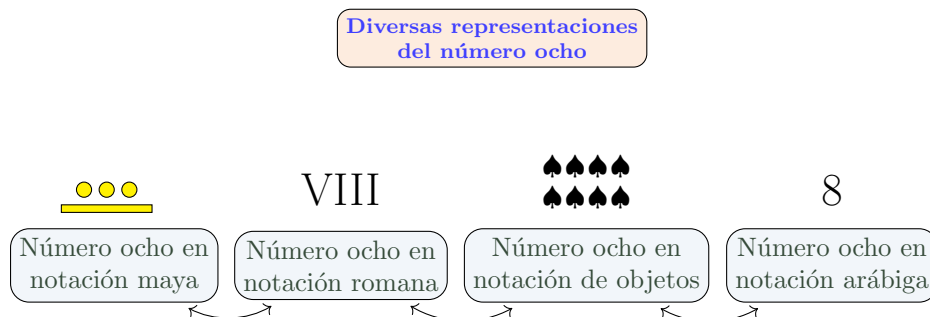


FIGURA 2. Semiótica y semiología. La semiótica es la parte de la semiología que estudia la comunicación en sistemas cerrados, mientras la semiología estudia todos los medios de comunicación en sistemas más amplios y abiertos. Las señales funcionan en sistemas abiertos.

III. ALGUNAS CARACTERÍSTICAS DE LA SEMIÓTICA

La semiótica actualmente se considera ser una ciencia independiente que se ocupa de proveer herramientas para poder criticar o analizar a otros rubros de la Ciencia que empleen símbolos en su quehacer. Las aplicaciones de la semiótica abarca campos tan extensos como la comunicación oral, visual, o escrita.

Los símbolos son útiles en todos los ámbitos de nuestra sociedad, y en particular en el ejemplo de los iconos, pueden dar un efecto de reafirmación o de promoción de un producto, una institución o una comunidad.

Un ejemplo de la aplicación de la semiótica en los campos de la comunicación visual, puede ser el diseño de logotipos empresariales. Por ejemplo, podemos mencionar el logotipo de la Universidad Autónoma de México (UNAM, por sus siglas en español), o el logotipo de peligro biológico, que mostramos en la figura 3.

Los símbolos son de vital importancia ya que comunican ideas sencillas o complejas de forma rápida y eficiente, y son

útiles como herramientas de pensamiento y del procesamiento de la información, son además una base cultural y de desarrollo del pensamiento y del conocimiento humano. Los símbolos transmiten información, facilitan la comprensión y también hacen perceptibles las ideas tanto concretas como abstractas.

Símbolo para representar el riesgo biológico



FIGURA 3. Ejemplo del símbolo universal para la representación de riesgo biológico. Mostrando la utilidad de los signos y el entorno abierto y amplio que tienen los símbolos en nuestras sociedades.

También los símbolos juegan un papel necesario en la navegación marítima, y el transporte terrestre. Son un

instrumento que ayuda a mantener una buena regulación social. Ayudan y son herramientas para el pensamiento, al cual pueden dirigir y por medio de estos hallar una conclusión o una solución a un problema, y siempre y durante el pensamiento, lo dirigen y son auxiliares de él, para que éste no pierda el rumbo.

Por ejemplo, en matemáticas nos ayudan a presentar una idea con precisión y nos ayudan en el desarrollo de una consecuencia lógica. En física, son indispensables para el planteamiento del problema y su solución a través de todo el aparato matemático, que puede también involucrar el uso de ecuaciones diferenciales, y otros recursos simbólicos.

IV. DESARROLLO INICIAL DE LA SEMIÓTICA

En los siguientes párrafos vamos a mostrar el desarrollo de la semiótica, que han hecho varios autores famosos como Piaget, Peirce y Saussure.

Charles Sanders Peirce es el padre de la semiótica que es la teoría filosófica del significado y la representación. Todo en cuanto existe, posee un significado y por lo tanto es un signo que puede ser representado y mediante esta representación puede conducir a la mente humano a un nuevo pensamiento que puede, en ciertas condiciones construir un nuevo conocimiento [8].

Piaget hablaba acerca de las representaciones mentales, que cada persona genera acerca del medio donde vive, y las interpreta adueñándose de ella, para un futuro uso como conocimiento adquirido. De ahí se habla de una estructura cognitiva interna ya instalada en las personas.

Según Saussure dentro de la semiótica y en el estudio del signo hay que distinguir entre dos elementos que conviven en él, estos son el “significante” y el “significado”, hay que mencionar que Saussure es uno de los estudiosos de la semiótica y su papel dentro del sistema lingüístico del ser humano, según el mismo autor [9] hay varios objetivos lingüísticos que conviene recalcar:

- Explicar el desarrollo histórico de las lenguas.
- Hallar las leyes generales que preceden a los fenómenos particulares.
- Darse a entender y definir la Ciencia.

Con Saussure la lengua pasa a ser el espectro social del habla individual y es la capacidad de expresar sentimientos, pensamientos, ideas y opiniones de las personas. Los signos son el vehículo que utiliza la lengua para poder transmitir estas ideas a través del tiempo, haciendo las narrativas más perdurables, siempre y cuando, las transcripciones y/o duplicados se realicen con cuidado y fidelidad.

Peirce introdujo el concepto de pragmática semiótica, desde el cual puede verse uno de los primeros esfuerzos por llevar al ámbito educativo los conceptos y principios que se manejan en la semiótica, para practicarlas en el aula. También y gracias a él se estableció lo que se conoce en semiótica como el triángulo donde está la llamada triada del signo, que puede verse como una mejora de la dualidad presentada por Saussure y establecida por el significante y el significado.

V. LA SEMIÓTICA EN LA EDUCACIÓN

La semiótica en la educación tiene un papel relevante, pues podemos revisar la idea de que en la educación se procesa la información se señala en varios ámbitos. Por ejemplo, se fundamenta en la teoría del procesamiento de la información (o también conocida como cognitivismo), donde se tiene por sentado que los estudiantes construyen su propio conocimiento. Todo esto va encaminado a desarrollar más herramientas educativas de apoyo, como, por ejemplo, el desarrollo de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), que faciliten el proceso de enseñanza-aprendizaje en los estudiantes. El que en la educación se maneja el procesamiento de la información [10, 11] y esto está dentro del corazón de la semiótica, es por eso que es importante entenderla y tratar de averiguar cómo afecta este conocimiento al proceso formativo de las personas, y es importante entonces proponer metodologías y estrategias didácticas que tengan en cuenta el manejo de los signos, y la forma de aprovecharlos para que el estudiante, los use como un medio y un recurso, para procesar la información y aprender nuevos conceptos. La semiótica entonces tiene un papel fundamental en la formación de las estructuras cognitivas del pensamiento [12].

La semiótica trata la interacción que se tiene entre el mundo físico, y la persona vista como el agente que efectúa el proceso cognitivo, y que por tanto requiere el apoyo necesario, por parte de su comunidad o de otra persona, para facilitar esta interacción, y mejorar la asimilación y la comprensión de nuevos conceptos, que le ayuden en la toma personal de decisiones en la vida real.

El docente será el agente mediador que traduce y ayuda a interpretar la información, para que el estudiante adquiera la comprensión de los objetos y las situaciones del mundo físico. Esto refuerza el pensamiento, el razonamiento y la crítica constructiva, sobre el comportamiento conductual, pasivo y conductista tradicional.

La semiótica así debe de darnos un marco teórico y metodológico para entender y mejorar el proceso educativo del estudiante, y en particular, a nosotros nos interesa hallar las mejoras en el aprendizaje de la física.

De esta forma, este escrito puede ser tomado como una parte introductoria para comprender la importancia de la semiótica en la enseñanza en general, y en particular en la enseñanza de la física.

VI. CONCLUSIONES

En el presente escrito introducimos nociones fundamentales de lo que es la semiótica, y cuál es su papel en el ámbito educativo. Por eso es importante estudiar a fondo este tema, para poder proponer cómo estos fundamentos pueden aplicarse en la educación, y en particular cómo puede ayudarnos a comprender la forma de que el fenómeno de la asimilación de nuevos conocimientos puede manejarse y mejorar, entendiéndolo como un proceso cognitivo, que necesita apoyarse, tanto de la teoría como de la práctica, proponiendo nuevas estrategias y tácticas educativas, para mejorar el proceso de enseñanza y aprendizaje de los

estudiantes, visualizándolo desde el punto de vista semiótico. En una segunda parte de este estudio, trataremos de abordar este problema y propondremos una aproximación teórica, que contemple los elementos esenciales de la semiótica y como se pueden organizar, en la búsqueda de nuevas metodologías didácticas que apoyen el proceso educativo, y en particular el proceso educativo de la física, tomando en cuenta los avances ya hechos en el aprendizaje de las matemáticas, y en particular tomando las aproximaciones hechas por Duval en esta área del conocimiento humano.

AGRADECIMIENTOS

El autor quiere agradecer el apoyo recibido en la elaboración de este artículo a la SECIHTI por el proyecto IH-2025-I-125, titulado “Aprendizaje basado en Proyectos y Problemas en la enseñanza de la Física”, y al Instituto Politécnico Nacional por el apoyo recibido con el proyecto SIP 20253853 titulado “Representaciones semióticas y su efecto en el aprendizaje de la ley de Ohm mediante el aula invertida”.

REFERENCIAS

- [1] Duval, R. & Vega Restrepo, M. B. *Semiosis y pensamiento humano: Registros semióticos y aprendizajes intelectuales*. (Colección Ciencias Sociales, Programa Editorial, 2da. Edición, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2017).
- [2] Espanhol EAD. *Semiología, Semiótica y Signo Lingüístico*. [Video de 2015]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=BS_C-11bHCQ>, consultado el 2 de abril de 2025.
- [3] Veliz, C., *Semiología – Clase 01*. [Video de 2020]. Youtube,

- <<https://www.youtube.com/watch?v=yiSdD0mDEh8>>, consultado el 1 de abril de 2025.
- [4] Seral, M. (2025). *Números Mayas: El Sistema de Numeración Maya – Simboloteca*. [Imagen de 2025]. Pinterest, <<https://www.simboloteca.com/sistema-numeracion-maya/>>, consultado el 20 de marzo de 2025.
- [5] Kahotong, K., *Set of arabic numbers, vector*. [Imagen del 2017]. Alamy, <<https://www.alamy.com/stock-image-set-of-arabic-numbers-vector-163343247.html>>, consultado el 29 de marzo de 2025.
- [6] Muriel, T., *Números Romanos*. [Página informativa de 2025]. Diccionario de Dudas, <<https://www.diccionariodedudas.com/numeros-romanos/>>, consultado el 28 de marzo de 2025.
- [7] freepik.es, *Números arábigos 7 8 9 | Vector Premium*. [Imagen s.f.]. Freepik, <https://img.freepik.com/vector-premium/numeros-arabigos-7-8-9_381648-23.jpg?w=2000>, consultado el 27 de marzo de 2025.
- [8] *Aprendemos de todo. Teoría de registros de representación semiótica de Reymond Duval - #pedagogia*. [Video de 2020]. YouTube, <<https://www.youtube.com/watch?v=txqISp04Ajl>>, consultado el 3 de abril de 2025.
- [9] Rivera Díaz, A. G., *Teoría lingüística Saussure*, de 2022, <<https://lucaedu.com/teoria-linguistica-saussure/>>, consultado el 2 de abril de 2025.
- [10] Craik, F. I. M. & Lockhart, R. S., *Levels of processing: A framework for memory research*, *Journal of Verbal Learning & Verbal Behavior*, **11**, 6, 671–84 (1972).
- [11] Rumelhart, D. E., McClelland, J. L. & PDP Research Group, *Parallel distributed processing: explorations in the microstructure of cognition* (Cambridge, Massachussets, MIT Press, 1987).
- [12] Piaget, J., *La equilibración de las estructuras cognitivas: Problema central del desarrollo* (Siglo XXI Editores, Ciudad de México, México, 1978).

The Motion of a Hoop with an Attached Mass Causes to Jump

EDVCATIO PHYSICORVM



ISSN 1870-9095

Seyedeh Zahra Hosseini, Hossein Vaseei,
Amin Reza Mahmoodi, Mahan Fallahpour

Ariaian Young Innovative Minds Institute, AYIMI, Tehran, Iran, <http://www.ayimi.org>.

E-mail: zhrahosseiniiii@gmail.com

(Received 11 February 2025, accepted 23 May 2025)

Abstract

This study investigates the phenomenon of a hoop with an attached mass exhibiting a jumping motion when rolling with sufficient angular momentum. It is explained by the interplay of angular momentum, gravitational force, and the rotational dynamics of the system. Key parameters influencing this behavior include the mass of the hoop, the attached mass, and the initial angular velocity. The study explores whether similar behavior can be reproduced with alternative unbalanced mass distributions on a wheel and discusses the implications of varying ground profiles on the jumping motion. Results show the specific dynamics depend on the distribution and magnitude of the mass. Changes in ground profile are found to alter the trajectory and characteristics of the jumping motion and highlighting the importance of environmental factors in such dynamic systems. In our study, we explored the impact of three distinct hoop materials - metal, plastic, and wood - on the dynamics of a jumping motion. Alongside material variation, we investigated the influence of hoop size and the mass attached to the hoop. Through experimental analysis, this article elucidates how these parameters shape the jumping phenomenon. By examining the experimental results, the analysis of the results presented in this study utilized COMSOL for simulation purposes, with MATLAB employed for generating phase diagrams. Additionally, TRACKER software facilitated the numerical analysis, particularly in determining the jump angle. By leveraging these tools, we were able to comprehensively examine the experimental data and draw the conclusions regarding the influence of hoop material, size variations, and attached mass on the dynamics of the jumping motion.

Keywords: Hoop, Jumping Motion, Rolling.

Resumen

Este estudio investiga el fenómeno de un aro con una masa adosada que realiza un salto al rodar con suficiente momento angular. Este fenómeno se explica por la interacción entre el momento angular, la fuerza gravitacional y la dinámica rotacional del sistema. Los parámetros clave que influyen en este comportamiento incluyen la masa del aro, la masa adosada y la velocidad angular inicial. El estudio explora si se puede reproducir un comportamiento similar con distribuciones de masa desequilibradas alternativas sobre una rueda y analiza las implicaciones de las variaciones en el perfil del terreno sobre el salto. Los resultados muestran que la dinámica específica depende de la distribución y la magnitud de la masa. Se observa que los cambios en el perfil del terreno alteran la trayectoria y las características del salto, lo que subraya la importancia de los factores ambientales en este tipo de sistemas dinámicos. En nuestro estudio, exploramos el impacto de tres materiales distintos para el aro (metal, plástico y madera) en la dinámica del salto. Además de la variación del material, investigamos la influencia del tamaño del aro y la masa adosada. Mediante análisis experimental, este artículo explica cómo estos parámetros dan forma al fenómeno del salto. Para el análisis de los resultados experimentales presentados en este estudio, se utilizó COMSOL para la simulación y MATLAB para la generación de diagramas de fase. Además, el software TRACKER facilitó el análisis numérico, especialmente para determinar el ángulo de salto. Gracias a estas herramientas, pudimos examinar exhaustivamente los datos experimentales y extraer conclusiones sobre la influencia del material del aro, las variaciones de tamaño y la masa añadida en la dinámica del salto.

Palabras clave: Aro, Salto, Rodadura.

I. INTRODUCTION

For a while now, reports and observations of hopping hoops have been made. The phenomena that happens when a hoop jumps while rolling in a vertical plane by carrying a heavy object fixed to the rim is explained for the first time in this work (Fig. 1).



FIGURE 1. Schematic observation of jumping motion.

Originally described in "A Mathematician's Miscellany" by Littlewood [1] in 1953, the hypothetical problem of a rigid,

massless hoop filled with a particle that rolls without slipping can be used as an engaging issue in the classroom for planar motion of rigid bodies.

Tokieda [2] revived the problem by basing his analysis on the geometric features of the motion.

Littlewood and Tokieda both come to the same conclusion—that once the particle is at the highest point along its cycloidal journey, the hoop will hop after rolling through 90° .

Since Tokieda's work, variations of this problem have drawn a lot of interest. Butler [3] and Theron [4] made an effort to disprove the possibility of this hop. However, as Theron and du Plessis argue in [5], the proof in both situations was predicated on false assumptions.

The genuinely singular challenge of a massless, rigid hoop loaded with a particle, which we have not been able to definitively demonstrate, does not hop when the normal reaction becomes zero.

Nevertheless, in [5], we incorporate practical friction coefficient values into the model and discover that a skimming motion, in which the massless hoop stays in contact with the surface despite the absence of any response force between the surface and the hoop, can occur after the rolling phase.

The motion of a hoop rolling in a vertical plane while carrying a heavy particle fastened to the rim is covered in Theron's study [6]. The hoop is not rigid, as was previously determined; instead, the elasticity of the system yields findings consistent with earlier reports of hula-hoop hopping.

The primary outcome of this investigation is the determination of the prerequisites needed for hopping to happen following a rotation of less than 90° , beginning with the particle at its highest position.

This work is an effort to use ring elasticity to explain this observed occurrence. We analyze a very basic elastic model in which, among other things, we assume that the moment of inertia is invariant to ring deformation. Even with its simplicity, this methodology produces useful outcomes.

Also, after examining the theory of this phenomenon and performing calculations to find the maximum height, we will examine the results of the tests performed in different conditions.

II. THEORETICAL FRAMEWORK

The first theory that we will investigate here is the T.F. Tokieda's theory [2] for a weightless hoop with a point mass applied to it, which it is, said that it should be placed near the position of unstable equilibrium (Fig.2).

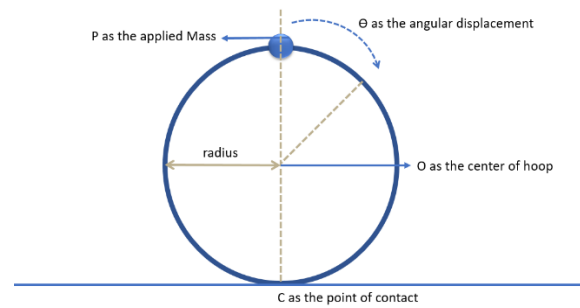


FIGURE 2. Schematic view of the hoop.

It can be said that the best way to prove the hoop indeed hops is to calculate the force that the hoop exerts against the floor at the point of contact, and to check that it changes to negative after the hoop has rolled $\pi/2$. But unfortunately it hardly explains “why the hoop should even hop?” although by the following description it is possible to see the different forces applied to the system (Fig. 3).

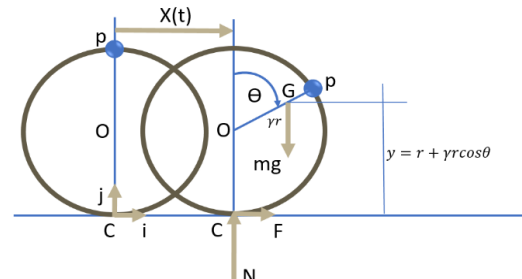


FIGURE 3. Forces applied to the system.

The following theory is based on the fact that the weight of the hoop is equal to zero in comparison with the point mass added to the hoop (it is not actually a weightless hoop but in comparison with the point mass it is negligible).

As the hoop will rotate down if we follow a line from the point mass on the position of unstable equilibrium it becomes a line coming down and it will stop on the ground and it will go up again (Fig. 4).



FIGURE 4. COMSOL simulation of the jumping hoop.

By this description we can say that there are to conflicted shapes, for sure there is a cycloid which form by following the point mass on the hoop, but also we are neglecting mass of the hoop so technically because the hoop is massless and a single point mass will form a parabola while hitting the ground, this means both shapes should be investigated to see in which parts of both graphs they will be aligned.

The Motion of a Hoop with an Attached Mass Causes to Jump
gravitational acceleration and R the radius of the hoop as it is shown at (1), the conservation of theory dictates.

$$\frac{m}{2} \left[(R\dot{\theta} + R\cos\theta.\dot{\theta})^2 + (-R\sin\theta.\dot{\theta})^2 \right] + mg(R + R\cos\theta) = \frac{m}{2} v_0^2 + mg2R$$

$$\dot{\theta}^2 = \frac{4gR\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) + v_0^2}{4R^2\cos^2\left(\frac{\theta}{2}\right)}, \quad \dot{y} = -R\sin\theta.\dot{\theta}$$

$$= -\sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \sqrt{4gR\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) + v_0^2}$$

Therefore, m pulls the hoop up, thereby making it hop, as soon as the second derivative of the parabola exceeds that of the cycloid; the hop occurs at minimal θ with

$$\ddot{y} = -2g\sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right) - \frac{v_0^2}{4R},$$

$$1) -g \geq \ddot{y}(\theta(t))$$

$$2) \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \geq 1/\sqrt{2}\left(1 - \frac{v_0^2}{4gR}\right)^{1/2}$$

Especially for initial velocity being equal to zero the hoop hops at θ being equal to $\pi/2$.

By the information given in the theory it is possible to obtain the following diagrams from the simulation which is simulated by this theory (Figs. 7-10).

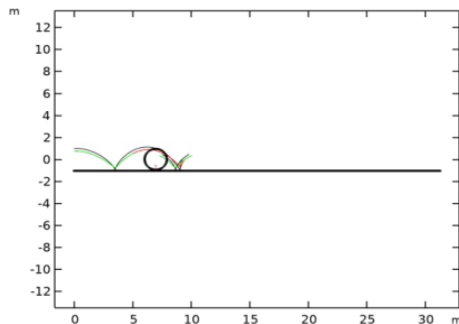


FIGURE 5. Displacement (mbd).

The moment that parabola is outside the cycloid is when the rolling motion will turn into a hopping motion (Fig. 6).

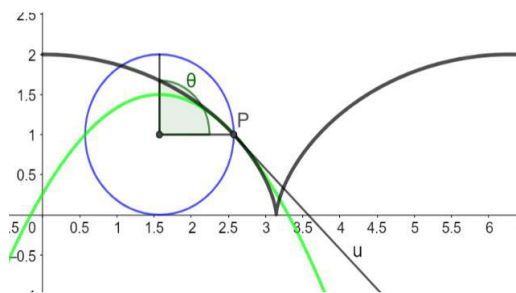


FIGURE 6. Jumping occurs while parabola is outside of the cycloid.

Now based on the T.F Tokieda Theory that represents:

$$\frac{m}{2} (\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + mgy = \frac{m}{2} v_0^2 + mg2R$$

Along the cycloid:

$$x(t) = R\theta(t) + R\sin\theta(t)$$

$$y(t) = R + R\cos\theta(t)$$

- 1) M (point mass) presses the hoop down as long as the imagined parabola at p departs below the cycloid
- 2) M pulls the hoop up, and the hoop hops, as soon as the imagined parabola at p departs above the cycloid.

By construction the parabola and the cycloid have the same zeroth, therefore departure below or above will be decided by an inequality between their second derivatives. If we shove the point mass off the point of unstable equilibrium with initial velocity being equal to zero, with g being the

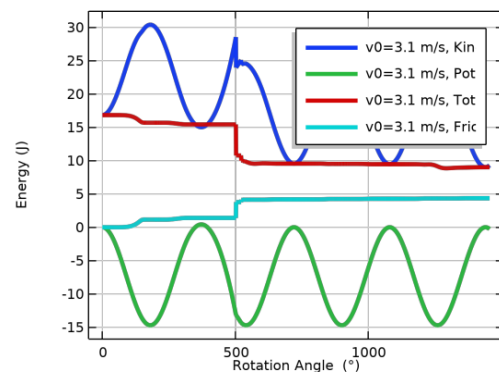


FIGURE 7. Energy vs Rotation angle diagram.

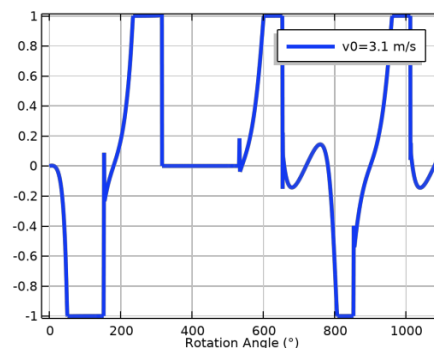


FIGURE 8. Velocity vs Rotation angle diagram.

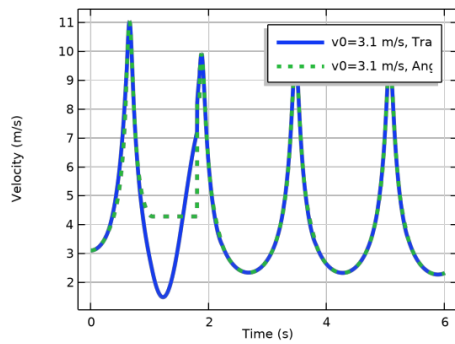


FIGURE9. Velocity vs Time diagram.

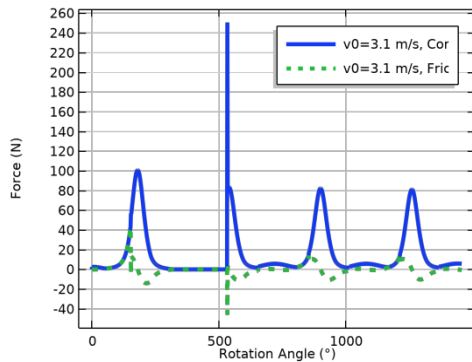


FIGURE10. Force vs Rotation angle diagram.

These graphs for force dependent and velocity dependent diagrams were investigated using simulation of a hopping hoop by COMSOL.

