

El péndulo simple como propuesta didáctica para integrar teoría y práctica del diseño de experimentos en el aula de clase



Colaboración

Gabriel Grosskelwing Núñez; Esmeralda Anahí Martínez Carabarán; Dalia Johana Arieta de los Santos; Heidi Anabel Jácome Sánchez; Arturo Cabrera Hernández, TecNM: Instituto Tecnológico Superior de Misantla

Fecha de recepción: 08 de octubre de 2022

Fecha de aceptación: 25 de noviembre del 2022

RESUMEN: Los nuevos modelos educativos exigen la integración de la teoría con la práctica experimental, sin embargo los serios rezagos en infraestructura escolar no permiten contar con espacios físicos para este fin.

En el presente trabajo se propone emplear el péndulo simple como un modelo viable, de bajo costo, reproducible y que no requiere instalaciones especializadas para ejemplificar la planificación de la investigación de una manera teórico-experimental apoyado en un plan racional que brinda la metodología del diseño de experimento y la estadística inferencial.

Alineados al esquema propuesto por Montgomery, presentamos un protocolo que permite establecer las variables de longitud de cuerda como factor de tratamiento, masa y ángulo del péndulo, como factores de bloque, en un diseño de experimentos por bloques al azar en unidades divididas y como variable de respuesta el tiempo promedio del periodo. La propuesta didáctica mostró buena aceptación y un avance significativo en la asimilación del conocimiento para la materia de DOE en alumnos matriculados en materias que requieren este tipo de herramientas estadísticas. Se demostró la utilidad del péndulo simple como un modelo para unir el puente entre teoría y práctica en escuelas que no cuenten con un laboratorio especializado.

PALABRAS CLAVE: Péndulo, periodo, diseño de experimentos, bloques al azar en unidades divididas.

ABSTRACT: The new educational models require the integration of theory with experimental practice, however, the serious lags in school infrastructure do not allow having physical spaces for this purpose.

In the present work, it is proposed to use the simple pendulum as a viable, low-cost, reproducible model that does not require specialized facilities to exemplify the planning of the investigation in a theoretical-experimental way supported by a rational plan that provides the design methodology of experiment and inferential statistics.

Aligned to the scheme proposed by Montgomery, we present a protocol that allows to establish the variables of chord length as treatment factor, mass and angle of the pendulum, as block factors, in a design of experiments by randomized blocks in divided units and as variable of response the average time of the period. The didactic proposal showed good acceptance and a significant advance in the assimilation of knowledge for the DOE subject in students enrolled in subjects that require this type of statistical tools. The usefulness of the simple pendulum was demonstrated as a model to bridge the gap between theory and practice in schools that do not have a specialized laboratory.

KEYWORDS: Pendulum, period, design of experiments, random blocks in divided units.

INTRODUCCIÓN

Los modelos docentes actuales promueven la búsqueda de escenarios de aprendizaje que combinen estrategias y técnicas para eficientar el proceso de enseñanza. Uno de tales escenarios es el laboratorio experimental de ciencias, un espacio para el desarrollo de habilidades y destrezas en diferentes áreas, mien-

tras que se desarrollan la imaginación, creatividad y el espíritu de investigación, al permitir que se visualice y experimente bajo condiciones ambientales controladas y normalizadas los conceptos aprendidos en el aula de clase [1]. Para cumplir su objetivo, un laboratorio requiere de materiales, medios e instalaciones adecuadas para su correcto funcionamiento, además de una logística educativa que permita una asociación entre la teoría que se enseña en el aula de clase y el trabajo práctico de laboratorio [2].

Es claro que la actividad experimental potencia la enseñanza cuando se tienen todos los elementos que permitan las mínimas condiciones para un óptimo aprendizaje, un escenario poco común en países en vías de desarrollo [3]. En México, de acuerdo al Instituto Nacional para la Evaluación de la Educación (INEE), existen severas deficiencias en infraestructura escolar. Por ejemplo, se estima que a nivel nacional, para el nivel preescolar y primaria, no existen laboratorios de ciencias, mientras que solo el 24% de escuelas secundarias y el 59.5% de bachilleratos cuenta con éste [4]. Esta situación se agrava para las escuelas indígenas y comunitarias [5]. Lo anterior no permite en el alumno el pleno desarrollo de capacidades, habilidades y destrezas, así como la actitud de indagación, curiosidad y reflexión en etapas intermedias de formación académica que reafirmen sus conocimientos y que podrían despertar una inicial vocación científica. [6,7]

En el Instituto Tecnológico Superior de Misantla se reportan índices de reprobación de alrededor del 17% en lo general (Figura 1). Se observa un patrón de reprobación similar en los últimos cinco años, con un incremento significativo para los periodos 2020 y 2021.

