

Montajes de ExD para incorporar la ley de presión hidrodinámica de Bernoulli en ambientes escolares de Ingeniería



Luis H. Barbosa¹, Cesar Mora²

¹Grupo Física y Matemática, Depto. de Ciencias Naturales, Facultad de Ingeniería, Universidad Central, Cra 5 No 21-38, Bogotá, Colombia.

²Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Instituto Politécnico Nacional, Av. Legaria 694, Col. Irrigación, C. P. 11500, México D. F.

E-mail: lhbfsica@gmail.com,

(Recibido 1 de Mayo de 2013, aceptado 25 de Agosto de 2013)

Resumen

Se han recopilado distintos montajes de experimentos discrepantes (ExD) cuyo fenómeno puede ser explicado usando como mecanismo la ley de Presión Hidrodinámica de Bernoulli (LPHB). Se esbozan los montajes y se describen los eventos relevantes que pueden ser predichos mediante esta regularidad. Adicionalmente se reporta una experiencia de aprendizaje activo donde se han usado algunos de los montajes descritos. Se describe la experiencia y se reportan resultados del coeficiente de Bao sobre una población de 63 estudiantes de muestras tomadas con el pre-test/pos-test una semana antes y después de incorporar la LPHB en una sesión de instrucción. Para tomar los datos se ha usado un test de la LPHB previamente utilizado en otros estudios. Se ha encontrado que la metodología es efectiva de acuerdo a los vectores de evolución de Bao pero con una eficiencia en tiempo de tan sólo 2 horas, esto es muy conveniente en la búsqueda de metodologías eficientes y compite con el método tradicional que como se sabe es eficiente en tiempo pero nada efectivo para incorporar temáticas de física en muchos ambientes escolares.

Palabras clave: Material didáctico, experimentos discrepantes, enseñanza de la Física.

Abstract

This article presents an interacting discrepant experiment (DeX), its physical modeling as well as its pedagogical benefits of the assembly to learn the Bernoulli's Law of Hydrodynamic Pressure. The impact of the results is presented on a population of students and the interactive engagement is measured starting from a process of dissonance to a process of consonance. The prototype has been implemented as a project in order that the student's population makes time by their own during four weeks. The evolution of the learning process is specified with the Hake's average normalized gain and the Bao's concentration factor. The Hake's gain value, above 0.5 means that the experience has turned out to be quite fruitful from a pedagogical standpoint.

Keywords: Didactic material, discrepant experiments, physics education, teaching methods.

PACS: 01.50.My, 01.40.-d, 01.40.Fk, 01.50.Pa, 01.50.Wg, 01.50-i, 01.40.gb

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Como se sabe de trabajos anteriores, la LPHB corresponde a una de las regularidades más fértiles de la naturaleza que fue advertida y modelada por Bernoulli y permite explicar un variado número de fenómenos producidos para fluidos en movimiento [1, 2, 3]. Sobre la interpretación de esta ecuación Bauman llamó la atención sobre ciertos cuidados que se deben tener a la hora de demostrarla, así como ciertos errores que se cometen a la hora de concluirla [4, 5]. Acerca de las ideas intuitivas o preconcepciones de los estudiantes sobre esta ley, se presenta un estudio sobre una población de estudiantes de ingeniería que fue usado en la construcción y validación de un test para evaluar el aprendizaje de esta

regularidad de fluidos [6]. Sin embargo, en la comunidad académica se despliega una gran controversia sobre las "misapplications" de la LPHB correspondientes a distintos fenómenos que un grupo de profesores entiende como aplicaciones de la ecuación de Bernoulli, pero que otro grupo afirma como aplicaciones no adecuadas de la LPHB [7, 8]. Por ejemplo, un grupo de profesores precisa que el vuelo de los aviones se debe a la ley de Bernoulli mientras que otro grupo precisa que es más bien debido a la segunda ley de Newton. Pero aunque se presentan una gran variedad de situaciones que pueden ser explicadas por la LPHB, en revisiones sobre el ámbito de investigación en Física educativa, no se tiene un estudio que contenga las situaciones

experimentales que puedan ser aplicaciones de la LPHB adecuadas para la clase [9, 10]. Tener un estudio de tal naturaleza, podría ser útil a la hora de presentar situaciones que permitan ejercitar y repetir la apropiación de este concepto. Por esta razón este artículo pretende reunir algunos de los montajes más representativos como aplicación de la LPHB aunque ya Walker había ilustrado algunos [11]. Como un ejemplo de uso para la clase, se muestra una experiencia donde se plantearon cerca de 10 situaciones diferentes para plantear y luego interaccionar con una población de estudiantes. El método ha mezclado un tinte de tradicional, otro de PODS [12] y mucha interacción con preguntas y respuestas. Se pretende entonces mostrar resultados de esta experiencia, lo cual resulta eficaz, pero también eficiente en tiempo de ejecución.

En lo que sigue del artículo se ilustran varias situaciones que comúnmente vislumbran un fenómeno discrepante ya que de trabajos anteriores han mostrado ser de un gran valor pedagógico para movilizar al estudiante y favorecer su aprendizaje [13, 14, 15]. Posteriormente se presenta una experiencia de uso de estos montajes en una población de 63 estudiantes de física mecánica en ambientes de ingeniería y se muestran los resultados de la evolución del aprendizaje con muestras del pre/pos-test mediante el índice de concentración de Bao [16] y finalmente se presentan las conclusiones.

II. MONTAJES, FENOMENO Y USO EN EL AULA

A continuación se presentan algunos montajes que fueron usados como aplicaciones de la ley de Bernoulli al intervenir en una población de cerca de 63 estudiantes de ingeniería de la Universidad de la Salle con edad promedio de 17 años y de clase media.