Also, we can express the potential energy that the potential energy of the system is only affected by the vertical position of the point mass, and can be written as:

$$W_p = \gamma mgR(\cos(\theta) - 1)$$

that when the point mass reaches its upper position, the potential energy becomes zero. Kinetic energy can be written as follows after some algebra which includes the location and speed of the center of gravity:

$$W_k = mR^2(1 + \gamma \cos(\theta))\dot{\theta}^2$$

Given the expressions for both types of energy, the principle of conservation of energy can be used to arrive at a closed expression for the angular velocity as a function of the angle of rotation:

$$W_k + W_p = const = W_k|_{\theta=0}$$

Inserting the kinetic and potential energy expressions, we get:

$$mR^2(1 + \gamma \cos(\theta))\dot{\theta}^2 = -\gamma mgR(\cos(\theta) - 1) + mv_0^2(1 + \gamma)$$

Thus

$$\dot{\theta} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{\gamma gR(1 - \cos(\theta)) + v_0^2(1 + \gamma)}{1 + \gamma \cos(\theta)}}$$

When

$$\theta = \pi$$

then:

$$\dot{\theta}_{max} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{2\gamma gR + v_0^2(1 + \gamma)}{1 - \gamma}}$$

What happens as γ approaches 1 (the main problem with just a point mass). The maximum angular velocity approaches infinity! It looks non-physical [11].

III. MATERIALS AND METHODS

By using various masses we can observe the effect that different masses will have on the hop, it is said in the question that by changing the profile of the ground we might be able to see its effect on the way that the hoop will slide on the ground which will affect the hopping motion, in some investigations we can say that the point mass will lift the hoop and we will see the jumping motion also in some of the experiments we can see that the hoop will accelerate down without any jumping motion.

The experiments include the main factors to investigate how they will affect the phenomenon and what changes they cause in the size of the jumping motion.

The experimental setup includes hoops with different internal and external diameter to investigate how the diameter of the hoop will affect the phenomenon, 3 types of material for the hoop which covers a wooden, iron and plastic material for the hoop, with different point masses applied to the system with 50,100,150,200 and 250 gram mass (Fig. 11).



FIGURE 11. Different Point mass applied to the system.

IV. RESULTS AND DISCUSSION

Sliding the hoop with zero initial velocity so we can have a comparison between the theoretical result and experimental result, we can obtain the main graph which is the size of the hop while attaching different point mass to the hoop, this experiment is investigated for 3 materials of the hoop and hoops with external diameter being equal to 30 cm, 45 and 55 cm (Figs.12a,b , c and d).

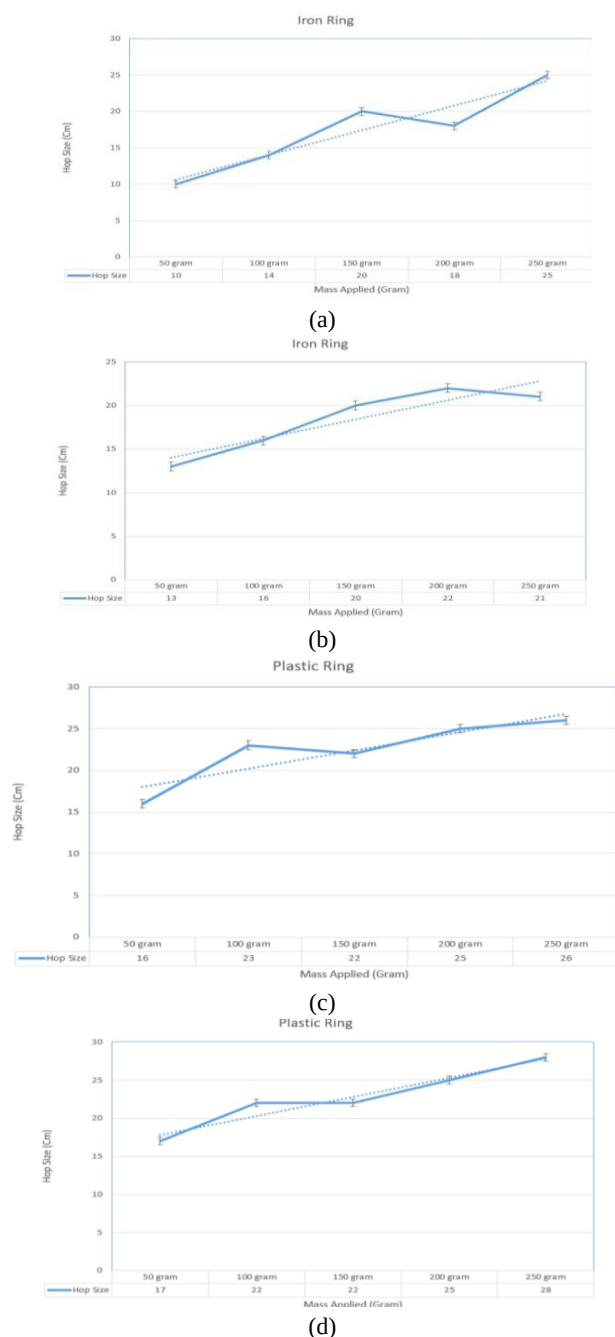


FIGURE 12. Size of the hop vs Point mass in different rings, (a) and (b) in Iron ring, (c) and (d) in Plastic ring.

The graph represents the change in size of the hop by adding different point mass to the metal hoop which we can observe there is an almost ascending line that proves the metal hoop will hop more if we add a greater mass (250 gram). The hoop itself weighs 56 grams using the hoop with 0 cm external diameter (Fig.12a) and 77 grams using the hoop with 45 cm external diameter (Fig.12b) which both are clearly not weightless but low weighted in comparison with the point mass.

The same experiment is investigated for plastic hoops with the same external diameters being equal to 30,45 (Fig.12c and d) and 55 cm, which the same ascending trend can be seen by applying a range of point mass from 50 to 250

The Motion of a Hoop with an Attached Mass Causes to Jump grams to the plastic hoop and the size of the hop will increase by increasing the mass.

Therefore, by a comparison between theory and experiment it is possible to say that the experiment confirms the theory which represents that the jumping motion occurs in $\pi/2$ and by the experiment we were able to estimate the size of the hop that happens in $\pi/2$ using tracker by tracking the trace of point mass and measure the distance between the ground and the hoop while it hops (Fig.13).

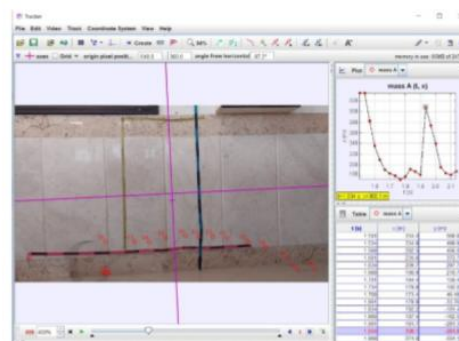


FIGURE 13. To estimate the size of the hopping by Tracker.

V. CONCLUSIONS

Theory and experiment in comparison proves that there is a direct relation between the point mass and the size of the hop, although comparing wooden, iron and plastic hoop we can observe that the data proves that the size of the jump in plastic hoop is more than both iron and wooden hoop which it is possible to confirm it by the main theory which is the hoop being weightless in comparison with the point mass and knowing that the plastic hoop with the same external diameter and width, weights lower than wooden and iron hoop means the theory can be more accurate for a hoop with a lower weight. (although the hopping happens in all three different materials we used in the experiment).

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to express our sincere gratitude to Ariain Young Innovative Minds Institute for giving the opportunity to participate in IPT 2024 and guiding us to publish this article in this journal.

REFERENCES

- [1] Littlewood, J. E., *Littlewood's Miscellany*, Edited by B. Bolobas, p. 37, (Cambridge University Press, USA, 1986).
- [2] Tokieda, T. F., *The hopping hoop*, Am. Math. Monthly **104**, 152-153 (1997).
- [3] Butler, J. P., *Hopping hoops don't hop*, Am. Math. Monthly **106**, 565-568 (1999).
- [4] Theron, W. F. D. and du Plessis, N. M., *The hopping hoop*

revisited, Departmental Report TW98/1, Department of Applied Mathematics, University of Stellenbosch, Stellenbosch, November (1998).

[5] Theron, W. F. D. and du Plessis, N. M., *The dynamics of a massless hoop*, Am. J. Phys. **69**, 354-359 (2001).

[6] Theron, W. F. D., *The Dynamics of an Elastic Hopping Hoop*, Mathematical and Computer Modelling **35**, 1135-1147 (2002).

[7] Pritchett, T., *The hopping hoop revisited*, Am. Math. Monthly **106**, 609-617 (1999).

[8] Theron, W. F. D., *The rolling motion of an eccentrically loaded wheel*, Am. J. Phys. **68**, 812-820 (2000).

[9] Mackenzie, D., *Fred Almgren (1933-1997)*, Notices of the Am. Math. Society **44**, 1102-1106 (1997).

[10] Fairclough, T. J., *The great weighted wheel*, Mathematics Today (August), 107-113 (2000).

[11] <https://www.comsol.com/blogs/the-physics-of-a-hoppinghoop/>

The Enigma of the Chirping Echo: Unveiling the Acoustics of Chichen Itza's Pyramid



Amin Reza Mahmoodi, Seyedeh Zahra Hosseini, Mahan Fallahpour

Ariaian Young Innovative Minds Institute, AYIMI, Tehran, Iran, <http://www.ayimi.org>

E-mail: mahmoodiaminreza@gmail.com

ISSN 1870-9095

(Received 11 February 2025, accepted 29 May 2025)

Abstract

In this research the intriguing phenomenon of the "chirping echo" produced by the Great Pyramid of Chichen Itza, is investigated. When a clap resonates against the structure's steps, a sound akin to a quetzal bird's call emerges. By meticulous diffraction simulations, the research tackles the question of how the architectural design of the pyramid shapes the echo into a series of chirps. The repetitive pitch phenomenon analysis reveals a critical finding: the frequency of the returning sound is independent of the initial clap and instead, it is entirely due to the intricate geometric configuration of the pyramid itself. Two prominent models are used to explain this fascinating acoustic interaction: the Lubman torsional scattering model and the Declercq diffraction model. The Lubman model depicts the clap-echo process as a linear system that remains constant over time. However, its results indicate a dependence of the echo on the random spectrum of the initial sound, which contradicts the observed independence of frequency from the source. In contrast, the Declercq diffraction model offers a more compelling explanation. It assumes that the tiered steps of the pyramid act as a diffraction grating, selectively scattering the sound waves generated by the clap. This selective scattering, based on the wavelength of the sound, leads to a specific pattern of echoes arriving at the listener's ears at slightly different intervals. The human brain perceives these rapid, periodic variations in arrival time as a change in pitch, creating the characteristic chirping effect. Examining and comparing these models by meticulous simulations result in a more comprehensive understanding of the acoustic marvels embedded within the architecture of Chichen Itza. This research not only contributes to the field of acoustic engineering but also offers valuable insights into the potential role the acoustic considerations may have played in the design and construction of this ancient Mayan monument.

Keywords: Massive Pyramid, Sound, Acoustic Marvel, Echo.

Resumen

En esta investigación se estudia el intrigante fenómeno del "eco chirriante" producido por la Gran Pirámide de Chichén Itzá. Cuando una palmada resuena contra los escalones de la estructura, emerge un sonido similar al canto de un quetzal. Mediante meticulosas simulaciones de difracción, la investigación aborda la cuestión de cómo el diseño arquitectónico de la pirámide da forma al eco, convirtiéndolo en una serie de chirridos. El análisis del fenómeno de tono repetitivo revela un hallazgo crucial: la frecuencia del sonido reflejado es independiente de la palmada inicial y, en cambio, se debe enteramente a la intrincada configuración geométrica de la propia pirámide. Se utilizan dos modelos destacados para explicar esta fascinante interacción acústica: el modelo de dispersión torsional de Lubman y el modelo de difracción de Declercq. El modelo de Lubman describe el proceso palmada-eco como un sistema lineal que permanece constante en el tiempo. Sin embargo, sus resultados indican una dependencia del eco con respecto al espectro aleatorio del sonido inicial, lo que contradice la independencia observada de la frecuencia con respecto a la fuente. En contraste, el modelo de difracción de Declercq ofrece una explicación más convincente. Este modelo supone que los escalones de la pirámide actúan como una rejilla de difracción, dispersando selectivamente las ondas sonoras generadas por el aplauso. Esta dispersión selectiva, basada en la longitud de onda del sonido, produce un patrón específico de ecos que llegan a los oídos del oyente a intervalos ligeramente diferentes. El cerebro humano percibe estas variaciones rápidas y periódicas en el tiempo de llegada como un cambio de tono, creando el característico efecto de chirrido. El análisis y la comparación de estos modelos mediante simulaciones meticulosas permiten una comprensión más completa de las maravillas acústicas inherentes a la arquitectura de Chichén Itzá. Esta investigación no solo contribuye al campo de la ingeniería acústica, sino que también ofrece información valiosa sobre el posible papel que las consideraciones acústicas pudieron haber desempeñado en el diseño y la construcción de este antiguo monumento maya.

Palabras clave: Pirámide masiva, Sonido, Maravilla acústica, Eco.

I. INTRODUCTION

A. Overview of the Chirping Echo Phenomenon

The Great Pyramid of Chichen Itza holds an acoustic marvel – the "chirping echo." This intriguing phenomenon occurs when a clap or similar sharp sound resonates against the

pyramid's steps. Instead of a typical echo, a series of chirps emerges, reminiscent of a quetzal bird's call.

This unique echo piqued the interest of researchers who sought to understand how the pyramid's design shapes the sound. Through meticulous simulations involving diffraction, they discovered a fascinating revelation: the chirping effect is

not influenced by the initial clap's pitch. Instead, it arises solely from the intricate geometric configuration of the pyramid itself.

Two prominent models attempt to explain this captivating acoustic interaction:

- **Lubman Torsional Scattering Model:** This model depicts the clap-echo process as a linear and unchanging system. However, its predictions contradict the observed phenomenon. It suggests the echo's frequency depends on the initial sound's random characteristics, which is not the case with the chirping echo.

- **Declercq Diffraction Model:** This model offers a more convincing explanation. It proposes that the tiered steps of the pyramid function as a diffraction grating. Similar to how a prism separates light; the steps selectively scatter sound waves based on their wavelength. This selective scattering leads to a specific pattern of echoes reaching the listener's ears at slightly different times.

The human brain perceives these rapid, periodic variations in arrival time as a change in pitch, resulting in the characteristic chirping effect.

By meticulously examining and comparing these models, researchers aim to gain a deeper understanding of the acoustic marvels embedded within Chichen Itza's architecture. This research not only contributes to the field of acoustic engineering but also raises intriguing questions about the potential role acoustics may have played in the design and construction of this ancient Mayan monument. The chirping echo suggests that the Maya may have possessed a sophisticated understanding of acoustics and deliberately incorporated it into their architectural masterpiece.

B. Importance of Investigating Ancient Acoustic Marvels

The chirping echo phenomenon at Chichen Itza is a prime example of why investigating ancient acoustic marvels holds significant value. Here's why:

Understanding Ancient Engineering & Design:

- Unveils the potential role acoustics played in the construction and purpose of these structures.
- Provides insights into the scientific and technological knowledge of past civilizations.
- Offers clues about how these structures were intended to be experienced – for religious ceremonies, public gatherings, or other purposes.

Advancements in Acoustic Engineering:

- Studying how ancient structures manipulate sound can inspire innovative acoustic design principles for modern architecture.
- The knowledge gained can be applied to improve sound quality in concert halls, theaters, and other public spaces.
- Understanding past techniques could lead to the development of new acoustic materials and technologies.

Historical and Cultural Significance:

- Deepens our understanding of how ancient societies interacted with their environment and the natural world.

- Sheds light on the artistic and cultural values embedded within these structures.

- Offers a more holistic perspective on the achievements and ingenuity of past civilizations.

Unlocking Secrets of the Past:

- Acoustic investigations can reveal hidden features or design aspects not readily apparent.
- They can offer clues about the construction process or intended functionality of structures.
- By analyzing acoustics, we can potentially gain new insights into the lives and practices of the people who built these monuments.

The chirping echo is just one example. Investigating acoustic marvels across various ancient cultures has the potential to broaden our understanding of the past, inspire innovation in the present, and shape the future of sound engineering.

II. THE CHIRPING ECHO: OBSERVATION AND INRIGUE

A. Description of the Acoustic Phenomenon

Here is a closer look at this captivating acoustic experience:

- **The Intriguing Sound:** When a clap or similar sharp sound resonates against the pyramid's steps, a distinct echo emerges. Unlike a typical echo, it does not simply repeat the original sound. Instead, it transforms into a sequence of rapid, high-pitched chirps.

- **The Effect on Listeners:** The chirping echo can be quite surprising and even eerie for first-time listeners. The transformation of a sharp sound into a series of chirps sparks curiosity and a desire to understand the cause behind this acoustic anomaly.

- **The Role of the Pyramid's Steps:** The tiered structure of the pyramid's steps plays a crucial role in creating the chirping effect. It is believed to act like a diffraction grating, a structure that separates light or sound waves based on their properties.

- **Unraveling the Mystery:** The exact mechanism behind the chirping echo remained a mystery for centuries. However, recent scientific research using advanced simulation techniques has shed light on the phenomenon. The chirping echo is more than just a quirky acoustic effect. It is a testament to the intricate design of the Great Pyramid and a reminder of the fascinating interplay between science and history.

B. Research Motivation

The chirping echo presents a compelling puzzle for researchers for several reasons:

- **Unexplained Anomaly:** Unlike a typical echo, the chirping effect cannot be explained by simple sound reflection. This unexplained behavior demands scientific investigation.

- **Understanding Ancient Design:** The echo's dependence on the pyramid's structure raises questions about the Maya's potential awareness of acoustics during construction. Research can provide insights into their architectural practices.

- **Bridge Between Science and History:** The chirping echo offers a unique opportunity to explore the intersection of science and history. Understanding the phenomenon sheds light on both Mayan ingenuity and the principles of acoustics.

The initial observations of the chirping echo, coupled with the scientific advancements of recent times, have fueled a quest to unravel the mystery behind this captivating acoustic phenomenon at Chichen Itza.

III. METHODOLOGY

A. Diffraction Simulations: Understanding the Echo Formation

Diffraction Explained:

Diffraction is a wave phenomenon where waves, like sound or light, bend or spread out as they encounter obstacles or pass through narrow openings. Imagine water waves spreading out after passing through a gap between rocks.

The Pyramid as a Diffraction Grating:

The tiered steps of the Great Pyramid act like a giant diffraction grating for sound waves. Similar to how a prism separates light into its constituent colors, the steps selectively scatter sound waves based on their wavelength.

Simulating the Echo:

Using sophisticated computer simulations, researchers can model the interaction between sound waves and the pyramid's steps. These simulations take into account:

- The geometry of the steps – size, spacing, and overall shape.
- The properties of sound waves – frequency (pitch) and wavelength.

By running these simulations, researchers can predict how the sound waves will interact with the steps and diffract at various angles.

Matching the Chirps:

The simulations reveal that the specific way sound waves diffract from the steps creates a pattern of echoes reaching the listener's ears at slightly different times. Our brains perceive these rapid variations in arrival time as a change in pitch, resulting in the characteristic chirping effect (Fig. 1).

The Power of Simulations:

Diffraction simulations offer a valuable tool for understanding the chirping echo because:

- They allow researchers to analyze complex interactions between sound and the pyramid's structure without physically altering the monument.
- They provide a visual representation of how sound waves diffract, aiding comprehension.

They can be used to test different hypotheses about the echo's formation.

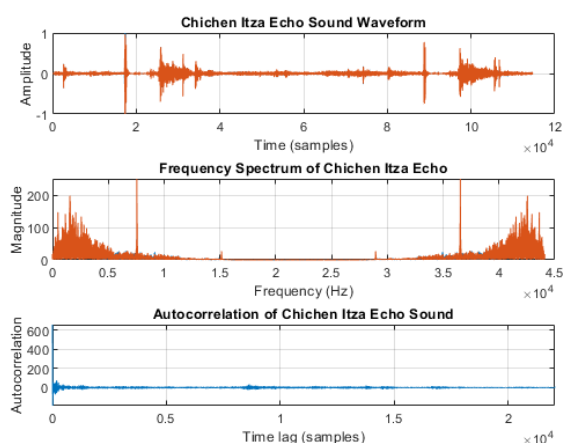


FIGURE 1. Diffraction Simulation.

IV. LUBMAN TORSIONAL SCATTERING MODEL

A. Explanation of the Model

The Lubman Torsional Scattering Model, proposed by D.M. Lubman, offers a simplified approach to explain the echo phenomenon at the Great Pyramid of Chichen Itza. Here's a breakdown of its core concept and limitations:

Core Idea:

- The model depicts the interaction between the initial sound (clap) and the resulting echo as a linear system. This means it assumes a constant and unchanging relationship between the two.

- Imagine a simple spring system – the force applied (clap) determines the force exerted back (echo) in a predictable way.

Strengths:

- **Simplicity:** The Lubman model offers a relatively easy-to-understand explanation for the echo. It doesn't require complex scientific concepts like diffraction.

Limitations:

- **Inability to Explain Key Feature:** However, the model falls short in explaining a crucial aspect of the chirping echo – its independence from the initial sound's frequency.

Here's why the Lubman model struggles:

- **Frequency Dependence:** The model predicts that the echo's frequency should depend on the random distribution of frequencies within the initial sound (clap). In simpler terms, the pitch of the echo should change depending on how "high" or "low" the initial clap sounded.

- **Reality vs. Prediction:** In reality, the chirping echo has a distinct pitch regardless of the initial sound's pitch. A high-pitched clap or a low-pitched clap will both produce the same series of chirps (Fig. 2).

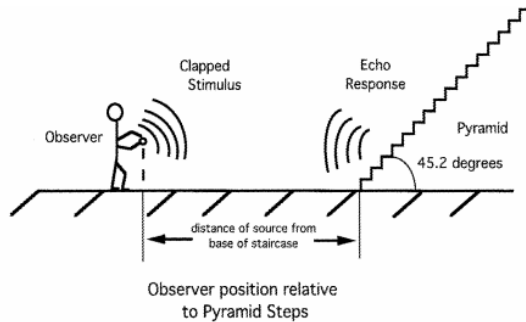


FIGURE 2. The Lubman Torsional Scattering Model.

Conclusion:

The Lubman model serves as a starting point for understanding the echo, but it's not sufficient to explain the full phenomenon, particularly the unique chirping effect. Its limitations pave the way for exploring more nuanced models, like the Declercq diffraction model, which considers the interaction between sound waves and the intricate geometry of the pyramid.

Analysis of Results and Contradictions

The Lubman Torsional Scattering Model offers a seemingly straightforward explanation for the echo at Chichen Itza. However, a closer analysis reveals contradictions between the model's predictions and the observed behavior of the chirping echo.

Recap of the Lubman Model:

- **Linear System:** The model portrays the clap-echo process as a constant, linear system. The initial sound simply determines the echo's characteristics in a predictable way.

-

Predicted Echo Behavior:

- **Frequency Dependence:** Based on this linear relationship, the Lubman model predicts that the echo's frequency should depend on the initial sound's frequency content.

- Imagine a simple echo where a high-pitched clap results in a high-pitched echo, and a low-pitched clap results in a low-pitched echo.

-

Observed Echo Behavior (Contradiction):

- **Frequency Independence:** In reality, the chirping echo exhibits the opposite behavior. Regardless of the initial sound's pitch (high or low clap), the echo consistently produces the same series of chirps with a distinct frequency.

-

Analysis of the Contradiction:

This key difference between the model's prediction and the observed echo exposes a fundamental limitation of the Lubman model. It fails to capture the crucial aspect of the chirping echo – its independence from the initial sound's frequency.

Why Does the Model Fail?

The Lubman model treats the echo phenomenon as a simple cause-and-effect relationship, neglecting the role of the pyramid's structure. It doesn't consider how sound waves

interact with the tiered steps, which is the key factor shaping the chirping effect.

Importance of the Analysis:

Analyzing the shortcomings of the Lubman model highlights the need for a more sophisticated explanation. This paved the way for exploring alternative models, like the Declercq diffraction model, which incorporates the concept of diffraction and the pyramid's geometry to provide a more accurate explanation for the captivating chirping echo phenomenon (Figs. 3, 4).

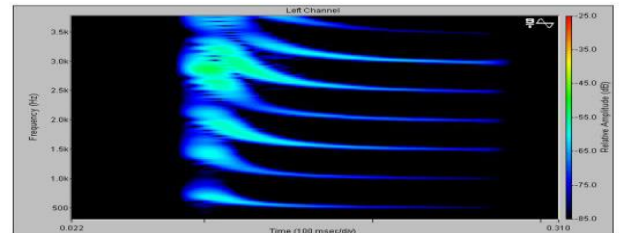


FIGURE 3. Chirped Echo simulated by convolution on a simple desktop computer.

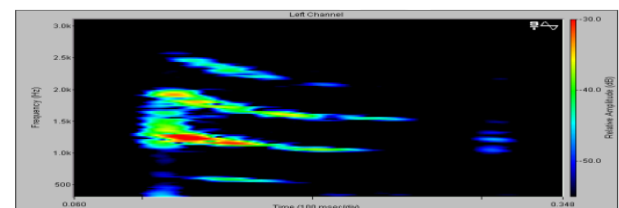


FIGURE 4. Actual Chirped echo from a handclap at the temple of Kukulkan's north stairs.