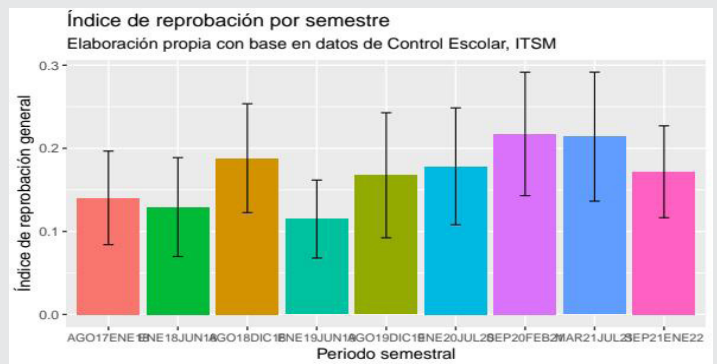


Figura 1.- Índice de reprobación por semestre del año 2017 a 2021 en el Instituto Tecnológico Superior de Misantla. Fuente propia.

En el caso particular de la materia de DOE, el índice de reprobación oscila alrededor del 13% (Figura 2) lo cual evidencia la dificultad del alumno para asimilar conceptos estadísticos básicos.

Diferentes esfuerzos se han realizado para enfrentar esta problemática. La creación de laboratorios virtuales es una alternativa viable y económica que permite visualizar en plataformas digitales cambios en las varia-

bles del modelo en estudio y observar la respuesta de salida ha sido una solución exitosa [8]; sin embargo, el rezago en el acceso a internet limita su aplicación. Se estima que aproximadamente el 62.8 % de escuelas en México carecen de este servicio.

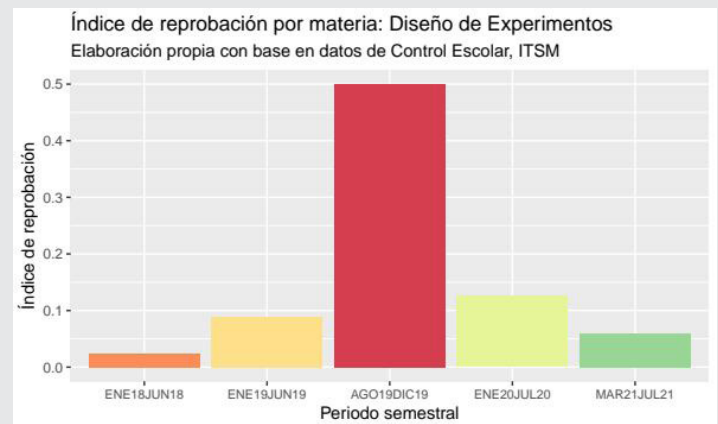


Figura 2.- Índice de reprobación por semestre para la materia Diseño de Experimentos del año 2017 a 2021, en el Instituto Tecnológico Superior de Misantla. Fuente propia.

Otra alternativa es la búsqueda de modelos de aprendizaje que transformen el aula de clase en escenarios de aprendizaje que emulen un laboratorio de ciencias. Para ello los modelos experimentales deberán ser seguros, de bajo costo, reproducibles, elaborados con materiales de fácil adquisición y desarrollados en un tiempo razonablemente corto, pero que reúnan los estándares didácticos para reconocer la importancia de tener un orden lógico de pasos en la experimentación, así como aprender a elaborar hipótesis, discriminar las variables del experimento y realizar el análisis e interpretación de datos obtenidos de acuerdo a una metodología estructurada; de esta forma los conceptos y principios del diseño de experimentos saldrían del libro de texto al medio ambiente físico del alumno, a fin de unir la fractura establecida entre teoría y práctica experimental [9].

Con un modelo experimental sencillo y reproducible, Antony, J. aplica una estrategia de enseñanza del diseño de experimentos en ingeniería para optimizar el funcionamiento de una catapulta [9]. Posteriormente, Izquierdo I. et al., emplea el mismo modelo y lo estudia bajo el esquema propuesto por Montgomery como un ejemplo didáctico aplicado de diseño de experimentos [10].

El presente proyecto propone emplear al péndulo como herramienta didáctica para instruir al alumno en el diseño de experimentos. Si bien, el péndulo ha sido una herramienta educativa común en laboratorios de física, la perspectiva de este proyecto integra el diseño de experimentos para variables fácilmente modificables y establece como variable respuesta el periodo de oscilación, elemento clave en el cálculo de la constante de la gravedad. Con este modelo creamos un espacio di-

dáctico teórico-experimental a bajo costo y plenamente validado, ideal para escuelas que no cuenten con un laboratorio de ciencias.