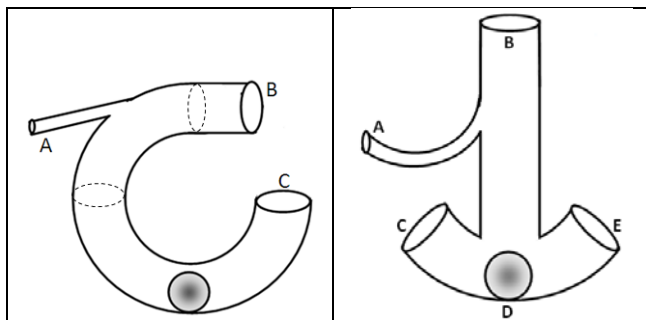


FIGURA 1. a) Soplador mágico 1. b) Soplador mágico 2. En ambos al soplar por el tubo B se debe observar que la bola en el fondo del aparato inicia el movimiento.

Los montajes de la figura 1 son invención de Barbosa y fueron usados para un estudio de incorporación de la LPHB en ambientes escolares de ingeniería [2]. El montaje de la figura (1a) ha sido construido en manguera o vidrio y fue presentando por primera vez en un congreso nacional de Física en Manizales (Colombia) en 2001. El montaje de la figura 2 fue usado en el Test-LPHB [20] en estudios durante

2008-2011 y fue presentado como un prototipo en vidrio en reunión anual de profesores de física (AAPT-2011) en San Luis Potosí. Se usó una esfera de poliestireno en D para hacer la demostración experimental durante una conferencia de cierre el domingo. Si se usa una esfera de balsa o de corcho se necesita una muy alta capacidad pulmonar para vencer el peso de la esfera. En ambos prototipos al soplar por A hace que la esfera en el fondo salga disparada hacia B. Esto resulta discrepante para la lógica de la mayoría de estudiantes.

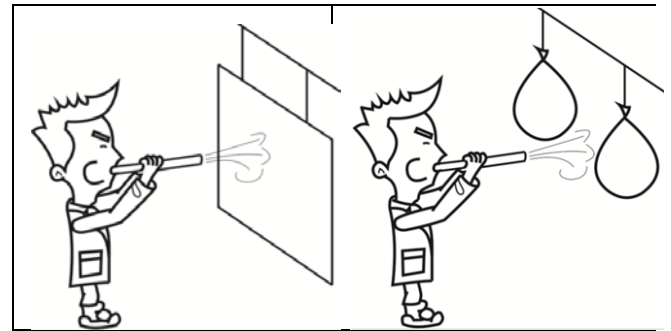


FIGURA 2. a) Soplar en frente de una hoja de papel. b) Soplar en medio de dos globos.

Este montaje es muy conocido en la comunidad académica pero resulta muy adecuado presentarlo, primero de modo que se observe que el flujo empuja una cartulina, luego se plantea el montaje de los dos globos para soplar en medio con un tubo. Si los estudiantes no lo conocen, casi siempre resulta discrepante para ellos, pues ellos predicen que los globos se separan, pero sucede que se unen.

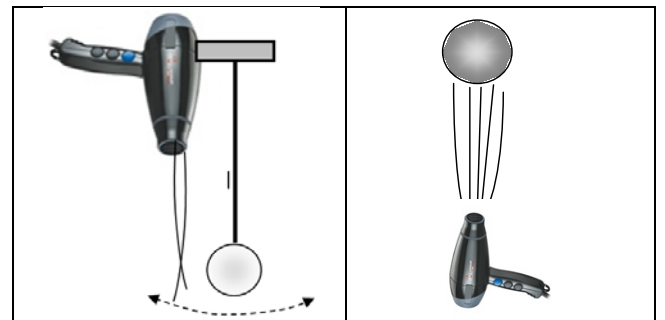


FIGURA 3. a) Bola de poliestireno atada de un hilo y atrapada al colocarla cerca de un flujo constante de aire. b) Bola flotando en un flujo constante de aire.

Tanto los montajes de la figura 3 como de la figura 4 son usados como aplicaciones de la ley de Bernoulli, sin embargo como precisa Weltner y Ingelman-Sundberg estos montajes son impactantes para el estudiante y resulta un poco complejo evidenciar la ley de Bernoulli en la comprensión del fenómeno. Respecto al montaje (3b) existe cierta polémica de si realmente es una aplicación de la LPHB, pues por un lado, es clave ponerle cuidado a la fuerza sustentadora del aire para sostener la bola, pero además es importante recordar que la bola no se sale del flujo incluso para una pequeña inclinación del flujo. Es en este fenómeno (bola no se sale del flujo), donde se puede usar a la LPHB y no para

sustentar la bola en cuyo caso sería mejor usar la segunda ley de Newton.

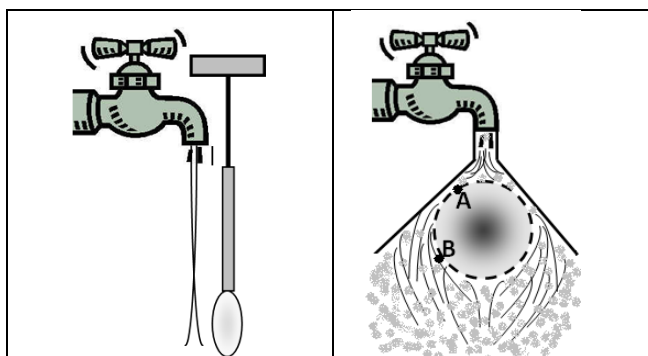


FIGURA 4. a) Cuchara cerca de un flujo continuo de agua. b) Bola de ping pong dentro de un embudo con flujo continuo de agua.