V. DECLERCQ DIFFRACTION MODEL

Conceptual Framework

The Declercq diffraction model offers a compelling framework for understanding the captivating chirping echo at the Great Pyramid of Chichen Itza. Here's a breakdown of its core concepts:

Foundation in Diffraction:

- This model leverages the well-established principle of diffraction in wave physics. Diffraction occurs when waves, like sound or light, bend or spread out as they encounter obstacles or pass through narrow openings. Imagine water waves spreading out after passing through gaps between rocks.

The Pyramid as a Diffraction Grating:

- The Declercq model proposes that the tiered steps of the pyramid act as a giant diffraction grating for sound waves. Similar to how a prism separates light based on its wavelength

(color), the steps selectively scatter sound waves with different wavelengths.

Understanding Sound Waves:

- Sound travels through air as waves with varying frequencies and wavelengths. Higher frequencies correspond to higher pitches, and vice versa.

-

Interaction with the Steps:

When a sound, like a clap, generates sound waves, they encounter the pyramid's steps. Here's what happens:

- * The sound wave reaches the steps with a range of frequencies (wavelengths).

- * Due to diffraction, each frequency (wavelength) scatters at slightly different angles based on its interaction with the step size and spacing.

Echo Formation and the Chirps:

- The diffracted sound waves travel at slightly different speeds due to their varying paths.

- These diffracted waves reach the listener's ears at slightly different times.

-

The Human Perception of Pitch:

- Our brains perceive these rapid variations in arrival time of the diffracted sound waves as a change in pitch. This is why we hear a series of chirps instead of a simple echo.

Key Strengths of the Model:

- **Frequency Independence:** Explains why the chirping echo has a distinct pitch regardless of the initial sound's frequency.

- **Role of Pyramid Geometry:** Accounts for the interaction between sound waves and the intricate structure of the steps, a crucial factor in creating the chirps.

The Declercq diffraction model provides a powerful conceptual framework for understanding the chirping echo. It highlights the interplay between sound wave properties, the pyramid's geometry, and our perception of sound, leading to this fascinating acoustic phenomenon.

How Diffraction Shapes the Chirping Echo

The Declercq diffraction model sheds light on how the phenomenon of diffraction shapes the captivating chirping echo at the Great Pyramid of Chichen Itza. Here's a closer look at this interplay:

Diffraction Explained:

Diffraction is a wave phenomenon where waves like sound or light bend or spread out as they encounter obstacles or pass through narrow openings. Imagine dropping a pebble in water and observing the waves rippling outward. When these waves encounter gaps between rocks, they diffract, bending around the edges and creating a broader wave pattern (Fig. 5).

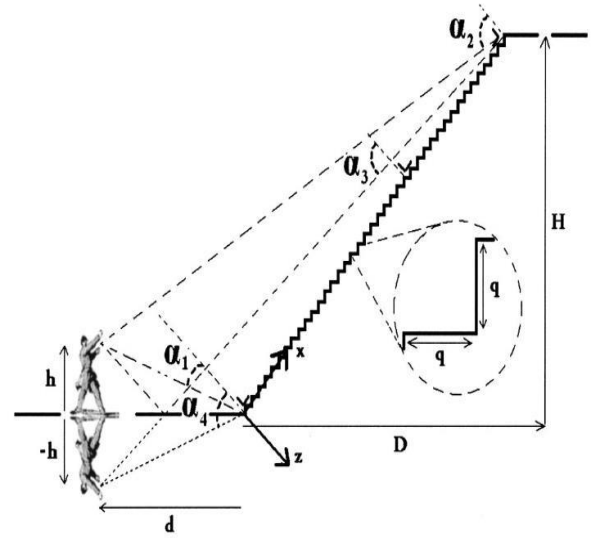


FIGURE 5. The Declercq diffraction model.

$$\alpha_1 = \arccos \frac{(\mathbf{h} + \mathbf{d}) \cdot \mathbf{e}_z}{\sqrt{h^2 + d^2}},$$

$$\alpha_2 = \arccos \frac{(\mathbf{h} + \mathbf{d}) \cdot \mathbf{e}_z}{|\mathbf{h} + \mathbf{d} - \sqrt{D^2 + H^2} \mathbf{e}_x|},$$

$$\alpha_3 = \arccos \frac{(-\mathbf{h} + \mathbf{d}) \cdot \mathbf{e}_z}{|-\mathbf{h} + \mathbf{d} - \sqrt{D^2 + H^2} \mathbf{e}_x|},$$

$$\alpha_4 = \arccos \frac{(-\mathbf{h} + \mathbf{d}) \cdot \mathbf{e}_z}{\sqrt{h^2 + d^2}},$$

$$\mathbf{K}^m = k_x^m \mathbf{e}_x + k_z^m \mathbf{e}_z,$$

with

$$k_x^m = k_x^{inc} + m \frac{2\pi}{\sqrt{2}q},$$

$$k^2 = \omega^2 / v^2,$$

The Pyramid as a Grating:

The tiered steps of the pyramid, according to the Declercq model, function as a giant diffraction grating for sound waves. Similar to how a prism separates light into its constituent colors based on their wavelengths, the steps act on sound waves with different wavelengths in specific ways.

Sound Waves and Wavelength:

Sound travels through the air as waves, and each wave has a characteristic frequency and wavelength. Frequency determines the pitch we hear – higher frequencies correspond to higher pitches and vice versa. Wavelength is the distance between two corresponding points on a wave, such as peak to peak.

Interaction with the Steps:

When a sharp sound like a clap occurs, it generates sound waves with a range of frequencies (and wavelengths). As these sound waves reach the pyramid's steps, they interact with the structure in the following way:

- Each frequency within the sound wave (with its corresponding wavelength) interacts with the steps differently due to their size and spacing.
- This interaction causes diffraction, where each frequency scatters at slightly different angles. Imagine the sound waves bending around the steps, but with some bending more than others depending on their wavelength.

Path Length Variation and Time Delays:

The diffracted waves travel slightly different paths due to their varying angles of scattering. This creates a crucial difference:

- The path lengths traveled by the diffracted waves will differ slightly. Some waves might travel a more direct path, while others might bend more and travel a longer distance.

These varying path lengths translate to slight time delays for the diffracted waves reaching the listener's ears.

Perceiving Chirps:

Our brains are adept at interpreting arrival times of sound waves. In the case of the chirping echo:

- The diffracted waves with slightly different frequencies arrive at the listener's ears at slightly different times due to their varying path lengths.
- Our brains perceive these rapid variations in arrival time as a change in pitch. This is why we hear a series of chirps instead of a simple echo.

The Declercq model highlights diffraction as a key mechanism shaping the echo. The way sound waves diffract due to the pyramid's step structure leads to these minor time delays, which our brains interpret as the characteristic chirping effect.

Supportive Evidence and Analysis

The Declercq diffraction model for the chirping echo at Chichen Itza gains support from various lines of evidence and analysis:

1. Consistency with Observed Echo Behavior:

- The model explains the **frequency independence** of the echo. Regardless of the initial sound's pitch (high or low clap), the echo consistently produces the same series of chirps. This aligns perfectly with observations of the chirping echo phenomenon.

2. Corroboration with Diffraction Principles:

- The model's foundation in established principles of diffraction adds credibility. Scientific understanding of how waves, including sound waves, diffract is well-documented and can be applied to explain the interaction between sound and the pyramid's steps.

3. Simulations and Modeling:

- Modern computer simulations can model sound wave interactions with the pyramid's geometry based on diffraction principles. These simulations can predict the

patterns of diffracted waves and their arrival times at the listener's position. Comparing these predictions with the actual chirping echo can provide further support for the model (Fig. 6).

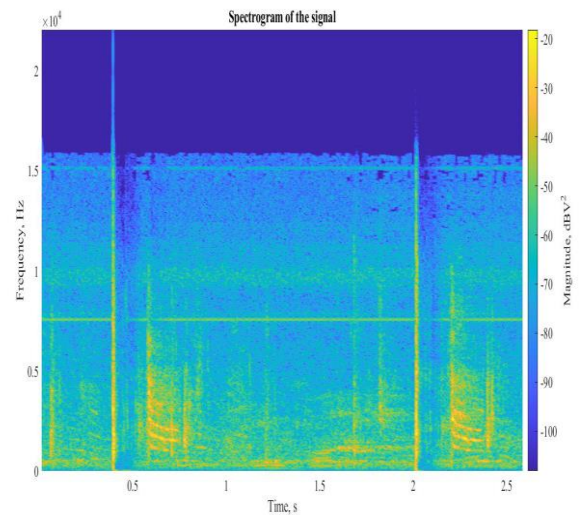


FIGURE 6. Simulations and Modeling.

VI. COMPARATIVE ANALYSIS

A. Contrasting the Two Models

The chirping echo at the Great Pyramid of Chichen Itza has sparked scientific curiosity, leading to the development of two contrasting models to explain this fascinating phenomenon. Here's a breakdown of their key differences and how they compare:

Lubman Torsional Scattering Model:

- **Core Concept:** This model depicts the echo as a linear system. The initial sound simply determines the echo's characteristics in a predictable way, like a spring pushing back with a force proportional to the applied force.

Strengths:

- Offers a relatively simple explanation.
- Easy to understand without complex scientific concepts.

Weaknesses:

- Fails to explain the **frequency independence** of the chirping echo.
- The model predicts that the echo's pitch should depend on the initial sound's frequency, which is not observed.
- Doesn't consider the role of the pyramid's structure in shaping the echo.

Declercq Diffraction Model:

- **Core Concept:** This model leverages the principle of diffraction. It proposes that the tiered steps of the pyramid act like a giant diffraction grating, selectively scattering sound waves with different wavelengths.

Strengths:

- Explains the **frequency independence** of the chirping echo.
- Accounts for the **role of the pyramid's geometry** (step size and spacing) in creating the echo effect.
- Aligns with established principles of wave physics (diffraction).
- **Weaknesses:**
 - Requires a deeper understanding of wave behavior and diffraction.
 - More complex than the Lubman model.

Comparison of Key Aspects:

Feature	Lubman Torsional Scattering Model	Declercq Diffraction Model
Core Idea	Linear system, echo depends on initial sound	Sound wave diffraction by pyramid steps
Strengths	Simple, easy to understand	Explains frequency independence, considers pyramid geometry, aligns with scientific principles
Weaknesses	Fails to explain key echo behavior (frequency independence)	More complex, requires understanding of diffraction
Role of Pyramid	Not considered	Crucial factor in echo formation

Conclusion:

The Lubman model offers a basic explanation but fails to capture the nuances of the chirping echo. The Declercq model, with its foundation in diffraction, provides a more comprehensive and scientifically sound explanation for this captivating acoustic phenomenon. By considering how sound waves interact with the intricate structure of the pyramid, the Declercq model effectively explains the frequency independence and the role of the pyramid's design in creating the characteristic chirping effect.

Why the Declercq Model Prevails

Here's why the Declercq diffraction model prevails over the Lubman torsional scattering model in explaining the chirping echo at Chichen Itza:

Explanatory Power:

- The Declercq model successfully explains the **key characteristic** of the chirping echo – its **independence from the initial sound's frequency**. Regardless of the clap's pitch, the echo consistently produces the same series of chirps. This aligns perfectly with observations.
- The Lubman model, on the other hand, predicts the echo's frequency to depend on the initial sound's frequency, which contradicts reality.

Scientific Basis:

- The Declercq model leverages well-established scientific principles of **diffraction**. Diffraction is a proven phenomenon in wave physics, explaining how waves like sound or light bend or spread out when encountering obstacles.

- The Lubman model lacks a strong scientific foundation for its linear system approach. It doesn't account for the complex interaction between sound waves and the pyramid's structure.

Alignment with Observations:

- The Declercq model predicts the **pattern of echoes** reaching the listener's ears based on the diffraction of sound waves by the steps. This aligns with the rapid variations in arrival time that our brains perceive as chirps.
- The Lubman model doesn't offer a mechanism for explaining the chirps or the role of the pyramid's geometry in shaping the echo.

Comprehensiveness:

- The Declercq model incorporates the **role of the pyramid's structure** (step size and spacing) as a crucial factor in creating the echo effect. This provides a more complete picture of the phenomenon.
- The Lubman model focuses solely on the initial sound and the resulting echo, neglecting the influence of the pyramid's design.

In conclusion, the Declercq diffraction model prevails because it offers a scientifically sound, comprehensive, and observationally consistent explanation for the captivating chirping echo at the Great Pyramid of Chichen Itza.

VII. CONCLUSION

The Great Pyramid of Chichen Itza isn't just a marvel of Mayan architecture; it's a testament to their potential understanding of acoustics. The captivating "chirping echo" phenomenon adds another layer to its historical significance.

Our exploration delved into the mystery behind the echo, examining two key models:

- **The Lubman Torsional Scattering Model:** While offering a simple explanation, it fails to capture the echo's independence from the initial sound's pitch.
- **The Declercq Diffraction Model:** This model prevails due to its strong scientific foundation in diffraction principles. It explains how the pyramid's steps act as a giant diffraction grating, shaping the echo and creating the characteristic chirps.

The implications of the chirping echo extend beyond acoustics:

- **Archaeological Insights:** It raises questions about the Maya's potential awareness of acoustics and the cultural significance they might have attributed to the echo.
- **Scientific Understanding:** The phenomenon serves as a real-world example of diffraction, deepening our understanding of sound wave behavior.
- **Cultural Significance:** Understanding the echo enriches the visitor experience at Chichen Itza and informs preservation efforts to maintain this unique aspect of the site.

The chirping echo stands as a captivating reminder that there's still much to learn about ancient civilizations. It compels us to re-evaluate historical structures and consider the possibility that acoustics played a role in their design and

cultural significance. By unraveling the mystery of the chirping echo, we gain a deeper appreciation for the ingenuity of the Maya and the fascinating interplay between science and history.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to express our sincere gratitude to Ariain Young Innovative Minds Institute for giving the opportunity to participate in IPT 2024 and guiding us to publish this article in this journal.

REFERENCES

- [1] Woodstock, Z. C. and Lubert, C. P., *Architectural acoustical oddities*, Proceedings of Meetings on Acoustics **22**, 025002 (2014).
- [2] Bilsen, F. A., Huygens on Pitch Perception; Staircase Reflections Reconsidered, Nederlands Akoestisch Genootschap **178**, 1-8 (2006). Web. 14 nov 2013.
- [3] Bilsen, F. A., *Repetition Pitch*, Frans A. Bilsen's Homepage. Frans A. Bilsen, n.d. Web. 9 Sept. 2013.
- [4] Bilsen, F. A., *Repetition Pitch Glide from the Step Pyramid at Chichen Itza*, Journal of the Acoustic Society of America **120**, 594-596 (2006).
- [5] Declercq, N. F., Briers, R., Leroy, O. and Degrieck, J., *A Theoretical Study of Special Acoustic Effects Caused by the Staircase of the El Castillo Pyramid at the Maya Ruins of ChichenItza in Mexico*, Journal of the Acoustical Society of America **116**, 3328-3335 (2004).
- [6] Lubman, D., *An Archaeological Study of Chirped Echo from the Mayan Pyramid of Kukulcan at Chichen Itza*, Acoustical Society of America. Orange County Regional Chapter of the Acoustical Society of America, 1 Feb. (1999). Web. 9 Sept. 2013.
- [7] Lubman, D., *Convolution-scattering model for staircase echoes at the temple of Kukulcan*, The Journal of the Acoustical Society of America **123** (5_Supplement), 3604 (2008). <https://doi.org/10.1121/1.2934779>
- [8] Jones, D. S., *Diffraction theory: A brief introductory review*, Optik **20**, 71-78 (1972).
- [9] Augello, M. A. & Lombardi, A., *Systems of Acoustic Resonance at Ancient Sites and Related Brain Activity: Preliminary Results of Research*. In E. Candela, J. A. Vargas, & L. M. Cámara (Eds.), Proceedings of the 20th International Congress on Sound and Vibration **4**, 2743-2749 (2018).

The Mechanical Resistance of Eggs to Crack by Tapping Together

EDVCATIO PHYSICORVM



ISSN 1870-9095

Mahan Fallahpour

*Tehran University, Ariaian Young Innovative Minds Institute, AYIMI, Tehran, Iran,
<http://www.ayimi.org>.*

E-mail: fallahpourmahan@gmail.com

(Received 11 February 2025, accepted 24 May 2025)

Abstract

This study investigates the mechanical properties of eggs with a focus on predicting their resistance to cracking under impact. We analyze both the external geometry of the eggshell and the internal viscoelastic behavior of the egg's contents to provide a comprehensive understanding of the factors influencing an egg's structural integrity. Theoretical analysis reveals that the geometric stiffness of the eggshell plays a critical role in its ability to distribute stress, with sharper ends exhibiting greater resistance to fracture due to higher curvature. Additionally, material properties such as the energy required to break atomic bonds and the Young's modulus are essential in determining the threshold stress for cracking. The internal components of the egg, specifically the egg white and yolk, were modeled as a viscoelastic system where the egg white acts as an elastic element and the yolk as a dashpot. This model suggests that the egg's interior functions as a natural shock absorber, with the position of the yolk relative to the impact site significantly influencing the egg's overall resistance to cracking. Experimental validation involved controlled impact tests, which confirmed that eggs with the yolk positioned further from the point of impact were more susceptible to fracture, consistent with theoretical predictions. The findings provide new insights into the interplay between the eggshell's geometry, material properties, and internal dynamics, offering potential applications in the design of biomimetic materials and resilient structures. This research not only enhances our understanding of egg mechanics but also contributes to broader fields such as materials science and engineering.

Keywords: Eggshell Mechanics, Geometric Stiffness, Viscoelastic Behavior, Fracture Resistance, Stress Distribution, Biomimetic Materials.

Resumen

Este estudio investiga las propiedades mecánicas de los huevos, centrándose en la predicción de su resistencia a la rotura por impacto. Se analiza tanto la geometría externa de la cáscara como el comportamiento viscoelástico interno del contenido para comprender a fondo los factores que influyen en la integridad estructural del huevo. El análisis teórico revela que la rigidez geométrica de la cáscara desempeña un papel fundamental en su capacidad para distribuir la tensión, presentando los extremos más puntiagudos una mayor resistencia a la fractura debido a su mayor curvatura. Además, las propiedades del material, como la energía necesaria para romper los enlaces atómicos y el módulo de Young, son esenciales para determinar la tensión umbral de rotura. Los componentes internos del huevo, concretamente la clara y la yema, se modelaron como un sistema viscoelástico donde la clara actúa como un elemento elástico y la yema como un amortiguador. Este modelo sugiere que el interior del huevo funciona como un amortiguador natural, y que la posición de la yema con respecto al punto de impacto influye significativamente en la resistencia general del huevo a la rotura. La validación experimental incluyó ensayos de impacto controlados, los cuales confirmaron que los huevos con la yema más alejada del punto de impacto eran más propensos a fracturarse, en consonancia con las predicciones teóricas. Los hallazgos aportan nuevos conocimientos sobre la interacción entre la geometría de la cáscara, las propiedades del material y la dinámica interna, ofreciendo aplicaciones potenciales en el diseño de materiales biomiméticos y estructuras resilientes. Esta investigación no solo amplía nuestra comprensión de la mecánica del huevo, sino que también contribuye a campos más amplios como la ciencia e ingeniería de materiales.

Palabras clave: Mecánica de la cáscara de huevo, Rigidez geométrica, Comportamiento viscoelástico, Resistencia a la fractura, Distribución de tensiones, Materiales biomiméticos.

I. INTRODUCTION

Egg tapping is a traditional game, often played during festive occasions, where two players attempt to crack each other's hard-boiled eggs by tapping them together. The objective of this game is straightforward: the player whose egg remains intact after the tapping wins, while the player whose egg

cracks is defeated. Despite the simplicity of the game, the underlying mechanics that determine the strength of an egg are complex and merit scientific investigation. This project aims to develop a non-invasive method to predict the winning egg among a given pair, leveraging the inherent properties of the egg's structure.

The egg, an essential reproductive element in many species, is a marvel of natural engineering. It comprises three main components: the eggshell, the egg white (albumen), and the egg yolk. The eggshell, primarily composed of calcium carbonate (CaCO_3), is a semi-permeable membrane that protects the egg's contents while allowing gas exchange. The egg white is a protein-rich layer that cushions the yolk, providing additional protection and nutrients. The yolk, the nutrient-dense core, contains vital proteins, lipids, and other elements necessary for embryonic development.

The eggshell itself is a key factor in determining the outcome of egg tapping. Its strength is influenced by various factors, including the thickness, uniformity, and geometric stiffness. Geometric stiffness, a concept in structural mechanics, refers to the ability of a shape to resist deformation under load. In eggs, this characteristic varies between the blunt (broader) and sharp (narrower) ends of the shell. Typically, the blunt end of the egg exhibits lower geometric stiffness due to its larger radius of curvature, making it more susceptible to cracking under pressure. Conversely, the sharper end, with its smaller radius of curvature, generally demonstrates higher geometric stiffness, allowing it to withstand greater forces without deforming.

Understanding these geometric and structural properties of the eggshell is crucial for developing a reliable non-invasive prediction method. By analyzing factors such as curvature, shell thickness, and material distribution, it is possible to estimate which egg is more likely to remain intact during a tapping contest. This investigation seeks to explore these variables and establish a scientifically sound method for predicting the winning egg without resorting to invasive techniques.

II. THEORETICAL FRAMEWORK

A. Physics of the Eggshell Surface

The eggshell is a critical component in understanding the mechanical behavior of an egg during an egg tapping contest. Composed predominantly of calcium carbonate (approximately 95%), the eggshell serves as a protective barrier for the egg's internal contents. The remaining composition includes proteins and other organic materials that contribute to the shell's structure and integrity.

A key factor in the mechanical properties of the eggshell is its **surface curvature**. The eggshell's geometry is inherently non-uniform, featuring two distinct ends: the blunt (or broader) end and the sharp (or narrower) end. This non-uniform curvature results in varying stress distributions when external forces, such as those experienced during egg tapping, are applied. The sharper end, with its smaller radius of curvature, tends to distribute stress more effectively, thus reducing the likelihood of crack initiation under impact.

The **energy required to break atomic bonds** within the eggshell is another critical consideration. The strength of the eggshell is largely dependent on the strength of the atomic bonds between calcium carbonate molecules. When an external force is applied to the shell, energy is absorbed by

these bonds, and if the energy exceeds the bond strength, the bonds break, leading to crack formation. The energy required to initiate a crack is influenced by factors such as the bond energy of the material, the presence of defects or impurities in the shell, and the overall microstructure. A higher bond energy indicates a more robust shell, less likely to fracture under impact.

Moreover, the **Young's modulus** of the eggshell, a measure of its stiffness, plays a crucial role in determining its resistance to deformation. The Young's modulus for eggshells is relatively high, reflecting a material that is stiff and resists deformation under applied forces. However, this stiffness is anisotropic, meaning it varies with the orientation of the force relative to the shell's microstructure. This anisotropy is especially relevant when considering the non-uniform curvature of the shell, as it affects how the shell deforms and ultimately fractures under stress.

$$E = \frac{\text{Stress}}{\text{Strain}} = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Understanding the physics of the eggshell surface, including the interplay between surface curvature, the energy required to break atomic bonds, and the Young's modulus, is essential for predicting its behavior under stress. By examining these factors, we can develop more accurate models for predicting which egg is more likely to remain intact during an egg tapping game. This section lays the foundation for further exploration into the structural mechanics of eggs and their implications for non-invasive predictive methods.

B. Response of the Eggshell to Applied Forces

When an external force (F) is applied to a section of the eggshell (2_1), the shell responds by generating an internal reaction force to counteract the applied stress. This interaction is crucial for understanding the conditions under which the eggshell might crack or remain intact during an impact, such as in an egg tapping game.

The reaction force generated by the shell arises from the material properties and geometric configuration of the eggshell. For a specific segment of the shell, characterized by its thickness (t) and the cross-sectional radius ($r(x)$), the reaction force ($f(x)$) can be expressed as:

$$f(x) = \sigma t \pi r(x).$$

Here, (σ) represents the stress within the shell material, and (x) denotes the position along the shell where the force is applied. The cross-sectional radius ($r(x)$) and the thickness (t) play critical roles in determining the shell's ability to generate sufficient reaction force.

In the direction along the (x)-axis, which is aligned with the applied force, the component of this reaction force is given by:

$$f \cos \alpha(x) = \sigma t \pi r \cos \alpha(x).$$

Where ($\alpha(x)$) is the angle between the reaction force ($f(x)$) and the (x)-axis. According to Newton's Third Law of

Motion, the equilibrium condition is maintained as long as the generated reaction force equals the applied force, i.e.,

$$(F = \sigma t \pi r \cos \alpha(x)).$$

However, if the material of the eggshell is unable to generate a reaction force sufficient to counterbalance the applied force (F), the structural integrity of the shell is compromised. When this threshold is surpassed, the stress exceeds the material's capacity, leading to crack initiation. The crack propagation continues until the entire structure fails, resulting in the shell breaking.

Understanding this mechanical response is essential for predicting the conditions under which an eggshell will crack. This analysis forms the basis for further exploration into how variations in shell thickness, cross-sectional radius, and the orientation of applied forces influence the likelihood of fracture. Consequently, this knowledge can be applied to develop predictive models for determining the outcome of egg tapping contests (Fig. 1) [1].

