

CULCYT

CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA • ISSN 2007-0411



VOLUMEN 20 | NÚMERO 3

SEPTIEMBRE - DICIEMBRE 2023

Directorio Institucional**Mtro. Juan I. Camargo Nassar**
RECTOR**Dr. Daniel Constandse Cortez**
SECRETARIO GENERAL**Dr. Juan F. Hernández Paz**
DIRECTOR DEL INSTITUTO DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA**Mtro. Jesús Meza Vega**
DIRECTOR GENERAL DE COMUNICACIÓN UNIVERSITARIA**Dra. Nelly Gordillo Castillo**
COORDINADORA DE APOYO AL DESARROLLO DE
LA INVESTIGACIÓN Y AL POSGRADO DEL IIT**Comité Editorial****Dra. Nelly Gordillo**
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ
Editora en Jefe**Mtro. Raúl Alfredo Meza González**
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ
Coordinador Editorial**Dr. Víctor Manuel Castaño Meneses**
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**Dr. Ramón Gerardo Guevara González**
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**Dr. Klavdia Oleschko Lutkova**
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**Dr. Abdiel Ramírez Reyes**
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ**Dra. Santos Adriana Martel Estrada**
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ**Dr. David Cortés Sáenz**
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CIUDAD JUÁREZ**Dr. David Ortega Gaucín**
INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

CULCYT se fundó en diciembre de 2003 como parte del programa para la formación de investigadores del Instituto de Ingeniería y Tecnología. Lanzó su primer número en abril de 2004. Fundador: Dr. Victoriano Garza Almanza. A partir de 2019, ha fungido como Editora en Jefe la Dra. Nelly Gordillo Castillo.

CULCYT. CULTURA CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Vol. 20, núm. 3, septiembre-diciembre 2023, es una publicación académica, editada de manera cuatrimestral por la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, a través del Instituto de Ingeniería y Tecnología.

D.R. © UACJ, Avenida del Charro núm. 619 norte, C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

Editora responsable: Dra. Nelly Gordillo Castillo.

Reserva de derechos al uso exclusivo núm.
04-2022-101711332100-102.

ISSN (electrónico): 2007-0411.

Sitio OJS: erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt. Correo electrónico: culcyt@uacj.mx. Teléfono +52 (656) 6884848.

DOI: [10.20983/culcyt.2023.3](https://doi.org/10.20983/culcyt.2023.3)

Modalidad de publicación continua. Tan pronto como un artículo ha sido preparado, se publica en línea.

Los trabajos a publicar en CULCYT deben ser originales e inéditos. En este momento, la revista no tiene costos de publicación para los autores.

El acceso a la revista es libre, sin requerimientos, bajo lo establecido en la normatividad mexicana de acceso abierto, y se da a través de su sitio

<https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt>

o mediante el Repositorio Institucional de la UACJ

<http://ri.uacj.mx/vufind/>



UACJ | Repositorio Institucional

Los artículos firmados son responsabilidad de sus autores.

Se autoriza la reproducción total o parcial, siempre y cuando se cite la fuente.

Información para autores:

<https://erevistas.uacj.mx/ojs/index.php/culcyt/autores>

Los contenidos e imágenes de la publicación están sujetos a una licencia CC 4.0 internacional BY NC.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE CIUDAD JUÁREZ

latindex

Dialnet

CONTENIDO / CONTENTS

Artículos de investigación / Research articles

Aplicación del modelo de Kano al futuro diseño de equipo de rehabilitación para el tratamiento de la anquilosis mandibular **4**

Application of the KANO model for the design of rehabilitation equipment for mandibular ankylosis
 Daniel Brugal García, Erika Guadalupe Meraz Tena

Control pasivo de vibraciones para estructuras mecánicas amortiguadas bajo excitación armónica de aceleración en la base **11**

Passive vibration control for damped mechanical structures under base acceleration harmonic excitation
 José Gabriel Mendoza Larios, Eduardo Barredo Hernández, Irving Abdiel Maldonado Bravo, Cuauhtémoc Mazón-Valadez

Empleo del software RStudio para la validación analítica Pb en suelo urbano **19**

Use of RStudio software for analytical validation of Pb in urban soils
 Eliany Nicado Leal, Alba Yadira Corral Avitia, Laura Elena Santana Contreras, Jonatan Torres Pérez, Miroslava Quiñonez Martínez, Juan Pedro Flores Margez

Artículos de revisión / Review articles

Perspectiva de la oxidación electroquímica de colorantes sintéticos en aguas residuales artificiales: Rol del material anódico **25**

Perspective of electrochemical oxidation of synthetic dyes in artificial wastewater: Role of anode material
 Humberto Rubí Juárez, Linda Estefany Morales Galicia, Marisela Yadira Soto Padilla, Felipe Adrián Vázquez Gálvez

Edición especial Enseñanza de la Física y la Educación para la Ciudadanía / Special edition Teaching of Physics and Citizenship Education

Presentación **E1**

Presentation
 Jesús Manuel Sáenz Villela

The role of undergraduate research in physics education **E2**

El papel de la investigación de pregrado en la educación de la física
 Jorge A. López

Física forense: Una oportunidad desatendida en los libros de texto **E12**

Forensic physics: A neglected opportunity in textbooks
 Dr. Vicente Torres Zúñiga

Implementación de Hojas de Actividades y Clases Interactivas Demostrativas con Simulaciones PhET en Física Conceptual **E20**

Implementation of Activities and Interactive Lecture Demonstrations with PhET Simulations in Conceptual Physics
 Karen Yael Castrejón Parga, Jesús Manuel Sáenz Villela, Eunice Sarai Lara Pérez, Diana Berenice López Tavares

Diseño de actividades bajo el marco de enseñanza para la comprensión en el primer año universitario **E39**

Design of activities under the framework of teaching for understanding at the first-year university level
 Marco Antonio Noguez Córdoba, Mateo Barkovich, Marcos López Chimil, Rita Vázquez Padilla

Aprendizaje de las ciencias: Secado de alimentos como proyecto STEM **E49**

Science learning: Food drying as a STEM project
 Fátima María Isabel de los Santos García, Carmen del Pilar Suárez Rodríguez

Aplicación del modelo de Kano al futuro diseño de equipo de rehabilitación para el tratamiento de la anquilosis mandibular

Application of the KANO model for the design of rehabilitation equipment for mandibular ankylosis

Daniel Brugal García^{1,a}✉, Erika Guadalupe Meraz Tena^{1,b}

¹ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez | ^a{Instituto de Arquitectura, Diseño y Arte, Maestría en Diseño y Desarrollo de Producto} ^b{Instituto de Ingeniería y Tecnología, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computación} | Ciudad Juárez, Chihuahua, México

RESUMEN

En el tratamiento de la anquilosis mandibular se han establecido metodologías y herramientas para proporcionar una correcta rehabilitación, tanto en el ámbito de las malformaciones congénitas como de apariciones posoperatorias, etc. Sin embargo, en la actualidad, las tasas de reincidencia de esta patología, sobre todo posterior a una intervención quirúrgica, son bastante elevadas, por lo que se genera una problemática en dicho proceso que muchas veces termina propiciando nuevamente una intervención quirúrgica. Este artículo ofrece un análisis mediante modelo de Kano para determinar y clasificar los requerimientos de diseño de un producto rehabilitador de la mandíbula. Se aplicó una encuesta a seis expertos con la finalidad de determinar los atributos en el método. Se realizó un muestreo de tipo casual entre 26 personas de ambos sexos, de edades comprendidas entre los 18-70 años, pertenecientes a expertos del área de la medicina. Los datos obtenidos para la clasificación del equipo de rehabilitación evidencian que la mayoría de los requerimientos son de tipo Atractivo (atributo que resulta satisfactorio tenerlo y que no frustra a los usuarios sin él). Esto define el dispositivo a diseñar porque serán características innovadoras en el diseño del producto, pudiendo convertirse en ventajas de mercadotecnia y que además incentiven su uso.

PALABRAS CLAVE: anquilosis; mandíbula; dispositivo; rehabilitación; fisioterapia.

ABSTRACT

In the treatment of mandibular ankylosis, methodologies and tools have been established to provide correct rehabilitation, both in the field of congenital malformations and postoperative appearances, etc. However, currently, the recurrence rates of this pathology, especially after a surgical intervention, are quite high, which creates a problem in this process that often ends up leading to a surgical intervention again. This article offers an analysis using the Kano model to determine and classify the design requirements of a jaw rehabilitation product. A survey was applied to six experts in order to determine the attributes in the method. A casual sampling was carried out among 26 people of both sexes, aged between 18-70 years, belonging to experts in the area of medicine. The data obtained for the classification of the rehabilitation equipment shows that the majority of the requirements are of the Attractive type (an attribute that is satisfactory to have and that does not frustrate users without it). This defines the device to be designed because they will be innovative features in the design of the product, which can become marketing advantages and also encourage its use.

KEYWORDS: ankylosis; mandible; device; rehabilitation; physiotherapy.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Daniel Brugal García

INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Arquitectura, Diseño y Arte.

DIRECCIÓN: Av. del Charro núm. 450, col. Partido Romero, C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

CORREO ELECTRÓNICO: al216631@alumnos.uacj.mx

Fecha de recepción: 10 de mayo de 2023. **Fecha de aceptación:** 10 de octubre de 2023. **Fecha de publicación:** 20 de octubre de 2023.



I. INTRODUCCIÓN

La anquilosis de la articulación temporomandibular (ATM) es un desorden que lleva a una restricción de la apertura bucal con reducción parcial de los movimientos mandibulares o una completa inmovilidad de la mandíbula. Es una aflicción extremadamente desagradable que causa problemas en la masticación, digestión, habla, apariencia e higiene. En los pacientes en crecimiento, las deformidades de la mandíbula y maxila pueden ocurrir junto con maloclusión [1], [2].

La causa más frecuente son los accidentes automovilísticos, los deportes o la violencia. La anquilosis temporomandibular también puede ocurrir como secuela de infecciones del oído medio o de la mastoides que se extienden a la articulación por contigüidad, afectando las superficies articulares y causando la fusión con el hueso temporal, o por osteomielitis del cuerpo de la mandíbula debida una infección dental o por enfermedades sistémicas que afecten las articulaciones como la artritis reumatoide juvenil [3].

La anquilosis de la ATM puede clasificarse usando una mezcla del lugar (intraarticular o extraarticular), el tipo de tejido perjudicado (óseo, fibroso o fibro-óseo) y la expansión de la fusión (completa o incompleta). La anquilosis está clasificada como verdadera o falsa. En la anquilosis verdadera hay una unión ósea o fibrosa en medio de las áreas de la articulación en la cápsula, en tanto que en la anquilosis falsa los inconvenientes radican en las construcciones circundantes, es decir, los elementos que rodean la articulación, pero no forman parte de ella [4].

Los deslizamientos articulares siempre tienen que ser dirigidos, con el fin de readaptar la situación del condilo a las nuevas demandas biomecánicas, flexibilizando las estructuras que lo impiden. Se pueden realizar deslizamientos postero-antérieures de forma intraoral y lateral de forma extraoral. Son bastantes las técnicas usadas en fisioterapia para tratar las disfunciones de la ATM, todas ellas usadas con el objetivo de reducir la isquemia local, estimular la propiocepción, romper las adherencias fibrosas, así como estimular la membrana sinovial para la producción de líquido y reducir el dolor [5].

Después del proceso operatorio y una vez que el dolor postoperatorio ha disminuido, se debería empezar la terapia servible del paciente, en la cual se pide que

abra y cierre la boca con ayuda de aditamentos o con artefactos que se colocan en la parte subsiguiente para hacer movimientos de apertura y cierre, lo que causará tensión sobre los ligamentos y los músculos que rodean la cápsula articular. Los ejercicios integran movimientos de apertura, excursión lateral y estiramiento manual [6].

En este caso en concreto, debido a las deficiencias de los productos existentes se busca diseñar un dispositivo para facilitar la fisioterapia y proporcionar una correcta realización de los ejercicios de rehabilitación, teniendo en cuenta los daños que puede causar la errónea o nula puesta en práctica de estos.

Para ello, el propósito principal de este estudio es aplicar el modelo de Kano para poder identificar y clasificar aquellos atributos que deben estar presentes en el diseño del dispositivo rehabilitador, partiendo de las necesidades detectadas por el cliente. El presente trabajo parte de la aplicación de una encuesta para detectar dichas necesidades y poder aplicar el modelo de Kano e interpretar sus resultados.

La investigación realizada definió, en un primer momento, los atributos detectados por el cliente con relación a las características con que debe contar el dispositivo rehabilitador y, enseguida, se aplicó el modelo de Kano para clasificar, según las cinco dimensiones de calidad establecidas por Kano, los atributos identificados en la primera etapa del proyecto.