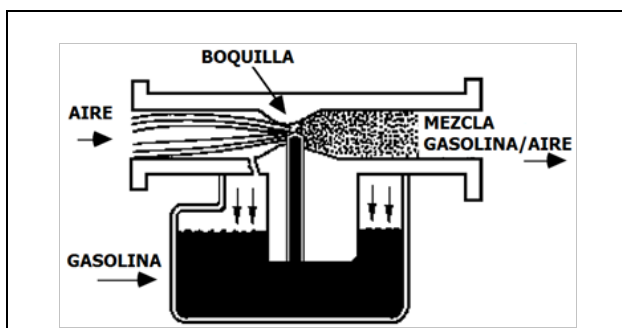


FIGURA 5. Esquema simple del carburador de un auto.

El carburador bosquejado en la figura 5 es un dispositivo que cae dentro de las aplicaciones que de la LPHB que empiezan a volverse obsoletas por el avance de la inyección electrónica en los autos pero que no por ello dejan de llamar la atención para recordar la LPHB, pues el carburador aun se usa en maquinaria agrícola (motosierras), en ciclomotores y motocicletas de baja cilindrada, en los generadores eléctricos portátiles y en los juguetes de modelismo con motor.

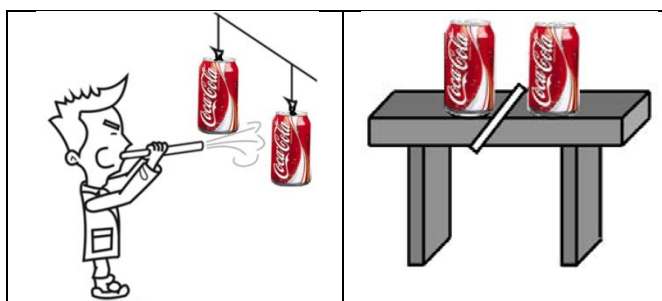


FIGURA 6. a) Botellas de plástico colgando de hilos que se juntan al soplar en medio de estas. b) Latas vacías de gaseosa muy juntas sobre una mesa se juntan si se hace incidir un flujo de aire en medio de ellas a pesar del rozamiento con la mesa.

Los dos montajes de la figura 6 aunque son muy similares permiten llamar la atención en la fuerza que hay que vencer para verlos como aplicación de la LPHB. En las botellas de plástico está la ligadura de las cuerdas que cuando al soplar

en medio de las botellas evidencian la disminución de la presión, pero en el caso de las latas sobre la mesa, para ver el fenómeno de disminución de la presión, se debe vencer la fuerza de fricción de las latas sobre la mesa. Esto último permite vislumbrar un hecho curioso cuando detrás de las latas se coloca una pared vertical muy próxima a las latas o algo lejana de ellas; cuando la pared está cerca las latas vacías, se separan cuando se sopla en medio de ellas, pero si la pared lejos, las latas se juntan.

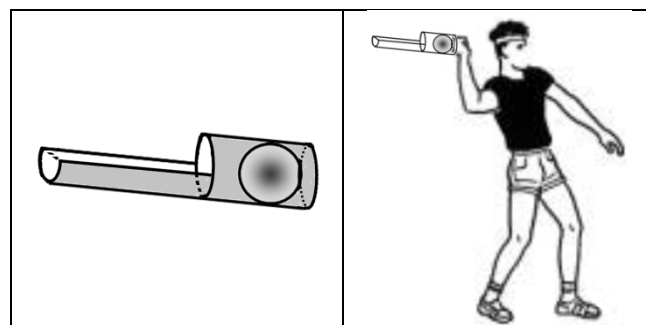


FIGURA 7. a). Lanzador de bola de poliestireno que puede construirse con un tubo de 3 pulgadas b) Al lanzar la bola no solo se impulsa sino que se le imprime rotación que origina el Tiro de chanfle por efecto Magnus.

El artefacto de la figura 7 corresponde a un tubo en semicilindro para lanzar una bola de poliestireno y permite visualizar perfectamente la desviación de la trayectoria de la bola cuando ésta rota en sentido horario o antihorario respecto a su eje y además avanza respecto al aire en reposo. Esto en el sentido común es entendido como que «la bola tiene efecto». Por ejemplo, en el tenis, beisbol o el llamado «tiro de chanfle» de Roberto Carlos. En física es llamado el efecto Magnus, pero de nuevo la LPHB ayuda a comprender el fenómeno cuando se compara la rapidez del aire que arrastra la bola por la rotación y la rapidez del aire por el avance de la bola en una determinada dirección. Este ejemplo particularmente no puede ser explicado solo con Bernoulli ya que la explicación requiere llamar la atención sobre la fricción o viscosidad al fluido.

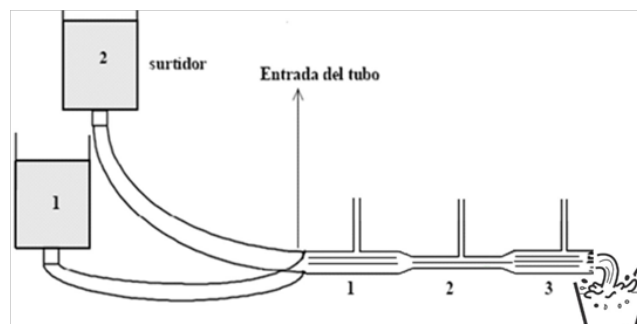


FIGURA 8. a). Tubos verticales con tubo horizontal comunicante que cambia la sección transversal de área para cambiar velocidad de flujo y por ende la presión que hace cambiar el nivel de fluido en los tubos verticales.

El montaje de la figura 8 permite llamar la atención para la relación entre la ecuación de continuidad y la ecuación de

Bernoulli ya que por un lado la velocidad del fluido cambia al reducirse la sección transversal de área del tubo horizontal y esto aumenta la velocidad que a la vez origina disminución de la presión en el fluido y por tanto nivel del fluido en el tubo vertical disminuye.