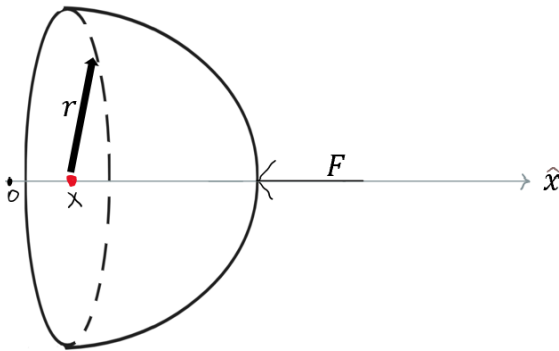


FIGURE 1. Schematic of egg Shell and inserted force.

C. The Stress Required for Fracture

Understanding the stress required to initiate a fracture in the eggshell is crucial for predicting the conditions under which the shell might fail. To determine the force necessary to cause the eggshell to crack, it is essential to calculate the critical stress (σ) that triggers fracture according to Griffith's criterion [2, 3, 4, 5, 6]. This criterion, which is rooted in fracture mechanics, provides a fundamental equation to estimate the stress at which a material with pre-existing flaws or cracks will fail.

According to Griffith's criterion, the critical stress (σ) needed for fracture is given by:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi c}}.$$

In this equation:

- (E) represents the Young's modulus of the material, which quantifies the stiffness of the eggshell.

The Mechanical Resistance of Eggs to Crack by Tapping Together

- (γ) denotes the energy required to break atomic bonds per unit surface area created by the crack. This term is also known as the surface energy.
- (c) is the half-length of the crack, representing the size of the flaw in the material where the crack is likely to propagate.

Griffith's criterion reveals that the critical stress increases with higher material stiffness (greater (E)) and higher surface energy (γ), but decreases as the length of the crack (c) increases. This relationship underscores the importance of both material properties and the presence of microstructural flaws in determining the likelihood of fracture.

Once the critical stress (σ) is known, the average force $\bar{F}$ required to initiate a crack in the eggshell can be calculated using the relationship:

$$\bar{F} = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi c}} t \pi r \cos \alpha(x).$$

The equation shows that the force required to initiate a crack is proportional to the thickness and cross-sectional radius of the shell, as well as the cosine of the angle of force application. It also depends on the material properties, particularly the Young's modulus and surface energy, as well as the size of any pre-existing flaws in the shell.

Understanding and applying Griffith's criterion in this context allows for a more precise prediction of when and where the eggshell is likely to fracture. By analyzing these factors, it is possible to assess the conditions under which an eggshell might fail during an egg tapping contest, providing a theoretical foundation for predicting the outcome based on the mechanical properties of the eggshell.

D. Analytical Expression for the Force Leading to Fracture

To further refine the prediction of the force required to initiate fracture in the eggshell, it is essential to account for the geometric properties of the eggshell surface. The shape and curvature of the shell play a significant role in determining the stress distribution and, consequently, the fracture behavior.

Given the geometry of the eggshell surface (as illustrated in Figure 2-2), the cross-sectional radius (r) at any point along the shell can be expressed as:

$$r(\theta) = \left(\frac{\sin \theta}{\sqrt{a \sin^2(\theta) + b \cos^2(\theta)}} \right).$$

Here, (θ) represents the angular position on the shell, while (a) and (b) are geometric parameters that characterize the ellipsoidal shape of the eggshell.

The angle (α), which is the angle between the reaction force ($f(x)$) and the (x)-axis, is given by the inverse tangent of the derivative of ($r(\theta)$) with respect to (θ):

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{dr(\theta)}{d\theta} \right).$$

With these geometric considerations, the force ($\bar{F}$) required to initiate a crack in the eggshell can be reformulated to account for the specific geometry of the shell:

$$\bar{F} = \frac{2E\gamma}{\sqrt{\pi c}} t\pi \left(\frac{\sin \theta}{\sqrt{a \sin^2(\theta) + b \cos^2(\theta)}} \right) \sqrt{1 + \left(\frac{\cos \theta (\sqrt{a \sin^2 \theta + b \cos^2 \theta}) - \frac{a \sin 2\theta - b \sin 2\theta}{2\sqrt{a \sin^2 \theta + b \cos^2 \theta}}}{a \sin^2 \theta + b \cos^2 \theta} \right)^2} + \left(\frac{\cos \theta (\sqrt{a \sin^2 \theta + b \cos^2 \theta}) - \frac{a \sin 2\theta - b \sin 2\theta}{2\sqrt{a \sin^2 \theta + b \cos^2 \theta}}}{a \sin^2 \theta + b \cos^2 \theta} \right)^2$$

By incorporating these geometric factors, the model provides a more accurate prediction of the force required to cause a fracture. The expression considers both the material's resistance to crack initiation and the influence of the shell's shape on stress distribution. This refined approach enhances the understanding of how the geometry of the eggshell affects its mechanical behavior under load (Fig. 2).

Understanding this relationship is key to developing predictive models for eggshell fracture in various scenarios, such as during egg tapping contests. By applying this comprehensive analytical approach, one can more accurately determine the conditions under which an eggshell is likely to fail.

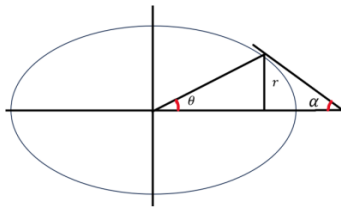


FIGURE 2. Gemetrical Model.

III. THE PHYSICS OF THE EGG INTERIOR

The interior of an egg consists primarily of two key components: the yolk and the egg white (albumen). These two elements exhibit distinct physical properties, which can be modeled to understand their mechanical behavior under stress. Given their characteristics, the egg white, with its elasticity, can be approximated as a spring, while the yolk, due to its viscous nature, can be modeled as a dashpot. This analogy allows us to conceptualize the egg's interior as a physical shock absorber system, as depicted in Figure (3) [7].

In this model, the egg white acts like an elastic spring that can deform and recover, while the yolk behaves like a dashpot, which resists sudden movements and dissipates energy through viscous damping. The combination of these elements forms a viscoelastic system, capable of absorbing and dissipating energy when subjected to external forces.

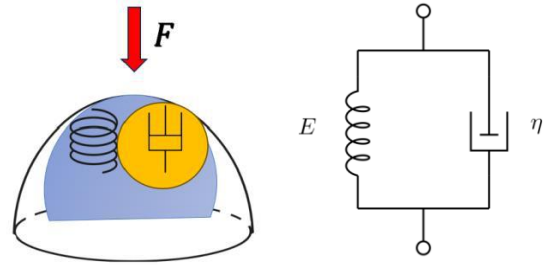


FIGURE 3. The analogy conceptualize the egg's interior as a physical shock absorber system.

To analyze the mechanical response of this viscoelastic system, we can derive the stress ($\sigma(t)$) as a function of time, considering the properties of both the spring (egg white) and the dashpot (yolk). The governing equation for the stress in this system is given by:

$$\sigma(t) = E\varepsilon(t) + \eta \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} = E \left[\varepsilon(t) + \tau \frac{\partial \varepsilon(t)}{\partial t} \right]; \tau = \frac{\eta}{E}$$

- ($\sigma(t)$) is the stress at time (t)
- ($\varepsilon(t)$) represents the strain at time (t).
- (E) is the Young's modulus, representing the stiffness of the egg white.
- (η) denotes the viscosity of the yolk, reflecting its resistance to flow.
- (τ) is the retardation time, a parameter that describes the time delay in the material's response to stress.

When a constant stress (σ_0) is applied, solving the above differential equation for strain ($\varepsilon(t)$) yields:

$$\varepsilon(t) = \frac{\sigma_0}{E} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right).$$

This equation describes the strain response of the egg's interior over time, highlighting the exponential decay characteristic of viscoelastic materials. Initially, the strain increases rapidly as the spring element (egg white) deforms, but as time progresses, the dashpot (yolk) dissipates energy, leading to a gradual decrease in strain rate until a steady state is reached.

If the material is freed from the applied stress at a time (t_1), the elastic element (egg white) will cause the material to revert to its original shape, with the deformation gradually returning to zero. This retardation behavior follows the equation:

$$\varepsilon(t > t_1) = \varepsilon(t_1) e^{-\frac{(t-t_1)}{\tau}}.$$

Here, ($\varepsilon(t_1)$) represents the strain at the moment when the stress is removed, and the term ($e^{-\frac{(t-t_1)}{\tau}}$) describes the rate at which the material returns to its initial state.

The exponential nature of the strain relaxation further illustrates how the egg's interior behaves as a shock absorber. The egg white's elastic properties cause it to exert a restoring

force, while the yolk's viscous properties contribute to the gradual reduction of strain. This combined effect ensures that the egg's interior can efficiently absorb and dissipate energy from impacts, thereby minimizing potential damage.

In summary, the viscoelastic model of the egg's interior provides valuable insights into how the yolk and egg white interact to protect the egg from external stresses. By modeling the egg as a spring-dashpot system, we can better understand its ability to absorb and dissipate energy, contributing to its resilience and structural integrity [8, 9, 10, 11].

A. The Effect of Yolk Position on Impact Resistance

The position of the yolk within the egg can significantly influence the egg's resistance to impact and its likelihood of cracking. Factors such as the cooking process can cause variations in the distance between the yolk and the point of impact, which in turn affects the egg's mechanical behavior. Understanding this relationship is crucial for predicting egg fragility based on its internal configuration.

When an egg is subjected to impact, the yolk acts as a viscous dashpot that absorbs and dissipates the impact energy. The effectiveness of this energy dissipation depends on the proximity of the yolk to the shell. Specifically, if the yolk is positioned closer to the point of impact, it can more effectively absorb and mitigate the forces transmitted through the egg white. Conversely, if the yolk is situated further away from the point of impact, the cushioning effect provided by the yolk is reduced.

The distance between the yolk and the point of impact is influenced by several factors, including the cooking method and the egg's storage conditions. For instance, during boiling, the egg white and yolk undergo changes in consistency and position. If the egg is overcooked, the yolk can become more centrally positioned or even become deformed, affecting its ability to act as an effective shock absorber.

To illustrate this concept, consider two eggs with different yolk positions relative to the point of impact, as shown in Figure 4-2. In Egg A, the yolk is positioned closer to the shell, providing a more effective shock absorption mechanism. In Egg B, where the yolk is positioned farther from the shell, the impact forces are less effectively mitigated by the yolk, increasing the likelihood of cracking.

The mechanical behavior of the egg in response to an impact can be understood through the following considerations:

- **Yolk as a Dashpot:** In a well-cooked egg with the yolk closer to the shell, the yolk's viscous properties help absorb impact forces, reducing the stress transmitted to the shell.
- **Yolk Positioning:** As the yolk moves further away from the point of impact, the cushioning effect decreases, leading to higher stress on the shell and an increased probability of crack formation.

In summary, the proximity of the yolk to the point of impact plays a critical role in determining the egg's resistance to cracking. A yolk that is positioned further from the impact site diminishes the shock-absorbing capabilities of the egg, increasing the likelihood of failure. Understanding and

controlling the yolk's position through careful cooking and handling can thus be essential in improving the egg's structural integrity and reducing the risk of cracking (Fig. 4).

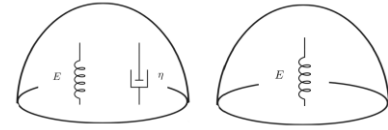


FIGURE 4. The Structure of the impact.

IV. EXPERIMENTAL PROCEDURES

To validate the theoretical predictions and investigate the impact of cooking on the yolk's position relative to the point of impact, a series of experiments were meticulously designed. These experiments aimed to assess both the mechanical behavior of the eggs under controlled conditions and the influence of yolk displacement on the likelihood of shell fracture.

To ensure consistency in the cooking process, specific standards were established. The eggs were carefully wrapped in bubble wrap to prevent the formation of microscopic cracks that could occur from contact with the container walls during boiling (Fig.5). This precaution was critical in maintaining the integrity of the eggshells throughout the experiment.



FIGURE 5. The eggs were carefully wrapped in bubble wrap.

The eggs were boiled in three distinct orientations to observe the effect of positioning on yolk displacement. In the first orientation, the eggs were placed with the pointed end facing downward. In the second, the eggs were laid on their sides, and in the third orientation, the broad end faced downward (Fig. 6). Upon post-cooking examination, it was observed that in all three cases, the yolk had shifted upward, away from the bottom of the egg. This movement allowed for the control of the yolk's distance from the impact site in subsequent tests.

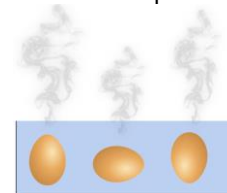


FIGURE 6. The boiled eggs.

To simulate the collision between two eggs, a controlled impact setup was designed (Fig.7). In this setup, an egg was released from a specified height using a movable clamp and allowed to fall freely onto another egg positioned below it in an egg tray. The tray was stabilized using play dough to ensure consistent impact conditions. The egg in the tray was fixed securely, ensuring that any resulting fracture was due to the collision force and not extraneous movement.

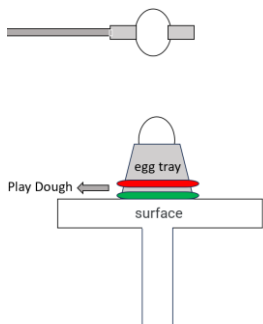


FIGURE 7. A controlled impact setup.

After conducting repeated trials, it was observed that approximately 90% of the eggs where the yolk was positioned far from the impact site suffered fractures. This high failure rate was consistent with the theoretical predictions, which suggested that the absence of the yolk near the impact point—effectively removing the damping effect of the dashpot—would lead to a higher probability of shell failure.

The experimental results not only confirmed the theoretical model but also highlighted the significant role that the yolk's position plays in the egg's structural resilience. The displacement of the yolk during cooking alters the internal dynamics, making the egg more susceptible to cracking if the yolk is not situated near the impact zone.

V. CONCLUSION

This study comprehensively examined the mechanical properties of eggs, focusing on the interplay between the external geometry of the eggshell and the internal viscoelastic dynamics of the egg's contents. The investigation began with an analysis of the eggshell's structural physics, where it was found that the shell's resistance to cracking is heavily influenced by its geometric stiffness. Eggs with sharper ends exhibited greater stiffness due to the higher curvature, which distributes stress more evenly across the surface. Conversely, the broader, flatter regions of the shell were more prone to cracking under stress due to localized force concentrations.

In addition to the geometric analysis, the study delved into the material properties of the eggshell, specifically examining the energy required to break atomic bonds and the Young's modulus of the shell material. These factors are crucial in understanding the threshold stress needed to initiate a fracture. It was demonstrated that the stress required to fracture the shell is a function of both its material properties and the curvature, with higher curvature areas able to

withstand greater forces due to the more efficient distribution of stress.

Moving to the interior of the egg, the study explored the physics of the egg white and yolk, modeling them as an elastic element and a dashpot, respectively. This viscoelastic system acts as a natural shock absorber, where the egg white (with its elasticity) absorbs and stores energy, while the yolk (with its viscosity) dissipates it. This internal damping mechanism plays a crucial role in protecting the eggshell from impact damage. The study demonstrated that the position of the yolk relative to the impact site significantly affects the egg's overall resilience. When the yolk is closer to the point of impact, it enhances the egg's ability to absorb and dissipate energy, thereby reducing the likelihood of shell fracture.

The experimental section provided empirical validation of these theoretical insights. By controlling the cooking process and manipulating the position of the yolk, it was observed that eggs with the yolk positioned further from the impact site were more likely to crack, corroborating the theoretical model. The controlled impact experiments, which simulated real-world conditions, confirmed that the yolk's position is a critical factor in the egg's structural integrity. The experimental results showed a strong alignment with the theoretical predictions, with approximately 90% of the eggs where the yolk was distant from the impact site experiencing fractures.

In conclusion, this study has provided a detailed and multi-faceted understanding of the factors that contribute to an egg's resistance to cracking. The research highlighted the critical role of geometric stiffness in the eggshell, the material properties that determine the stress required for fracture, and the internal viscoelastic dynamics that protect the shell from damage. The experimental results reinforced these findings, showing how the yolk's position relative to the impact site can significantly influence the egg's ability to withstand force. These insights not only enhance our understanding of egg mechanics but also offer potential applications in fields such as materials science and engineering, where the principles observed in eggshells and their internal structure could inspire the design of more resilient materials and structures.

ACKNOWLEDGEMENTS

We would like to express our sincere gratitude to Ariain Young Innovative Minds Institute for giving the opportunity to participate in IPT 2024 and guiding us to publish this article in this journal.

REFERENCES

- [1] The fracture toughness of eggshell David Taylor ↑ , Megan Walsh, Alexandra Cullen, Peter O'Reilly [The fracture toughness of eggshell \(tcd.ie\)](https://doi.org/10.1016/j.tcd.2019.04.001)
- [2] Griffith, A. A., *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*, Philosophical Transactions, Series A **221**, 163-198 (1920).

[3] Inglis, C. E., *Stresses in Plates Due to the Presence of Cracks and Sharp Corners*, Transactions of the Institute of Naval Architects **55**, 219-241 (1913).

[4] Irwin, G. R., *Fracture Dynamics, Fracturing of Metals*, American Society for Metals, Cleveland, OH, 147-166 (1948).

[5] Orowan, E., *Fracture and Strength of Solids*, Reports on Progress in Physics **XII**, 185 (1948).

[6] Irwin, G. R., *Analysis of Stresses and Strains near the End of a Crack Traversing a Plate*, Journal of Applied Mechanics **24**, 361-364 (1957).

[7] Alizadeh, H. V., Fanton, M. G., Domel, A. G., Grant, G., Camarillo, D. B., *Prevention of Traumatic Brain Injury with Liquid Shock Absorption*, DOI:10.48550/arXiv.1910.07722.

The Mechanical Resistance of Eggs to Crack by Tapping Together

[8] *On the elasticity and viscosity of metals*, Proceedings of the Royal Society of London **14**, 289–297. 1865-12-31. doi:10.1098/rspl.1865.0052. ISSN 0370-1662.

[9] Voigt, W., *Ueber die innere Reibung der festen Körper, insbesondere der Krystalle*, Abhandlungen der Königlichen Gesellschaft von Wissenschaften zu Göttingen **36**, 3–47 (1890).

[10] Rajagopal, K. R., *A note on a reappraisal and generalization of the Kelvin–Voigt model*, Mechanics Research Communications **36**, 232–235 (2009). doi:10.1016/j.mechrescom.2008.09.005.

[11] Meyers, M. A., Chawla, K. K., *Mechanical Behavior of Materials*, (Cambridge University Press, UK, 1999), pp. 570–580. ISBN 978-1-107-39418-6

Fundamentos del nano secado por aspersión y su aplicación como etapa de purificación de nanofármacos



N. Ramirez-Guerrero, O. Gonzalez-Rodriguez, R. Casañas-Pimentel*
Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Legaria 694. Colonia Irrigación 11500 Ciudad de México

ISSN 1870-9095

E-mail: rcasanas@ipn.mx

(Recibido el 1 de abril de 2025, aceptado el 30 de mayo de 2025)

Resumen

El secado por aspersión es una técnica que se ha empleado durante mucho tiempo en diversas industrias, incluyendo la farmacéutica, para convertir líquidos en sólidos y formar productos de apariencia uniforme. La construcción del secador por aspersión está diseñada de tal manera que permite atomizar el líquido en pequeñas gotas, lo que garantiza una gran área de superficie para la transferencia de calor y de masa, y acorta significativamente el procesamiento, protegiendo a las sustancias químicas de su degradación térmica. Cada gota se seca formando una partícula sólida individual con características que pueden personalizarse optimizando las variables de formulación y los parámetros críticos del proceso. En los últimos años, ha tomado fuerza el uso de la tecnología de nanosecado por aspersión como método para la fabricación de nanopartículas a escala de laboratorio, así como para su purificación. Este enfoque es de especial interés cuando se busca mejorar las propiedades o el efecto de un fármaco al reducir el tamaño de las partículas obtenidas o mejorar su estabilidad. Es por eso que se utiliza la técnica de nebulización para la atomización del fluido de alimentación, mientras que el flujo laminar de gas en la cámara de secado garantiza condiciones de secado suaves. Además, los colectores electrostáticos, a diferencia de los separadores ciclónicos, garantizan una alta eficacia en la producción de nanopartículas sólidas, incluso si se procesa un pequeño volumen de muestra.

Palabras clave: Nanosecado por aspersión, gelatina, partículas poliméricas, micropartículas, nanopartículas.

Abstract

Spray drying is a technique that has long been used in diverse industries, including pharmaceutical, to convert liquids into solids and form products with a uniform appearance. The construction of the spray dryer is designed to atomize the liquid into small droplets, ensuring a large surface area for heat and mass transfer and significantly shortening processing times, protecting chemical substances from thermal degradation. Each droplet dries to form an individual solid particle with characteristics that can be customized by optimizing formulation variables and critical process parameters. In recent years, the use of nano spray drying technology has gained momentum as a method for manufacturing nanoparticles at the laboratory scale. This approach is of particular interest when seeking to improve the properties or effect of a drug by reducing the size of the obtained particles. Therefore, the nebulization technique is used to atomize the feed fluid, while the laminar flow of gas in the drying chamber ensures gentle drying conditions. Furthermore, electrostatic collectors, unlike cyclone separators, guarantee high efficiency in the production of solid nanoparticles, even when processing a small sample volume.

Keywords: Nano spray drying, gelatin, polymer particles, microparticles, nanoparticles.

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de medicamentos ha tenido un impacto significativo en las últimas décadas, en gran medida gracias al avance de la nanomedicina [1]. La nanoencapsulación de medicamentos en partículas de escala nanométrica ha dado lugar a un elevado número de nanoformulaciones aprobadas para su uso clínico en humanos, las cuales han permitido mejorar la estabilidad de los fármacos, su solubilidad y su biodisponibilidad, controlar su tasa de liberación, mejorar su efecto terapéutico y reducir sus efectos adversos, entre otras ventajas [2].

La mayoría de las técnicas para la obtención de medicamentos nanoencapsulados implica la obtención de suspensiones [3] las cuales pueden emplearse directamente como suspensión o pueden ser procesadas para generar

polvos. Diversos sistemas empleados para la nanoencapsulación de medicamentos, como las micelas, los liposomas y las nanopartículas de base proteica han mostrado inestabilidad, permitiendo la fuga de los principios activos, la fusión de las nanopartículas y el cambio de tamaño, entre otros aspectos [4]. Por lo anterior, se han explorado diversos procesos “down-stream” que permiten mejorar la estabilidad de los nanofármacos [1, 3].

Las formas farmacéuticas sólidas ofrecen grandes ventajas no sólo en la estabilidad, sino también en la dosificación, el almacenamiento y la administración de los medicamentos, entre ellos, los polvos, son una forma farmacéutica recurrente en la nanomedicina [5].

El nano secado por aspersión es un proceso sencillo de operar, de bajo costo, con bajo consumo energético, escalable y reproducible, que permite encapsular sustancias sensibles

al calor, con un mínimo de degradación y con una alta eficiencia de encapsulación. El proceso permite el control del tamaño, forma y morfología de las partículas y puede utilizarse para la generación directa de nano formulaciones farmacéuticas en polvo o como un proceso down-stream para eliminar los disolventes de las nanoformulaciones previamente preparadas por otra técnica. La técnica generalmente da lugar a la obtención de partículas en tamaños micrométricos o submicrocétricos. Esta tecnología se ha empleado para encapsular fármacos para el tratamiento de tuberculosis, asma, inflamación, diabetes, enfermedades neurológicas, infecciones, cáncer y enfermedades cardiacas, entre otras [5].

El proceso de nanoencapsulación de fármacos mediante nano secado por aspersión involucra el uso de materiales que generen la pared de las nanopartículas, el uso de surfactantes, de disolventes y de un gas de secado. Dentro de los materiales de pared más empleados se encuentran la β -ciclodextrina, el manitol, el quitosano, el PLGA, la poli ϵ -caprolactona, la trealosa, la lactosa, la pectina, el ácido esteárico, la gelatina, el PVP, la goma arábica y el PVA, entre otros materiales aprobados para uso farmacéutico. Por su parte, los disolventes más empleados para esta técnica son diclorometano, metanol, acetona, metanol, acetonitrilo, etilacetato y algunos de estos productos mezclados con agua. El uso de disolventes orgánicos permite usar temperaturas de operación menores, por su baja temperatura de evaporación, sin embargo, también involucra la posibilidad de dejar trazas de disolventes que pueden resultar tóxicas para su uso en humanos. El gas de secado en el nano secado por aspersión es típicamente un gas inerte, o sus mezclas, siendo el nitrógeno o el oxígeno los más comunes [5].