II. METODOLOGÍA

DISEÑO DEL ESTUDIO

Para identificar los atributos a utilizar en el modelo de Kano, se encuestó en línea a un grupo de expertos y, una vez definidos estos atributos, se aplicó el modelo de Kano a un grupo de cirujanos maxilofaciales y, finalmente, se reportaron los resultados, así como su análisis e interpretación. Se trató, en este sentido, de un estudio transversal y descriptivo.

MUESTRA

En relación con la encuesta mencionada, se realizó un muestreo intencional u opinativo de 6 especialistas. Y para aplicar el cuestionario de Kano, se llevó a cabo un muestreo de tipo accidental o casual entre 26 personas

de ambos sexos, de edades comprendidas entre los 18-70 años, todos pertenecientes al sector laboral.

MATERIALES

La encuesta a expertos y el cuestionario de Kano fueron llevados a cabo mediante la plataforma en línea de formularios de Google Forms y para recopilar los resultados de ambos cuestionarios, así como para el análisis e interpretación del modelo de Kano, se utilizó una plantilla de Microsoft Excel, con las tablas, gráficas y ecuaciones necesarias.

LA METODOLOGÍA DE KANO

Las etapas de la aplicación el modelo de Kano se definen enseguida:

Etapla 1: Identificación de requerimientos-necesidades del cliente.

Se solicitó a un grupo de expertos que contestaran un cuestionario en línea para determinar las principales características con que debe contar el producto y que pudieran abarcar cualquier área que el encuestado considerara. Dos preguntas fueron de tipo abierto, pero limitadas en el número de elementos a incluir en la respuesta, mientras que las otras dos fueron de valoración. El cuestionario fue enviado a los expertos mediante correo electrónico, incluyendo un enlace para que contestaran.

Etapla 2: Construcción del cuestionario de Kano.

Después de recabar los atributos aportados por los expertos, se hizo un proceso de filtración de todas las respuestas obtenidas para usar aquellas comunes y sin repetir para la construcción del cuestionario de Kano, cuya elaboración se basó fundamentalmente en dos tipos de preguntas por cada atributo: la funcional y la disfuncional. Mientras la primera cuestiona cómo se siente el cliente en el caso que el atributo esté presente en el producto, la segunda cuestiona cómo se siente en el caso contrario, cuando el atributo no se encuentra presente en el producto.

Las preguntas fueron de tipo opción múltiple de respuesta única y el encuestado debió seleccionar, tanto para la pregunta disfuncional como funcional, alguna de las siguientes opciones:

1. Me gustaría.
2. Debe estar presente.
3. Me da igual.
4. No me gusta, pero lo tolero.
5. No me gustaría.

La combinación de las respuestas funcionales y disfuncionales de un mismo atributo dio como resultado la clasificación inicial del requerimiento del usuario. Dichas clasificaciones son las siguientes:

1. A (Atractivo). Atributo que resulta satisfactorio tenerlo y que no frustra a los usuarios sin él.
2. U (Unidimensional). Se relaciona positiva y linealmente con la satisfacción del cliente. En otras palabras, cuanto mayor sea la presencia de este atributo, mayor será la satisfacción del usuario.
3. O (Obligatorio). La falta de él genera insatisfacción en el cliente, pero su presencia no conduce a una mayor satisfacción para el usuario.
4. I (Indiferente). Atributo que, con o sin él, no genera satisfacción ni insatisfacción al usuario.
5. R (Reversible). Su presencia genera insatisfacción y su ausencia conduce a la satisfacción del usuario.

Etapla 3: Evaluación e interpretación

Al aplicar la tabla de Kano a las respuestas de los 26 cuestionarios y utilizar la tabla de evaluación de Kano se obtuvieron los requerimientos ya clasificados según lo define el método, así como el procesamiento del método en porcentajes.

Con la información obtenida del análisis de frecuencias, se calculó el Coeficiente de Satisfacción (CS) y el Coeficiente de Insatisfacción (CI), el cual se utilizó para conocer el impacto promedio de un atributo del producto en la satisfacción de todos los clientes. Para todo ello se hizo uso de hojas de cálculo de Microsoft Excel. Por último, con el fin de evaluar la significancia estadística de la clasificación del modelo de Kano, se calculó la diferencia absoluta de las dos frecuencias más altas de las alternativas (Atractivo, Obligatorio, Rendimiento, Indiferente, Opuesto y Cuestionable) y se comparó con el estadístico Q, el cual se calculó mediante fórmulas predefinidas en Excel.

En el análisis de todos los datos se utilizó una plantilla de Microsoft Excel, con las tablas, gráficas y ecuaciones necesarias.

III. RESULTADOS

En primer lugar, se muestra en la [Tabla 1](#) los atributos determinados por los requerimientos que demanda el diseño del producto.

Se aplicó la tabla de Kano a las respuestas de los 27 cuestionarios, utilizando la tabla de evaluación de Kano, que es una sumatoria de los resultados de cada una de las clasificaciones de las preguntas funcionales y disfuncionales mostradas en la [Tabla 2](#), así como la [Tabla 3](#), que contiene el porcentaje de cada clasificación con respecto a cada atributo. Con la información obtenida del análisis de frecuencias, en la [Tabla 4](#) se calculó

el Coeficiente de Satisfacción (CS) y el Coeficiente de Insatisfacción (CI), el cual se utiliza para conocer el impacto promedio de un atributo del producto en la satisfacción de todos los clientes ^[7].

TABLA 1
REQUERIMIENTOS - ATRIBUTOS

EQUIPO DE REHABILITACIÓN	Simplicidad de uso
	Modo de uso
	Apariencia llamativa
	Fácilmente higienizable
	Económico
	Materiales hipoalergénicos
	Adaptabilidad
	Reutilizable
	Incentivar rehabilitación
	Peso del producto

TABLA 2
PROCESAMIENTO DEL MÉTODO

SUMATORIA DE CRITERIOS									
	REQUERIMIENTOS	A	U	O	R	C	I	TOTAL	CLASIFICACIÓN
1	Simplicidad de uso	15	6	1	0	1	4	27	Atractivo
2	Modo de uso	13	4	1	5	0	4	27	Atractivo
3	Apariencia llamativa	7	5	0	8	0	7	27	Reversible
4	Apariencia profesional	10	8	5	0	0	4	27	Atractivo
5	Fácilmente higienizable	4	12	6	0	0	5	27	Unidimensional
6	Económico	12	11	1	0	0	3	27	Atractivo
7	Materiales hipoalergénicos	8	8	6	0	0	5	27	Atractivo-Unidimensional
8	Adaptabilidad	9	9	7	0	0	2	27	Atractivo-Unidimensional
9	Reutilizable	15	4	4	2	0	2	27	Atractivo
10	Incentivar rehabilitación	8	10	4	0	0	5	27	Unidimensional
11	Peso del producto	11	5	6	0	0	5	27	Atractivo

TABLA 3
PROCESAMIENTO DEL MÉTODO EN PORCENTAJES

SUMATORIA DE CRITERIOS									
	REQUERIMIENTOS	A	U	O	R	C	I	TOTAL	CLASIFICACIÓN
1	Simplicidad de uso	55 %	22 %	4 %	0 %	4 %	15 %	100 %	Atractivo
2	Modo de uso	48 %	15 %	4 %	19 %	0 %	15 %	100 %	Atractivo
3	Apariencia llamativa	26 %	19 %	0 %	30 %	0 %	26 %	100 %	Reversible
4	Apariencia profesional	37 %	30 %	19 %	0 %	0 %	15 %	100 %	Atractivo
5	Fácilmente higienizable	15 %	44 %	22 %	0 %	0 %	19 %	100 %	Unidimensional
6	Económico	44 %	41 %	4 %	0 %	0 %	11 %	100 %	Atractivo
7	Materiales hipoalergénicos	30 %	30 %	22 %	0 %	0 %	19 %	100 %	Atractivo-Unidimensional
8	Adaptabilidad	33 %	33 %	26 %	0 %	0 %	7 %	100 %	Atractivo-Unidimensional
9	Reutilizable	56 %	15 %	15 %	7 %	0 %	7 %	100 %	Atractivo
10	Incentivar rehabilitación	30 %	37 %	15 %	0 %	0 %	19 %	100 %	Unidimensional
11	Peso del producto	41 %	19 %	22 %	0 %	0 %	19 %	100 %	Atractivo

TABLA 4
CÁLCULO DE CS Y CI

SUMATORIA DE CRITERIOS										
	REQUERIMIENTOS	A	U	O	R	C	I	TOTAL	CS (+)	CI (-)
1	Simplicidad de uso	56 %	22 %	4 %	0 %	4 %	15 %	100 %	0.8077	-0.2692
2	Modo de uso	48 %	15 %	4 %	19 %	0 %	15 %	100 %	0.7727	-0.2273
3	Apariencia llamativa	26 %	19 %	0 %	30 %	0 %	26 %	100 %	0.6316	-0.2632
4	Apariencia profesional	37 %	30 %	19 %	0 %	0 %	15 %	100 %	0.6667	-0.4815
5	Fácilmente higienizable	15 %	44 %	22 %	0 %	0 %	19 %	100 %	0.5926	-0.6667
6	Económico	44 %	41 %	4 %	0 %	0 %	11 %	100 %	0.8519	-0.4444
7	Materiales hipoalergénicos	30 %	30 %	22 %	0 %	0 %	19 %	100 %	0.5926	-0.5185
8	Adaptabilidad	33 %	33 %	26 %	0 %	0 %	7 %	100 %	0.6667	-0.5926
9	Reutilizable	56 %	15 %	15 %	7 %	0 %	7 %	100 %	0.7600	-0.3200
10	Incentivar rehabilitación	30 %	37 %	15 %	0 %	0 %	19 %	100 %	0.6667	-0.5185
11	Peso del producto	41 %	19 %	22 %	0 %	0 %	19 %	100 %	0.5926	-0.4074

La Figura 1 muestra gráficamente los valores de CS y CI dentro de un mismo atributo, teniendo en cuenta que en el caso de que el atributo evaluado tenga un valor de CS próximo a 1, se entiende que, si dicho atributo se incluye, el usuario experimentará una gran satisfacción. Por otro lado, si el valor de CI para el atributo evaluado se acerca a -1, se entiende que, si este atributo no se incluye, el usuario experimentará una gran insatisfacción.

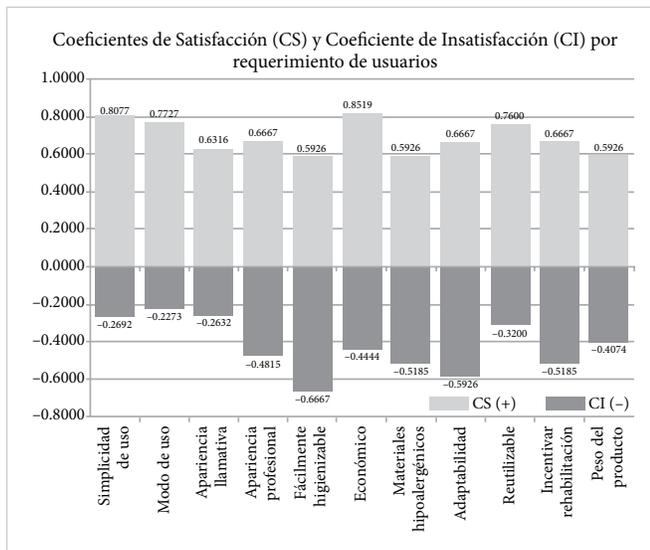


Figura 1. Valores de CS y CI.

En la Figura 2 es un esquema general utilizado para clasificar los requerimientos en función de los valores de los coeficientes CS y CI que se han obtenido para cada atributo. Esta clasificación se puede dar en cuatro variantes diferentes: Atractivo, Unidimensional, Indiferente u Obligatorio [8].

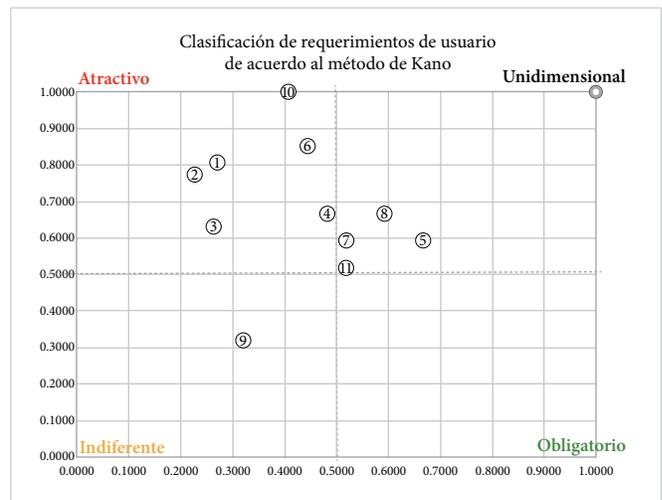


Figura 2. Clasificación de requerimientos según los valores de CS y CI.