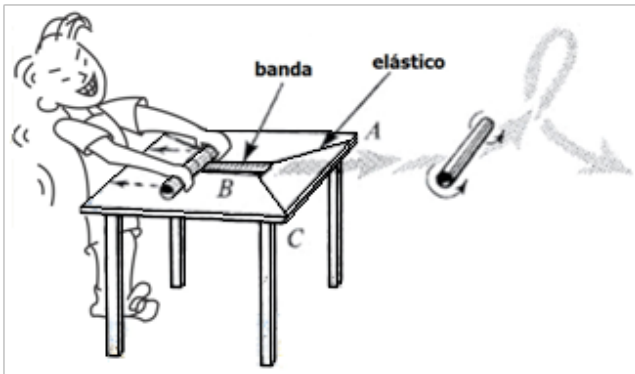


FIGURA 9. Lanzar objetos con superficies y que rotan sobre su eje principal.

En el montaje de la figura 9 la idea es lanzar el cilindro con una banda pero además hacerlo rotar sobre su eje. Sin rotación el cilindro debería trazar una trayectoria parabólica en su recorrido, pero con rotación alrededor de su eje principal el cilindro traza una trayectoria de zigzag. Con cierta complejidad, en este caso de nuevo la ley de Bernoulli es la herramienta conceptual para acercarse a la comprensión del fenómeno.

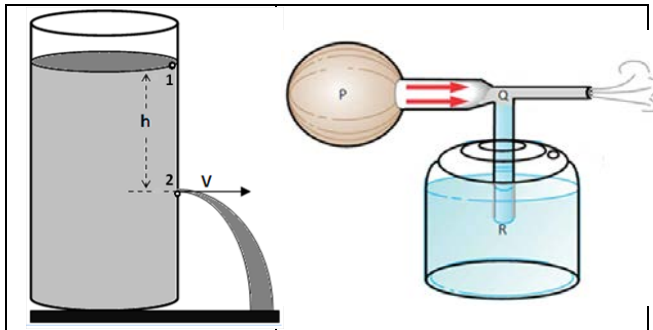


FIGURA 10. a) Montaje para deducir la ecuación de Torricelli como un caso particular de la ley de Bernoulli. b) Atomizador o vaporizador.

En el montaje de la figura 10 al aplicar la ecuación de Bernoulli entre el punto 1 y 2 del tanque se debe suponer que la rapidez en «1» es aproximadamente cero y que además la presión tanto en «1» como en «2» es atmosférica. Entonces se puede deducir que la velocidad del flujo es

$$\sqrt{2gh} \quad (1)$$

Asimismo, con la ley de Bernoulli se puede explicar como el flujo en el tanque del atomizador o vaporizador, sube y es dispersado en muchas gotas. La explicación es que cuando se mueve el émbolo o se comprime la bomba en P se genera un flujo cuya alta velocidad en el nodo de conexión con el

tubo vertical hace que la presión disminuya y por tanto el flujo suba desde R hasta Q. Esta explicación también tiene contradictores en la red pero algunos profesores reconocidos como Walter Lewin aun la usan para explicar el fenómeno.

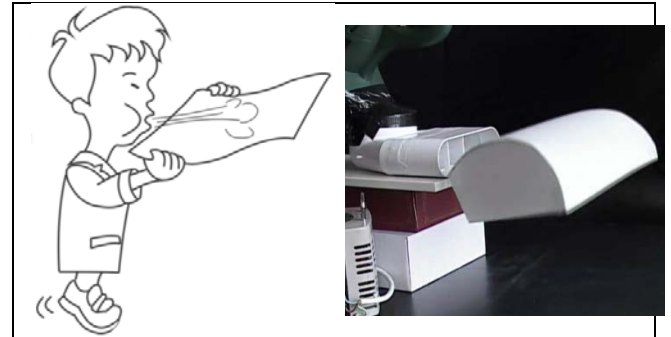


FIGURA 11. a) Soplar por encima de hoja b) Soplar por encima de estructura curva, efecto cohanda.

Soplar por encima de la hoja es una situación común para evidenciar la regularidad de Bernoulli (ver figura 11). Se puede construir una estructura con cartulina que tenga una superficie curva y mediante una sopladora incidir con un flujo de aire por encima de tal superficie; el efecto es que la superficie se levanta y aunque este montaje lo usan para ilustrar el efecto Coanda, no hay una gran brecha conceptual explicar mediante la regularidad de Bernoulli.

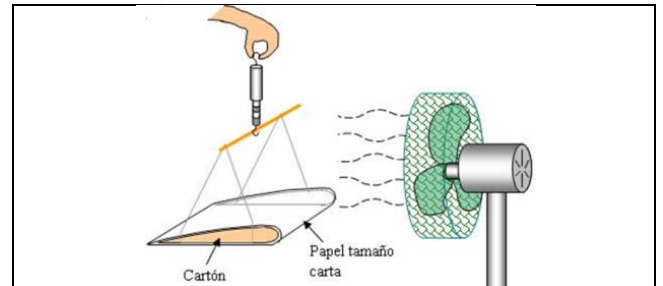


FIGURA 12. Estructura semejante a un ala de avión sujeta a un dinamómetro.

El montaje de la figura 12 ilustra un descenso en el sensor de fuerza cuando se hace incidir un flujo de aire con el ventilador en la estructura. Quizás puede contribuir a esclarecer sobre aquella polémica internacional de que la LPHB no es suficiente para explicar el ascenso de los aviones.

En la figura 13 se muestran dos maquetas donde el aire incide una casa y una edificación. Como el aire pasa rápidamente baja enormemente la presión y puede tener efectos nefastos sobre la construcción. Este hecho de la naturaleza debe ser tenido en cuenta por el ingeniero a la hora de diseñar y construir, por ejemplo, para determinar una medida de la influencia de la edificación cuando la estructura se balancea (ver figura 13b) o cuando el viento incide sobre el techo de la casa (ver figura 13a).