A. Instrumentación

El proceso de secado por aspersión consta de tres fases principales (atomización, evaporación del disolvente y recolección de partículas) que se subdividen en 6 pasos (Figura 1):

- Paso 1. Calentamiento
- Paso 2. Formación de gotas
- Paso 3. Cámara de secado
- Paso 4. Recolección de las partículas
- Paso 5. Filtro de salida
- Paso 6. Filtrado del Gas

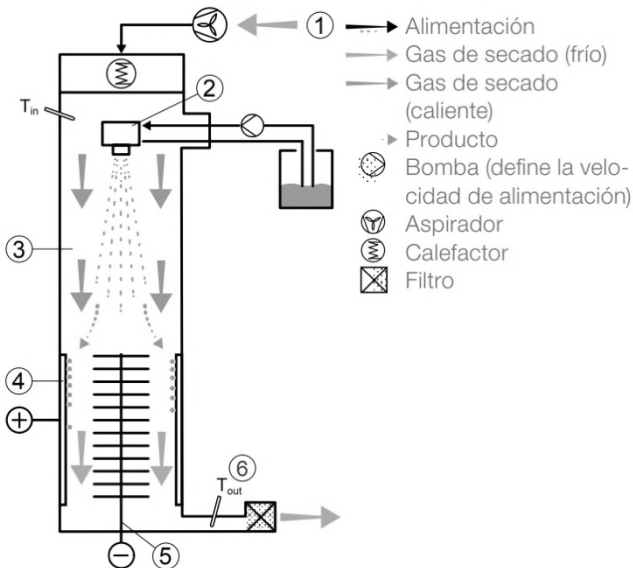


FIGURA 1. Nano secador por aspersión BÜCHI- B90 (imagen tomada del catálogo de la marca [6])

A.1 Atomización

El dispositivo de atomización es muy importante para el proceso de secado por aspersión convencional, y su selección es muy importante en el uso del secado por aspersión como un método de secado económico. Los atomizadores se diferencian según su principio de funcionamiento. Los tipos principales son atomizadores rotativos y atomizadores de boquilla [7]. El principio de funcionamiento de los diferentes tipos de atomizadores se menciona brevemente en la tabla I.

Tabla I. Tipos de atomizadores para secado por aspersión "[8].

Tipo de atomizador	Principio	Ventajas	Limitaciones	Aplicaciones
Atomizador rotatorio	El disco giratorio de alta velocidad arroja líquido tangencialmente, creando una fina pulverización	Alto rendimiento, maneja muestras viscosas, robusto	Distribución del tamaño de gotas más grande, potencial de degradación del producto debido a fuerzas de corte	Leche en polvo, café, jugos de frutas, detergentes
Atomizador con boquilla de presión	El líquido a alta presión se fuerza a pasar a través de un pequeño orificio y se rompe en gotas	Tamaño de gota más pequeño, bueno para materiales sensibles al calor	Menor rendimiento, puede requerir bombas de alta presión	Productos farmacéuticos, sabores, enzimas
Atomizador de boquilla de dos fluidos	La corriente de gas a alta velocidad atomiza el líquido	Control flexible del tamaño de gota, adecuado para materiales sensibles al calor	Puede ser más complejo de operar y mantener	Materiales frágiles, productos encapsulados
Atomizador ultrasónico	Las ondas sonoras de alta frecuencia crean vibraciones que rompen el líquido en finas gotas	Tamaño de gota muy pequeño, distribución uniforme del tamaño de partícula	Bajo rendimiento, costoso	Nanopartículas, aplicaciones especializadas

A diferencia de los secadores por aspersión convencionales, donde se pueden utilizar boquillas de diversos tipos, un nebulizador montado en el cabezal de aspersión se encarga de crear diminutas gotas de aerosol en un nanosecador por aspersión. Cabe destacar que la construcción del nebulizador, basada en tecnología de malla vibratoria, garantiza la formación de gotas con alta precisión y reproducibilidad en cuanto a su tamaño [9] Como resultado, la distribución del tamaño de partícula del producto final es estrecha. En esencia, la solución de alimentación circula sobre la superficie de una placa metálica delgada perforada. Bajo las vibraciones de alta frecuencia de un actuador piezoeléctrico, la malla de pulverización se mueve rápidamente hacia arriba y hacia abajo, expulsando gotas a través de los orificios cilíndricos hacia la cámara de secado [10, 11].

En el secador por pulverización nano B-90 de Buchi, el cabezal de pulverización accionado por cristal piezoeléctrico consiste en una pequeña tapa de pulverización con una fina membrana perforada (malla de pulverización) en su interior. Esta membrana cuenta con una matriz de orificios fabricados con precisión, con diámetros de 4, 5.5 o 7 μm . Cuando el actuador piezoeléctrico se activa a una frecuencia ultrasónica (60 kHz), se inicia una vibración (ascendente y descendente) en la malla [12].

Los orificios de esta malla se realizan mediante perforación láser en la membrana delgada. Estos orificios tienen forma cónica, con el diámetro mayor hacia el lado de la alimentación del líquido y el diámetro estrecho hacia el lado de liberación de las gotas. La forma de los orificios se ha optimizado para la creación de gotas individuales. La alimentación del sistema se lleva a cabo por medio de dos tuberías de plástico que conectan el cabezal de pulverización al depósito de alimentación. Una bomba peristáltica de velocidad variable hace circular el fluido uniformemente desde el depósito, a través del cabezal de pulverización, hasta la malla de pulverización y de vuelta al depósito. Este modo de circulación permite una atomización eficiente y continua [11].

A.2 Evaporación del disolvente

Esta etapa, y los pasos posteriores del proceso de secado por aspersión, constituyen la fase de formación de partículas. Con la alimentación atomizada en pequeñas gotas, el siguiente paso es secar las gotas por contacto directo con un gas caliente. Esto permite la rápida evaporación de la humedad de la superficie de todas las gotas de manera uniforme. El requisito fundamental es un flujo de gas uniforme a todas las partes de la cámara de secado. En el secador convencional, las gotas suelen encontrarse con el aire caliente en la cámara de aspersión, ya sea en flujo en paralelo o en contracorriente [13].

La función de un dispersor de aire es crear una caída de presión mediante placas perforadas o canales de paletas, a través de los cuales se dirige el gas para facilitar un flujo uniforme en todas las direcciones de la cámara de secado por aspersión. El dispersor de aire se coloca normalmente en el techo de la cámara de secado, junto al atomizador. La cámara de secado suele tener un fondo cónico, cuya relación altura-

diámetro (relación de aspecto) se determina según las aplicaciones finales [13].

Aunque el flujo turbulento en un secador por pulverización convencional facilita un secado más eficiente gracias a una mayor transferencia de calor, la exposición de las partículas a temperaturas elevadas puede provocar la desnaturalización de materiales termosensibles, como proteínas y péptidos. El sistema de calentamiento del Nano Spray Dryer B-90 funciona con un principio de flujo laminar, generado por el aire que pasa a través de una espuma metálica porosa compacta, lo que optimiza el consumo de energía y permite velocidades de calentamiento cortas. Con el flujo laminar, se logra un calentamiento suave, lo que lo convierte en el sistema ideal para productos biofarmacéuticos termosensibles. Además, la configuración vertical del nano secador por aspersión facilita la recolección directa de las partículas en el colector, lo que minimiza su adherencia a las paredes laterales de la cámara de vidrio y, por lo tanto, permite un mayor rendimiento [14].

A.3 Recolección de partículas

En el secado por aspersión convencional se emplean dos sistemas para separar el producto del medio de secado: la separación primaria y la secundaria. La cámara de secado por aspersión suele tener un fondo cónico para facilitar la recolección del polvo seco. Durante la separación primaria, el polvo seco se recoge en la base del secador, seguido de su extracción mediante un transportador de tornillo o un sistema neumático con un separador ciclónico en el momento de la separación secundaria. La corriente de gas cargada con la humedad evaporada se extrae del centro del cono, sobre el fondo cónico, y se descarga a través de una salida lateral. La eficiencia relativamente baja de la recolección requiere el uso de un sistema adicional de recolección de partículas, compuesto por colectores secos seguidos de depuradores húmedos. Los colectores secos incluyen un separador ciclónico, un filtro de mangas y un precipitador electrostático, según el tamaño de las partículas arrastradas por los gases de escape y las especificaciones del producto final [13].

La recolección de partículas en el Nano Spray Dryer B-90 se realiza mediante un precipitador electrostático, cuyo mecanismo de recolección es independiente de la masa de la partícula. Este sistema, que consta de un electrodo en estrella conectado a tierra (cátodo) y un electrodo cilíndrico colector de partículas (ánodo), logra una recolección de partículas finas de alta eficiencia. Durante el secado por pulverización, el alto voltaje aplicado entre los electrodos crea un campo electrostático que acelera la deposición de partículas con carga negativa en la pared interna del electrodo cilíndrico colector de partículas. A continuación, se realiza un proceso de descarga. El polvo fino se recolecta del interior del cilindro mediante un raspador de partículas [15].

Este método de separación de partículas tiene la ventaja de recolectar partículas de tamaño micrométrico a submicrométrico de manera eficaz y con altos rendimientos, incluso en cantidades de muestra pequeñas, en el rango de miligramos o mililitros [16].

B. Ingeniería del proceso de formación de partículas

B.1 Tamaño de partícula

Independientemente del tipo de atomizador, la atomización tiene influencia en el tiempo de secado y la morfología de las gotas, es el factor principal que determina el tamaño de las partículas finales [17].

Un diámetro equivalente de particular importancia es el diámetro aerodinámico, es decir, el diámetro de una esfera de densidad unitaria que tiene la misma velocidad de sedimentación que la partícula medida, cómo se expresa en la ecuación 1:

$$d_a = \sqrt[3]{\frac{\rho_p}{\rho^*}} d_g, \quad (1)$$

donde d_a y d_g son el diámetro aerodinámico y geométrico, respectivamente; ρ_p es la densidad de la partícula la cual en esta ecuación no debe confundirse con la densidad real del material seco. La densidad de partículas es la masa de la partícula dividida por el volumen de una esfera de diámetro d_g y puede ser significativamente menor que la densidad real, ya que incluye huecos internos y externos. ρ^* es la densidad de referencia, la cual usualmente será $1 \frac{g}{cm^3}$.

Para expresar el diámetro geométrico de partículas esféricas secadas por aspersión en función de las variables de formulación y proceso (ecuación 2) se requiere de un simple balance de masa [18].

$$d_g = \sqrt[3]{\frac{C_F}{\rho_p}} d_D. \quad (2)$$

Esta ecuación muestra que el diámetro geométrico se puede controlar mediante la atomización, que determina el diámetro de las gotas, d_D . El tamaño de partícula también se ve afectado directamente por los cambios en la concentración de la solución de alimentación, C_F .

B.2 Distribución radial de los componentes durante el proceso de secado

La evaporación de una gota de solución en un secador por aspersión involucra un problema de transporte de calor y masa. El proceso se rige por la diferencia entre la presión de vapor de los disolventes y su presión parcial en la fase gaseosa. La velocidad de evaporación se determina por el equilibrio entre la energía necesaria para evaporar el disolvente y la energía transportada a la superficie de la gota [18].

Debido a la ausencia de convección interna, la distribución de los componentes en una gota que se evapora puede ser descrita mediante la ecuación de difusión no lineal. Si se consideran coeficientes de difusión constantes e interacciones insignificantes entre los solutos, la ecuación de difusión se convierte en la segunda ley de difusión de Fick [19]. Esta ecuación (3), en su forma unidimensional tiene una solución si se asume que la gota se evaporará a una velocidad

de evaporación constante y se puede definir la velocidad de evaporación, κ como:

$$d^2(t) = d_0^2 - \kappa t \therefore \kappa = - \frac{dd^2}{dt}. \quad (3)$$

Donde d es el diámetro instantáneo de la gota. El período de velocidad de secado descendente comienza cuando la gota alcanza un contenido crítico de humedad debido a la pérdida continua de disolvente. Por lo tanto, la viscosidad de la gota aumenta con el tiempo y, en un punto determinado, comienza la superficie a solidificarse y el proceso de secado queda determinado por el contenido de sólidos de la gota [17]. El tiempo necesario para secar la gota se calcula aproximadamente mediante su vida útil τ_D (ecuación 4)

$$\tau_D = \frac{d_0^2}{\kappa}. \quad (4)$$

El modelo propuesto por Vehring-Foss-Lechuga (VFL) [20] ha sido bastante utilizado para comprender la formación de partículas durante el proceso de secado. Con el supuesto de una simetría esférica unidimensional, propiedades constantes del material, difusión constante y tasas de evaporación constantes, el número de Péclet (Pe) describe la recesión de la gota controlada por la tasa de evaporación (κ) y la difusión del soluto (D_j) [20] (ver ecuación 5).

$$Pe = \frac{8}{D_j}. \quad (5)$$

Si el número de Péclet es alto significa que la recesión de la superficie de la gota es considerablemente mayor que la difusión del soluto, lo que conduce a la obtención de partículas huecas. Por el contrario, un número de Péclet bajo significa que la tasa de difusión del soluto es mayor que la recesión de la superficie de la gota, lo que conduce a la formación de partículas sólidas [17].

El enriquecimiento de la superficie (E_j) es la relación entre la concentración superficial y la concentración promedio de soluto en la gota, y se expresa como:

$$E_j = \frac{C_{j,s}}{C_{j,m}} = 1 + \frac{Pe}{5} + \frac{Pe^2}{100} - \frac{pe^3}{4000} \text{ para } Pe < 20, \\ E_j = \frac{Pe}{3} + 0.363 \text{ para } Pe > 20, \quad (6)$$

donde $C_{j,s}$ es la concentración superficial y $C_{j,m}$ son las concentraciones promedio del soluto j [21].

Utilizando un balance de masa entre el estado inicial de las gotas y cualquier momento durante el período de secado, la concentración media de cualquier soluto en forma de solución se puede obtener de [18]:

$$C_{m,i}(t) = C_{0,i} \left(1 - \frac{\tau}{\tau_d}\right)^{-\frac{2}{3}}, \quad (7)$$

en el cual $C_{0,i}$ es la concentración de alimentación inicial del soluto y τ_d es la vida útil de la gota.

Utilizando la ecuación 7 y la definición de enriquecimiento superficial, es posible obtener el tiempo que necesita cualquier componente para alcanzar la saturación $\tau_{sat,i}$ a partir de

$$\tau_{sat,i} = \tau_D \left(1 - (S_{0,j} E_i)^{\frac{2}{3}} \right), \quad (8)$$

donde $S_{0,j} = \frac{C_{0,i}}{C_{sol,i}}$.

Donde $C_{0,i}$ es la concentración inicial, componente i, $C_{sol,i}$ es la solubilidad, componente i y $S_{0,j}$ es la concentración inicial del soluto normalizada por su solubilidad, es decir, el índice de saturación inicial del soluto [22].

Un ejemplo de la aplicación del nano secado por aspersión para la eliminación del disolvente en suspensiones de nanopartículas obtenidas por otra técnica se muestra a continuación.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Preparación de nanopartículas vacías

Las nanopartículas se sintetizaron primero por el método de desolvatación. Para ello se preparó una solución polimérica a una concentración conocida con gelatina tipo B (Sigma 300 Bloom) en agua desionizada a 50°C y agitación durante 30 min. Se ajustó el pH de la solución a 7.0 ± 0.5 y posteriormente, se adicionó gota a gota acetona con agitación continua y temperatura ambiente. Finalmente, se agregó una solución de agentes reticulantes al 1.2% de CDI:NHS relación 5:1. La solución se agitó durante 16 horas. De esta forma, se generó una suspensión de nanopartículas de gelatina, reticuladas, libres de un principio activo (vacías).

B. Preparación de nanopartículas cargadas con un principio activo modelo

Para la síntesis de nanopartículas que incorporan principio activo, se preparó una solución a una concentración de 4 mg/mL del principio activo en un disolvente adecuado, luego se adicionó el volumen necesario a la solución polimérica inicial, previo al ajuste de pH y se continuó el proceso descrito en la sección II.A. Es de suma importancia que los principios activos deben ser químicamente compatibles con los materiales que forman la pared en un proceso de nanoencapsulación por nano secado por aspersión.

C. Purificación de nanopartículas mediante nanosecado por aspersión.

Pasadas las 16 horas de agitación, se recuperó la solución de nanopartículas en tubos para centrifugación, incluyendo los sólidos que se formaron durante el proceso y se centrifugó a $2500 \times g$ durante 60 min, al finalizar se recuperó el sobrenadante, que es la suspensión de nanopartículas. Para la eliminación del disolvente que contiene la suspensión de nanopartículas se utilizó el nanosecado por aspersión empleando el equipo Nano Spray Dryer (BÜCHI Modelo B-

90), las condiciones de operación del equipo se muestran en la Tabla II.

TABLA II. Condiciones de operación del equipo de nanosecado por aspersión para la eliminación del disolvente.

Condición	Descripción
Malla	4 μ m
Soluto	Gelatina
Concentración de Soluto	2% m/v
Intensidad de Spray	100%
Tasa de Sprayado	20%
Temperatura de entrada	80°C

D. Caracterización de nanopartículas

El tamaño y la morfología de las nanopartículas se determinaron por microscopía electrónica de barrido, colocando una muestra de nanopartículas en polvo sobre una cinta de carbono. Las partículas fueron cubiertas con una fina capa de oro mediante sputtering y se realizó el análisis en el equipo JSM-6390 (JEOL, Japan). Las micrografías se realizaron en 3000 y 5000 aumentos y se analizaron mediante el software ImageJ para determinar la distribución de tamaños.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se puede observar la morfología esférica de las nanopartículas vacías, las cuales presentaron un tamaño medio cercano a los 700 nm y una distribución de tamaño desde 300 nm (0.3 μ m) hasta 1200 nm (1.2 μ m), según se observa en el histograma de frecuencias en la Figura 3.

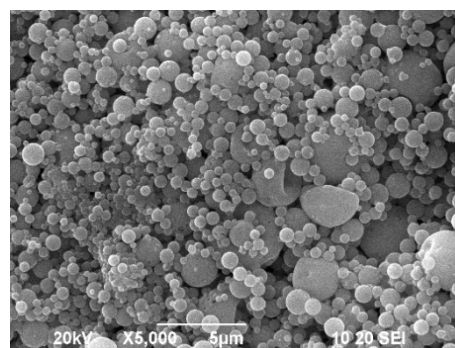


FIGURA 2. Micrografía electrónica de barrido de nanopartículas vacías en polvo, obtenidas después del nanosecado por aspersión.

Las partículas de gelatina obtenidas no mostraron agregación y presentaron una forma esférica con superficie lisa.

La mezcla CDI:NHS, se aplicó en la formulación ya que es un excipiente de uso común presente en varios productos farmacéuticos a base de proteínas y tiene la ventaja de inhibir la agregación de proteínas [14, 23]. Por otro lado, la forma esférica es la forma más estable de una gota, por lo tanto, se puede esperar la formación de partículas esféricas compactas

en el nanosecado por aspersión. Varias investigaciones han optimizado la suavidad y esfericidad de las partículas añadiendo surfactantes. El surfactante equilibra las fuerzas superficiales-viscosas dentro de la gota de secado y permite la formación de una superficie esférica lisa en la partícula seca [11, 24].

En otros estudios se han obtenido mediante nanosecado por aspersión nanopartículas de gelatina con superficies lisas [25] y porosas [26], mientras que en otros se obtuvieron partículas no esféricas de superficie rugosa [27]. La rugosidad de la superficie de la partícula está fuertemente determinada por los parámetros de proceso, particularmente por la tasa de evaporación y la difusión del soluto, como se explicó arriba, de tal manera que, si bien se pueden emplear surfactantes y agentes que mejoren la calidad de las partículas obtenidas, el experimentador deberá tener especial cuidado en los parámetros del proceso.

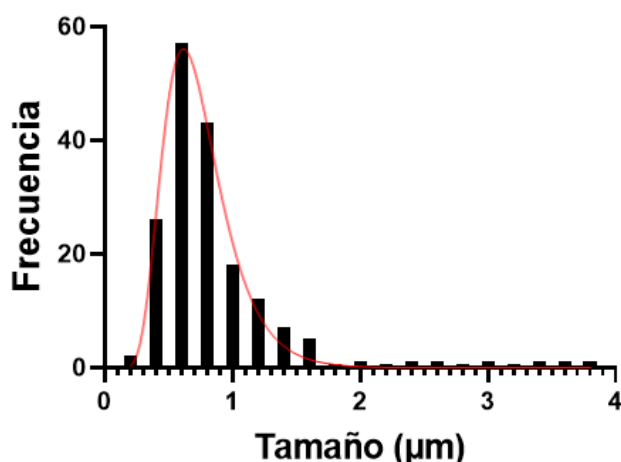


FIGURA 3. Gráfico de distribución de tamaños de las nanopartículas vacías obtenidas por nanosecado por aspersión.

Para el presente estudio sobre el Nano Spray Dryer B-90, el tamaño de partícula fue controlado predominantemente por el tamaño de la malla de pulverización. Aunque las concentraciones del entrecruzante y la proteína se clasificaron en segundo y tercer lugar, respectivamente (datos no mostrados), sus influencias fueron mínimas en relación con el tamaño de la malla de pulverización. Estos hallazgos fueron consistentes con otros estudios que encontraron que la concentración total de sólidos, la viscosidad y la tensión superficial de la solución de pulverización tenían muy poco impacto en el tamaño final de las gotas [28].

Las partículas cargadas con el principio activo modelo también presentaron una forma esférica (Figura 4) y una superficie lisa. La distribución de tamaños fue más amplia (0.4-1.9 µm), con la mayoría de las nanopartículas con tamaños por encima de 1 µm (Figura 5). La adición del principio activo incrementó en gran medida el tamaño de las nanopartículas, sin embargo, cambios en los parámetros de proceso pueden producir mejoras en el tamaño del producto final, por lo que para el ejemplo expuesto en este trabajo, el experimentador debería ajustar los parámetros de formulación (concentración de la solución, tipo de disolvente usado, concentración y tipo de surfactante) y de procesamiento (velocidad de flujo de alimentación, tamaño

de la malla, presión y temperatura del gas de secado, condiciones de atomización, etc.). Para obtener partículas de tamaño submicrométrico se recomienda usar un tamaño de poro de la malla de 4.0 µm y soluciones diluidas, con valores de concentración entre 0.1 y 1% m/v [5].

Además, es indispensable recordar que, en general, el tamaño de partícula de los productos de nanosecado por aspersión varía entre 0.2 y 5 µm, siendo generalmente superiores a 1 µm, más aún, algunos investigadores han obtenido tamaños de partícula mayores a los 10 µm empleando esta técnica [10]. Las características necesarias para el producto y la idoneidad de su tamaño dependerán de la aplicación deseada.

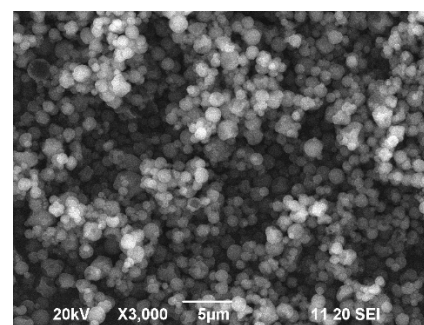


FIGURA 4. Micrografía electrónica de barrido de nanopartículas de gelatina que contienen un principio activo, obtenidas por nanosecado por aspersión.

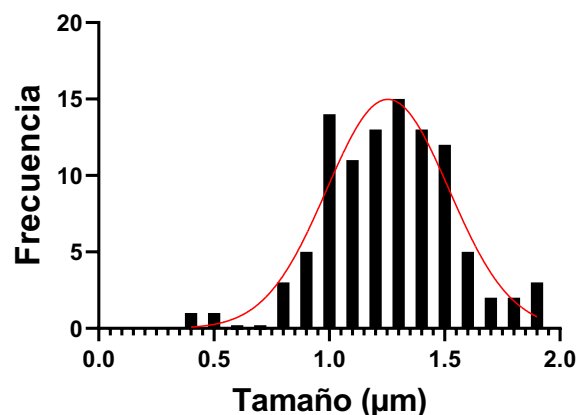


FIGURA 5. Gráfico de distribución de tamaños de las nanopartículas cargadas con un principio activo obtenidas por nanosecado por aspersión.

IV. CONCLUSIONES

El proceso de nano secado por aspersión es una técnica ampliamente usada para aplicaciones nano farmacéuticas, aunque sus productos son generalmente de tamaños micrométricos. La técnica permite generar nanoformulaciones por el secado directo de suspensiones de materiales de pared, surfactantes y los principios activos, aunque también es adecuada para la eliminación de disolventes.

En la suspensión de nanopartículas de gelatina obtenidas

por el método de desolvatación, el secado por aspersión elimina el disolvente, obteniéndose un polvo homogéneo que puede ser resuspendido posteriormente en un medio adecuado, los tamaños obtenidos se encuentran en la escala micrométrica y submicrométrica, con tamaños que van desde los 200 nm para las nanopartículas vacías y 300 nm para las que contienen el principio activo; el método es adecuado para conservar la morfología esférica de las nanopartículas, sin embargo puede incrementar el tamaño de las partículas en suspensión si se utiliza como un proceso de purificación “down-stream” como ocurrió en este estudio (datos no mostrados). El tamaño de partícula del producto de nano secado por aspersión está fuertemente influenciado por el tamaño de poro de la malla de pulverización, que en este estudio fue el más pequeño disponible comercialmente (4 µm), sin embargo, formulaciones con nanosuspensiones más diluidas podrían dar lugar a nanopartículas más pequeñas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo contó con el apoyo de la Secretaría de Investigación y Posgrado del Instituto Politécnico Nacional (Proyecto de Innovación No. 20231083). Omar A. González Rodríguez y Nancy C. Ramírez Guerrero recibieron becas de doctorado de la SECIHTI, México.