MATERIAL Y MÉTODOS

Construcción del péndulo

El péndulo simple se construyó siguiendo protocolos previamente establecidos y validados [11, 12]. Dos masas de 150 y 300 gramos fueron atadas en la parte central con el extremo de una cuerda y el otro extremo de la cuerda con longitud predeterminada, se sujetó al punto de unión en un sitio alto del aula de clases, como se muestra en la Figura 1. De esta forma, la longitud de la cuerda del péndulo puede ser modificada y ajustada a la longitud solicitada por el diseño experimental. El péndulo fue colocado manualmente en la posición inicial de oscilación con un ángulo de 10° o 35° . Para asegurar la validez científica de los datos a obtener, el orden en que se efectuaron los experimentos fue al azar. El tiempo de duración del periodo de oscilación fue tomado de forma visual-manual con ayuda del cronómetro de un teléfono celular. Se contabilizó el tiempo de 10 oscilaciones para minimizar errores asociados al tiempo de reacción visual-manual. Posteriormente, cada dato se dividió entre 10, se elevó al cuadrado y fue el reportado para la duración del periodo a las condiciones de las variables establecidas.

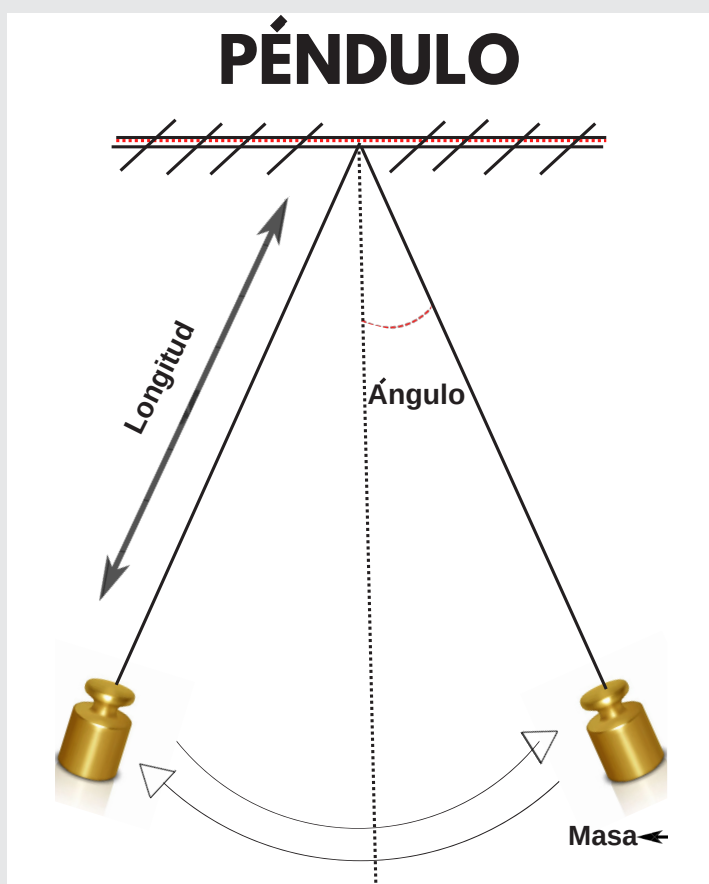


Figura 3.- Representación gráfica de un péndulo simple. Se señalan las tres variables a considerar en el diseño de experimentos, longitud de cuerda, ángulo de oscilación y masa.

Planificación del diseño de experimentos

Para cumplir el carácter didáctico de este proyecto, por su sencillez y claridad, se siguieron las etapas propuestas por Montgomery para el presente diseño de experimentos [13]. Cada una de ellas se desglosa a continuación:

1. Reconocimiento del problema. Escribir en la pizarra el problema propuesto de manera clara y concisa "Establecer los factores que intervienen durante el funcionamiento de un péndulo".

2. Elección de los factores y niveles. Con apoyo de un esquema del péndulo, promover entre los alumnos una lluvia de ideas sobre los factores que influyen en el funcionamiento del péndulo. Anotar en el pizarrón cada sugerencia. Promover la discusión grupal para establecer qué sugerencia puede ser considerada variable. Clasificar como variables primarias aquellas que serán modificados en la experimentación, variables constantes las que no son de interés en el experimento y serán mantenidos constantes, y variables molestas aquellas que presenten complicación en mantenerlas constantes. Para este proyecto, las variables seleccionadas fueron longitud del péndulo, masa oscilante y el ángulo de oscilación.

En base a protocolos publicados previamente, se establecieron los niveles para cada variables, dos para la masa, B1 (150 g) y B2 (300 g) y dos para el ángulo de oscilación, ángulo A1 (10°) y ángulo A2 (35°). Para la variable longitud se establecieron 5 niveles C1, C2, C3, C4 y C5 (60, 70, 80, 90 y 100 cm). Se propuso el análisis por con tres replicas para cada combinación dada [14].