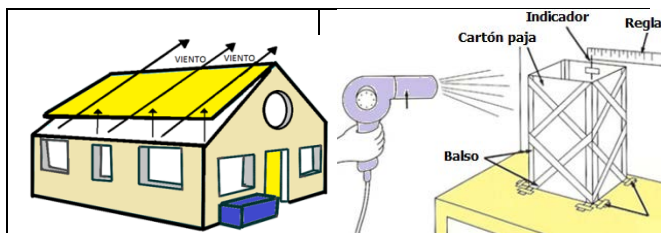


FIGURA 13. a).Techo casa b) Maqueta de un edificio para mostrar influencia sobre la fachada cuando un flujo de aire incide de lado sobre la edificación.

El montaje de la figura 14 posee cuatro tubos verticales unidos a un tubo horizontal con fluido coloreado y que está libre a la atmósfera. En algunos de los tubos verticales se ha colocado una pestaña con superficie ya sea plana, cóncava, convexa o nada. Cuando se hace incidir un flujo horizontal sobre cada pestaña se espera que el aire al pasar rápidamente disminuya la presión y por tanto el nivel del fluido suba respecto a uno inicial.

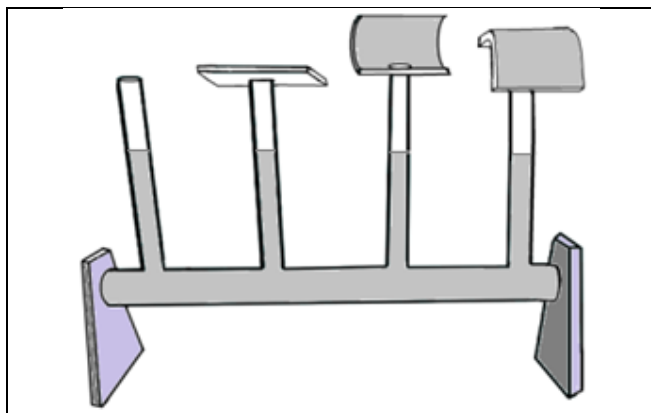


FIGURA 14. Tubos verticales libres a la atmósfera con distintas superficies y soplar horizontalmente en cada una de ellas.

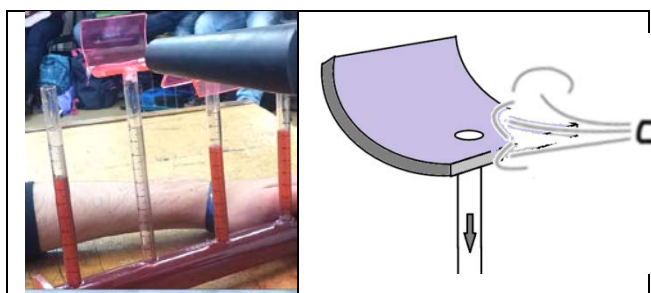


FIGURA 15. a) El flujo de la sopladora en vez de disminuir la presión según Bernoulli, la aumenta y en este caso el nivel del fluido desciende. b) Esquema de la pestaña que hace descender el nivel del fluido y que a pesar de ser curva, no lo puede predecir la ley de Bernoulli.

Lo que se observa es que efectivamente en el tubo con pestaña convexa, el nivel asciende ya que la presión disminuye, pero en el caso del tubo con pestaña cóncava, el nivel desciende, es decir la presión aumenta, contrario a lo que predice la LPHB. Este hecho parece que se debe a que en tal pestaña, se forma una turbulencia de fluido y entonces el aire se direcciona hacia abajo empujando y aumentando la presión lo cual sería explicado de acuerdo a la segunda ley de Newton. Ahora bien, cuando se hace incidir un fuerte flujo en el tubo sin pestaña el nivel asciende y en el caso con pestaña plana, el nivel desciende. Es decir la LPHB se queda corta a la hora de predecir en algunas de estas situaciones. Este experimento tiene un fino detalle y es que el fluido de la sopladora debe incidir horizontal, es decir, perpendicular al tubo vertical. Si el flujo se inclina ligeramente hacia arriba, el nivel asciende y pareciera que el flujo succiona el aire del tubo vertical y por ende hace ascender del tubo vertical.

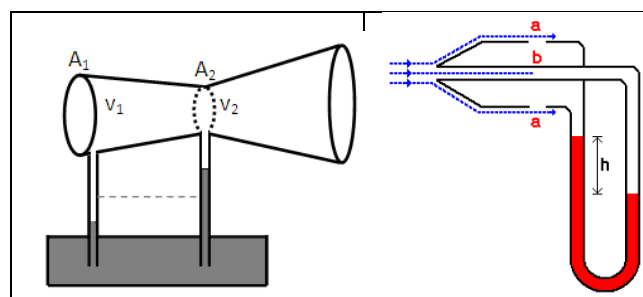


FIGURA 16. a) Tubo de Venturi. b) El Tubo de Pitot.

La figura 16a muestra un esquema del tubo de Venturi que sirve para medir la velocidad de un fluido en una tubería a partir de la diferencia de presión. La figura 16b corresponde a un esquema del tubo de Pitot y sirve para medir velocidad de un flujo mediante la diferencia de presión estática y dinámica en una línea de corriente.

El prototipo de la figura 17 es llamado al rotor de Flettner y ha sido usado para impulsar navíos. Se puede construir con un carrito de tres o cuatro ruedas con baja fricción en los ejes y un cilindro liviano en el eje de un motor de eléctrico sobre el carrito. Como se observa en la figura la idea es que el cilindro sobre el carrito rote ya sea horario o antihorario. Cuando sobre éste el cilindro rotante se hace incidir un flujo aire lateral o de lado (figura 17b), se origina un movimiento horizontal del carrito hacia adelante o hacia atrás.