REFERENCIAS

- [1] Costa, C., Padrela, L., *Progress on drug nanoparticle manufacturing: exploring the adaptability of batch bottom-up approaches to continuous manufacturing*, J Drug Deliv Sci Technol **111**,107120 (2025).
<https://doi.org/10.1016/J.JDDST.2025.107120>
- [2] Jia, Y., Jiang, Y., He, Y. et al., *Approved Nanomedicine against Diseases*, *Pharmaceutics* **15**,774 (2023).
<https://doi.org/10.3390/PHARMACEUTICS15030774>
- [3] Mazayen, Z. M., Ghoneim, A. M., Elbatany, R. S. et al., *Pharmaceutical nanotechnology: from the bench to the market*, *Futur J Pharm Sci* **8**,12 (2022).
<https://doi.org/10.1186/S43094-022-00400-0>
- [4] Egwu. C. O., Aloke, C., Onwe, K. T. et al., *Nanomaterials in Drug Delivery: Strengths and Opportunities in Medicine*, *Molecules* **29**, 2584 29:2584 (2024).
<https://doi.org/10.3390/MOLECULES29112584>
- [5] Arpagaus, C., Collenberg, A., Rütli, D. et al., *Nano spray drying for encapsulation of pharmaceuticals*, *Int J Pharm* **546**,194–214 (2018).
- [6] Nano Spray Dryer B-90 literature review and applications, Buchi.com.
https://www.buchi.com/es/conocimiento/aplicacionesnano_spray_dryer_b_90_literature_review_and_applications. Accessed 25 Sep 2025
- [7] Anandharamakrishnan, P. C., Ishwarya, S., *Spray Drying Techniques for Food Ingredient Encapsulation*, First Edition, (John Wiley & Sons, USA, 2015).
- [8] Attri, N., Kaur, S., Aggarwal, P. et al., *Spray Drying: A Promising Technique in Food Processing – Concept, Applications, and Latest Advancements. Novel Drying Technologies in Food Science* [Working Title].
<https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.1009780>
- [9] Arpagaus, C., *A Short Review on Nano Spray Drying of Pharmaceuticals*, *J Nanomed Nanosci* **3**,149 (2018).
- [10] Strojewski, D., Krupa, A., *Spray drying and nano spray drying as manufacturing methods of drug-loaded polymeric particles*, *Polymers in Medicine* **52**,101–111 (2022).
<https://doi.org/10.17219/PIM/152230>
- [11] Arpagaus, C., John, P., Collenberg, A., Rütli, D., *Nanocapsules formation by nano spray drying*, *Nanoencapsulation Technologies for the Food and Nutraceutical Industries* 346–401 (2017).
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809436-5.00010-0>
- [12] Heng, D., Lee, S. H., Ng, W. K., Tan, R. B., *The nano spray dryer B-90*, *Expert Opin Drug Deliv* **8**, 965–972 (2011). <https://doi.org/10.1517/17425247.2011.588206>
- [13] Anandharamakrishnan, C., Ishwarya, S. P., *Introduction to spray drying*, *Spray Drying Techniques for Food Ingredient Encapsulation* 1–36 (2015).
<https://doi.org/10.1002/9781118863985.CH1>
- [14] Lee, S. H., Heng, D., Ng, W. K. et al., *Nano spray drying: A novel method for preparing protein nanoparticles for protein therapy*, *Int J Pharm* **403**, 192–200 (2011).
<https://doi.org/10.1016/J.IJPHEM.2010.10.012>
- [15] Riehle C (1997) Basic and theoretical operation of ESPs. *Applied Electrostatic Precipitation* 25–88.
https://doi.org/10.1007/978-94-009-1553-4_3
- [16] Heng, D., Lee, S. H., Ng, W. K., Tan, R. B., *The nano spray dryer B-90*, *Expert Opin Drug Deliv* **8**, 965–972 (2011). <https://doi.org/10.1517/17425247.2011.588206>
- [17] Alhajj, N., O'Reilly, N. J., Cathcart, H., *Designing enhanced spray dried particles for inhalation: A review of the impact of excipients and processing parameters on particle properties*, *Powder Technol* **384**, 313–331 (2021).
<https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2021.02.031>
- [18] Vehring, R., *Pharmaceutical Particle Engineering via Spray Drying*, *Pharm Res* **25**, 999 (2007).
<https://doi.org/10.1007/S11095-007-9475-1>
- [19] El-badrawi, H. H., Hafez, E. S., Fayad, M., Shafeek, A., *Transport Phenomena* 2nd ed (Wiley, USA, 2002).
- [20] Vehring, R., Foss, W. R., Lechuga-Ballesteros, D., *Particle formation in spray drying*, *J Aerosol Sci* **38**, 728–746 (2007).
- [21] Vehring, R., Snyder, H., Lechuga-Ballesteros, D., *Spray Drying*, *Drying Technologies for Biotechnology and Pharmaceutical Applications* 179–216 (2020).
<https://doi.org/10.1002/9783527802104.CH7>
- [22] Ordoubadi, M., Gregson, F. K. A., Wang, H. et al., *On the particle formation of leucine in spray drying of inhalable microparticles*, *Int J Pharm* **592**, 120102 (2021).
<https://doi.org/10.1016/J.IJPHEM.2020.120102>
- [23] Wang, W., Wang, Y. J., Wang, D. Q., *Dual effects of Tween 80 on protein stability*, *Int J Pharm* **347**, 31–38 (2008).
<https://doi.org/10.1016/J.IJPHEM.2007.06.042>
- [24] Fontana, M. C., Durli, T. L., Pohlmann, A. R., et al., *Polymeric controlled release inhalable powder produced by vibrational spray-drying: One-step preparation and in vitro lung deposition*, *Powder Technol* **258**, 49–59 (2014).
<https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2014.03.011>

- [25] Shehata, T. M., Ibrahima, M. M., (*BÜCHI nano spray dryer B-90: a promising technology for the production of metformin hydrochloride-loaded alginate-gelatin nanoparticles*, Drug Dev Ind Pharm **45**, 1907–1914 (2019).
- [26] Fabela, F., Secado por aspersión. In: Espinosa Hugo, García Eristeo (eds) Tecnologías de nano/microencapsulación de compuestos bioactivos, 1º, 189–199 (2017).
- [27] Castro-Muñoz, R., Barragán-Huerta, B. E., Yáñez-Fernández, J., *Use of gelatin-maltodextrin composite as an encapsulation support for clarified juice from purple cactus pear (Opuntia stricta)*, LWT - Food Science and Technology **62**, 242–248 (2015).
- [28] Schmid, K., Arpagaus, C., Friess, W., Evaluation of the Nano Spray Dryer B-90 for pharmaceutical applications, Pharm Dev Technol **16**, 287–294 (2011).
<https://doi.org/10.3109/10837450.2010.485320>

“Luz, Cámara... ¡Acción!” o Luz, Campo magnético, Gravedad

EDV CATIO PHYSICORVM



ISSN 1870-9095

Jeremías Romero

Universidad Tecnológica Nacional – Facultad Regional La Rioja, Argentina.

E-mail: romerojeremias86@gmail.com

(Recibido el 11 de febrero de 2025, aceptado el 23 de mayo de 2025)

Resumen

Este trabajo tiene por objetivo presentar una teoría alternativa que brinde una nueva explicación acerca del fenómeno de la gravedad. Para esto, se realiza, por un lado, un análisis racional de los postulados utilizados para dar validez a la teoría propuesta, y por otro, se presentan los experimentos necesarios para su confirmación. Esto último, representa una ventaja respecto de las teorías actuales. Además, desde una perspectiva didáctica, se recurre a los conceptos de transposición didáctica de Chevallard y conducta fosilizada de Vygotsky, conceptos que permiten u obligan a realizar una revisión constante de las teorías vigentes.

Palabras clave: gravedad, luz, transposición didáctica, enseñanza, epistemología.

Abstract

This work aims to present an alternative theory that provides a new explanation about the phenomenon of gravity. For this, on the one hand, a rational analysis of the postulates used to validate the proposed theory is carried out, and on the other, the experiments necessary for its confirmation are presented. The latter represents an advantage over current theories. Furthermore, from a didactic perspective, Chevallard's concepts of didactic transposition and Vygotsky's fossilized behavior are used, concepts that allow or force a constant review of current theories.

Keywords: Gravity, light, didactic transposition, teaching, epistemology.

I. INTRODUCCION

Cómo es de suponer, el título busca atraer la atención del lector y se basa en que los conceptos de luz y gravedad están relacionados. Esto se puede demostrar en el principio de funcionamiento de un televisor de rayos catódicos, como se trata de demostrar más adelante (ver B.2.).

Debido a que la temática es una teoría alternativa que requiere de los conocimientos existentes se considera que, además de un título atractivo, también es necesaria una pregunta con las mismas características para generar el interés del lector. De más está agregar, que disparadores de este tipo son esenciales también en el proceso de enseñanza aprendizaje. Teniendo en cuenta que se trata de una investigación científica, no de cualquier tipo de investigación, una pregunta que reúne estos requisitos para introducirnos en el ámbito académico y después en el científico es ¿Cree en Dios? O tal vez la pregunta podría modificarse para guiar al lector hacia donde deseamos ¿Cree en la existencia de Dios?, parecería no cambiar demasiado. Pero si complejizamos la pregunta del siguiente modo ¿“algo” puede existir, pero no ser real? En el caso anterior modificamos la pregunta del siguiente modo ¿Usted cree en la existencia de Dios o cree que es real?

Tomando como referencia lo planteado anteriormente, al analizar un concepto, un tema, una teoría, etc. podemos hacer la misma pregunta: ¿existe?, pero ¿es real? Esto es algo fundamental en relación a la presente investigación y luego también a la enseñanza del conocimiento. Es necesario reflexionar acerca de cómo investigamos, estudiamos o enseñamos algo que existe, pero no es real. Para ser más precisos con que método científico lo

investigamos o en que parte de la ciencia encuadramos aquello que existe, pero no es real.

Ahora es necesario exponer o justificar la estrategia utilizada y presentar como procederemos en el desarrollo del presente trabajo, el cual intenta dar una mejor descripción sobre qué es la gravedad y qué experimentos son necesarios realizar para su demostración.

Como consideramos que el propósito o finalidad es educativa no solo usaremos referencias de rigor técnico científico sino también referencias simples y cotidianas, con información de los ámbitos académicos y científicos (libros, revistas, etc.) como así también información al alcance de la mayoría de las personas con acceso a internet (buscadores, buscadores e información científica, sitios web), ya que se desconoce el nivel de los conocimientos en la temática tratada que pueda llegar a tener el o los lectores, y si dicho lector desea usar lo expuesto en el presente trabajo como material didáctico.

La impronta didáctica que tiene el presente, se debe a que se recurre a los resultados preliminares a la investigación realizada en la Tesis de la Maestría en Docencia Universitaria denominada: “El proceso de Transposición didáctica en la enseñanza de la física en las carreras de Ingeniería Electromecánica de las UTN a partir de un relevamiento bibliográfico”, el que se toma como antecedente.

En cuanto a la forma de llevar adelante el desarrollo del trabajo podemos anticiparlo así: explicación de los conceptos previos en el tipo de investigación a realizar, factores a considerar en la validación del conocimiento utilizado en las investigaciones, ejemplo práctico a modo de justificación, descripción de carácter racional sobre las

teorías existentes y la nueva teoría propuesta, planteo de los experimentos a realizar para la confirmación de la nueva teoría, finalizando con la conclusión.

II. CONCEPTOS O DEFINICIONES PREVIAS RESPECTO AL CONOCIMIENTO PRODUCIDO EN LAS INVESTIGACIONES

Tratando de resumir la situación optaremos por citar tres trabajos sobre el conocimiento, el primero se refiere a las ideas previas sobre un conocimiento, el segundo y el tercero a su evolución histórica. Ya que si se plantea una temática compleja en la cual se propone una teoría alternativa es necesario una buena contextualización que justifique la estrategia utilizada para describir el trabajo realizado. A su vez también para ir introduciendo al lector en un aspecto que, si bien no es central en la investigación, pero sí para tener presente ante una pregunta simple como ser ¿Por qué ciertos cambios en el conocimiento requieren de muchos años para su concreción? Como ser el cambio de la teoría geocentrista a la heliocentrista.

Dentro de los trabajos mencionamos el de las ideas previas del concepto de fuerza de César Mora y Diana Herrera [1] sobre cómo afecta el conocimiento que tiene una persona al momento de ser participe del proceso de enseñanza-aprendizaje y el trabajo “Evolución histórica del concepto fuerza” Parte 1 y de 2 de JM Rivera-Juárez, J Madrigal-Melchor, E Cabrera-Muruato y por último, C Mercado [2, 3] donde exponen todo el camino y los cambios sufridos por un conocimiento fundamental en la educación actual.

Por lo que consideramos o tengemos la necesidad de que en esta sección se dejen lo más claro y definido posible las ideas, conceptos, definiciones, y otros conocimientos utilizados en el desarrollo del presente trabajo que permitan una rápida y mejor comprensión de lo planteado en la investigación.

Empecemos con lo más simple, la ciencia y sus divisiones: Ciencia Formal y Ciencia Fáctica (Subdividas en Sociales y Naturales).

Del Diccionario de la Lengua Española [4]

“Ciencia: (Del Lat. scientia) f. 1. Conjunto de conocimientos obtenidos mediante la observación y el razonamiento, sistemáticamente estructurados y de los que se deducen principios y leyes generales con capacidad predictiva y comprobables experimentalmente”.

“Formal: (Del lat. formalis). Adj. 1. Perteneciente o relativo a la forma, por contraposición a esencial. 2. Que tiene formalidad. 3. Dicho de una persona seria, amiga de la verdad y enemiga de bromas. 4. Expreso, preciso, determinado. 5. Que usa símbolos definidos y estipulados en algún sistema. Análisis formal, lenguajes formales.”

“Fáctico, ca: (Del lat. Factum “hecho”). Adj. 1 Perteneciente o relativo a los hechos. 2. Fundamentado en hechos o limitado a ellos, en oposición a teórico o imaginario.”

“Social: (Del lat. socialis). Adj. 1. Perteneciente o relativo a la sociedad”

“Natural: (Del lat. naturalis). Adj. 1. Perteneciente o relativo a la naturaleza o conforme a la cualidad o propiedad de las cosas.”

Parecería no ser de gran ayuda las definiciones, pero si decimos cuales son las ciencias que pertenecen a las

formales las cuales son la lógica y la matemática, además considerando que fáctica es en oposición a teórico e imaginario, trayendo la pregunta en el apartado de la introducción de que, si algo puede existir, pero no ser real. Entonces la ciencia formal se encarga de aquello que es teórico o imaginario que existe, pero no es real.

Necesariamente ¿Cómo determinamos que algo es real? Tal vez una discusión antigua.

Si no se lo puede ver, ni observar efectos de interacción con otros objetos, sustancias o excitados por energía.

Si no lo puede escuchar, ni oír efectos de su interacción con otros objetos, sustancias o excitados por energía.

Si no lo puedo tocar.

Si no puede conocer su sabor o modificar su sabor en una mezcla o dilución.

Si no puede conocer su olor o modificar el olor en una mezcla o dilución.

Es decir, si no puede ser apreciado por los sentidos estamos ante un ente imaginario.

Aquí es necesario una observación respecto a una problemática. Si tenemos entes imaginarios y tenemos los diferentes estados de la materia sumando a las diferentes formas de energía, cómo determinar o discernir si son reales o imaginarios cuando se está tratando con elementos que usamos frecuentemente en la vida cotidiana y son además utilizados en cuestiones técnicas o investigaciones, que nos resultan tan familiares, que solemos no cuestionarlos o planteamos a que parte de la ciencia pertenecen, esto parecería algo sin sentido, pero es muy importante si planteamos una investigación que requiere de una demostración empírica.

Antes de continuar se toma la decisión de hacer la referencia como entes imaginarios para que sea más general y no definirlo de manera específica, a fin de evitar que parezca que solo se aplica a un aspecto particular del conocimiento.

Vamos a hacer referencia a la forma de proceder que propusieron Rene Descartes y Francis Bacon por la cual, posteriormente se construyó la referencia del método científico, es decir, la forma de validar o separar al conocimiento general del científico.

En su discurso del método descartes lo describe en 4 partes:

“Fue el primero, no admitir como verdadera cosa alguna, como no supiese con evidencia que lo es; es decir, evitar cuidadosamente la precipitación y la prevención, y no comprender en mis juicios nada más que lo que se presentase tan clara y distintamente a mí espíritu, que no hubiese ninguna ocasión de ponerlo en duda.

El segundo, dividir cada una de las dificultades, que examinare, en cuantas partes fuere posible y en cuantas requiriese su mejor solución.

El tercero, conducir ordenadamente mis pensamientos, empezando por los objetos más simples y más fáciles de conocer, para ir ascendiendo poco a poco, gradualmente, hasta el conocimiento de los más compuestos, e incluso suponiendo un orden entre los que no se preceden naturalmente.

Y el último, hacer en todo unos recuentos tan integrales y unas revisiones tan generales, que llegase a estar seguro de no omitir nada” [5].

Estos pasos utilizados o mencionados por Descartes conllevan a que se lo referenciara como Racional y que posibilita la pregunta ¿Y qué sucede si no dudamos del

conocimiento que se considera debidamente probado? Vinculado a la pregunta ¿Cómo demostramos empíricamente un ente imaginario?

Por lo que deja la reflexión de que si es el resultado de un razonamiento lógico y no tenemos por qué dudar de dicha conclusión es válido y útil cuando tratamos con entes imaginarios, pero y ¿al tratar con fenómenos que requieren de demostraciones empíricas?

Es conveniente exponer que las preguntas son solo para despertar el interés y la duda en el lector sobre los conceptos o conocimientos utilizados para el objetivo de nuestra investigación sin importar si dichas preguntas tienen una respuesta, ya que en la ciencia cuántas preguntas no tienen una respuesta sino varias teorías que intentan darles respuesta. Por esto es que en cada etapa del desarrollo del presente trabajo se realizan preguntas y que en nuestro caso, al dudar sobre ciertas temáticas nos generan la necesidad de buscar, o mejor dicho investigar.

Pasando a lo expuesto por Francis Bacon sobre su *Nuovom Organum*, si bien no respeta el orden en el que fue escrito se considera mejor de esta manera para nuestro propósito.

“95. Las ciencias han sido tratadas o por los empíricos o por los dogmáticos. Los empíricos, semejantes a las hormigas, sólo deben recoger y gastar; los racionalistas, semejantes a las arañas, forman telas que sacan de sí mismos; el procedimiento de la abeja ocupa el término medio entre los dos; la abeja recoge sus materiales en las flores de los jardines y los campos, pero los transforma y los destila por una virtud que le es propia. Ésta es la imagen del verdadero trabajo de la filosofía, que no se fia exclusivamente de las fuerzas de la humana inteligencia y ni siquiera hace de ella su principal apoyo; que no se contenta tampoco con depositar en la memoria, sin cambiarlos, los materiales recogidos en la historia natural y en las artes mecánicas, sino que los lleva hasta la inteligencia modificados y transformados. Por esto todo debe esperarse de una alianza íntima y sagrada de esas dos facultades experimental y racional, alianza que aún no se ha verificado.” [6] pág. 143.

“63. Un ejemplo muy manifiesto del primer género, se observa en Aristóteles que ha corrompido la filosofía natural por su dialéctica; construye el mundo con sus categorías; atribuido al alma humana esa noble substancia, una naturaleza expresada por términos de segunda intención; zanjado la cuestión de lo denso y de lo raro que dan a los cuerpos mayores o menores dimensiones en extensión, por la pobre distinción de la potencia y del acto; dado a cada cuerpo un movimiento único y particular, y afirmado que, cuando un cuerpo participa de un segundo movimiento, proviene éste del exterior, e impuesto a la naturaleza otra infinidad de leyes arbitrarias. Siempre han atendido más a dar cierto aparato de lógica a sus respuestas y dar al espíritu algo de positivo en los términos, que, de penetrar en la realidad, esto es lo que más llama la atención comparando su filosofía con los otros sistemas en predicamento entre los griegos. En efecto: las homeomerías de Anaxógoras, los átomos de Leucipo y Demócrito, el cielo y la tierra de Parménides, el odio y la amistad de Empédocles, la resolución de los cuerpos en el elemento indiferente del fuego, y su vuelta al estado de densidad, de Heráclito, revelan su filosofía natural, y tienen cierto sabor de experiencia y realidad, mientras que la física de Aristóteles, no contiene de ordinario otra cosa más que los

“Luz, Cámara... ¡Acción!” o Luz, Campo magnético, Gravedad términos de su dialéctica, dialéctica que más tarde rehizo bajo el nombre más solemne de metafísica, en la que, según él, debían desaparecer por completo los términos ante la realidad. Y nadie se maravilla acordándose de que sus libros sobre los animales, los problemas y otros tratados también, están henchidos de hechos. Había comenzado Aristóteles por establecer principios generales, sin consultar la experiencia y fundar legítimamente sobre ella los principios, y después de haber decretado a su antojo las leyes de la naturaleza, hizo de la experiencia la esclava violentada de su sistema; de manera que, a este título, merece aún más reproches que sus sectarios modernos (los filósofos escolásticos) que han olvidado la experiencia por completo.

64. Pero la filosofía empírica ha dado a luz opiniones más extrañas y monstruosas que la filosofía sofística y racionalista, porque no se fundaba en la luz de las nociones vulgares (luz débil y superficial, es verdad, pero en cierto modo universal y de gran alcance) sino en los límites estrechos y oscuros de un reducido número de experimentos. Por esto es por lo que semejante filosofía, a los ojos de los que pasan la vida haciendo ese género de experimentos y tienen de ellos infestada la imaginación, digámoslo así, parece verosímil y casi cierta; a los ojos de los otros inadmisibles y vana. Encontramos de ello un ejemplo notable en los sistemas de los químicos; pero en la época presente en parte alguna se encontraría, a no ser en la filosofía de Gilberto. Sin embargo, no deja de ser muy importante ponerse en guardia contra tales sistemas, pues prevemos y auguramos ya que, si el espíritu humano excitado por nuestros consejos, seriamente se vuelve hacia la experiencia, despidiéndose de las doctrinas sofísticas, entonces por su precipitación, por su atracción prematura y el salto, o mejor dicho, el vuelo por el que se elevará a las leyes generales y a los principios de las cosas, se le ofrecerá peligro constante de caer en ese género de sistemas, por lo que, desde ahora, debemos salir al paso de ese peligro.

65. La filosofía corrompida por la superstición e invadida por la teología, es el peor de todos los azotes, y el más temible para los sistemas en conjunto o para sus diversas partes. El espíritu humano no es menos accesible a las impresiones de la imaginación que a las de las nociones vulgares. La filosofía sofística es batalladora, aprisiona el espíritu en sus lazos; pero esa otra filosofía, hinchada de imaginación, y que se asemeja a la poesía, engaña mucho más al espíritu. Hay, en efecto, en el hombre, cierta ambición de inteligencia lo mismo que de voluntad, sobre todo en los espíritus elevados. Se encuentran en Grecia ejemplos palpables de ese género de filosofías, particularmente en Pitágoras, en el que la superstición es de las más grandes y groseras; en Platón y en su escuela, en que es a la vez más manifiesta y peligrosa. Se encuentra también la superstición en ciertas partes de los otros filósofos, en las que se han introducido las formas abstractas, las causas finales y las causas primeras, y en las que se omite las causas medias y otras cosas importantes. Toda precaución para huir de tal peligro es poca; pues la peor cosa del mundo, es la apoteosis de los errores, y debe considerarse como el primer azote del espíritu, la autoridad sagrada concedida a vanas ficciones. Algunos modernos han incurrido en ese defecto con tal ligereza, que han intentado fundar la filosofía natural sobre el primer capítulo del Génesis, el libro de Job, y otros tratados de la Santa Escritura, interrogando la muerte en medio de la

vida. Es tanto más necesario que de la mezcla impura de las cosas divinas y las humanas, salga no sólo una filosofía quimérica, si que también una religión herética. Es, pues, un precepto muy saludable, contener la intemperancia del espíritu, no dando a la fe sino lo que es materia de fe.” [6] pp. 103 a 106.

Si bien extenso, pero necesario porque se trata de la ciencia y especialmente de como se ha justificado el conocimiento en general y el científico en particular nos remontados a situaciones o procedimientos pasados. Esto es muy importante o fundamental si consideramos que vamos a realizar una investigación y tomamos conocimientos que suponemos ya debidamente validados, pero ¿están debidamente justificados? O en un momento de la historia de la humanidad bajo determinados criterios fueron aceptados, pero con el avance de la tecnología pueden sufrir correcciones al poder realizarse experimentos más precisos.

Esto nos da pie, por decirlo de una manera más directa, a insertar al trabajo lo expuesto por Popper, de la versión en inglés de su trabajo *The logist of scientific discovery*. Donde el autor inicia su trabajo con la pregunta ¿Cuál es este método de las ciencias empíricas? En su primer capítulo: El problema de la inducción, plantea que está ampliamente aceptado el uso de los métodos inductivos por consiguiente la lógica inductiva con los análisis lógicos de esos métodos inductivos. Sigue, por señalar que es común llamar inferencia inductiva cuando se pasa de una declaración singular como el resultado de la observación o experimentación a una declaración general como hipótesis o teorías [7]. Básicamente cuestiona que un resultado experimental (positivo) no permite demostrar una hipótesis o teoría general, es condición necesaria pero no suficiente, esto lo lleva a afirmar que, sin importar cuantos cisnes blancos veamos, no podemos generalizar afirmando que todos los cisnes son blancos ya que sabemos de la existencia de cisnes negros.

Agregaremos dos definiciones más:

Inferir (Del lat. Inferre “llevar a” conjug. Actual c. sentir). Tr. 1. Deducir algo o sacarlo como conclusión de otra cosa. Se infiere de su rostro que está contento 2. Producir un daño físico o moral. El escándalo infirió un duro golpe a su reputación. 3. Deus. Incluir o llevar consigo algo. Las premisas infieren la conclusión [4].