3. Selección de la variable de respuesta. La variable de respuesta se estableció en base al respaldo bibliográfico de múltiples protocolos que han estudiado el movimiento del péndulo, estableciéndose como variable respuesta el tiempo de duración de un periodo.

4. Elección del diseño experimental. En base a la relación que existe entre la variable respuesta y los factores analizados reportada en la bibliografía, se propuso el diseño experimental de bloques al azar en unidades divididas, para evaluar cuales de las variables propuestas influyen sobre la variable respuesta. Este diseño experimental es sencillo dado que no considera las interacciones entre los factores de tratamiento y las de bloque, por lo que, se podría considerar a éste como un experimento de un solo factor (longitud de la cuerda), debido a que el experimentador distribuye los niveles del factor de tratamiento de acuerdo a criterios que él selecciona de manera arbitraria dentro de los factores de bloque, lo cual permite verificar si una variable considerada de ruido, tiene alguna clase de influencia sobre el efecto debido a los cambios en los niveles del factor de tratamiento. Este enfoque permitió llegar a conclusiones similares a la física [15].

Inicialmente se propuso aplicar el diseño factorial, sin embargo, se encontró después de varias repeticiones del experimento, que la variable masa presenta un comportamiento de variable confusa, arrojando una asociación espúrea con el periodo y conclusiones opuestas a las reportadas en la literatura. El empleo del modelo de bloques al azar en unidades divididas permitió el control del sesgo de confusión [16].

Tabla 1. Puntos muestrales de las tres variables evaluadas.

N.º	Angulo	Masa	Longitud
1	A1	B1	C1
2	A2	B1	C1
3	A1	B2	C1
4	A2	B2	C1
5	A1	B1	C2
6	A2	B1	C2
7	A1	B2	C2
8	A2	B2	C2
9	A1	B1	C3
10	A2	B1	C3
11	A1	B2	C3
12	A2	B2	C3
13	A1	B1	C4
14	A2	B1	C4
15	A1	B2	C4
16	A2	B2	C4
17	A1	B1	C5
18	A2	B1	C5
19	A1	B2	C5
20	A2	B2	C5

5. Realización de los experimentos. Dado que el modelo del péndulo puede ser efectuado en aulas y salones de clase, seleccionar grupos de tres personas para realizar los experimentos de acuerdo al protocolo propuesto. Distribuir las tareas de forma que la primera persona sujetará la cuerda a la masa y al punto de soporte, la segunda se encargue de medir la longitud del péndulo, y una tercera persona tomará la masa del péndulo y la ubicará en la posición inicial con el ángulo adecuado. Al soltar la masa, iniciará el movimiento periódico del péndulo.

Realizar un total de 60 experimentos bajo los principios del diseño de experimentos, aleatoriedad, reproducibilidad de réplicas, y bloqueo. En la Tabla 1 se presenta el arreglo sugerido por el diseño experimental. Para que el orden de los 60 experimentos sea completamente al azar, aplicar un muestreo aleatorio simple. Con ayuda del cronómetro de un teléfono celular, tomar el tiempo que tardan diez oscilaciones completas. Dividir este valor entre diez y anotar en el espacio correspondiente en la Tabla de registro de datos.

6. Análisis de datos. Capturar los datos empleando la Hoja de Cálculo del software LibreOffice de acuerdo al esquema del diseño por bloques y realizar el análisis de datos con un software de elección. Con los valo-

res de P obtenidos, interpretar y definir cuáles de ellas afectan el periodo de un péndulo. En el presente proyecto el tamizado de datos, las pruebas de normalidad y homocedasticidad así como la prueba ANOVA para factores individuales e interacciones se realizó empleando el software de libre acceso R Project versión 4.2.1 mediante el IDE R Studio versión 2022.07.0, en un equipo de cómputo HP con procesador AMD E1-6010 APU con AMD Radeon R2 Graphics, memoria RAM de 8 GB, con sistema operativo Linux Mint 20.3 Cinnamon.

7. Conclusiones y recomendaciones. Dado que el comportamiento del péndulo y la naturaleza de las oscilaciones han sido plenamente estudiadas a través de una ecuación que permite el cálculo de la constante de gravedad [11, 12] es factible verificar si se han cumplido los objetivos propuestos en el diseño experimental, al comparar las conclusiones obtenidas por diseño de experimentos, con la metodología tradicional empleada en laboratorios de física de análisis por regresión lineal de los puntos experimentales obtenidos aplicando la ecuación del péndulo simple.

Evaluación de la propuesta didáctica en el aula de clases.