Por último, para determinar si la clasificación del modelo de Kano fue estadísticamente significativa, se realizó un cálculo que consiste en obtener la diferencia absoluta entre las dos frecuencias más altas de las alternativas, es decir, Atractivo, Obligatorio, Rendimiento, Indiferente, Opuesto y Cuestionable. Posteriormente, esta diferencia se comparó con el valor del estadístico Q, el cual se obtuvo a través de la Ecuación (1).

$$Q = 1.65 \cdot \sqrt{\frac{(a + b) \cdot (2n - a - b)}{2n}} \quad (1)$$

en donde, Q es el estadístico Q, a y b son las frecuencias de las observaciones más altas y n es el número total de respuestas.

Se comparó el valor de la diferencia absoluta entre a y b , o sea, $abs(a - b)$, con el valor del estadístico Q , para cada respuesta. En caso de que el valor de $abs(a - b)$ sea menor que Q , se considera que la clasificación del

atributo no tiene significancia estadística. En cambio, si el valor de $abs(a - b)$ es mayor que el estadístico Q , se considera que la clasificación es estadísticamente significativa [8].

TABLA 5
TEST ESTADÍSTICO Q

SUMATORIA DE CRITERIOS										
	REQUERIMIENTOS	A	U	O	R	C	I	TOTAL	CS (+)	CI (-)
1	Simplicidad de uso	15	6	1	0	1	4	27	9	0.788
2	Modo de uso	13	4	1	5	0	4	27	8	1
3	Apariencia llamativa	7	5	0	8	0	7	27	1	0.723
4	Apariencia profesional	10	8	5	0	0	4	27	2	1
5	Fácilmente higienizable	4	12	6	0	0	5	27	6	0.615
6	Económico	12	11	1	0	0	3	27	1	1
7	Materiales hipoalergénicos	8	8	6	0	0	5	27	0	0.705
8	Adaptabilidad	9	9	7	0	0	2	27	0	1
9	Reutilizable	15	4	4	2	0	2	27	11	1
10	Incentivar rehabilitación	8	10	4	0	0	5	27	2	1
11	Peso del producto	11	5	6	0	0	5	27	5	1

Los datos obtenidos para la clasificación del equipo de rehabilitación evidencian que la mayoría de los requerimientos son de tipo Atractivo para la muestra realizada. Esto, por una parte define el dispositivo a diseñar porque serán características innovadoras en el diseño del producto, pudiendo convertirse en ventajas de mercadotecnia y que incentiven su uso.

En dos de los atributos (materiales hipoalergénicos y adaptabilidad) se encuentran dispersos entre Atractivo y Unidimensional (este se refiere a un atributo que guarda una relación directa y positiva con la satisfacción del cliente, lo que significa que cuanto más se cumple este atributo, mayor será el grado de satisfacción del usuario) [9], lo cual requiere que se deban seguir evaluando para establecer si existe algún error o mala redacción de las preguntas. También se encuentran presentes atributos unidimensionales, por lo que estos atributos (fácilmente higienizable e incentivar la rehabilitación) se encuentran directamente relacionados con la satisfacción del cliente, por tanto, resultaron ser imprescindibles para el proyecto.

A estas alturas, se obtuvo una clasificación para los atributos, sin embargo, se hizo necesario continuar con un análisis más profundo que el propio método propone. Ello fue validado por la aparición de atributos que se

encontraban dispersos entre otros datos. Para obtener una mejor interpretación, se calcularon los Coeficientes de Satisfacción (CS) e Insatisfacción (CI).

La representación gráfica anterior está dada por el cálculo de CS y CI. En esta se puede apreciar que la mayoría de los requerimientos resultaron ser Atractivos para los usuarios que fueron encuestados. Esto se traduce a que aumentan la satisfacción del cliente, pero no resultan ser imprescindibles, siendo el número 10 el que presenta mayor satisfacción que todos.

Los atributos que se encuentran dentro de la categoría Unidimensional (como se muestra en la Figura 2) son: fácilmente higienizable, adaptabilidad, materiales hipoalergénicos y peso del producto, sin embargo, materiales hipoalergénicos y peso del producto se encuentran bien próximos al grupo Atractivo. Es importante señalar que en mayor medida en que se encuentren presentes estos atributos, mejor aceptación tendrá el producto. El atributo Reutilizable cayó dentro del grupo Indiferente, por lo que su presencia en el producto no causa satisfacción ni insatisfacción y, por tanto, deberá evaluarse si es necesaria su presencia.

Teniendo en cuenta el cálculo de la prueba Q se puede evaluar la aplicación y la clasificación de los atributos de

Kano se puede apreciar en la [Tabla 5](#) cómo dos de los requerimientos evaluados se deberían estudiar más a fondo para determinar si existen diferentes segmentos de mercado o si hay algún error, ello debido a que los valores de $!(a - b)$ son menores que el valor de Q. Sin embargo, estos dos resultaron ser atributos Unidimensionales, por lo que lo más probable es que se trate de diferencias en los perfiles de mercado a los que fue aplicada la muestra.

IV. CONCLUSIONES

Las clasificaciones que se obtuvieron a partir de los atributos seleccionados permitieron establecer el papel con que cuenta cada uno de ellos en el avance del proyecto. En su mayoría fueron clasificados como Atractivos, por lo que establecieron el carácter incentivo de la muestra hacia estos atributos.

Los resultados del estudio también arrojaron que la desigualdad de los perfiles ocasionó diferencias de opiniones significativas en la muestra, por lo que se hace recomendable, para futuros trabajos, seleccionarla mejor. Todo ello pauta los elementos a tener en cuenta en el desarrollo del producto y acerca de cómo incorporarlo para que los resultados se encuentren en concordancia con el criterio de las personas más calificadas para evaluarlos.

REFERENCIAS

- [1] D. Molina, P. Aguayo, C. Ulloa, V. Iturriaga, T. Bornhardt y M. Saavedra, “Anquilosis de la articulación temporomandibular: Una revisión de la literatura”, *Av Odontostomatol*, vol. 29, no. 5, 2013.
- [2] M. C. Aragón, F. Aragón y L. M. Torres, “Trastornos de la articulación témporo-mandibular”, *Rev. Soc. Esp. Dolor*, vol. 12, no. 7, pp. 429-435, 2005.
- [3] F. Belmont-Laguna, L. Sánchez-Matus, J. Téllez-Rodríguez y H. Ceballos-Hernández, “Terapia funcional en el postoperatorio de la anquilosis temporomandibular en pacientes pediátricos (1ª parte)”, *Acta Pediatr Mex*, vol. 28, no. 3, pp. 111-117, 2007.
- [4] J. G. Ravelo, J. C. López y R. Ruiz, “Anquilosis temporomandibular. Liberación, reconstrucción con injerto de apófisis coronoides y cartílago auricular: Presentación de caso clínico”, *Rev. Odont. Mex.*, vol. 15, no. 2, pp. 115-121, abr.-jun., 2011.
- [5] R. Martínez-García, “Tratamiento fisioterapéutico de las disfunciones de la articulación temporomandibular (ATM)”, *Revista Internacional de Fisioterapia y Rehabilitación*, vol. 5, no. 1, pp. 26-32, 2020.
- [6] Y. Cabrera, C. M. Albornoz y S. Hidalgo, “Terapéutica actual de los trastornos temporomandibulares”, *AMC*, vol. 6, no. 2, mar.-abr. 2002.
- [7] C. Berger *et al.*, “Kano’s methods for understanding customer-defined quality,” *Centre for Quality Management Journal*, vol. 2, no. 4, pp. 3-35, 1993.
- [8] J. L. Hernández y M. C. Hernández, “Usabilidad”, en *Teorías y métodos del diseño*, L. Soto y J. M. Madrid, coords., 1.ª ed., Ciudad Juárez: UACJ, 2013, pp. 1-17.
- [9] C.-C. Yang, “The Refined Kano’s Model and its Application”, *Total. Qual. Manag. Bus. Excell.*, vol. 16, no. 10, pp. 1127-1137, 2005, doi: [10.1080/14783360500235850](https://doi.org/10.1080/14783360500235850).

Control pasivo de vibraciones para estructuras mecánicas amortiguadas bajo excitación armónica de aceleración en la base

Passive vibration control for damped mechanical structures under base acceleration harmonic excitation

José Gabriel Mendoza Larios¹✉, Eduardo Barredo Hernández¹, Irving Abdiel Maldonado Bravo², Cuauhtémoc Mazón-Valadez²

¹ Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM) | Huajuapán de León, Oaxaca, México

² Tecnológico Nacional de México | Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) | Cuernavaca, Morelos, México

RESUMEN

Este trabajo se preocupa con la solución del problema de optimización \mathcal{H}_∞ para estructuras mecánicas amortiguadas de un grado de libertad (SDOF) acopladas al Absorbedor Dinámico de Vibraciones (DVA) clásico, bajo el efecto de movimientos armónicos del suelo. Con el objetivo de obtener primeramente fórmulas simples de diseño, se toma en cuenta la función de respuesta en frecuencia (FRF) de la estructura primaria no amortiguada como la función objetivo a ser minimizada en las frecuencias invariantes de control cuadradas. Para abordar esto, se aplica la técnica de los puntos fijos (FPT) basada en el enfoque de Krenk, y luego se producen soluciones cuasi-óptimas. Inspirado en la metodología de Nishihara, se calculó la medida de rendimiento de control \mathcal{H}_∞ resolviendo numéricamente un conjunto de ecuaciones no lineales, y tomando en cuenta las soluciones de forma cerrada producidas por la FPT como puntos de inicio para las iteraciones. Se observó que los puntos de resonancia de la estructura primaria amortiguada disminuyen cuando aumenta el amortiguamiento estructural. Independientemente del amortiguamiento estructural agregado al sistema mecánico, la metodología de optimización utilizada proporciona un buen compromiso para reducir con precisión los puntos de resonancia de la FRF.

PALABRAS CLAVE: técnica de los puntos fijos; puntos fijos; criterio \mathcal{H}_∞ ; DVA; excitación de aceleración armónica en la base.

ABSTRACT

This work is concerned with the \mathcal{H}_∞ optimization problem's solution for single-degree-of-freedom (SDOF) damped mechanical structures coupled to the classic Dynamic Vibration Absorber (DVA) under the effect of harmonic ground motions, which provides an analytical and numerical design framework. In order to firstly obtain simple design formulas, the undamped primary structure's frequency response function (FRF) is taken into consideration as the objective function to be minimized at its square control invariant frequencies. To address this, the fixed-points technique (FPT) based on Krenk's approach is applied, and then short quasi-optimal solutions are yielded. Inspired by the Nishihara' methodology, the \mathcal{H}_∞ control performance measure was computed by numerically solving a set of non-linear equations and taking into account the closed-form solutions rendered by the FPT as starting points for iterations. It was observed that the damped primary structure's resonant points decreases when the structural damping increases. No matter the structural damping added to mechanical system, the used optimization methodology provides a good compromise to accurately reducing the FRF's resonant points.

KEYWORDS: fixed-points technique; fixed-points; \mathcal{H}_∞ criteria; DVA; base acceleration harmonic excitation.

Correspondencia:

DESTINATARIO: José Gabriel Mendoza Larios.

INSTITUCIÓN: Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM).

DIRECCIÓN: Carretera a Acatlima km 2.5, C. P. 69000, Huajuapán de León, Oaxaca, México.

CORREO ELECTRÓNICO: jgml@mixteco.utm.mx

Fecha de recepción: 25 de abril de 2023. **Fecha de aceptación:** 16 de octubre de 2023. **Fecha de publicación:** 31 de octubre de 2023.



I. INTRODUCCIÓN

Existen diferentes fuentes de excitación que causan una actividad vibratoria en máquinas y estructuras, la cual, en condiciones de bajo o nulo amortiguamiento, puede alcanzar niveles críticos que pueden comprometer la integridad estructural de los sistemas mecánicos. Por esta razón, se han implementado diferentes dispositivos y/o estrategias para controlar la vibración de los sistemas mecánicos y llevarlos a un estado de operación seguro. Dentro de los dispositivos implementados se encuentra el absorbedor dinámico de vibración (DVA, por sus siglas en inglés).

El DVA, es un dispositivo mecánico que tiene la capacidad de generar un equilibrio dinámico de fuerzas cuando se acopla a una máquina o estructura mecánica (llamada estructura primaria), lo que produce una disminución en su amplitud de vibración. Es por esta razón que el DVA se ha utilizado para el control de vibraciones en edificios, puentes, tuberías y cables [1], entre otras aplicaciones.

El primer DVA sin amortiguamiento estaba constituido por una masa y un resorte [2]. Este dispositivo tiene la capacidad de eliminar completamente la vibración de la estructura primaria cuando esta opera a su frecuencia natural. Sin embargo, el rango de frecuencias de excitación que puede filtrar es muy reducido [3]. Posteriormente, a este DVA se le añadió un amortiguador. Para el diseño óptimo de este nuevo dispositivo, se desarrollaron soluciones analíticas utilizando la teoría de los puntos fijos (FPT, por sus siglas en inglés) [4]. La adición del amortiguamiento al DVA provocó un incremento del ancho de banda de frecuencias de operación que puede filtrar el dispositivo.