Inducir (Del lat. Inducere. Conjug. C. conducir). Tr. 1. Mover a alguien a algo o darle motivo para ello. Todo me induce a pensar que no vendrá. 2. Provocar o causar algo. El médico decidió inducir el parto. 3. Fil. Extraer, a partir de determinadas observaciones o experiencias particulares, el principio general implícito en ellas [4].

Si bien parece que estamos repitiendo lo mismo o se da vueltas sobre lo mismo, esto es necesario, y el lector se dará cuenta del porqué cuando se explique o describa el apartado sobre la nueva teoría que se propone, lo cual se tratará en el punto V.

Siendo un poco más sintéticos y directos, los objetos formales en tanto entes imaginarios se deducen, por ende, solo basta una inferencia y que, al no dudar de la lógica aplicada, estos son validados. En cambio, en el caso de los objetos fácticos, las demostraciones empíricas (a veces experiencia práctica sobre determinados fenómenos) son necesarias para validar el conocimiento y generalmente en este caso, una vez obtenido un resultado empírico positivo ya se permite su generalización. Aquí se corre el riesgo de estar ante una generalización apresurada derivada de una

inferencia inductiva, es decir, partiendo de una constatación empírica y realizando una deducción por medio de un razonamiento lógico se corre el riesgo de justificar los resultados por un camino incorrecto. Esto nos lleva a que es necesario reflexionar sobre que sucede si planteamos una investigación buscando una demostración empírica sobre un ente imaginario.

Porque es un riesgo al estilo del que se da en el caso de una inferencia podemos estar ante una inducción.

III. EL CONOCIMIENTO UTILIZADO ESTA DEBIDAMENTE VALIDADO, FACTORES A CONSIDERAR EN SU CONFORMACIÓN

Dado que el objetivo de este trabajo es exponer una teoría alternativa que explique el fenómeno de la gravedad es necesario mostrar sus discrepancias con las teorías actuales. Aquí es necesario en primer lugar revisar como surgieron, donde lo más importante de analizar es el conocimiento utilizado para dar surgimiento a las mismas.

Ya que mucho del conocimiento de la física no es actual siendo sus bases o cimientos: leyes, principios, postulados, teorías y otros que llevan años, décadas, siglos o milenios de utilización (principio de Arquímedes 287 A.C., leyes de Newton 1687). Por lo que consideramos importante de agregar el presente inciso que nos permita darle un contexto al conocimiento sobre: la generación, la enseñanza y la utilización en la investigación, debido al control previo a su utilización por partir de una base incorrecta. Para ello nos valdremos de dos teorías que son la transposición didáctica de Chevallard (1991) y la conducta fosilizada de Vygotsky (1979).

Respecto a la transposición didáctica, se suele mencionar que es el proceso que sufre el “saber sabio” (conocimiento científico) y las modificaciones sobre este por la intervención del didacta pasando a ser “el saber enseñado” (conocimiento enseñado), para determinar si esto sucedió Chevallard planteo lo siguiente “*Pero existe otra manera de plantear el problema de la existencia de la transposición didáctica: una manera de plantear ese problema que participa del principio de vigilancia epistemológico, que el didacta debe observar constantemente*” [8]. La forma en la que he utilizado lo planteado es la del control sobre el origen del conocimiento que se “elevó” para ser considerado científico, por tal motivo se debe buscar en su origen para saber si con el transcurso del tiempo este conocimiento no sufrió modificaciones o alteraciones.

Ahora mencionaremos sobre una parte de lo planteado por Lev Vygotsky en su trabajo *El desarrollo de los procesos psicológicos superiores* capítulo 5 problemas el método, contextualizando, plantea una crítica y la comparación sobre el método usado por la psicología versus “su método de investigación”.

“El problema de la “conducta fosilizada”. El tercer principio subyacente a nuestra aproximación analítica está basado en el hecho de que, en psicología, hallamos a menudo procesos que ya han desaparecido, es decir, procesos que han recorrido un largo estadio de desarrollo histórico y han terminado por fosilizarse. Estas formas fosilizadas de conducta se encuentran más fácilmente en los procesos psicológicos llamados automáticos o mecanizados, que, a causa de su antiguo origen, se repiten

ahora millones de veces, quedando totalmente mecanizados. Han perdido su apariencia original, de modo que su aspecto externo no nos dice absolutamente nada acerca de su naturaleza interna. Su carácter automático crea grandes dificultades al análisis psicológico. Los procesos que, tradicionalmente, hemos denominado como atención voluntaria e involuntaria, proporcionan un ejemplo elemental que demuestra cómo ciertos procesos esencialmente distintos adquieren una similitud externa como resultado de su automatización. Evolutivamente hablando, estos dos procesos difieren profundamente. No obstante, en psicología experimental se considera un hecho, tal como lo formuló Titchener, que la atención voluntaria, una vez establecida, funciona exactamente igual que la atención involuntaria. En términos de Titchener, la atención “secundaria” cambia constantemente en atención “primaria”. Después de describir y comparar ambos tipos de atención, Titchener afirmó: “Existe, sin embargo, un tercer estadio en el desarrollo de la atención, que consiste nada menos que en un retorno al primer estadio”. El estadio último y superior en el desarrollo de todo proceso puede mostrar una semejanza puramente fenotípica con los primeros estadios. Así pues, si partimos de una aproximación fenotípica, resulta imposible distinguir entre las formas superiores e inferiores de dicho proceso. El único modo de estudiar este tercer y último estadio del desarrollo de la atención e a través de la comprensión de éste en todas sus diferencias e idiosincrasias. En pocas palabras, hemos de comprender su origen. A continuación, hemos de centrarnos, no el producto del desarrollo, sino en el proceso mismo, por el que se establecen las formas superiores. Al actuar de este modo, el investigador se ve a menudo forzado a alterar el carácter automático, mecanizado y fosilizado de las formas superiores de conducta y devolverlas a su fuente original a través del experimento. Este es el objetivo del análisis dinámico” [9].

Extenso pero necesario, ya que la transposición didáctica nos permite sintetizar que sucedió, pero el análisis sobre “el conocimiento fosilizado” nos permite comprender el proceso sufrido ya que hay teorías o conocimientos que fueron adaptaciones de un área del saber a otro campo disciplinario por lo que un conocimiento puede haber sufrido una transposición desde su origen y además otra transposición al implementarse en otra área del saber. Si se nos permite, siendo el conocimiento en general y científico en particular que posee reglas y métodos específicos, pero al final del día sigue siendo el resultado de las acciones de seres humanos y como sabemos somos falibles. En esta teoría y método propuesto por Vygotsky que es más preciso en cuanto desde donde tenemos que empezar el análisis para su comparación y poder describir el proceso sufrido. Ya que por un lado, si no se controla previo a su utilización estamos basando una investigación sobre una base incorrecta y por el otro mucho de los conceptos, teorías suelen provenir inclusive de la antigua Grecia, por lo que es demasiado tiempo para que no hayan sufrido modificaciones y si estos procesos sufridos hasta quedar fosilizados sin un correcto control pueden terminar siendo transposiciones que no guardan relación a su origen por más que en un determinado periodo de tiempo haya sido debidamente justificado.

Como una síntesis reflexiva de lo planteado en este apartado con la referencia a la pregunta ¿Qué fue primero el huevo o la gallina? Se suele utilizar como un indicativo de la complejidad de un asunto, pero un análisis simple aquello

“Luz, Cámara... ¡Acción!” o Luz, Campo magnético, Gravedad

que llamamos huevo existe desde el tiempo de los dinosaurios y el animal al que denominamos gallina según la teoría evolutiva, surge de un animal de similares características que fue adaptándose mejor a los cambios sufridos en el ambiente. Por lo que el huevo existe unos cientos de millones de años previo a la gallina.

Llevado al conocimiento enseñado en las escuelas que luego los estudiantes tienen como base sobre el cual se enseñan conocimientos más complejos y avanzados como en la universidad, este es una aproximación muy limitada, descontextualizada de los procesos sufridos durante el paso del tiempo y por consiguiente al estudiante se le dificulta la comprensión del conocimiento que está más próximo al científico como el enseñado en las universidades. No se podría plantear lo mismo respecto a conocimientos que se definen como científicos, es decir, debidamente validados, pero sin un control previo como podemos decir que no has sufrido transposiciones y lo que se utiliza es en realidad un conocimiento fosilizado desde hace décadas que no guarda relación alguna con su origen.

IV. EJEMPLO, LO SUCEDIDO CON EL CONCEPTO FÍSICO DE MASA

Como se mencionó en la introducción, previamente se realizó una tesis bajo el título “El proceso de la Transposición didáctica en la enseñanza de la física en las carreras de Ingeniería Electromecánica de las UTN a partir de un relevamiento Bibliográfico”.

Aquí vamos a sintetizar los aspectos más destacados de dicho trabajo que permiten una justificación o dan cuenta de la importancia de lo propuesto hasta el momento.

Para demostrar la transposición didáctica utilizaremos la traducción realizada a la definición de “masa” de Issac Newton en su *Principia* del latín.

“DEFINICIÓN PRIMERA

La cantidad de materia es la medida de la misma originada de su densidad y volumen conjuntamente.

El aire dos veces más denso, en también doble espacio, es cuádruple, en triple espacio, séxtuple. Lo mismo se debe entender de la nieve o del polvo condensados por compresión o licuefacción. Y esta misma es la razón para todos los cuerpos que por cualquier causa se condensan de modos diversos.

No tengo, en cambio, aquí razón ninguna para un medio, si hubiere alguno, que atravesase libremente los intersticios de las partes. A esta cantidad llamo en lo sucesivo cuerpo o masa. Se hace manifiesta por el peso de cualquier cuerpo, pues, por medio de experimentos muy exactos con péndulos, hallé que era proporcional al peso, como después se mostrará” [10].

Pero La definición en latín en su escrito original

“Definitiones. Def. I.

Quantitas Materiae est mensura ejusdem orta ex illius Densitate & Magnitudine conjunctim Aer duplo densior in duplo spatio quadruplus est. Idem intellige de Nive et Pulveribus per compressionem vel liquefactionem condensatis. Et par est ratio corporum omnium, quæ per causas quascunq; diversimode condensantur. Medii interea, si quod fuerit, interstitia partium libere pervadentis, hic nullam rationem habeo. Hanc autem quantitatem sub nomine corporis vel Massæ in sequentibus passim intelligo. Innotescit ea per corporis cujusq; pondus.

Nam ponderi proportionalem esse reperi per experimenta pendulorum accuratissime instituta, uti posthac docebitur" [11].

Para no extendernos demasiado, la palabra *Materiae* (con la "e" al final) no se traduce como materia sino "material", esto es evidente ya que una persona que realizó Filosofía natural en el 1680, es decir, ciencia natural y realiza experimentos (con péndulos) para demostrar sus postulados, utilizaría una terminología precisa. Esto surge de lo encontrado en los siguientes diccionarios de latín al español Nuevo diccionario latino español etimológico de De Miguel y De Morarte (1867) [12], VoX Diccionario ilustrado latino-español español-latino de Mir (1982) [13].

Primero, de El nuevo diccionario latino-español etimológico extraemos:

- *Mātēria*, æ, y *mātēries*, ēi, f. [de *mater*]. Col. La materia, el material; Asunto, motivo; Medio, ocasión; Todo género de madera; Naturaleza, índole, genio; Col. Raza, casta (h. de caballos); Cels.

Sustancia alimenticia, alimentos; Gell. *Materia*, tema, tesis; Cic. Ocasión, causa, pretexto. —

Materiēs vatum, Ov., objeto de los cantos de los poetas. De *apparitiōne materiæ*, Vitruv., en cuanto a la manera de preparar los materiales

- *Firmītas*. ātis, f. [de *firmus*], Caes. Firmeza, estabilidad, constancia. - *Firmītas corpōris*, Cic., la robustez del cuerpo. *Firmītas vocis*, Gell., fuerza de la voz. *Firmītas vini*, Plin., fuerza del vino.

Firmītas aevi, Plin., larga duración. *Firmītas animi*, Cic., entereza de ánimo. *Firmītas imperiī*, Suet., estabilidad del mando (del gobierno, del reinado). *Firmītas materiæ*, Cies., solidez de los materiales

Ahora del diccionario Vox ilustrado:

- *Materia* - æ [o -iēs -iēi] f.: materia (m. rerum, el principio físico de las cosas) || material, esp. Madera de construcción (m. cæsa, árboles cortados) || materia, tema, objeto (m. sermonis, tema de una conversación) || motivo, pretexto (*materiam dare invidiæ*, dar motivo al odio) || fondo moral, carácter, madera (*fac fuisse in isto materiem Catonis*, supón que haya habido en ese hombre la madera de un Catón)

Ahora bien, en la actualidad se tiene o se refiere a la masa como la medida de la inercia, donde para conocer la masa de un cuerpo solo basta con aplicar una fuerza de valor conocido y medir la aceleración que este sufre, entonces al dividir la fuerza en la aceleración sabremos la masa del cuerpo. Pero ¿cómo hacemos para medir la masa de un fluido? debido a ¿Cómo aceleramos un fluido?

Se puede apreciar que hay una inconsistencia respecto a que la masa sea una medida de la inercia y que lo definido por Newton no se condice con las referencias en la actualidad.

Consideremos los siguientes planteamientos

La masa es proporcional al peso, entonces, cuánto pesa un trasatlántico (barco como el Titanic) su peso debemos medirlo en toneladas y motiva la pregunta por qué no se hunden siendo que son tan pesados y la densidad del metal utilizada en algunos de esos tipos de barcos es muy superior a la del agua, por ende, deberían hundirse y no flotar. Entonces se puede reformular la pregunta del siguiente modo: ¿En el movimiento es primordial considerar la masa?

Tenemos 3 cantidades iguales de masa del mismo material, cantidad 1, cantidad 2 y cantidad 3: a la cantidad 1, le damos forma de ancla; a la cantidad 2, le damos forma

de esfera y la cantidad 3, forma de lámina u hoja (una chapa).

Tomemos dos casos el caso I y el caso II, donde intervienen las tres cantidades mencionadas previamente. Para que no queden dudas respecto a la respuesta de si ¿el movimiento de un cuerpo depende de la masa?

Caso I:

Si tenemos un plano inclinado de un ángulo de 45°.

Si colocamos los 3 objetos en la mitad de dicho plano inclinado, cual se moverá hacia abajo y cuál no. La esfera rodará hasta abajo, pero el ancla y la lámina a lo sumo caerán hacia arriba o abajo según se las arroje, pero no se deslizarán hacia abajo. Ahora alguien correctamente podría decir, pero depende del material que sean los objetos y la rampa ya que si los materiales tienen muy pero muy baja fricción los tres cuerpos se deslizarían hacia abajo. Pero considerando materiales comunes esto no sucedería, solo la esfera podría bajar por el plano inclinado.

Caso II:

A los tres objetos los introducimos en un recipiente (muy grande) con agua, cuál se hundirá y cuál no, considerando que el material es de mayor densidad que el agua. El ancla se hundirá al igual que la esfera, pero que pasará con la lámina, consideremos que la dejamos suavemente de manera horizontal sobre el agua se hundirá o, como el planteamiento sobre los barcos, dicha lámina flotará.

Otro análisis con un experimento simple como tomar 2 hojas de papel (iguales), a una hacerla un bollo redondo y la otra dejarla como está. Subir a una altura considerable y dejarlas caer al piso desde la misma altura. Sabemos que el bollo de papel caerá en línea recta, pero la hoja de papel dependerá de la posición en la que la soltemos. Donde puede llegar a caer en línea recta sí, pero en la mayoría de los casos saldrá para cualquier lugar menos en línea recta hacia abajo.

En este último planteamiento o ejemplo se deja de manifiesto que lo expresado en la actualidad sobre la masa como medida de la inercia, NO puede ser considerado una buena explicación del concepto y a su vez no guarda ninguna relación con el concepto en sí. Es a lo sumo válido para un caso muy específico de la mecánica de los cuerpos sólidos en el área de la dinámica.

Entonces si la masa no guarda relación con el movimiento ¿qué es?

La masa es un concepto, es decir, un ente imaginario (una idealización, también se podría decir un objeto formal no empírico) que existe en nuestras mentes (porque lo construimos como una representación mental, que pertenece a la ciencia formal), ya que se creó para explicar una relación física ($\text{Fuerza} = \text{masa} \times \text{aceleración}$, debido a la variación de la aceleración gravitatoria al alejarnos del centro del planeta tierra). Pero que empíricamente no se puede demostrar que es real ya que surge de controlar la relación de densidad y volumen (tanto la masa, la densidad y el volumen son escalas matemáticas existentes, pero no son reales).

Como la masa es una relación de tres entes imaginarios permite la ley de conservación de la masa donde si varío la densidad, variara en relación proporcional el volumen, pero dejando constante el valor de masa.

Se concluye que el concepto masa está atravesado por la transposición didáctica ya desde su traducción del latín y se lo asocia a un objeto empírico cuando en realidad no lo es.

Este ejemplo sigue en el mismo camino de lo planteando, el control de los conceptos fundamentales usados como base o cimiento en una investigación porque podemos encontrarnos como le sucedió al concepto de masa que sufrió una transposición didáctica, no guarda relación alguna con su definición, las explicaciones son muy limitadas o solo para casos muy particulares y que dicho conocimiento en textos o investigaciones científicas es una forma fosilizada (que no cuestionamos y por ende no modificamos), y se sigue enseñando de una manera incorrecta.

Se pide disculpas por lo sintético, y por no ser más extensos, realizando mejores descripciones que permitan sea más simple de comprender lo que le sucedió al concepto de masa.

V. ANALISIS RACIONAL DE LAS TEORIAS EXISTENTES Y LA TEORIA PROPUESTA, SOBRE LA EXPLICACION DEL FENÓMENO DE LA GRAVEDAD

Como la temática es compleja optamos por la estrategia de sub dividir la sección siguiente, considerando ir exponiendo los conocimientos previos necesarios en el orden que esperamos facilite al lector conocer la teoría propuesta y comprender la misma.

Se aclara que solo se expondrán los aspectos necesarios o solo dejar los conceptos generales que permitan una comprensión de la temática, ya que existen debates respecto a la justificación de teorías o modelos, sin olvidar que en ciertas áreas utilizan explicaciones que no puede ser demostradas como ser el caso de que se confunde en la electricidad como el movimiento de electrones con el de carga eléctrica en movimiento. Otro caso se menciona la emisión de electrones cuando se emite luz (onda electromagnética), donde (el electrón siempre se mueve alrededor del núcleo) para hacer mover el electrón fuera del núcleo (separarlo) se requiere de radiación ionizante (rayos X, beta, gamma, neutrones libres, etc.) relacionados con procesos o radiación nuclear mientras que existen radiaciones NO ionizantes las que no son peligrosas mientras que no se excedan de los niveles permitidos en las normas de seguridad e higiene: radiación sonora, térmica, lumínica (infrarrojas, ultravioletas), magnéticas, campos eléctricos, ondas electromagnéticas (señales de radio, TV, telefonía, internet, microondas) etc.

A. La gravedad como la curvatura del espacio tiempo

En la actualidad la única teoría que rige su explicación es que la gravedad es la curvatura del espacio tiempo [14]. Entonces como hemos venido desarrollando y reiterando en los distintos apartados, ¿El tiempo es real? El espacio que es sinónimo de volumen ¿es real? Ambas preguntas se responden fácilmente.

Como se expresó en el inciso IV, la masa, la densidad y el volumen son entes imaginarios que pertenecen a la ciencia formal ya que son escalas matemáticas. Esto implica que no se puede tomar como válido la explicación de un fenómeno físico o natural que recurre a la distorsión de dos escalas matemáticas que son dos entes imaginarios ya que no se podrá realizar experimentación alguna que demuestre dicho enunciado.

Si bien existe un experimento que al pasar la luz de una estrella lejana cerca del sol durante un eclipse solar esta luz sufrió una curvatura [14] dicha situación planteó que solo puede explicarse como la curvatura del espacio tiempo ¿o se puede explicar de una manera mucho más simple? Que inclusive millones de personas en el mundo lo han visto en sus hogares.

B. Conocimientos y contextualizaciones necesarias para justificar la nueva teoría

B. 1. La tierra y su campo magnética

Desde hace mucho tiempo se conoce acerca del magnetismo y el campo magnético del planeta tierra como el trabajo de William Gilbert De Magnete (1600). La importancia de este concepto aquí, radica en introducir o recordar que cuando se tiene una carga eléctrica en movimiento se genera un campo magnético y viceversa como lo demostró el experimento de Osterd, tomamos como ejemplo el video del canal *yo también aprendo* de youtube [15], siendo que el polo norte y sur del planeta son además los polos magnéticos.

Con respecto a las líneas de flujo magnético y por ende las líneas de fuerza magnética dejamos el siguiente video de Felipe Montecino Líneas magnéticas de fuerza [16].

Aquí es necesario plantear algunos interrogantes acerca del campo magnético del planeta tierra:

¿La intensidad del flujo magnético es constante o es variable? ¿Posee una frecuencia constante o es variable? ¿El campo magnético del planeta tierra posee una forma de onda definido o todavía no fue determinado en un experimento? Si el planeta tierra genera un campo magnético, los demás planetas ¿poseen un campo magnético? ¿El sol posee un campo magnético?

B. 2. Una Onda electromagnética (luz) es desviada por un campo magnético o campo eléctrico

No realizaremos esfuerzo alguno en intentar dar ni una simple introducción de las ondas electromagnéticas y sus múltiples variantes debido a los rangos de frecuencia de las mismas ya que es un tema muy complejo muy extenso y con muchísimas aplicaciones diferentes. Solo dejaremos lo básico para nuestro propósito y videos de ejemplos que confirmen lo expuesto.

La luz es una onda electromagnética, es decir, es una forma de energía que al “desplazarse” su frecuencia u oscilación le permite pasar de un semiciclo en el cual es energía magnética a otra energía que es campo eléctrico. (Otras ondas electromagnéticas como son las señales de telefonía traspasan las paredes ya que la parte magnética no se ve afectada por la materia mientras los materiales no sean magnéticos).

Aquí una demostración simple con el experimento de tubo de rayos catódicos con la emisión de luz, del canal *educacióntv* Rayos catódicos y televisión [17].

Entonces a una onda electromagnética como lo es la luz podemos desviarla fácilmente de su trayectoria rectilínea si se aplica una atracción o repulsión magnética o de campo eléctrico.

B. 3. Campos magnéticos de forma de ondas y frecuencias variables

Ahora necesitamos mostrar ejemplos referidos a que el ser humano puede generar señales y campos magnéticos de formas de onda y frecuencias variables, ya que por lo expuesto en la subsección 2 la interacción de las ondas electromagnéticas como ser la luz con los campos magnéticos y eléctricos modifican su trayectoria rectilínea.

Del trabajo de May, Quijano y Cab Generador de Campo Magnético Variable [18]:

“El presente trabajo está centrado en el diseño y construcción de un generador de campos magnéticos estables y variables en el tiempo basado en la ley de Biot-Savart y empleando la funcionalidad de las bobinas de Helmholtz mediante corriente alterna y directa. El dispositivo está configurado para generar campos magnéticos continuos con diferente polaridad, así como tres diferentes formas de campo magnético variable: senoidal, triangular y diente de sierra. El control del generador es realizado por un microcontrolador Cy8C5868 AXI-LP035 de la familia 5LP de Cypress Semiconductor, que posee una arquitectura de 32 bits ARM M3 y un conjunto de bloques analógicos internos”.

Para no dejarlo sujeto a la imaginación utilizaremos un video del canal: Electrónica práctica paso a paso osciladores I: Oscilador con relevador donde se dejan los circuitos simples para generar variaciones de intensidad y frecuencia [19].

B. 4. Fuerza sobre una carga eléctrica sometida a un campo magnético

Gracias al experimento de Oersted (1820), al experimento de Ampere (1820) y la ley de Biot-Savart (1820), podemos calcular la Fuerza que sufre una longitud de conductor L por la cual circula una corriente eléctrica I (carga eléctrica en movimiento) sometida a un campo magnético B , la fuerza es perpendicular al plano del producto vectorial corriente y campo magnético, donde el sentido está determinado por la regla de la mano derecha (solo dejaremos esta referencia sin profundizar demasiado).

Esto es el principio de funcionamiento de los motores eléctricos donde para una tipología constructiva de los motores eléctricos de inducción con rotor en cortocircuito, el campo magnético generado por el bobinado o devanado del inductor induce una corriente eléctrica en el rotor (espiras en cortocircuito) dichas espiras del rotor sufren la acción de una fuerza perpendicular que las obliga a girar). Video del canal *cienciabit* experimento de Ampere [20]. Motor eléctrico video del canal *Jorgloff*, demostración del campo magnético giratorio de motor asincrónico trifásico [21].

B. 5. La materia posee masa y carga eléctrica: protón, neutrón y electrón

Aquí es necesario una breve contextualización de los modelos atómicos hasta llegar a la actualidad para ello tenemos la síntesis del canal de YouTube *Es ciencia* [22].

Donde lo importante para este trabajo es que la materia que está constituida por átomos estos poseen protones (carga eléctrica positiva) neutrones (solo masa no posee carga eléctrica) y electrones (carga eléctrica negativa), los

protones y neutrones se encuentran en el centro y los electrones orbitan en radios de energía específicos alrededor del centro, es decir, el radio desde el centro hasta una trayectoria dada solo permite que en “lugar o trayectoria” solo puedan existir una cantidad limitada o definida de electrones, si existe un material posee un protón, neutrón y electrón más este electrón se situara a un radio más alejado del centro ya que el nivel de energía anterior ya está completo.