Se procedió a evaluar el valor pedagógico de la propuesta y su aceptación en alumnos que actualmente están matriculados en materias que requieren este tipo de herramientas estadísticas. A grupos de estudiantes en su último año de formación a nivel licenciatura de la carrera de Ingeniería Bioquímica, se les aplico un formulario para evaluar sus impresiones así como el aprendizaje previo y posterior al desarrollo de la práctica. El formulario fue electrónico y anónimo empleando el software de Google forms. Los resultados fueron analizados por prueba t-pareada de dos colas (p=0.05).

RESULTADOS

El modelo del péndulo permitió aplicar la metodología de diseño de experimentos, siguiendo los pasos propuestos por Montgomery [10, 13]. Inicialmente, el problema planteado a un grupo de 30 estudiantes fue determinar los factores que pueden influir en la duración del periodo de un péndulo simple. Bajo el esquema de lluvia de ideas, se propusieron 11 potenciales factores involucrados en el problema. (la gravedad, masa del objeto, corrientes de aire, tipo de hilo, punto donde se colgará el hilo, elasticidad del hilo, fuerza para impulsar el péndulo, presencia de aire, longitud del péndulo, forma del objeto, material con que se elaboró el objeto y ángulo del péndulo). Los factores fueron clasificados de acuerdo a los criterios previamente descritos.

Las variables primarias fueron masa del objeto, longitud del péndulo y ángulo del péndulo, las variables mantenidas constantes fueron gravedad, corrientes de aire, tipo de hilo, punto donde se colgara el hilo, elasticidad del hilo, presencia de aire, forma del objeto y material con que se elaboro el objeto y la variable molesta fue

la fuerza para impulsar el péndulo. Apoyados en los estudios publicados sobre mecánica del péndulo, se propusieron dos niveles para el factor de bloque, para el ángulo 10°(A1) y 35°(A2), para la masa del objeto 150g (B1) y 300g (B2) y 5 niveles para el factor de tratamiento, longitud de péndulo [60 (C1), 70(C2), 80(C3), 90(C4) y 100(C5) cm]; con un número de replicas de tres (n), y un número total de experimentos de 60(N=AxBxCxN). Los puntos muestrales se presentan en la Tabla 1.

Bajo el esquema del diseño experimental de bloques al azar en unidades divididas se derivan 3 objetivos específicos y 3 hipótesis de trabajo para las variables individuales (a, b y c). Para la variable ángulo se define la hipótesis nula ($\mu_{a1}=\mu_{a2}$) y alterna ($\mu_{a1}\neq\mu_{a2}$), para la variable masa se define la hipótesis nula ($\mu_{b1}=\mu_{b2}$) y la alterna ($\mu_{b1}\neq\mu_{b2}$) y para la variable longitud su hipótesis nula ($\mu_{c1}=\mu_{c2}=\mu_{c3}=\mu_{c4}=\mu_{c5}$) y la alterna ($\mu_{c1}\neq\mu_{c2}\neq\mu_{c3}\neq\mu_{c4}\neq\mu_{c5}$). Una explicación detallada se presenta en el sitio web <http://rpubs.com/Gabo6381/958652>.

La obtención de datos fue individual con un tiempo total de 90 minutos. El acopio de datos se realizó empleando la Hoja de Cálculo del software LibreOffice, en las columnas se ubicaron las variables a1(b1 ; b2) y a2(b1 ; b2), mientras que en las filas la variable c (c1;c2;-c3;c4;c5). A fin de visualizar el comportamiento de los datos y detectar si existen datos atípicos, se construyeron diagramas de caja y bigotes para los periodos de las tres replicas de cada una de las 20 combinaciones, empleando el software libre R-Project versión 4.2.1 mediante el IDE R Studio versión 2022.07.0, así como los valores del periodo por factor agrupado (Figura 4).

Como se observa, los datos presentan simetría y no se detecta la presencia de datos atípicos, lo cual da confiabilidad al análisis estadístico posterior.

En algunos experimentos se reportaron errores asociados a una mala perspectiva del estudiante con respecto al péndulo o a una equivocación en el número de oscilaciones, que ocasionó lecturas de 9 o 11 de estas. En caso de observar un comportamiento asimétrico o si existen datos atípicos, se sugiere repetir el experimento.

Con los datos tamizados se realizó una gráfica de probabilidad normal Figura 5 inciso a) además de la prueba de Shapiro-Wilks para verificar el ajuste de los residuos a la distribución normal con media cero, ambas coinciden en reforzar la hipótesis del ajuste hacia esa distribución, se corrió también la prueba de Durbin-Watson, para probar la existencia de autocorrelación en los residuales.