Después, fue desarrollada una teoría de ajuste de frecuencias con la finalidad de calcular el factor de amortiguamiento óptimo que aplanara la función de respuesta en frecuencia (FRF, por sus siglas en inglés) de la estructura primaria, en el rango de frecuencias en las que puede operar el DVA [5]. Por otra parte, se planteó soluciones analíticas para el diseño óptimo del DVA al minimizar los índices de rendimiento H_∞ y H_2 , considerando a la estructura primaria como amortiguada y no amortiguada [6], [7], [8]. Adicionalmente, se propuso la solución analítica del diseño óptimo del DVA al considerar como fuente de excitación una masa desbalanceada [9].

En este trabajo, se estudió la mitigación de forma pasiva de las vibraciones de una estructura mecánica, generadas por una excitación de aceleración armónica en la base, mediante la puesta en funcionamiento de un DVA.

Como resultado de la implementación de la FPT y la teoría de Krenk, fue posible desarrollar ecuaciones de forma cerrada simplificadas para el cálculo de los parámetros de diseño del DVA optimizados. También, mediante la utilización del método de Nishihara y en conjunto con el teorema de Vieta, se logró la optimización del índice de rendimiento \mathcal{H}_∞ , a partir del cual se extrajeron los parámetros de diseño óptimos del DVA de forma numérica, considerando a la estructura primaria como amortiguada y no amortiguada.

II. METODOLOGÍA

El desarrollo de esta investigación comenzó con la revisión del estado del arte sobre los absorbedores dinámicos de vibración. Posteriormente, se definió el problema de estudio, el cual consiste en el control pasivo de la vibración de una estructura con y sin amortiguamiento de un grado de libertad mediante la implementación de un DVA, al considerar como fuente de excitación un movimiento de aceleración armónica en la base de la estructura. Después, se obtuvo la FRF de la estructura mecánica con el absorbedor y se calcularon los parámetros optimizados para el diseño del DVA, mediante la aplicación de la FPT y la norma \mathcal{H}_∞ . Por último, se presentan y discuten los resultados obtenidos y las conclusiones de la investigación.

A continuación, se proporciona la metodología utilizada para la obtención del modelo matemático y la función de respuesta en frecuencia de la estructura mecánica con el DVA bajo excitación de aceleración armónica en la base.

MODELADO MATEMÁTICO

El sistema que se analiza en esta investigación se muestra en la [Figura 1](#), el cual está compuesto por una estructura primaria de un grado de libertad y una estructura secundaria correspondiente al absorbedor dinámico de vibración. El DVA se compone por una masa y una combinación en paralelo de resorte y amortiguador viscoso, que se conectan entre las masas de las estructuras: primaria y secundaria. Además, se considera que la es-

estructura primaria se excita mediante aceleración armónica en su base.

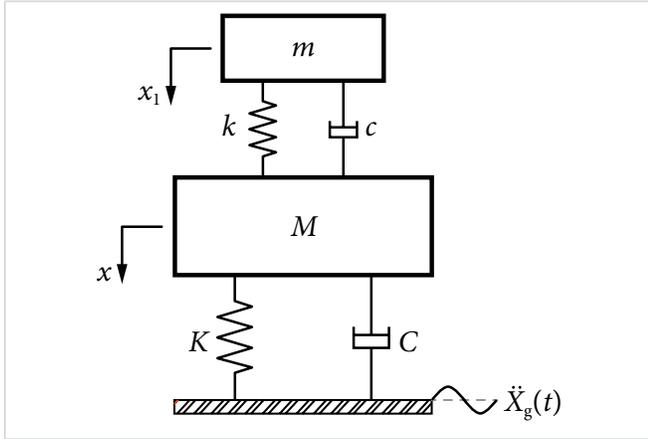


Figura 1. Sistema con DVA bajo excitación de aceleración armónica en la base.

Mediante la implementación del formulismo Euler-Lagrange para sistemas no conservativos es fácil obtener el modelo matemático del sistema que se muestra en la Figura 1, el cual se puede expresar como sigue:

$$\begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{x}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C+c & -c \\ -c & c \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{x} \\ \dot{x}_1 \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} K+k & -k \\ -k & k \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ x_1 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -Ma_g \\ -ma_g \end{Bmatrix} \quad (1)$$

donde los parámetros de la estructura primaria M , C y K representan su masa, su amortiguamiento y su rigidez, respectivamente; m , c y k constituyen la masa, el amortiguamiento y la rigidez del sistema secundario, que es el absorbedor de vibraciones, y $\ddot{X}_g(t)$ es la excitación de aceleración en la base, la cual se define a partir de $\ddot{X}_g(t) = a_g e^{i\omega t}$. Por otro lado, a_g representa la amplitud de la excitación de aceleración armónica en la base, y ω es la frecuencia de la excitación en el sistema.

Después de la transformación de Fourier, la FRF adimensional del sistema dinámico especificado a partir de la Ecuación (1) y considerando $C \cong 0$, se define como sigue:

$$|H(\mu, q, \zeta_2, \Omega)| = \frac{X\omega^2}{a_g} = \left[\frac{A(\mu, q, \Omega) + B(q, \zeta_2, \Omega)}{C(\mu, q, \Omega) + D(\mu, q, \zeta_2, \Omega)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

con

$$A = [(\mu + 1)q^2 - \Omega^2]^2$$

$$B = [2q\zeta_2\Omega(\mu + 1)]^2$$

$$C = \{[1 + (\mu + 1)q^2]\Omega^2 - q^2 - \Omega^4\}^2$$

$$D = [2q\zeta_2\Omega(\mu + 1)\Omega^2 - 1]^2$$

donde μ , q , ζ_2 y Ω son parámetros adimensionales y representan, respectivamente, la relación de masas, la relación de frecuencias naturales no amortiguadas, el factor de amortiguamiento y la relación de frecuencia forzada. Adicionalmente, los parámetros anteriores se definen a partir de $\mu = \frac{m}{M}$, $q = \frac{\omega_2}{\omega_1}$, $\zeta_1 = \frac{C}{2M\omega_1}$, $\zeta_2 = \frac{c}{2m\omega_2}$, $\Omega = \frac{\omega}{\omega_1}$, $\omega_1 = \sqrt{\frac{K}{M}}$ y $\omega_2 = \sqrt{\frac{k}{m}}$.

Además, estos parámetros adimensionales se pueden desarrollar y/o corroborar a partir de un análisis dimensional mediante el teorema Π de Buckingham [10] y, también, el diseño óptimo del DVA con excitación en la base quedará especificado a partir de los valores de estos parámetros.

A continuación, se implementó la FPT teniendo en mente el desarrollo de expresiones analíticas simplificadas para el cálculo de los parámetros óptimos del sistema de la Figura 1, dado el caso de excitación de aceleración en la base de tipo armónica.

APLICACIÓN DE LA FPT

Esta técnica consiste en la sintonización de los parámetros físicos del sistema mediante un proceso de calibración de frecuencias que da origen a los denominados puntos fijos o puntos invariantes. Además, estos puntos fijos son independientes del amortiguamiento del sistema. A partir de esta observación, se produce la siguiente condición de optimalidad:

$$\lim_{\zeta_2 \rightarrow 0} |H(\mu, q, \zeta_2, \Omega)| = \lim_{\zeta_2 \rightarrow \infty} |H(\mu, q, \zeta_2, \Omega)| \quad (3)$$

Si además de las condiciones de optimalidad dadas por la Ecuación (3) se considera la expresión $(\lim_{\zeta_2 \rightarrow \infty} |H(\mu, q, \zeta_2, \Omega)|)^2$, la aplicación de la técnica de los puntos fijos conduce a un sistema ecuaciones bicuadráticas para el caso de excitación estudiado, cuyas soluciones son dos raíces reales que representan las frecuencias invariantes del dispositivo DVA, y se pueden escribir de la siguiente manera:

$$\Omega^2 + a(\mu, q)\Omega + b(\mu, q) = 0$$

$$\Omega^2 + \tilde{a}(\mu, q, |H|)\Omega + \tilde{b}(\mu, q, |H|) = 0 \quad (4)$$

con

$$a(\mu, q) = -\frac{2(\mu + 1)^2 q^2 + \mu + 2}{(\mu + 2)}$$

$$b(\mu, q) = q^2$$

$$\tilde{a}(\mu, q, |H|) = -\frac{2}{(\mu + 1)}$$

$$\tilde{b}(\mu, q, |H|) = \frac{|H|^2 - (\mu + 1)^2}{|H|^2 (\mu + 1)^2}$$

Por lo tanto, la aplicación de la técnica de los puntos fijos es equivalente a resolver de forma analítica un conjunto de ecuaciones no lineales. Estas ecuaciones se pueden obtener a partir de la aplicación del teorema de Vieta al sistema de Ecuaciones (4), para el tipo de excitación considerada. Por lo tanto, para los polinomios mónicos representados en el sistema de Ecuaciones (4), la suma y producto de sus raíces reales, pueden especificarse como sigue:

$$\sum_{i=1}^2 \Omega_{i, \zeta \rightarrow 0}^2 = \sum_{i=1}^2 \Omega_{i, \zeta \rightarrow \infty}^2 \quad (5)$$

$$\prod_{i=1}^2 \Omega_{i, \zeta \rightarrow 0}^2 = \prod_{i=1}^2 \Omega_{i, \zeta \rightarrow \infty}^2 \quad (6)$$

Al seguir un procedimiento similar al presentado en [11] para la solución del conjunto de ecuaciones simultáneas no lineales Ecuaciones (5) y (6), se obtuvieron los parámetros óptimos de diseño del DVA para el caso de excitación de aceleración en la base de tipo armónica. Los parámetros de diseño óptimos son:

$$q_{\text{opt}}(\mu) = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{2(2-\mu)}}{(\mu+1)} \quad (7)$$

$$|H(\mu)| = \frac{\sqrt{2}(\mu+1)}{\sqrt{\mu}} \quad (8)$$

La Ecuación (7) representa el parámetro óptimo de ajuste de frecuencias. Un absorbedor de vibración que cumpla con esta relación puede ser llamado correctamente absorbedor de vibración sintonizado. Por otra parte, la Ecuación (8) representa la magnitud calibrada de la estructura primaria correspondientes a los puntos fijos para la excitación de aceleración armónica en la base.

La Figura 2 contiene la gráfica de la FRF de la estructura principal correspondiente al sistema de la Figura 1. Esta

gráfica se realizó al considerar distintos valores del factor de amortiguamiento. En la figura se especifican dos puntos identificados como P_1 y P_2 , los cuales se conocen como puntos fijos o puntos invariantes, cuya independencia del amortiguamiento es su principal característica. Por otro lado, para cada punto invariante existe una frecuencia invariante correspondiente.

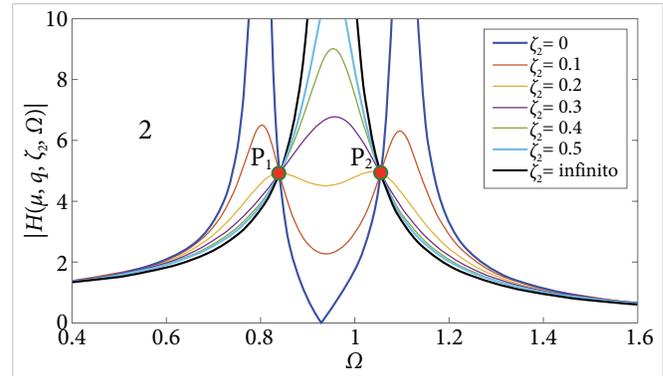


Figura 2. Gráfica de la función de respuesta en frecuencia de la estructura mecánica al considerar diversos valores del factor de amortiguamiento ζ_2 . Las gráficas se realizaron al considerar los parámetros $\mu = 0.1$ y $q_{\text{opt}} = 0.8861$.

Del análisis de la Figura 2 se puede concluir que, debe haber un valor del factor de amortiguamiento ζ_2 que aplane las FRF de la estructura primaria, en todo el rango de frecuencias entre los puntos fijos. De hecho, este factor de amortiguamiento es $\zeta_{2\text{opt}}$ y se puede calcular utilizando la teoría de ajuste de frecuencias de Krenk [5]. Por lo tanto, el factor de amortiguamiento óptimo para el caso de excitación de aceleración en la base, se expresa como sigue:

$$\zeta_{2\text{opt}}(\mu) = \frac{1}{4} \sqrt{\frac{2\mu(\mu-8)}{(\mu+1)(\mu-2)}} \quad (9)$$

La aplicación de la técnica de los puntos fijos produce como resultado una serie de ecuaciones simples de forma cerrada. Estas ecuaciones servirán para el diseño óptimo del DVA, para el control de la vibración generada por excitación de aceleración armónica en la base. Adicionalmente, en la siguiente subsección se calcula el índice de rendimiento \mathcal{H}_∞ para el diseño óptimo del DVA, considerando a la estructura primaria como amortiguada y no amortiguada.