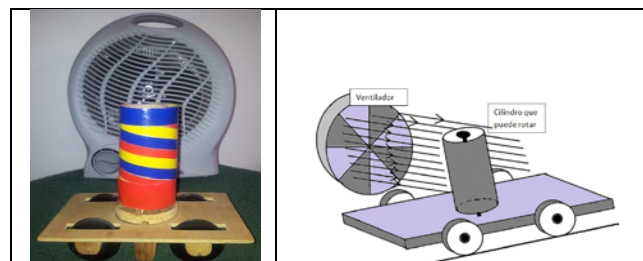


FIGURA 17. a). Rotor de Flettner. b) Carrito de juguete con cilindro rotante que puede avanzar por incidencia de flujo de aire desde una ventilador.

Aunque este es un caso del efecto Magnus se puede elaborar una explicación simple con la relación de velocidad-presión de la LPHB. De acuerdo a la figura 17, el cilindro que rota en sentido antihorario sobre el carrito recibe aire perpendicular que incide por ambos lados. Por la rotación del cilindro se arrastra aire en el borde de modo que la velocidad del aire en el lado izquierdo del cilindro es mayor, mientras que la del lado derecho es menor. En consecuencia, se presenta una diferencia de presión de derecha a izquierda sobre el cilindro y el carrito va hacia izquierda. Dicho de otra manera, se observa que ya que el aire va más rápido en el lado izquierdo del cilindro, ahí la presión disminuye, por tanto, hacia ese lado avanza el carrito.

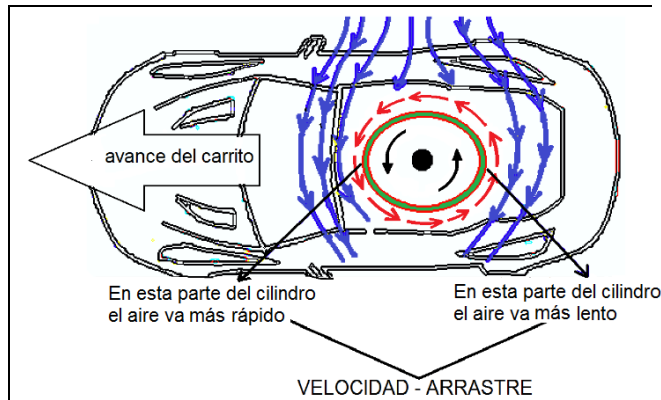


FIGURA 17. Vista del carrito-cilindro desde el techo.

III. MARCO TEORICO

A. Ecuación de Bernoulli para fluidos en movimiento

Para un fluido estacionario, no viscoso, irrotacional e incompresible se cumple que para dos puntos de una línea de corriente la suma de las presiones estática, cinética y gravitacional, es un valor constante que se expresa como,

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g y_2. \quad (2)$$

Si se condiciona para un fluido horizontal, el término gravitacional desaparece y la ecuación queda,

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = cte. \quad (3)$$

La ecuación (2) de Bernoulli expresa aquella relación de variación inversa entre velocidad y la presión para una línea de corriente de un fluido ideal, pues se observa que para que la suma de los dos términos sea constante, cuando la rapidez aumenta, la presión debe disminuir y viceversa, así se compensan y de ese modo la suma siempre da un valor constante. Bauman hace una excelente interpretación de esta

ecuación y llama la atención sobre algunos errores que se cometen en la interpretación [4].

B. El coeficiente de Bao

Es un indicador que da cuenta de la concentración de respuestas de una población de estudiantes cuando se enfrentan a una situación de pregunta frente a un test. Un valor bajo de puntaje con un valor bajo de concentración corresponde a que la población responde al azar, un nivel medio de puntaje y concentración media puede implicar que la población posee un modelo correcto y uno incorrecto para responder [16].

$$C = \frac{\sqrt{m}}{\sqrt{m}-1} x \left(\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n n_i^2}}{N} - \frac{1}{\sqrt{m}} \right). \quad (4)$$

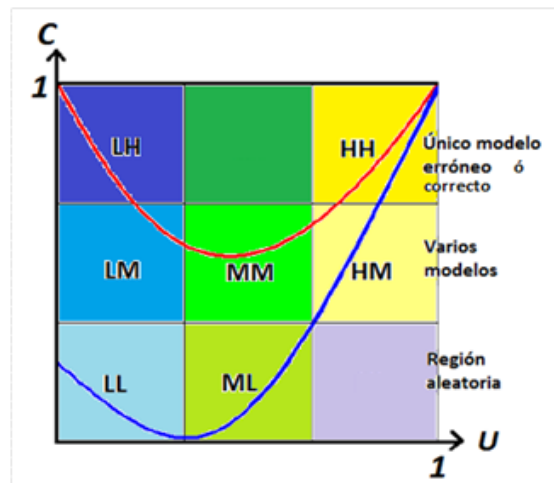


FIGURA 18. Gráfico topológico de regiones de Bao que determina tendencias de pensamiento de una población.

En este caso m corresponde al número de opciones o respuestas del ítem, n_i corresponde al número de elecciones correctas de la población encuestada frente a una pregunta ó ítem y N el número de estudiantes de la población. El gráfico de la figura 18 ilustra esta idea. Además se pueden trazar flechas desde los datos para contestaciones desde el pre-test hasta los datos para contestaciones del pos-test. Es son los denominados vectores de evolución de Bao que pueden dar una idea tanto numérica como geométrica de que tanto evolucionó el aprendizaje de una población determinada frente a un tema.