La evidencia muestral de Durbin-Watson mostró nula autocorrelación entre residuales, dejando sólida la hipótesis de independencia, y la prueba de Levene para homogeneidad de varianza, en donde la evidencia muestral mostró que las varianzas son homogéneas. A fin de observar el comportamiento de los residuales estándar para cada factor se construyeron las gráficas de caja y bigote correspondientes Figura 5 inciso b), c) y d). El análisis detallado con datos reales es presentado en <http://rpubs.com/Gabo6381/958652>.

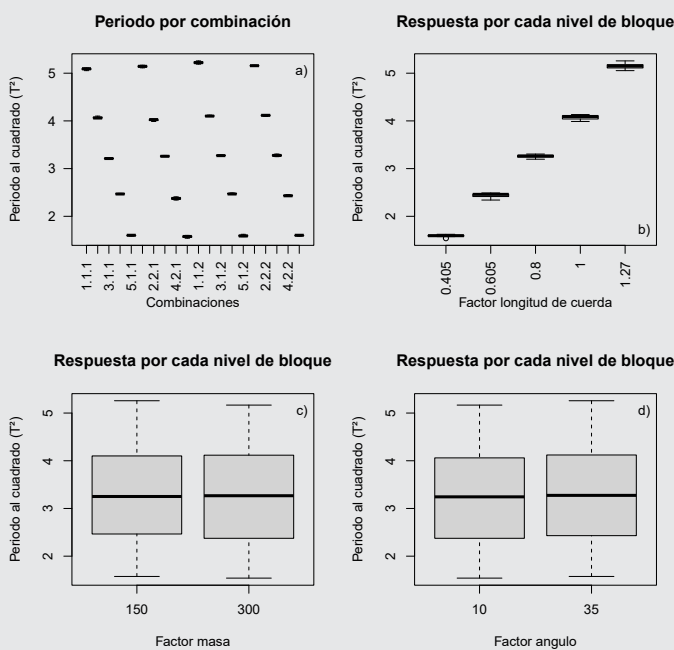


Figura 4.- Valores del periodo por combinación y factor agrupado. Se presenta el comportamiento de los valores de periodo para las diferentes combinaciones propuestas (a) así como para el factor longitud de cuerda (b), masa (c) y ángulo (d).

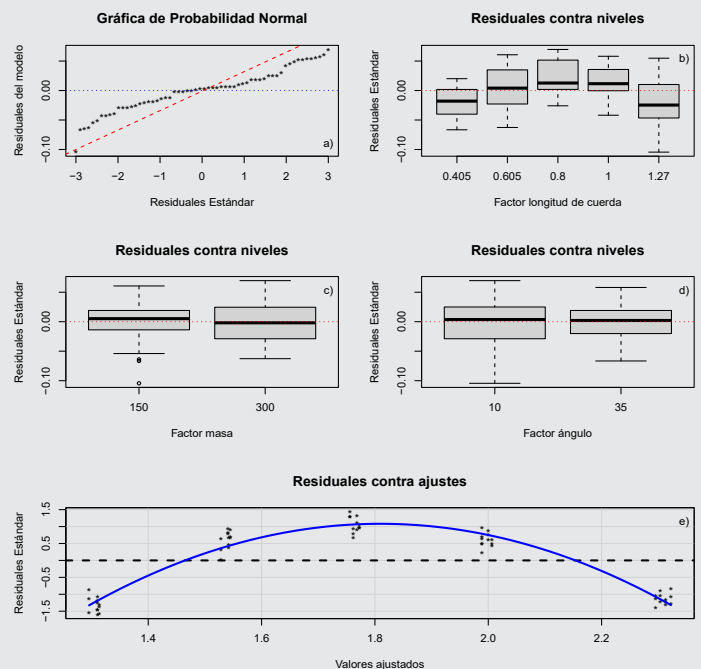


Figura 5. Comportamiento de los residuales estándar para cada factor. Se presentan las gráficas de normalidad (a) así como para residuales en diagrama de caja y bigote para longitud de cuerda (b), masa (c) y ángulo (d).

Un cuadro resumen de los valores de significación de la prueba ANOVA, se muestra en la Tabla 2. Se observan valores menores a 0.05 en las variables de ángulo (a) y longitud (c) lo cual apoya la hipótesis alterna que implica diferencias significativas entre los diferentes niveles de ambas variables y establece un efecto real de la longitud y el ángulo del péndulo sobre el tiempo del periodo. En contraste, para la variable masa (b) los valores de p fueron mayores de 0.05 y apoya la hipótesis nula, sin diferencias significativas entre los niveles de la variable lo cual descarta a la masa como factor que influye en la duración del periodo de un péndulo.

Tabla 2. Resultados de la tabla ANOVA para efectos de la variable de respuesta Periodo al cuadrado.