ÍNDICE DE RENDIMIENTO \mathcal{H}_∞

El índice de rendimiento \mathcal{H}_∞ , se enfoca en minimizar las amplitudes máximas de la vibración que se generan en

la estructura primaria, en las frecuencias de resonancia. Es común encontrar en la literatura que al índice de rendimiento \mathcal{H}_∞ se le identifique como la norma $\|H(\Omega)\|_\infty$ [12]. La minimización de esta norma produce la formulación de un problema de optimización no lineal en varias variables con restricciones de igualdad, tal como se expresa a continuación:

$$\begin{cases} \min_{P_{\text{opt}}} (\max(|H(\Omega)|)) = \max(|H(P_{\text{opt}}, \mu, \Omega)|) \\ \text{sujeto a} \\ \frac{\partial |H(\Omega)|^2}{\partial \Omega^2} = 0 \\ P_{\text{opt}}(q, \zeta_1, \zeta_2) \geq 0 \end{cases} \quad (10)$$

donde $P_{\text{opt}}(q, \zeta_1, \zeta_2)$ es una función que contiene los parámetros de diseño del DVA que deben optimizarse. Con el objetivo de alcanzar una alta precisión en la solución del problema de optimización de la Ecuación (10), se implementó el método de Nishihara [13], que consiste en minimizar la FRF $|H(\Omega)|$ de la estructura principal mediante la función $h = 1/\sqrt{1-r^2}$. Por tanto, minimizar la variable r ocasiona la minimización de la norma $\|H(\Omega)\|_\infty$. Por consiguiente, después de sustituir la magnitud $|H(\Omega)|$ por $h = 1/\sqrt{1-r^2}$ en la Ecuación (2), se generó una expresión matemática que asegura que las máximas amplitudes de vibración en las frecuencias de resonancia para el caso de excitación de aceleración armónica en la base sean iguales. Tal expresión se define como sigue:

$$\Omega^4 + c_1\Omega^3 + c_2\Omega^2 + c_3\Omega + c_4 = 0 \quad (11)$$

con

$$\begin{aligned} c_1 &= 2q^2(\mu + 1)[2(\mu + 1)\zeta_2^2 - 1] + 4\zeta_1(2\mu q\zeta_2 + \zeta_1) - 2 \\ c_2 &= q^2\{[q^2(\mu + 1)^2 + 2(\mu + 2)] - 8(\mu + 1 - 2\zeta_1^2)\zeta_2^2 \\ &\quad - 8\zeta_1^2\} + r^2 \\ c_3 &= 2q^2\{2[1 - (\mu + 1)^2(1 - r^2)]\zeta_2^2 + (\mu + 1)(1 - r^2 - q^2) \\ &\quad + 2q^2\zeta_1^2 - 1\} \\ c_4 &= q^4[1 - (\mu + 1)^2(1 - r^2)] \end{aligned}$$

Posteriormente, al utilizar el teorema de Vieta, la suma y el producto de las raíces reales de la Ecuación (11) genera un conjunto no lineal de ecuaciones simultáneas en función de los coeficientes $c_i(\mu, q, \zeta_1, \zeta_2, r)$ para $i = 1, \dots, 4$. Este conjunto de ecuaciones está en términos de los parámetros de diseño del DVA y de la variable r . Por tanto, para conseguir una solución óptima a la norma $\|H(\Omega)\|_\infty$, es necesario agregar una ecuación de restric-

ción. Tal ecuación se produce al usar la matriz jacobiana de la variación r con respecto a las variables de diseño del absorbedor $J_f(q, \zeta_2) = \frac{\partial f_i(q, \zeta_2)}{\partial (q, \zeta_2)}$. En consecuencia, el criterio de optimalidad se satisface para el determinante de 2×2 de la matriz jacobiana igualado a cero. De esta manera, la optimización del índice de rendimiento \mathcal{H}_∞ , utilizando el método de Nishihara, se obtiene mediante la solución del sistema no lineal representado por el sistema de Ecuaciones (12):

$$\begin{aligned} f_1(\mu, q, \zeta_1, \zeta_2, r) &= c_1\sqrt{c_4} - c_3 \\ f_2(\mu, q, \zeta_1, \zeta_2, r) &= \frac{1}{4}c_1^2 + 2\sqrt{c_4} - c_2 \\ f_3(\mu, q, \zeta_1, \zeta_2, r) &= \left| \frac{\partial(f_1, f_2)}{\partial(q, \zeta_2)} \right| = \begin{vmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q} & \frac{\partial f_1}{\partial \zeta_2} \\ \frac{\partial f_2}{\partial q} & \frac{\partial f_2}{\partial \zeta_2} \end{vmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

$\forall (\mu) \in \mathbb{R}^+$

Este conjunto de ecuaciones no lineales se puede resolver fácilmente de forma numérica haciendo uso del método de Newton-Raphson y tomando como datos de entrada las magnitudes de los valores de los parámetros óptimos que se obtuvieron a partir de la FPT. En la siguiente sección se presentan los resultados que se obtuvieron de la implementación de las dos técnicas de optimización: la FPT y el índice de rendimiento \mathcal{H}_∞ , para la determinación de los parámetros de diseño óptimo del DVA.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Derivado de la aplicación de la FPT, se obtuvieron ecuaciones simplificadas de forma cerrada para el diseño óptimo del DVA para el control de vibración derivada de la excitación de aceleración armónica en la base. Estas ecuaciones favorecen el diseño del dispositivo DVA debido a su simpleza, ya que únicamente están en función del parámetro de la relación de masas μ .

Por otro lado, la Figura 3 contiene las gráficas de la función de respuesta en frecuencia óptima de la estructura primaria que se muestra en la Figura 1, considerando diferentes valores del parámetro de la relación de masas μ y considerando los parámetros óptimos q_{opt} y $\zeta_{2\text{opt}}$.

De la Figura 3 se puede apreciar que la magnitud optimizada de la FRF decrece con el incremento del valor de la relación de masas μ . También, es evidente cómo se aplanan las FRF en el rango de frecuencias de operación del DVA entre las frecuencias invariantes.

Adicionalmente, el incremento de la relación de masas μ tiene el efecto de incremento del ancho de banda de supresión de vibración del dispositivo.

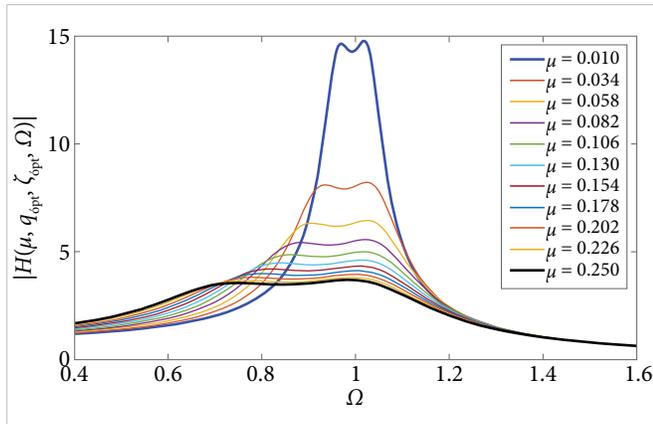


Figura 3. Gráficas de las FRF óptimas de la estructura primaria considerando diferentes valores del parámetro de la relación de masas μ .

Por su parte, los resultados numéricos de los valores de los parámetros óptimos para el diseño del DVA se proporcionan en la [Tabla 1](#). Estos valores se calcularon a partir del criterio \mathcal{H}_∞ considerando la estructura principal no amortiguada, para diferentes valores del parámetro de la relación de masas μ , considerando el intervalo $1\% \leq \mu \leq 25\%$ [14], [15].

TABLA 1
PARÁMETROS ÓPTIMOS DE DISEÑO DEL DVA, CRITERIO \mathcal{H}_∞
(ESTRUCTURA PRINCIPAL NO AMORTIGUADA)

μ	q_{opt}	$\zeta_{2\text{opt}}$	r_{min}	NORMA $\ H(\Omega)\ _\infty$
0.01	0.98762	0.06106	0.99755	14.28579
0.02	0.97548	0.08612	0.99519	10.20318
0.03	0.96356	0.10519	0.99291	8.41384
0.04	0.95187	0.12114	0.99072	7.35849
0.05	0.94039	0.13508	0.98861	6.64594
0.06	0.92912	0.14760	0.98658	6.12561
0.07	0.91806	0.15903	0.98463	5.72560
0.08	0.90719	0.16960	0.98275	5.40669
0.09	0.89652	0.17946	0.98093	5.14547
0.10	0.88604	0.18873	0.97919	4.92695
0.20	0.79043	0.26153	0.96487	3.80632
0.25	0.74811	0.28998	0.95948	3.54894

En la [Figura 4](#) se presenta una comparación de forma gráfica de las FRF de la estructura primaria, generadas a partir de los resultados que se obtuvieron de la técnica de los puntos fijos y criterio \mathcal{H}_∞ , al considerar un valor de $\mu = 0.1$.

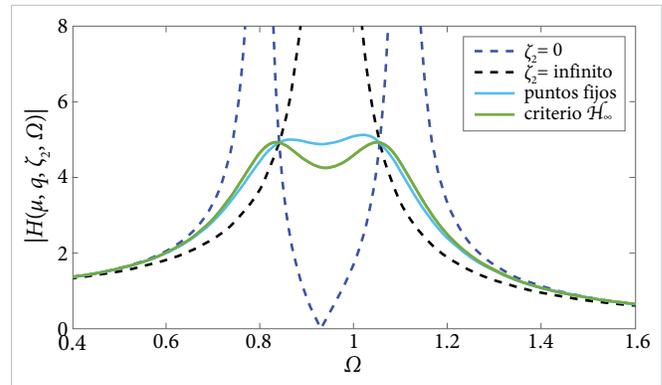


Figura 4. Comparación gráfica de las curvas FRF óptimas del sistema primario con DVA, obtenidas mediante la FPT y el criterio \mathcal{H}_∞ .

Los resultados presentados en la [Figura 4](#) muestran que, la FPT y el criterio \mathcal{H}_∞ , proporcionan resultados semejantes. Asimismo, aunque aparentemente la técnica de los puntos fijos proporciona un camino menos complicado para obtener el diseño óptimo del DVA, el criterio \mathcal{H}_∞ constituye una metodología robusta y precisa para el cálculo de los valores de diseño óptimo del DVA [16].

Asimismo, la [Tabla 2](#) contiene los resultados del índice de rendimiento \mathcal{H}_∞ , considerando la estructura primaria amortiguada para el cálculo de los parámetros de diseño óptimo del DVA. Estos resultados demuestran que el amortiguamiento de la estructura primaria tiene un efecto de reducción de la relación de frecuencias naturales q_{opt} y la amplitud optimizada norma $\|H(\Omega)\|_\infty$. Sin embargo, el amortiguamiento óptimo $\zeta_{2\text{opt}}$ se ve ligeramente incrementado. Estos resultados se pueden observar gráficamente en la [Figura 5](#), considerando una relación de masas μ de 0.1.

TABLA 2
PARÁMETROS ÓPTIMOS DE DISEÑO DEL DVA, CRITERIO \mathcal{H}_∞
(ESTRUCTURA PRINCIPAL AMORTIGUADA)

μ	q_{opt}	ζ_1	$\zeta_{2\text{opt}}$	r_{min}	NORMA $\ H(\Omega)\ _\infty$
0.1	0.85159	0.05	0.19855	0.95976	3.56093
	0.81131	0.10	0.20892	0.93323	2.78344
	0.76526	0.15	0.22038	0.89949	2.28863
0.15	0.79692	0.05	0.23958	0.95039	3.21488
	0.75203	0.10	0.25161	0.92306	2.59969
	0.70153	0.15	0.26537	0.88932	2.18681
0.20	0.74771	0.05	0.27362	0.94317	3.00920
	0.69960	0.10	0.28737	0.91574	2.48891
	0.64597	0.15	0.30358	0.88259	2.12703
0.25	0.70288	0.05	0.30336	0.93753	2.87428
	0.65239	0.10	0.31896	0.91039	2.41693
	0.59640	0.15	0.33788	0.87814	2.09030

En la Figura 5 se puede corroborar de manera gráfica que el incremento en la magnitud del amortiguamiento de la estructura primaria, tiene el efecto de reducción en su amplitud de vibración optimizada.