Entonces si la materia o sustancia (utilizo las dos palabras ya que a veces se toma a la materia solo como materiales en estado sólido) posee carga eléctrica y dicha carga eléctrica está siendo sometida a un campo magnético como el del planeta tierra ¿No debe existir una fuerza perpendicular sobre dicha carga eléctrica?

B. 6. Atracción entre planetas

Aquí recurriremos a una analogía como es las ondas electromagnéticas de radio FM (frecuencia modulada) y AM (amplitud modulada), las FM poseen mayor fidelidad, pero tienen un alcance limitado (distancia) y las AM poseen un alcance mucho mayor, pero de una menor fidelidad. Ambas señales no se interfieren porque trabajan a diferentes frecuencias para el mismo tipo de emisores y receptores, es decir, con el mismo equipo podemos escuchar las ondas AM y FM, pero ambas señales no se interfieren al trabajar a diferentes niveles de frecuencia.

Lo que podría repetirse para los planetas y estrellas mientras que existen campos magnéticos variables, las ondas o flujo magnético de mayor intensidad, tal vez de alta frecuencia y menor alcance interfieren con la materia y la sustancia dentro de la atmosfera, pero las ondas o flujo magnético de menor intensidad, tal vez de menor frecuencia que las anteriores, pero mucho mayor alcance interfieren con los generados por otros planetas o estrellas generando la atracción o repulsión entre dichos cuerpos celestes lo que explica su agrupación en el espacio.

B. 7. Incidencia de la temperatura

Como sabemos al aumentar la energía calórica sobre los cuerpos estos sufren una dilatación, es decir, aumentan su tamaño. Una explicación sería que los electrones al sufrir una excitación por esta energía calórica no pueden pasar un nivel mayor de energía, pero cambian la trayectoria por lo que la órbita descrita previo a la incidencia del aumento de temperatura cambia y se alejan del núcleo cambiando su radio de acción y si la temperatura disminuye la excitación cesa y los electrones vuelven al radio y orbita previo a la excitación. Básicamente distribuyen la energía recibida separándose más del núcleo y los electrones entre sí si están a diferentes niveles de energía, modificando sus orbitas originales ocasionando el aumento de tamaño al haber mayor separación.

Esto no parecería tener incidencia con el tema del trabajo, pero la pregunta sería ¿Si la energía calórica no solo aumenta la separación entre el núcleo y los electrones sino también los obliga a los electrones a girar más rápido? Sintetizando aumenta su frecuencia.

En el caso de los fluidos por tomar un ejemplo como es el aire, este al aumentar la energía calórica disminuye su densidad por consiguiente ascendiendo en la atmosfera (principio de funcionamiento de los globos aerostáticos)

además lo que ocasiona las corrientes de viento cuando una gran cantidad de masa de aire se desplaza hacia arriba otra de menor temperatura debe ocupar el espacio libre. Por lo que si consideramos la atracción magnética del campo del planeta tierra sobre una carga eléctrica también debemos considerar el efecto de un aumento de la frecuencia al girar más rápido la carga eléctrica analizada, ya que si la frecuencia del campo magnético del planeta tierra se mantiene dentro de un rango estable, el aumento de la frecuencia del movimiento de los electrones que poseen menor masa que el núcleo del átomo pueden generar una repulsión (leve pero repulsión al fin) y dicha repulsión incrementarse al incrementar la energía calórica ocasionando la disminución de la densidad en el aire.

B. 8. Analogía final

Lo planteado en esta sección lo dejaremos con la siguiente analogía, como se sabe el ser humano ha creado materiales a los cuales ha dotado con magnetismo remanente (imanes artificiales y/o ciclo de histéresis) por tanto, ya sea que el sol y los planetas generen campos magnéticos o algunos planetas, satélites, lunas hayan quedado con cierto magnetismo remanente pueden existir interacciones de atracción y repulsión entre los astros. Esto se explica mejor como atracciones magnéticas tales como dejar objetos metálicos en una mesa y colocar en el centro un imán o electroimán de gran potencia, donde los materiales tenderán a posicionarse de manera circular alrededor de dicho imán.

Y si la atracción magnética es responsable de la atracción entre planetas también lo puede ser para la atracción de la materia que posee carga eléctrica siendo mayor mientras más cerca se está del núcleo o centro del imán disminuyéndose al alejarse. Video de referencia del canal Girogio Colangelo – líneas de fuerza del campo magnético [23].

Resumiendo, el desarrollo del apartado B y sus subsecciones el orden es para ir de lo más simple a lo más complejo sin importar que no se logre una comprensión específica de la temática sino de los aspectos generales. Un ejemplo final más simple sobre la teoría propuesta es básicamente cuando interactuamos con dos imanes si ponemos los polos opuestos se atraen y si ponemos los polos iguales se repelen. Como sabemos que la carga eléctrica en movimiento genera campos magnéticos estos interactúan con el campo magnético del planeta tierra ocasionando atracciones o repulsiones a lo que denominamos como efecto gravitatorio.

VI. PROPUESTAS EMPIRICAS

Siendo la física una ciencia fáctica por excelencia debemos dejar los experimentos a realizarse cuyos resultados confirmen la nueva teoría. Aquí presentamos tres:

- Enviar señal electromagnética hasta un satélite variando la forma de onda y la frecuencia hasta que sea interrumpida por la acción del campo magnético del planeta tierra.
- Generar con un electroimán un campo magnético de onda y frecuencia variable que se oponga a la acción de la gravedad evitando que el dispositivo caiga al suelo o manteniéndose suspendido por la repulsión al campo magnético del planeta tierra.

- En el espacio fuera del alcance de la gravedad del planeta tierra, tomar varios materiales distintos y generar un campo magnético de origen eléctrico de forma de onda y frecuencia exacto que logre la atracción de los materiales utilizados.

VII. CONCLUSION

Por lo expuesto en los incisos previos podemos dejar las siguientes conclusiones:

- La teoría de que la gravedad es la curvatura del espacio tiempo no es válida ya que no se puede realizar experimento alguno para demostrar dicho enunciado ya que el tiempo y el espacio (volumen) son entes imaginarios, escalas matemáticas, que existen, pero no son reales y forman parte de la ciencia formal no de las ciencias fácticas (independientemente que se requieren para realizar los cálculos en demostraciones científicas).
- El fenómeno físico de la gravedad, se explica mejor como un efecto magnético, es decir, la nueva teoría es que la "fuerza gravitatoria" se debe a la atracción magnética que sufre la materia o sustancia por poseer carga eléctrica. Además, ya que el planeta tierra, por ende, los demás planetas y el sol pueden poseer o generar campos magnéticos donde interactúan en atracciones y/o repulsiones con los otros campos magnéticos de los astros esto explica su disposición en el espacio como ser el caso del sistema solar los planetas a la vuelta del sol. Es importante de mencionar que al tratarse de un fenómeno físico esta teoría se puede demostrar con experimentos y no como la teoría de la curvatura del espacio tiempo, donde estos conceptos utilizados en su explicación son entes imaginarios u objetos formales.
- Es necesario una vigilancia epistemológica sobre el conocimiento enseñado y/o utilizado como base para las investigaciones ya que este puede venir de larga data y ser una forma fosilizada que no guarda relación alguna con su origen.

VIII. REFERENCIAS

- [1] Mora, C., y Herrera, D., *Una revisión sobre ideas previas del concepto de fuerza*, Lat. Am. J. Phys. Educ., **3**, 72-86 (2009).
- [2] Rivera-Juárez, J. M., Madrigal-Melchor, J., Cabrera-Muruato, E., y Mercado, C., *Evolución histórica del concepto fuerza*, Lat. Am. J. Phys. Educ., **8**, 4601, 1-7 (2014).
- [3] Rivera-Juárez, J. M., Rivera-Vargas, Y., Cabrera-Muruato, E., y Mercado, C., *Evolución histórica del concepto fuerza. Parte II*, Lat. Am. J. Phys. Educ., **12**, 2310, 1-6 (2018).
- [4] Real Academia Española, *Diccionario de la lengua española*, Vigésimotercera Edición, Edición del Tricentenario (Espasa Libros, Editorial Planeta, Ciudad de México, México, 2014).
- [5] Quintas-Alonso, G. (Editor), *Discours de la Methode. La Dioptrique. Les Meteores. La Geometrie* de René Descartes de 1637, p. 15 (Ediciones Alfaguara, Ciudad de México, México, 1981).
- [6] Almori, C. F. (Editor), *Novum Organum* de Bacon, F. de 1620, Traducción directa del latín, pp. 103-106, 143 (Editorial Losada, Argentina, 2003).

- [7] Popper, K., *The Logix of Scientific Discovery* de 1935, pp. 3-4 (Routledge Classics, Filadelfia, USA, 2002).
- [8] Chevallard, Y., *La transposición Didáctica. Del Saber Sabio al saber enseñado* de 1991, p. 49 (Grupo Editor AIQUE, Buenos Aires, Argentina, 2000).
- [9] Vygotsky, L., *El desarrollo de los procesos psicológicos superiores* de 1979, pp. 103-104 (Critica, Barcelona, España, 2009).
- [10] Rada-García, E. (Editor), *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* de Isaac Newton de 1687, p. 84 (Alianza Editorial, Madrid, España, 1988).
- [11] Streater, J., *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* de Isaac Newton, publicación original en latín (La Royal Society, Londres, Inglaterra, 1687).
- [12] De Miguel, D. R., y De Morarte, E. M., *El nuevo diccionario latino-español etimológico* (Roma, Ediciones Era, Colonia Roma, Ciudad de México, México, 1867).
- [13] Mir, J. M., *Vox Diccionario Ilustrado Latino-español español-latino* (Biblograf, España, 1982).
- [14] Camilla, C., BBC News Mundo, *Teoría de la relatividad de Einstein: el eclipse hace 100 años que confirmo “el pensamiento más feliz” del célebre científico alemán*, <<https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-48153620>>, consultado el 01 de enero de 2025.
- [15] Canal Yo también aprendo, Experimento de Oersted, <<https://www.youtube.com/watch?v=7vZXcflXtzQ>>, consultado el 01 de enero de 2025.
- [16] Canal Felipe Montecino, Líneas magnéticas de fuerza, <<https://www.youtube.com/watch?v=bjd-deHivGs>>, consultado el 01 de enero de 2025.
- [17] Canal Educacióntv, *Rayos catódicos y televisión*, <<https://www.youtube.com/watch?v=T2bWtQeTqL8>>, consultado el 5 de enero de 2025.
- [18] May, O., Renán Quijano M. I., y Cab. C., *Generador de campo magnético Variable*. 1er congreso iberoamericano de instrumentación y ciencias aplicadas, <https://www.researchgate.net/publication/281306536_Generador_de_Campo_Magnetico_Variable>, consultado el 01 de enero de 2025.
- [19] Electrónica práctica paso a paso, Osciladores I: Oscilador con relevador, <<https://www.youtube.com/watch?v=Dan2FizFnoY>>, consultado el 01 de enero de 2025.
- [20] Cienciabit: ciencia y tecnología, Ampere's Experiment. <<https://www.youtube.com/watch?v=kKi7Hy98bA>>, consultado el 01 de enero de 2025.
- [21] Jorgloff, Demostración del campo magnético giratorio de motor asincrónico trifásico, <<https://www.youtube.com/watch?v=XorwWSc0NEo>>, consultado el 01 de enero de 2025.
- [22] Es ciencia, Modelos atómicos (Dalton, Thomson, Rutherford, Bohr y Chadwick), <<https://www.youtube.com/watch?v=8IX8FjjLKhc>>, consultado el 01 de enero de 2025.
- [23] Girogio Colangelo, K4E – Líneas de fuerza del campo magnético, <https://www.youtube.com/watch?v=8M0H_6lgZ74>, consultado el 01 de enero de 2025.

Inspiración para implementar la aproximación semiótica a la Educación en Física



ISSN 1870-9095

Rubén Sánchez Sánchez

*Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada
del Instituto Politécnico Nacional. Unidad Legaria.
Calzada Legaria No. 694. Colonia: Irrigación. Alcaldía Miguel Hidalgo.
Código Postal: 11500. Ciudad de México, México*

E-mail: rsanchezs@ipn.mx

(Recibido el 5 de abril de 2025, aceptado el 12 de mayo de 2025)

Resumen

En este breve escrito describimos las razones motivacionales para explorar la semiótica y sus construcciones teóricas al campo del aprendizaje de la física, teniendo en cuenta la experiencia ganada en el campo de la enseñanza de las matemáticas y viendo a estas últimas como el pilar fundamental donde se han desarrollado las ideas teóricas primigenias para fomentar el uso de la semiótica en el campo de la investigación educativa.

Palabras clave: Semiótica, educación, física.

Abstract

In this brief paper we describe the motivational reasons for exploring semiotics and its theoretical constructions to the field of learning physics, taking into account the experience gained in the field of teaching mathematics and seeing the latter as the fundamental pillar where the first theoretical ideas have been developed to promote the use of semiotics in the field of educational research.

Keywords: Semiotics, education, physics.

I. INTRODUCCIÓN

La semiótica y la semiología [1] generalmente se interpretan como dos formas de entender el mismo concepto o disciplina o campo de conocimiento, y se emplean en muchos ámbitos como la comunicación oral y escrita de los idiomas del ser humano, y también para el manejo crítico de otras disciplinas como en el diseño y creación de notas para la música, en las matemáticas, en la lógica, en la ciencia, en la señalización de precauciones, en la física, en la ingeniería, etcétera. Ferdinand de Saussure [2] estudió este tema desde el punto de vista lingüístico y social, y Charles Sanders Peirce [3] estudió este tema desde su punto de vista más funcional y pragmático.

Raymond Duval [4] en su obra, menciona que el avance de los conocimientos siempre está acompañado de la creación y del desarrollo de sistemas semióticos específicos que siempre coinciden con un elemento fundamental considerado como la lengua natural. También se menciona que, según Granger [5] el desarrollo de la ciencia siempre va acompañada de un desarrollo paralelo e indispensable de los símbolos y sus mecanismos en la representación de los objetos y sus relaciones fundamentales. Una de las disciplinas más arraigadas y posiblemente una de las más fundamentales sería la constituida por el campo de las matemáticas, donde el éxito del uso de los signos y su significado es fundamental no solo para establecer las bases,

sino también porque sin esto, su posterior desarrollo lógico y congruente sería prácticamente imposible. Así, las matemáticas forman un campo idóneo a partir del cual se puede explorar a la semiótica y su influencia en el aprendizaje de esta.

Según Duval, dada la necesidad de las representaciones semióticas, para varias de las funciones cognitivas no ha de haber *noesis* sin la *semiosis*. Siendo la *semiosis* la cual determina la posibilidad y la condición de la *noesis*, entendiendo a la *noesis* como la posibilidad de alcanzar el entendimiento.

Las representaciones mentales, se establecen como una interiorización de los preceptos [6, 7, 8, 9].

Aquí mencionamos algunas instancias de la educación que tienen que ver con el uso adecuado de los conceptos teóricos de la *semiosis*.

En lo que sigue trataremos de discutir la importancia que tienen unos subproductos teóricos de la semiótica conocidos como los registros semióticos. Estos tendrán un papel fundamental en el área de la investigación educativa y en el campo de la misma educación.

Duval ha tratado la teoría de la semiótica aplicada al desarrollo teórico de la comprensión de conceptos abstractos matemáticos, y ha señalado la importancia de ellos para conllevar el aprendizaje de las matemáticas. Nosotros tratamos de imitar su ejemplo, y guiarnos con sus enseñanzas, inspirándonos a tratar de comprender el proceso fundamental

de la comprensión de conceptos, pero en el campo de la física. En la física contamos con varios fenómenos naturales, que, si bien son un desafío para la mente humana, siempre el hombre ha tratado de guiarse para expresar el funcionamiento de estos fenómenos, elaborando y preparando un lenguaje adecuado para ellos. El lenguaje por excelencia que ha demostrado ser el más útil en la comprensión de los fenómenos naturales y sus leyes ha sido el lenguaje matemático. De ahí, que nosotros estemos inspirados en la aplicación de la semiótica no solo a las matemáticas, sino también al campo de la física.

II. REGISTROS SEMIÓTICOS

Uno de los conceptos que han sido el fruto de la teoría semiótica lo comprenden los llamados registros semióticos. Los registros semióticos los entendemos como aquellos instrumentos del ingenio humano para lograr plasmar datos o componentes del pensamiento necesarios para lograr la integración de estructuras del conocimiento. Es decir, en opinión del autor los registros semióticos son los eslabones más básicos de las construcciones del pensamiento, a partir de los cuales se pueden elaborar herramientas que coadyuven a lograr un conocimiento efectivo y eficaz de ciertos procesos o fenómenos, y además se necesitan para poder comprender conceptos profundos de un campo del conocimiento humano. En nuestro caso de interés, que es la física, podrían ser el conjunto de datos, gráficos, símbolos de cantidades físicas, la escritura de ecuaciones, los diagramas de situaciones físicas, etcétera.

II. TRANSFORMACIONES

Los registros semióticos son los bloques fundamentales para registrar eventos, cantidades o conceptos abstractos en un área del conocimiento humano. Por sí solos, no nos podrían ayudar a explicar cómo es que un proceso físico es entendido. El autor piensa que un ingrediente esencial de la teoría de la semiosis es comprender cómo se dan las transformaciones entre registros semióticos en nuestras mentes mortales. Es decir, los registros semióticos son los elementos esenciales de la teoría, pero es necesario, comprender sus transformaciones para tener un esquema de significados más dinámico y enriquecedor, y a partir de allí, tratar de elaborar un esquema teórico de construcción de conocimiento humano. Aquí nos interesa imaginarnos cómo el ser humano comprende una ley de la naturaleza usando los registros semióticos.

Dentro de la teoría de las transformaciones semióticas debemos distinguir dos tipos [10]:

1. Los tratamientos, son transformaciones que ocurren dentro del mismo registro donde se han formado.
2. Las conversiones, son transformaciones que ocurren entre dos distintos tipos de representación semiótica, sin que por eso se cambie el objeto denotado.

En la siguiente sección daremos un ejemplo sencillo, donde podemos apreciar la utilidad de estos conceptos de la teoría

de la semiótica, en el campo de la educación, y en particular al área educativa de la física.

III. EJEMPLO SENCILLO DE CINEMÁTICA

Aquí, podemos dar un ejemplo de transformación entre registros semióticos diferentes, usados, por ejemplo, para explicar el movimiento rectilíneo uniforme. Así, si realizamos un experimento con los estudiantes de un grupo, y pedimos que un alumno, conduzca su auto con una dirección fija y con una rapidez uniforme constante, por un tramo de carretera uniforme y lineal. Pedimos a sus compañeros que con anticipación coloquen señalizaciones a distancias constantes en el camino. Y otro equipo va a registrar los tiempos cada vez que el coche pase por un señalamiento. Realizamos una tabla de distancia contra tiempo, y luego lo graficamos.

Posteriormente comparamos los datos con la fórmula, sencilla de cinemática:

$$d = vt. \quad (1)$$

Para una rapidez v constante, ya escogida con anticipación, y suponiendo que el movimiento empieza en la distancia cero, (o en el origen de coordenadas).

El punto importante aquí, es tener en cuenta, la participación de los diferentes registros semióticos que estamos utilizando:

1. Fórmula matemática.
2. Diagrama esquemático del fenómeno del movimiento uniforme del automóvil.
3. Tabla de valores numéricos de distancias y tiempos.
4. Diagrama cartesiano de distancia (d eje vertical) vs. tiempo (t eje horizontal).

Otro punto importante (véase la figura 1), es identificar las diversas transformaciones (que en este caso son conversiones) entre diferentes registros semióticos:

1. Para transformar la tabla de datos a la fórmula, sustituimos una $v = \text{cte.}$, que es constante en la fórmula (1) y vamos sustituyendo cada valor de tiempo en la fórmula para obtener una distancia recorrida.
2. Para transformar la tabla de datos en gráfica, realizamos el trazo de los ejes coordenados con sus respectivas cantidades de distancia contra tiempo con sus respectivas unidades: por ejemplo, centímetros (cm) para distancia y segundos (s) para tiempo. Y utilizamos la tabla para graficar cada punto medido.
3. Para realizar un diagrama usamos el dibujo de un auto en un terreno recto, regular y plano, o una línea que lo represente, y dibujamos una flecha hacia donde avanza el auto con el valor de la rapidez, lo que representa la velocidad constante del auto. Y dibujamos conos viales con franjas naranjas y blancas, separadas entre sí a distancias constantes. Y

realizamos la conversión semiótica de la situación física con el dibujo.

El entendimiento final del fenómeno de movimiento rectilíneo uniforme se puede lograr, si el estudiante logra realizar la conversión de un tipo de registro a otro, de manera suave, y sin problemas de conflictos de identificación, o problemas de algún tipo de prejuicio, durante la clase.

Claro que aquí, mostramos un ejemplo sencillo, para ilustrar cómo es que los registros semióticos y sus transformaciones juegan un papel primordial en la

comprensión del fenómeno físico estudiado en clase. Se dice al fin que el individuo ha construido una estructura de pensamiento nuevo, queriendo dar a entender que ha asimilado de buena forma, un nuevo conocimiento, y con ello ha logrado concluir con el proceso cognitivo adecuado, que se busca con tanta insistencia en educación. Esto abre buenas posibilidades de éxito, no solo en este ejemplo sencillo, sino de forma similar, en varios de los temas de física, que normalmente se ven durante un curso regular.



FIGURA 1. Transformaciones entre registros semióticos diferentes (conversiones). Se representa esquemáticamente la conversión entre diferentes registros como la tabla de valores y la ecuación, y de ahí a la gráfica de una línea recta para el movimiento rectilíneo uniforme, y lo cual se asocia con el diagrama de la situación física, que es otro registro semiótico. El entender estas conversiones, nos ayuda a visualizar como se adquiere una nueva estructura de pensamiento en nuestras mentes. Esta manera de describir con un esquema un proceso cognitivo, nos ayuda de forma teórica en el campo de la educación de las ciencias.

III. CONCLUSIONES

Finalmente, queremos resumir este breve tratado sobre semiótica, registros semióticos y sus transformaciones, con unas palabras finales para concluir nuestro ejemplo. Aquí hemos visto, con un ejemplo sencillo, la utilidad de la teoría semiótica en el aprendizaje de la física. Pudimos identificar la acción de la teoría en la práctica educativa. Identificamos varios registros semióticos como bloques necesarios para construir nuevo conocimiento.

Y finalmente, llegamos a la conclusión de que en teoría es posible explicar de manera sencilla cómo, gracias a las transformaciones entre registros semióticos, o en particular gracias a sus conversiones, se puede entender que el individuo, en teoría, ha construido una nueva estructura de conocimiento en su mente, gracias a la acción lógica de la conversión entre registros semióticos.

Debemos recordar, que, no obstante, la aplicabilidad de la semiótica y los registros semióticos es prácticamente universal, y no solo se aplica a las matemáticas o la física, que serían dos de las áreas que tienen mucha importancia en el avance de la ciencia, y que aquí hemos tratado de abordar de manera breve, sino que también, se aplica en el desarrollo cultural, y la comunicación lingüística entre las comunidades humanas.

AGRADECIMIENTOS

El autor quiere agradecer a la SECIHTI de México por su apoyo con el proyecto IH-2025-I-125, titulado “Aprendizaje basado en Proyectos y Problemas en la enseñanza de la Física”, y al Instituto Politécnico Nacional por su apoyo con el proyecto SIP no. 20253853 titulado “Representaciones semióticas y su efecto en el aprendizaje de la ley de Ohm mediante el aula invertida”.

REFERENCIAS

- [1] TeoCom, La semiótica según Saussure y Peirce, <<https://www.youtube.com/watch?v=cpow2qgxu3k>>, consultado el 1 de abril de 2025.
- [2] Saussure, F., *Curso de lingüística general* (Editorial Amazon, 1ra. Edición, Washington, USA, 2019).
- [3] McNabb, D., *Hombre signo y cosmos: La filosofía de Charles S. Peirce* (Fondo de Cultura Económica, 1ra. Edición, Ciudad de México, México, 2018).
- [4] Duval, R., *Semiosis y pensamiento humano. Registros semióticos y aprendizajes intelectuales* (Programa Editorial, Universidad del Valle, Colección Ciencias sociales, 2da. Edición, Cali, Colombia, 2017), p. 46.
- [5] Granger, G., *Langages et épistémologie* (Klinksieck, Paris, 1979), pp. 21-47.

- [6] Vygotski, L. S., *Pensée et langage* (Ediciones sociales, Paris, 1985, 1934). *Thought and language* (Traduction anglaise, M.I.T. Press, Cambridge, 1962).
- [7] Piaget, J., *Etudes sur la logique de l'enfant, II, le jugement et le raisonnement chez l'enfant* (Delachaux et Niestlé, Neuchâtel, 1968a).
- [8] Piaget, J., *Biologie et connaissance* (Gallimard, Paris, 1968b).

- [9] Denis, M., *Image et cognition* (P. U. F., Paris, 1989).
- [10] Aprendemos de todo, Teoría de registros de representación semiótica de Reymond Duval, #pedagogia <<https://www.youtube.com/watch?v=txqISp04Ajl>>, consultado el 1 de abril de 2025.