Predictor	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F	Valor_p
Intersección	88.49	1	88.49	14396.67	.000
Factor Longitud de cuerda	92.02	1	92.02	14971.30	.000*
Factor masa	0.00	1	0.00	0.66	.421
Factor ángulo	0.03	1	0.03	4.96	.030*
Error	0.34	56	0.01		

Las conclusiones obtenidas con el presente modelo se ajustan bien a las reportadas en innumerables estudios que se han hecho sobre el tema desde la perspectiva del estudio del movimiento armónico, en donde la longitud esta considerada como una variable en la ecuación que describe el comportamiento de un péndulo:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad \text{Ec. 1}$$

donde T es el periodo, l es la longitud del péndulo y g es la constante de gravedad.

Esta ecuación corrobora que la única variable que influye en la duración del periodo de un péndulo es la longitud y es valida para ángulos de péndulo menores a 10° , donde se cumple que el valor del seno del ángulo es aproximadamente igual al valor del ángulo, consideración inicial para el desarrollo de esta ecuación y que restringe su uso, ya que para ángulos mayores la ecuación debe modificarse.

En la Figura 6 se presenta el comportamiento lineal de los gráficos del cuadrado de los valores del periodo (T^2) del péndulo en función de la longitud del péndulo (l), para los dos ángulos evaluados. Al aplicar regresión lineal se obtienen ecuaciones para el promedio de cada set de datos, que representan una línea recta. Tales ecuaciones corresponden a la ecuación.

$$T^2 = 4\pi^2 \frac{l}{g} \quad \text{Ec. 2}$$

donde $(4\pi^2)/g$ corresponde a la pendiente de la recta y l es la variable independiente. Con coeficientes de determinación de 1, podemos afirmar que el protocolo propuesto se aplicó de manera correcta. En base a los valores de la pendiente es posible estimar la constante de gravedad " g ". Los valores obtenidos fueron de 9.66 y 9.70 m/seg²; valores muy cercanos a la cons-

tante de gravedad (9.8 m/seg²). En ambas ecuaciones el valor de la ordenada al origen fue cercano a cero, este valor esta relacionado a la correcta determinación de la longitud del péndulo, la cual inicia en el centro de gravedad de la masa, por lo tanto los valores de los centros de gravedad de cada masa fue determinada de manera aceptable.

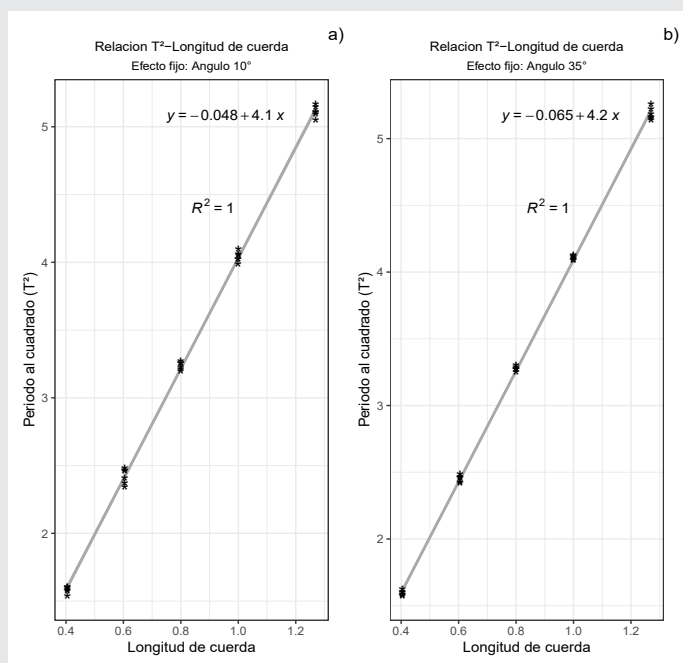


Figura 6. Análisis por regresión lineal de la variable respuesta periodo al cuadrado en función de la longitud de cuerda para un ángulo de 10° (a) y 35° (b), se presenta la ecuación y el valor del coeficiente de regresión lineal.

Para cuantificar el valor pedagógico de esta propuesta se empleó un formulario con preguntas sobre el conocimiento previo y posterior del tema, así también sobre las impresiones de la propuesta didáctica en el alumno. En general la impresión fue positiva; con porcentajes superiores al 80% para aspectos sobre disfrutar la realización del experimento, recomendar su aplicación e incluirlo como parte del curso de Química Analítica, calificar el experimento como activo y si se obtuvo un aprendizaje real y positivo. Con respecto a este último punto, un análisis con prueba t-pareada de dos colas ($p=0.05$) mostró diferencia significativa en el porcentaje de aciertos a las 10 preguntas de conocimientos sobre el tema antes y después de la práctica, con un valor promedio inicial de 45 hasta alcanzar un valor de 82.

Lo anterior sugiere que esta propuesta didáctica es una herramienta viable para incrementar la eficiencia del aprendizaje en el área del diseño de experimentos [17].