IV. CASO ESPECIAL CON 63 ESTUDIANTES

A. Metodología

Una semana antes de presentar el tema de fluidos se aplica el test-LPHB [20]. Luego, previo a la semana de actuación, se

avanza hasta el tema de conceptos básicos de Hidrostática y se deja planteada la ecuación de Bernoulli. Se sugiere que se va a dar una clase especial en la siguiente sesión sobre el último resultado. Se comienza recordando la ecuación de continuidad y la ecuación de Bernoulli. Se informa de lo importante de esta regularidad para explicar fenómenos.

El día de inicio la clase se comienza con un ejemplo precisando que la idea es predecir mediante uso de la LPHB sobre la situación presentada:

1. Primera situación es con el soplador de la figura 1. Se plantea, y en cuestión de segundos se hace una encuesta verbal. Se hace el experimento y en vez de que discutan, se explica haciendo uso de la LPHB. Se usa el prototipo y se usa el tablero. Se plantea la ecuación para un tramo del soplador. (15 minutos)
2. Segunda situación se planteo con el tubo de Venturi y se preguntó de nuevo a algunos estudiantes. Como caso especial se observa que si contesta el estudiante que entre la población tiene reputación de más sabio entonces todos se adhieren a la respuesta de El sin reflexionar.
3. Se plantean varias situaciones (tres mas) pero se acuerda con la población que antes de contestar, permitan al profesor elegir el estudiante que debería contestar. En este caso aun después de varias situaciones, un 40% de la población aun presenta incertidumbre y se equivoca.
4. Para este momento ya van cerca de 5 situaciones estudiadas, por lo menos en la fenomenología. Ahora se plantea una situación del tanque de agua y se deduce la ecuación para velocidad del agua de Torricelli en el punto 2 del tanque.
5. Se plantean otras situaciones y se sigue preguntando para que usen como herramienta de predicción la LPHB. Se estudiaron 14 situaciones distintas para usar siempre esta regularidad como mecanismo de explicación y predicción, en cada caso se hizo síntesis.
6. La última situación usada fue la soplar con un tubo en medio de dos globos. Controlando la respuesta comenzando por el que menos ha mostrado desempeño, incluso es esta quinceava situación un 20% no predice el fenómeno correctamente, pero se explica y con un par de globos sacados del bolsillo se comprueba con el experimento. Para este momento ya quedan menos de 10 minutos para acabar la clase.
7. Finalmente se termina la clase pero se recalca de lo importante de esta regularidad para ser tenida en cuenta a la hora de diseñar techos de casa, fachadas de edificios y que incluso sirve para explicar la voz. Se precisa que este tema se evaluará en el examen final.
8. La semana siguiente se aplica el test-LPHB junto a un examen de 10 puntos conceptuales de examen final con la indicación de que aquel estudiante que tenga un mínimo 8 repuestas buenas del test de 12, será premiado con decimas en el puntaje del examen final.

Es importante enfatizar que se podría avanzar en muchas situaciones si se dispone de tecnología para mostrar videos

cortos, recoger la información en cada encuesta y se dispone de experimentos sencillos para accionar.

B. Resultados

De acuerdo a información del pre-test, del pos-test y a partir de ecuación (4) se obtiene la gráfica de la figura 19 y la tabla 1. Se observa que la mayoría de preguntas pasan de la zona de azar (bajo puntaje y baja concentración) a la zona de dos modelos o un solo modelo de pensamiento (puntaje medio y superior e índice medio u alto).

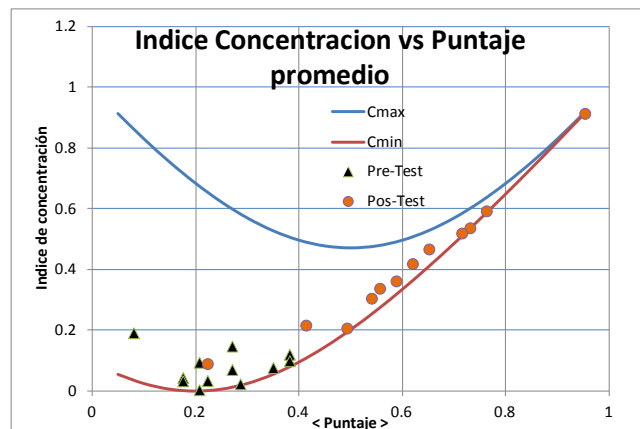


FIGURA 19. Evolución de pensamiento para población de 63 estudiantes de acuerdo a Test-LPHB.

TABLA I. Valores de concentración C y puntaje promedio <p> para test-LPHB antes de la instrucción y luego de la instrucción.

#	Pre-Test		#	Pos-Test	
	<p>	C		<p>	C
1	0.349	0.079	1	0.540	0.307
2	0.079	0.194	2	0.492	0.209
3	0.206	0.097	3	0.651	0.469
4	0.270	0.150	4	0.730	0.539
5	0.270	0.073	5	0.587	0.364
6	0.175	0.046	6	0.952	0.915
7	0.222	0.036	7	0.413	0.219
8	0.286	0.026	8	0.762	0.594
9	0.175	0.036	9	0.714	0.521
10	0.381	0.123	10	0.222	0.092
11	0.381	0.102	11	0.556	0.340
12	0.206	0.006	12	0.619	0.421

Para trazar los vectores de evolución de Bao es clave observar los valores para cada pregunta y cómo cambian desde pre-test hasta pos-test. Es importante observar que justo la pregunta 10 no sufre ningún cambio. Al analizar la pregunta 10, parece que fue mal comprendida por la población. Por entrevista posterior con estudiantes se encontró que había confusión con la redacción y la figura de esa pregunta del test-LPHB. La tabla 1 permite precisar los vectores de evolución de Bao para cada pregunta del test-

LPHB. La primera columna corresponde al valor de inicio y la segunda columna al valor final del vector.