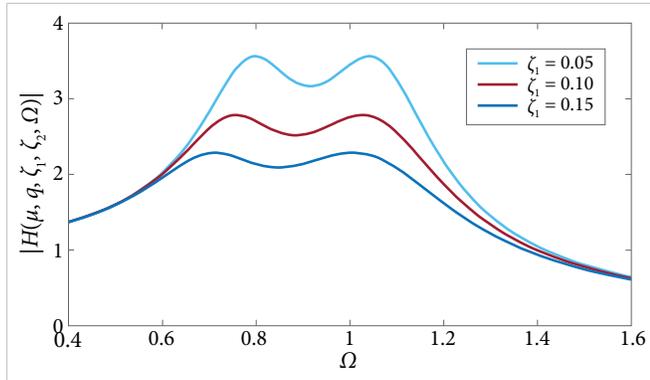


Figura 5. Comparación gráfica de las curvas FRF óptimas del sistema primario con DVA calculados a partir de la norma $\|H(\Omega)\|_\infty$, para diferentes valores de amortiguamiento de la estructura primaria.

IV. CONCLUSIONES

En esta investigación se propuso la solución del problema de control pasivo de vibraciones de una estructura mecánica de un grado de libertad, cuya excitación es un movimiento de aceleración armónica en la base. Para el control de la vibración, se consideró un absorbedor dinámico de vibración tradicional (DVA) conectado a la estructura primaria.

Con la finalidad de minimizar las máximas amplitudes de vibración de la estructura primaria, se implementaron dos esquemas diferentes para el diseño óptimo del DVA: FPT y el criterio \mathcal{H}_∞ . Derivado de la técnica de los puntos fijos y de la teoría de Krenk, se obtuvieron ecuaciones algebraicas simples para $q_{\text{opt}}(\mu)$ y $\zeta_{2\text{opt}}(\mu)$. Estas ecuaciones simplificadas son necesarias para el diseño óptimo del DVA, y fueron válidas para la relación de masas μ dentro el intervalo $1\% \leq \mu \leq 25\%$. Cabe mencionar que tales ecuaciones funcionan para valores superiores al valor máximo del intervalo anteriormente mencionado, sin embargo, utilizar valores de relación de masas $\mu > 25\%$ ya no es práctico debido a que se tendría que agregar una masa física del absorbedor demasiado grande en comparación con el sistema primario.

Por su parte, de la implementación del criterio \mathcal{H}_∞ utilizando el método de Nishihara se logró la minimización de las amplitudes máximas de vibración de la estructura primaria, mediante el cálculo numérico de

los parámetros óptimos de diseño del DVA. La norma $\|H(\Omega)\|_\infty$ se calculó para dos condiciones de operación de la estructura primaria: amortiguada y no amortiguada.

Con los resultados que se muestran en la Figura 4 se demuestra que los parámetros de diseño óptimos, calculados mediante el criterio \mathcal{H}_∞ para la estructura primaria no amortiguada, son similares a los calculados a partir de la técnica de los puntos fijos. Por otro lado, del cálculo del criterio \mathcal{H}_∞ para el diseño óptimo del DVA considerando a la estructura primaria con amortiguamiento, se concluye que el amortiguamiento de la estructura primaria tiene el efecto de reducción de su amplitud de vibración optimizada. Es decir, para una relación de masas μ especificada, el incremento en la magnitud del amortiguamiento de la estructura primaria ζ_1 , produce una reducción en su amplitud optimizada, tal como se muestra en la Figura 5.

REFERENCIAS

- [1] H. Benaroya, M. Nagurka y S. Han, *Mechanical Vibration Theory and Application*, 5.ª ed. EUA: Rutgers University Press, 2022.
- [2] H. Frahm, “Device for Damping Vibrations of Bodies”, Patente US989958A, abr. 18, 1911.
- [3] A. A. Shabana, *Theory of Vibration. An Introduction*, 3.ª ed. EUA: Springer International Publishing AG, 2019.
- [4] J. Ormondroyd y J. P. Den Hartog, “The Theory of the Dynamic Vibration Absorber”, *ASME Trans.*, vol. 50, no. 9, pp. 9-22, 1928.
- [5] S. Krenk, “Frequency Analysis of the Tuned Mass Damper”, *J. Appl. Mech.*, vol. 72, no. 6, pp. 936-942, may., 2005, doi: 10.1115/1.2062867.
- [6] T. Asami, O. Nishihara y A. M. Baz, “Analytical Solutions to H_∞ and H_2 Optimization of Dynamic Vibration Absorbers Attached to Damped Linear Systems”, *J. Vib. Acoust.*, vol. 124, no. 2, pp. 284-295, 2002, doi: 10.1115/1.1456458.
- [7] O. Nishihara y T. Asami, “Closed-Form Solutions to the Exact Optimizations of Dynamic Vibration Absorbers (Minimizations of the Maximum

- Amplitude Magnification Factors)”, *J. Vib. Acoust.*, vol. 124, no. 4, pp. 576-582, oct. 2002, doi: [10.1115/1.1500335](https://doi.org/10.1115/1.1500335).
- [8] T. Asami y O. Nishihara, “Closed-form exact solution to H_∞ optimization of dynamic vibration absorbers (application to different transfer functions and damping systems)”, *J. Vib. Acoust.*, vol. 125, no. 3, pp. 398-405, jul. 2003, doi: [10.1115/1.1569514](https://doi.org/10.1115/1.1569514).
- [9] T. Argentini, M. Belloli y P. Borghesani, “A Closed-Form Optimal Tuning of Mass Dampers for One Degree-of-Freedom Systems Under Rotating Unbalance Forcing”, *J. Vib. Acoust.*, vol. 137, no. 3, 034501, jun. 1, 2015, doi: [10.1115/1.4029576](https://doi.org/10.1115/1.4029576).
- [10] F. M. White y H. Xue, *Fluid Mechanics*, 9.^a ed. EUA: McGraw Hill, 2020.
- [11] J. G. Mendoza-Larios, E. Barredo-Hernández e I. A. Maldonado-Bravo, “Absorbedor dinámico de vibración no tradicional para controlar fuerza inercial”, *Cult. Científ. y Tecnol.*, vol. 19, no. 2, pp. 4-11, jun. 2022, doi: [10.20983/culcyt.2022.2.2.1](https://doi.org/10.20983/culcyt.2022.2.2.1).
- [12] Y. Hu y M. Z. Q. Chen, “Performance evaluation for inerter-based dynamic vibration absorbers”, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 99, pp. 297-307, ag. 2015, doi: [10.1016/j.ijmecsci.2015.06.003](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2015.06.003).
- [13] T. Asami, Y. Mizukawa y T. Ise, “Optimal Design of Double-Mass Dynamic Vibration Absorbers Minimizing the Mobility Transfer Function”, *J. Vib. Acoust.*, vol. 140, no. 6, 061012, dic. 2018, doi: [10.1115/1.4040229](https://doi.org/10.1115/1.4040229).
- [14] D. J. Inman, *Engineering Vibration*, 5.^a ed. EUA: Pearson, 2022.
- [15] E. Barredo, J. G. Mendoza-Larios, J. Mayén, A. A. Flores-Hernández, J. Colín, y M. Arias-Montiel, “Optimal design for high-performance passive dynamic vibration absorbers under random vibration”, *Eng. Struct.*, vol. 195, pp. 469-489, may. 2019, doi: [10.1016/j.engstruct.2019.05.105](https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.05.105).
- [16] E. Barredo, Zhipeng Zhao, C. Mazón-Valadez, J. G. Mendoza-Larios, I. A. Maldonado, “A grounded inerter-based oscillating TMD for suppressing harmonic and random vibrations”, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 254, pp. 1-32, may. 2023, doi: [10.1016/j.ijmecsci.2023.108438](https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108438).

RECONOCIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado parcialmente por la Universidad Tecnológica de la Mixteca (UTM).

Empleo del software RStudio para la validación analítica Pb en suelo urbano

Use of RStudio software for analytical validation of Pb in urban soils

Eliany Nicado Leal¹✉, Alba Yadira Corral Avitia¹, Laura Elena Santana Contreras¹, Jonatan Torres Pérez¹, Miroslava Quiñonez Martínez¹, Juan Pedro Flores Margez¹

¹ Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ciencias Biomédicas, Departamento de Ciencias Químico Biológicas, Programa de Maestría Ciencias Químico Biológicas, México

RESUMEN

La validación de los métodos analíticos es un requisito importante en la práctica del análisis químico, por lo que cada vez que se desea realizar un control de calidad de una medición, es necesario llevarlo a cabo. La presente investigación tiene como objetivo validar analíticamente la determinación de Pb en suelo urbano por espectrometría de absorción atómica en horno de grafito (GF-AAS por sus siglas en inglés), ya que en un futuro se desea medir el impacto que pueden causar las deposiciones atmosféricas en los suelos, debido a las emisiones de material particulado de las ladrilleras artesanales de Ciudad Juárez, Chihuahua, México. En breve se obtuvo valores de alta calidad, ya que se usaron técnicas y análisis estadísticos más robustos y en menos tiempo que una validación convencional.

PALABRAS CLAVE: validación; metal pesado; suelo urbano.

ABSTRACT

The validation of analytical methods is an important requirement in the practice of chemical analysis, so that every time a quality control of a measurement is desired, it is necessary to carry it out. The objective of this research is to analytically validate the determination of Pb in urban soil by graphite furnace atomic absorption spectrometry (GF-AAS), since in the future it is desired to measure the impact that atmospheric depositions can cause in soils, due to particulate matter emissions from artisanal brick kilns in Ciudad Juarez, Chihuahua, Mexico. As a result, high quality values were obtained since more robust statistical techniques and analysis were used and, in less time, than conventional validation using RStudio software.

KEYWORDS: validation; heavy metal; urban soil.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Eliany Nicado Leal.

INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ciencias Biomédicas.

DIRECCIÓN: Av. Plutarco Elías Calles núm. 1210, Fovissste Chamizal, Ciudad Juárez, Chih., Méx. C. P. 32310.

CORREO ELECTRÓNICO: al216538@alumnos.uacj.mx

Fecha de recepción: 27 de junio de 2023. **Fecha de aceptación:** 21 de noviembre de 2023. **Fecha de publicación:** 27 de noviembre de 2023.



I. INTRODUCCIÓN

La validación de métodos analíticos es un requisito importante en la práctica del análisis químico. Su realización proporciona un alto grado de confianza en el método analítico y en la calidad de los resultados, al disminuir el número de fallos y repeticiones. Los datos obtenidos durante la validación son pruebas documentales que proporcionan un alto grado de seguridad y cumplimiento de los criterios legales [1], [2].

Actualmente, existen diferentes formas de analizar los datos de una validación analítica, por ejemplo, al utilizar softwares como Excel, Minitab, SPSS, sin embargo, estas suelen requerir tiempo y recursos, por lo que se les dificulta a la mayoría de los analistas en laboratorios. En esta investigación se empleó el software RStudio como herramienta estadística, ya que su estructura incluye paquetes estadísticos que ayudan a obtener resultados más robustos y confiables en menor tiempo [2]. Este software es un entorno de desarrollo integrado para el lenguaje de programación R, dedicado al cálculo estadístico y a los gráficos. Por su facilidad de aprendizaje y aplicación, se utilizó para la validación analítica de la determinación de Pb en muestras de suelo urbano por espectrometría de absorción atómica en horno de grafito (GF-AAS, por sus siglas en inglés), integrando conocimientos estadísticos previos con técnicas robustas y más completas proporcionadas por este software.

La novedad de este estudio es que los resultados obtenidos no difieren de los de una validación normal, ya que cumplen los criterios de rendimiento establecidos por normativas como Analytical Chemistry in Europe (Eurachem), International Organization of Standardization (ISO) y Environmental Protection Agency (EPA) [3]. Estos resultados de rendimiento del método analítico pueden servir para evaluar la seguridad del metal Pb en muestras de suelo urbano, por lo que se requiere un resultado cuantitativo cuyo límite de detección sea inferior a los valores obtenidos por diferentes autores para esta matriz.

El objetivo de este estudio es demostrar el cumplimiento de criterios de la linealidad de la curva de calibración, la determinación de los límites de detección y cuantificación (LOD y LOQ, por sus siglas en inglés), la determinación de la precisión del equipo, la veracidad del método y la incertidumbre de medida [4], además de criterios analíticos establecidos por las normas ISO como normalidad, independencia, homocedasticidad y

linealidad de los residuos para la determinación de Pb en suelos urbanos mediante GF-AAS.

II. METODOLOGÍA

Entre las características de funcionamiento que debe desempeñar la determinación de Pb por GF-AAS para confirmar que es adecuada para el propósito descrito, destacan el cumplimiento de la linealidad de la curva de calibración, la determinación de los límites de detección y cuantificación (LOD y LOQ), la determinación de la precisión del equipo, la veracidad del método y la incertidumbre de medida [4]. Esta cuantificación del metal en muestras de suelo urbano se realiza en base a la masa del elemento (estado elemental) en el volumen de la matriz estudiada.