CONCLUSIONES

El péndulo simple demostró ser un modelo robusto y reproducible, aplicable al grado de extensión y profundidad que requiere los niveles superior e ingeniería, familiarizando al alumno con el tamizaje de variables,

un aspecto importante del DOE con un modelo atractivo que fusiona teoría y práctica así como promueve el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico, abstracto y estratégico. El éxito de esta propuesta didáctica permite ver áreas de oportunidad para desarrollar prácticas homologas para el aprendizaje teorico-práctico del DOE.

En esta práctica, las variables longitud y ángulo del péndulo se categorizaron como verdaderas variables con niveles de confianza del 95%, mientras la masa demostró no ser variable del experimento.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Cuaical, D. L. C., & Caicedo, D. M. C. (2017). *Influencia de los escenarios pedagógicos: aula de clase y laboratorio en el proceso de enseñanza-aprendizaje de las ciencias naturales*. *Revista Historia de la Educación Colombiana*, 20(20), 65-90.

[2] Flores, J., Caballero Sahelices, M. C., & Moreira, M. A. (2009). *El laboratorio en la enseñanza de las ciencias: Una visión integral en este complejo ambiente de aprendizaje*. *Revista de investigación*, 33(68), 75-111.

[3] Yoldere, H. M., & Adamu, M. (2014). *The challenges facing science education in developing countries and the way forward*. *International Journal of Scientific Engineering and Study*, 3(11), 2347-3878.

[4] Escudero, E. B. (2018). *Breve caracterización del sistema educativo mexicano*. *Revista Latinoamericana de Estudios Educativos (México)*, 48(1), 35-52.

[5] México. Instituto Nacional para la Evaluación de la Educación (2016) *Políticas para fortalecer la infraestructura escolar en México*. Documentos ejecutivos de política educativa. <https://www.inee.edu.mx/wp-content/uploads/2019/02/Documento5-infraestructura.pdf>

[6] Gödek, Y. (2004). *The development of science education in developing countries*. *Ahi Evran Üniversitesi Kırşehir Eğitim Fakültesi Dergisi*, 5(1), 1-11.

[7] Tyokumber, E. T. (2010). *Does science education in developing countries really count?*. *Bulletin of the Ecological Society of America*, 91(4), 432-437.

[8] Noboa, J. E., & Brito, C. P. (2016). *Laboratorios Virtuales: una alternativa para mejorar el rendimiento de los estudiantes y la optimización de recursos económicos*. *INNOVA Research Journal*, 1(11), 91-96.

[9] Antony, J. (2002). "Trainig for Design of Experiments Using a Catapult". *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 18, pp. 29-35.

[9] Izquierdo, L. I., Tanco, M., Viles, E., & Sánchez-Arjona, M. J. Á. (2007). *El diseño de experimentos como herramienta para la mejora de los procesos. Aplicación de la metodología al caso de una catapulta*. *Tecnura*, 10(20), 127-138.

[11] Matthews, M. R., Gauld, C., & Stinner, A. (2004). *The pendulum: Its place in science, culture and pedagogy*. *Science & Education*, 13(4), 261-277.

[12] Kent-Schneider, I., & Kruse, J. (2020). *Using a Simple Pendulum Investigation to Develop Students' History and Nature of Science Knowledge*. *The Physics Teacher*, 58(9), 628-631.

[13] Montgomery, D. C. (2005). *Design and Analysis of Experiments*. 6 ed, ed. 1. Jolm Wiley & Sonso.

[14] Antony, J., & Capon, N. (1998). *Teaching experimental design techniques to industrial engineers*. *International Journal of Engineering*, 14, 335-343.

[15] João M.I., Silva J.M. (2020). *Design of Experiments in Engineering Education: Opportunities and Challenges*. Carrillo-Cedillo E.G., Rodriguez-Avila J.A., Arredondo-Soto K.C., Cornejo-Bravo J.M. (Ed.), *Design of experiments for chemical, pharmaceutical, food, and industrial applications*. 1ra ed., , pp. 341-361). IGI Global, 701 E. Chocolate Avenue, Hershey, PA 17033-1240, USA,

[16] Quispe, A. M., Alvarez-Valdivia, M. G., & Loli-Guevara, S. (2020). *Metodologías Cuantitativas 2: Sesgo de confusión y cómo controlar un confusor*. *Revista del Cuerpo Médico Hospital Nacional Almazor Aguinaga Asenjo*, 13(2), 205-212.

[17] Lugo, J. P., Rossel, Y. O., & Veitía, J. R. (2022). *El pensamiento crítico en el contexto universitario: una vertiente del aprendizaje basado en problemas*. *Warisata-Revista de Educación*, 4(10), 34-54.