V. CONCLUSIONES

Se ha presentado una colección de posibles experiencias que pueden ser usadas para incorporar la ley de Bernoulli para fluidos en movimiento. Los montajes ilustrados generalmente presentan un fenómeno discrepante para el observador que nunca ha hecho reflexión sobre la regularidad de la LPHB. Esta discrepancia que originan estos montajes permite un escenario no solo cautivante sino de mucha actividad para movilizar al estudiante hacia una eficaz aprehensión del concepto que subyace a la regularidad de Bernoulli.

Como un caso especial se presentan resultados sobre una población de estudiantes en la cual se ha monitoreado su aprendizaje mediante el índice de concentración de Bao y sus vectores de evolución para cada una de las preguntas del test-LPHB. Se ha encontrado que una metodología interactiva usando algunas de estos montajes es muy eficiente al producir un cambio positivo por ir de la zona de respuestas al azar de Bao a la zona de un modelo correcto según el gráfico de la figura 17. Lo interesante de esta experiencia es el uso eficiente del tiempo ya que se ha usado sólo un tiempo de dos horas previa demostración de la ley. Esto puede ser muy útil a la hora de competir con el método tradicional el cual es eficiente en tiempo pero no efectivo para producir cambios conceptuales en los estudiantes.

La idea de este estudio es llamar la atención de que la acción de generar varias prácticas del mismo fenómeno, es decir de repetir la reflexión de la regularidad para distintos experimentos o eventos es de gran valor pedagógico para asimilar eficazmente un concepto. Esto se valida en este caso al presentar varios experimentos cuya característica común es que se pueden explicar con la misma ley en una población de estudiantes de ingeniería. Repetir sin aburrir requiere de este tipo de prácticas y es una acción efectiva para originar aprendizaje.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a la Dra. Leonor Hernández de Ciencias Naturales de la U. Central por la gestión en descarga de tiempo en el semestre para culminar este artículo.

REFERENCIAS

- [1] Barbosa L. H., Mora C., Talero P. y Organista O., *El Soplador mágico: un experimento discrepante en el aprendizaje de la ley de presión hidrodinámica de Bernoulli*. RBEF **33**, 4309 (2011).
- [2] Barbosa L. H., *The magic blower as a didactic element in learning the Bernoulli's law of hydrodynamic pressure in*

- engineering students*, Lat. Am. J. Phys. Educ. **5**, 133-138 (2012).
- [3] Guillen, M., *Cinco ecuaciones que cambiaron el mundo*, (Drokerz Impresiones, de bolsillo, México, 2010).
- [4] Bauman, R. and Schwaneberg, R., *Interpretation of Bernoulli's equation*, The physics Teacher **32**, 478-488 (1994). <http://dx.doi.org/10.1119/1.2344087>
- [5] Bauman, R. P., *An alternative derivation of Bernoulli's principle*, Am. J. Phys. **68**, 288-289 (2000), <http://dx.doi.org/10.1119/1.19423>.
- [6] Barbosa, L. H., *Metodología PODS con experimentos discrepantes para el aprendizaje de la ley de presión hidrodinámica de Bernoulli*, Enviado 04 abril de 2012 a RBEF, en revisión.
- [7]. Weltner, K., and Ingelman-Sundberg, M., *Misinterpretations of Bernoulli's Law*, <http://plato.if.usp.br/2-2007/fep0111d/Bernoulli.pdf> Consultado el 3 de febrero de 2011.
- [8] Recktenwald G., Edwards R., Howe D. and Faulkner J., *A simple experiment to expose misconceptions about the Bernoulli's equation*. ASME Conference Proceedings, 43802, 151-160 (2009). http://eet.cecs.pdx.edu/pubs/pdf/2009_IMECE2009-10964_suddenExpansion.pdf
- [9] Mcdermott, L. and Redish, E., *Resource Letter: PER-1: Physics Education Research*, Am. J. Phys. **67**, 755-767 (1999), <http://dx.doi.org/10.1119/1.19122>, Consultado el 30 de diciembre de 2010.
- [10] Davis, J. A. and Eaton, B. G., *Resource Letter PhD-1: Physics demonstrations*, Am. J. Phys. **47**, 835-289 (1979), <http://dx.doi.org/10.1119/1.11625>
- [11] Walker, J., *Física recreativa: La feria ambulante de la física*, (Noriega Editores, México, 2000).
- [12] Sokoloff, D. and Thornton R., *Active Learning in Introductory Physics*, (J. Wiley and Sons, Oregon, 2004).
- [13] Barbosa, L. H., *Los Experimentos Discrepantes en el aprendizaje activo de la física*, Lat. Am. J. Phys. Educ. **2**, 246-252 (2008).
- [14] Barbosa, L. H. y Mora C., *Los ExD como una herramienta pedagógica en la enseñanza de la Física*. Colombiana de Física **42**, 11-15 (2010).
- [15] Festinger, L., *A theory of cognitive dissonance*, (Stanford University Press, Stanford, CA., 1957).
- [16] Bao, L. and Redish, E., *Concentration analysis: A quantitative assessment of student states*, Am. J. Phys. **69**, S45-S53 (2001),
- [17] Efecto Venturi. Flujo y aplicaciones de Venturi http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Venturi
- [18] LHBFISICA, Web page of Luis H. Barbosa, <http://sites.google.com/site/lhbfsica/>, Consultada el 30 de enero de 2012.
- [19] Halliday, D., Resnick, R., Walker, J., *Fundamentals of Physics*, Vol. 1, 7th Ed. (John Wiley & Sons, USA, 2005). <http://www.compadre.org/per/items/Load.cfm?ID=2662>.
- [20] Barbosa, L. H., *Construcción, validación y calibración de un instrumento de medida del aprendizaje: test de ley de Bernoulli*. Enviado a la Rev. Educ. en Ingeniería. 04/2013.