En este estudio se utilizaron como reactivos una solución patrón de 1000 mg/L de Pb, dihidrogenofosfato de amonio como modificador de la matriz ($\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 5 %) para eliminar posibles interferencias durante la medición, HNO_3 (65 % suprapur®) y agua milli-Q® (Tipo I). Todos los reactivos utilizados eran p.a (puro para análisis) y trazables al NIST (National Institute of Standards and Technology). Las concentraciones de oligoelementos en muestras patrón de un solo elemento se analizaron con un espectrofotómetro de absorción atómica (AAS) Perkin Elmer de la serie Model AAnalyst 200 con horno de grafito y utilizando argón.

DETERMINACIÓN DE LINEALIDAD

La evaluación de la linealidad utilizó una curva de calibración de Pb con un rango de concentración de 20 a 100 $\mu\text{g/L}$ siguiendo los criterios establecidos por la EPA 239.2 para la determinación de Pb por GF-AAS [5], añadiendo como modificador de la matriz una solución de $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$. Se analizaron la significancia de los efectos de la constante y el intercepto. También, se determinó el cumplimiento de los supuestos de linealidad: homocedasticidad, normalidad, independencia y linealidad de los residuos de la curva de calibración. Además, se determinó el ajuste a un modelo de regresión lineal simple. Estos resultados son útiles como indicadores de la bondad de ajuste del modelo a los datos [6], [7].

DETERMINACIÓN DEL LOD Y DEL LOQ

El método del blanco se utilizó para cuantificar el límite de detección (LOD) y el límite de cuantificación

(LOQ). Se prepararon diez blancos de reactivo y se midió su absorbancia mediante GF-AAS. Los cálculos realizados para su determinación se llevaron a cabo de acuerdo con las Ecuaciones (1) y (2), respectivamente, que se presentan a continuación [8]. Para la determinación de estos límites se aplicó el paquete estadístico QualityTools del software RStudio.

$$Y_{LOD} = Y_B + 3S_B \quad (1)$$

$$Y_{LOQ} = Y_B + 10S_B \quad (2)$$

donde Y_{LOD} : límite de detección en términos de absorbancia; Y_{LOQ} : límite de cuantificación en términos de absorbancia; Y_B : absorbancia del blanco y S_B : desviación estándar del blanco

DETERMINACIÓN DE LA PRECISIÓN

El estudio de la exactitud se analizó bajo los parámetros de repetibilidad y reproducibilidad. Para ello fue necesario demostrar que el GF-AAS es capaz de proporcionar resultados repetibles y reproducibles, incluso si se modificaban algunas variables durante la medición, como los analistas y los días de medición. Se prepararon tres diluciones a tres niveles de concentración bajo, medio y alto y se realizaron mediciones repetidas de las soluciones. La reproducibilidad se cuantificó de la misma forma que la repetibilidad, variando dos factores de analistas y días de medición [1], [2].

El procedimiento propuesto para verificar que el método proporciona resultados adecuados bajo los criterios de repetibilidad y reproducibilidad fue el Gage R&R del paquete estadístico QualityTools de RStudio. Este se basa en estimar la variabilidad inducida en las medidas por el propio sistema y la compara con la variabilidad total observada para determinar la viabilidad del sistema de medida mediante un ANOVA [9].

DETERMINACIÓN DE LA VERACIDAD

El análisis de la veracidad del método se realizó a tres niveles de concentración como en el estudio de exactitud, utilizando una solución de concentración conocida y calculando el porcentaje de recuperación según la Ecuación (3) que se presenta a continuación [2], [4].

$$\% R = \frac{(C_0 - C_e)}{C_e} * 100 \quad (3)$$

donde % R: porcentaje de recuperación; C_0 : concentración conocida y C_e : concentración del patrón medida por el equipo.

INCERTIDUMBRE DE MEDIDA

El mensurando del método se identificó para determinar la incertidumbre de medida, que en este caso es la concentración de Pb, se determinaron las fuentes de incertidumbre junto con sus incertidumbres combinadas y, finalmente, se calculó la incertidumbre expandida para un factor de cobertura igual a 2 ($K = 2$) [10], [11].

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

DETERMINACIÓN DE LINEALIDAD

La [Tabla 1](#) muestra los resultados obtenidos para el análisis de regresión lineal simple, demostrando que los datos proporcionados por el GF-AAS sí presentaron un ajuste a este modelo de regresión. Estos resultados se obtuvieron a partir de la función de resumen del software RStudio, que proporcionó datos más completos que un análisis de regresión lineal en Excel. Se demuestra que los datos proporcionados por el GF-AAS se ajustan a modelo de regresión lineal simple ([Tabla 1](#)).

TABLA 1
RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL ANÁLISIS DE REGRESIÓN LINEAL

SUPUESTOS A CUMPLIR	CRITERIOS DE ACEPTACIÓN	RESULTADO	¿SE CUMPLE?
Pendiente significativamente distinta a cero	p-value < 0.05	< 2*10 ⁻¹⁶	Sí
No exista falta de ajuste	p-value < 0.05	< 2*10 ⁻¹⁶	Sí
Homocedasticidad de residuos	p-value > 0.05 (prueba de Breusch Pagan)	0.1825	Sí
Normalidad de residuos	p-value > 0.05 (Shapiro Wilk)	0.837	Sí
Linealidad e independencia de residuos	Suma de cuadrados de residuos igual o cercana a cero	8.02*10 ⁻¹⁹	Sí

Además de los resultados numéricos, el software RStudio proporciona gráficos en los que se puede ver el cumplimiento de los criterios. Las Figuras 1a), 1b) y 1c) muestran los gráficos correspondientes al análisis de homocedasticidad, normalidad, linealidad e independencia de los residuos. En la Figura 1a) se observa el gráfico de residuos frente a valores ajustados y muestra que los puntos de las réplicas se distribuyen aleatoriamente alrededor del eje central, lo que indica que

existe homocedasticidad de los residuos, dato que confirma los resultados obtenidos en la Tabla 1. La Figura 1b) muestra un gráfico Q-Q en el que se observa que los residuos siguen una tendencia de normalidad y la Figura 1c) expone un gráfico de la raíz de los residuos estandarizados frente a escala-localización. En este último gráfico, los residuos no siguen ningún patrón y se distribuyen en torno al eje principal, por lo que se cumple el supuesto de linealidad e independencia.

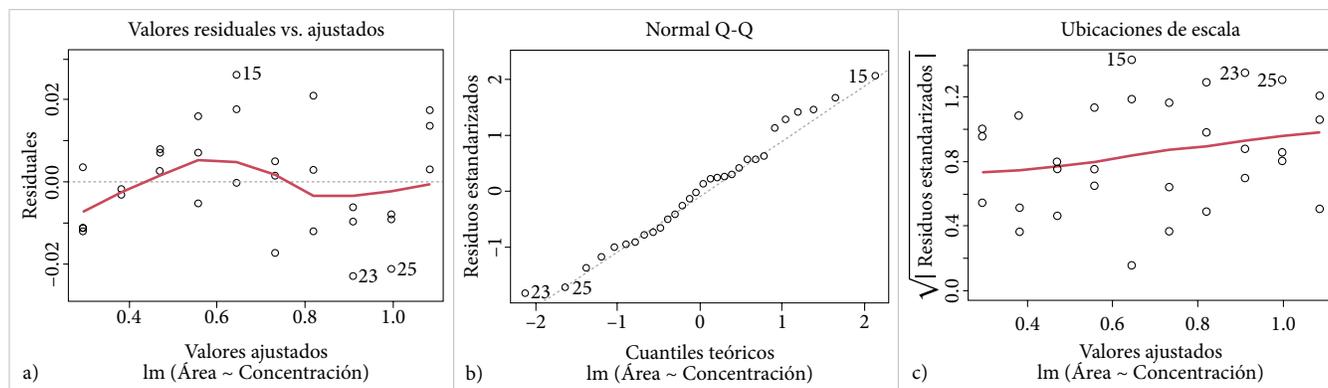


Figura 1. Gráficos RStudio para corroborar la regresión lineal: a) homocedasticidad de los residuos, b) normalidad de los residuos y c) linealidad e independencia de los residuos.

Teniendo en cuenta los criterios de aceptación para cada uno de los supuestos, se puede concluir que los datos proporcionados por el GF-AAS para un rango de curva de calibración de 20 a 100 µg/L se ajustan a un modelo de regresión lineal simple, por lo que el método se describe mediante una función del tipo $y = mx + n$. La Figura 2 muestra la curva de calibración obtenida para la determinación de Pb en muestras de suelo con su ecuación de la recta.

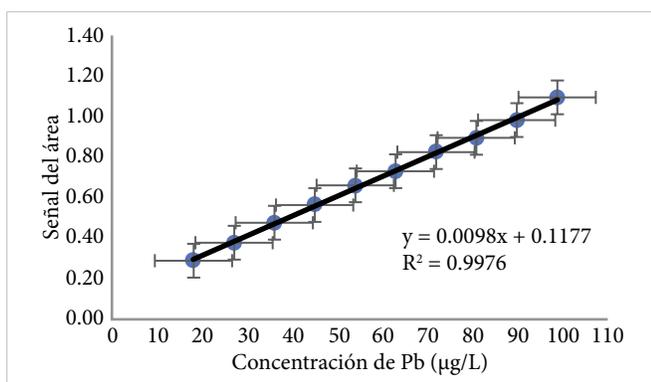


Figura 2. Curva de calibración obtenida para la cuantificación de Pb en suelo urbano.

Los resultados de LOD y LOQ fueron de 4.88 y 8.68 µg/L respectivamente, por lo que el equipo GF-AAS po-

drá determinar y cuantificar concentraciones de Pb por encima de estos límites.

DETERMINACIÓN DE LA PRECISIÓN

Los resultados de los parámetros de repetibilidad y reproducibilidad se muestran a continuación en la Tabla 2. Como puede observarse, los valores de variabilidad proporcionados por la repetibilidad y la reproducibilidad oscilaron entre 0.1163 y 0.3151 %, respectivamente, cumpliéndose, por tanto, los criterios de aceptación para cada parámetro e indicando que el equipo es capaz de repetir y reproducir los mismos datos, aunque se cambie el analista o los días de medida.

TABLA 2
RESULTADOS DE LA VARIABILIDAD DE LA REPETIBILIDAD Y REPRODUCIBILIDAD

VARIABLE	CRITERIO DE ADAPTACIÓN	RESULTADOS
Repetibilidad	% Var ≤ 1 %	0.1163
Reproducibilidad	% Var ≤ 1 %	0.3151

La Figura 3 que se presenta a continuación muestra la variación entre los analistas en los tres niveles de con-

centración estudiados, para lo cual se tomaron las tres diluciones preparadas por cada analista para los tres niveles de concentración y se le realizaron tres réplicas a cada una, para un total de nueve mediciones por niveles de concentración. Este gráfico se obtuvo con el paquete estadístico GageR&R de RStudio.

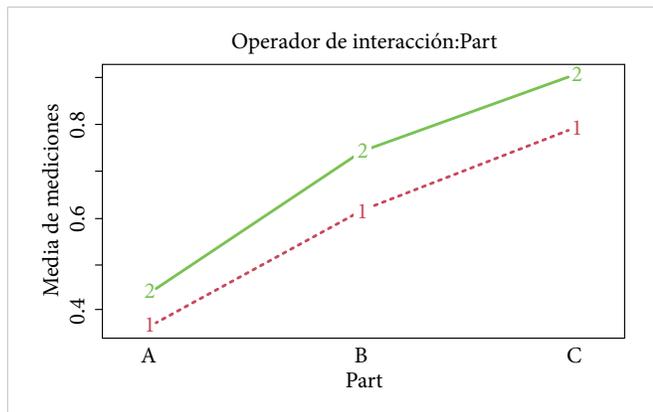


Figura 3: Diferencias entre las mediciones realizadas por dos analistas diferentes para un total de nueve muestras por analistas.

Como puede verse en el gráfico, hay muy poca variación entre los analistas (1 y 2) en los tres niveles de concentración estudiados.

DETERMINACIÓN DE LA VERACIDAD

Los resultados de veracidad se muestran en la [Tabla 3](#), presentada a continuación.

TABLA 3
RESULTADOS DEL PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN

NIVELES DE CONCENTRACIÓN	PORCENTAJE DE RECUPERACIÓN
Nivel Bajo	103.4837
Nivel Medio	105.7488
Nivel Alto	99.0719

Los valores del porcentaje de recuperación oscilaron entre 99 a 106 %. El rango de concentración tomados para la validación analítica fue de 20 a 100 µg/L, niveles a los que les corresponde un rango de 60 a 115 % y de 80 a 110 %, respectivamente [2]. Al comparar los resultados obtenidos se observa que se encuentran en este rango, por tanto, se puede afirmar que el GF-AAS es capaz de producir datos que son reales y certeros bajo las condiciones estudiadas.

INCERTIDUMBRE EN LA MEDICIÓN

La [Figura 4](#) muestra un diagrama de espina de pescado que relaciona las fuentes de incertidumbre que existen durante el proceso de medición del Pb.

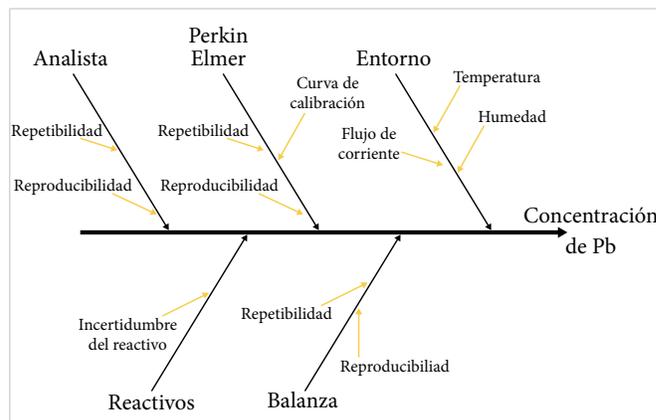


Figura 4. Diagrama de incertidumbre de medición de Pb en suelos urbanos.

IV. CONCLUSIONES

Al determinar la incertidumbre combinada de todas las fuentes de incertidumbre se calculó la incertidumbre expandida con un factor de cobertura ($K = 2$), obteniendo por tanto un valor de 0.012 mg/kg.

Los resultados obtenidos en este estudio manifiestan el cumplimiento de los requisitos para una validación analítica convencional y también demuestran que tanto la preparación y manejo de la solución estándar evaluada de Pb como el material de cristalería y el equipo Perkin Elmer utilizado en el estudio, permiten cuantificar valores por encima de 8.68 µg/L; reproducir y repetir resultados a pesar de que se cambien factores externos, como son los analistas, y producir resultados exactos en la matriz de estudio (estos datos son descritos por un modelo de regresión lineal simple bajo la función $y = mx + n$). Por lo tanto, este equipo es adecuado para el propósito descrito: la cuantificación de Pb en muestras de suelo urbano para la evaluación futura del impacto ambiental ocasionado por las ladrilleras artesanales en los suelos urbanos de Ciudad Juárez, así como para otros estudios potenciales de Pb y otros metales en suelos y agua

El empleo del software RStudio como alternativa para realizar cálculos estadísticos de la validación indicó que es apto para este propósito, donde se obtuvieron todos los resultados en menos de 30 minutos de ejecu-

ción. El *script* de programación generado durante este proceso puede ser llevado a grandes escalas fuera del laboratorio analítico, ayudando a distintas empresas de producción con su control de calidad de procesos.

REFERENCIAS

- [1] L. Correia, M. E. Soares y M. L. Bastos, "Validation of an electrothermal atomization atomic absorption spectrometry method for the determination of aluminum, copper, and lead in grapes," *J. Agric. Food. Chem.*, vol. 54, no. 25, pp. 9312-9316, dic. 2006, doi: [10.1021/jf0620564](https://doi.org/10.1021/jf0620564).
- [2] A. G. González, M. Á. Herrador y A. G. Asuero, "Intra-laboratory assessment of method accuracy (trueness and precision) by using validation standards," *Talanta*, vol. 82, no. 5, pp. 1995-1998, 2010, doi: [10.1016/j.talanta.2010.07.071](https://doi.org/10.1016/j.talanta.2010.07.071).
- [3] B. Magnusson y U. Örnemark, *The Fitness for Purpose of Analytical Methods – A Laboratory Guide to Method Validation and Related Topics*, 2.^a ed. Eurachem, 2014.
- [4] A. Gustavo y M. Ángeles, "A practical guide to analytical method validation, including measurement uncertainty and accuracy profiles," *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 26, no. 3, pp. 227-238, 2007, doi: [10.1016/j.trac.2007.01.009](https://doi.org/10.1016/j.trac.2007.01.009).
- [5] EPA-NERL: 239.2: *Lead by Graphite Furnace AA*, EPA/600/4-79/020, NEMI, 1978. [En línea]. Disponible en: https://www.nemi.gov/methods/method_summary/5297/
- [6] A. G. Asuero, A. Sayago y A. G. González, "The correlation coefficient: An overview," *Crit Rev Anal Chem*, vol. 36, no. 1, pp. 41-59, 2006, doi: [10.1080/10408340500526766](https://doi.org/10.1080/10408340500526766).
- [7] B. Magnusson y S. L. R. Ellison, "Treatment of uncorrected measurement bias in uncertainty estimation for chemical measurements," *Anal Bioanal Chem*, vol. 390, no. 1, pp. 201-213, 2008, doi: [10.1007/s00216-007-1693-1](https://doi.org/10.1007/s00216-007-1693-1).
- [8] A. Shrivastava y V. P. Gupta, "Methods for the determination of limit of detection and limit of quantitation of the analytical methods," *Chron. Young Sci.*, vol. 2, no. 1, pp. 21-25, 2011, doi: [10.4103/2229-5186.79345](https://doi.org/10.4103/2229-5186.79345).
- [9] M. Sharma, S. P. Sahni y S. Sharma, "Validating a destructive measurement system using Gauge R&R - A case study," *Eng. Manag. Prod. Serv.*, vol. 11, no. 4, pp. 34-42, dic. 2019, doi: [10.2478/emj-2019-0031](https://doi.org/10.2478/emj-2019-0031).
- [10] A. Maroto, R. Boqué, J. Riu y F. X. Rius, "Effect of non-significant proportional bias in the final measurement uncertainty," *Analyst*, vol. 128, no. 4, pp. 373-378, 2003, doi: [10.1039/b210526h](https://doi.org/10.1039/b210526h).
- [11] R. Frenkel, I. Farrance y T. Badrick, "Bias in analytical chemistry: A review of selected procedures for incorporating uncorrected bias into the expanded uncertainty of analytical measurements and a graphical method for evaluating the concordance of reference and test procedures," *Clin Chim Acta*, vol. 495, no. feb., pp. 129-138, 2019, doi: [10.1016/j.cca.2019.03.1633](https://doi.org/10.1016/j.cca.2019.03.1633).

Perspectiva de la oxidación electroquímica de colorantes sintéticos en aguas residuales artificiales: Rol del material anódico

Perspective of electrochemical oxidation of synthetic dyes in artificial wastewater: Role of anode material

Humberto Rubí Juárez¹ ✉  [0000-0002-1661-466X](https://orcid.org/0000-0002-1661-466X), Linda Estefany Morales Galicia¹, Marisela Yadira Soto Padilla¹  [0000-0003-3102-7962](https://orcid.org/0000-0003-3102-7962), Felipe Adrián Vázquez Gálvez¹  [0000-0003-0282-8023](https://orcid.org/0000-0003-0282-8023)

¹Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología, México

RESUMEN

El intensivo uso de colorantes que realiza la industria textil en la operación de teñido aporta un poco más de la mitad del agua residual coloreada (54 %) al medio ambiente en el mundo. El impacto negativo se produce en cuerpos acuáticos perjudicando la cadena alimenticia, la actividad fotosintética, la cantidad de oxígeno disuelto y otros aspectos. Los seres humanos expuestos también pueden contraer enfermedades desde dermatitis hasta problemas del sistema nervioso central. El tratamiento de aguas residuales coloreadas es entonces un requisito que puede realizarse por las vías física, química o biológica convencionalmente. El método electroquímico alternativo que ha propiciado interés es la oxidación electroquímica inducida con electrolitos añadidos y materiales electródicos diversos. Las publicaciones recientes indican que los electrodos de diamante dopado con boro, platino, grafito, PbO₂ dopado, PbO₂ sin dopar y dimensionalmente estables, alcanzan remociones de color sobresalientes superiores al 90 % y en algunos casos alrededor de 60 % de materia orgánica, cuantificada como DQO o COT, que se limitó por la presencia de subproductos orgánicos. El aumento del empleo de nanotecnología factible para configurar características electrocatalíticas mejores con base en nanopartículas o nanoestructuras incorporadas al electrodo se vislumbra como posible tendencia futura.

PALABRAS CLAVE: oxidación directa; oxidación indirecta; electrodo pasivo; electrodo activo; material electródico.

ABSTRACT

The intensive use of dyes by the textile industry in the dyeing operation contributes a little more than half of the world's colored wastewater (54%) to the environment. The negative impact occurs in aquatic bodies by damaging the food chain, photosynthetic activity, amount of dissolved oxygen or others. Exposed humans also contract diseases ranging from dermatitis to central nervous system problems. The treatment of colored wastewater is then a requirement that can be carried out conventionally by physical, chemical or biological means. The alternative electrochemical method that has attracted interest is induced electrochemical oxidation with added electrolytes and various electrode materials. Recent publications indicate that boron doped diamond, platinum, graphite, doped PbO₂, undoped PbO₂ and DSA electrodes attain remarkable color removals greater than 90% and in some cases around 60% of the organic matter, quantified as COD or TOC, which was limited by the presence of organic by-products. The increase in the use of feasible nanotechnology to configure improved electrocatalytic characteristics based on nanoparticles or nanostructures incorporated into the electrode is seen as a possible future trend.

KEYWORDS: direct oxidation; indirect oxidation; passive electrode; active electrode; electrode material.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Humberto Rubí Juárez.

INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología.

DIRECCIÓN: Av. del Charro n.º 450 norte, col. Partido Romero, Ciudad Juárez, Chih., México, C. P. 32310.

CORREO ELECTRÓNICO: humberto.rubi@uacj.mx

Fecha de recepción: 28 de agosto de 2023. **Fecha de aceptación:** 5 de diciembre de 2023. **Fecha de publicación:** 27 de diciembre de 2023.



I. INTRODUCCIÓN

La perspectiva que se debe tener de un tinte o colorante en el contexto ambiental o más particularmente para aguas residuales, difiere de cualquier sustancia coloreada. Un tinte es una sustancia coloreada, pero no todas las sustancias coloreadas son tintes [1]. “Un tinte es un compuesto orgánico coloreado que absorbe fuertemente la luz en la región visible y puede adherirse firmemente a la fibra en virtud del enlace químico entre algún grupo del tinte y la fibra. Las cualidades importantes que debe tener para la industria son la resistencia a la luz, al frotaamiento” [2] y lo más posible a las soluciones jabonosas.

Las empresas que utilizan los colorantes son varias, lo que ha promovido la alarmante producción de 700 000 toneladas de 100 000 tipos que se encuentran disponibles comercialmente a escala anual. La industria textil aporta un poco más de la mitad de efluente de tinte (54 %) al medio ambiente en el mundo. Las demás que hacen lo propio son del giro teñido (21 %), pulpa y papel (10 %), tenería y pintura (8 %) y fabricación de tintes (7 %) [3], [4]. La cuantiosa cantidad de agua requerida, aunada a la elevada cantidad de toneladas de colorante demandada por los procesos de la industria textil, origina enormes volúmenes de agua residual coloreada. El inconveniente ocurre porque mientras se efectúa el teñido no todo el tinte se adhiere a los tejidos. La porción libre fluye con el agua durante el lavado para constituir un contaminante en el efluente [5].

Las aguas con tintes que intencional o no intencionalmente son descargadas en ambientes acuáticos tienen un impacto negativo en la flora. El colorante puede permanecer tiempo prolongado en virtud de su prominente fotoestabilidad. La complicación más evidente de esos compuestos es la absorción y reflejo de la luz solar incidente en el agua. La barrera evita que penetre a la zona fótica, perjudicando la cadena alimenticia y la actividad fotosintética de las algas. Otros efectos comprenden el impacto en el aspecto estético en cuerpos de agua, la disminución de oxígeno disuelto, la reoxigenación, el aumento de la demanda química de oxígeno y la acumulación en peces u otras formas de vida [6], [7], [8], [9], [10].

Los seres humanos que se exponen al contacto, inhalación o incluso ingestión, pueden presentar enfermedades desde dermatitis hasta problemas del sistema nervioso central [11]. La manipulación o producción de colorantes reactivos constituye un riesgo de dermatitis

de contacto, conjuntivitis alérgica, rinitis, asma ocupacional, irritación en la piel, ojos, membrana mucosa y tracto respiratorio superior [8], [12]. Particularmente, los tintes verde reactivo 19, rojo disperso 1 y azul reactivo 2 tienen un efecto genotóxico a largo plazo [13] y, además, otros tienen potencial mutagénico, como azul B [14] y naranja disperso 1 [15]. Los factores mutagénicos se hacen posibles a través de múltiples etapas la carcinogénesis. Los que especialmente pueden proporcionar carcinogenicidad son los de tipo azo [16] y nitro [17].

El panorama intimidante ha sido afrontado con el desarrollo de un amplio rango de métodos para la remoción de colorantes en aguas residuales, a fin de disminuir su impacto en el medio ambiente. La literatura concuerda en que los tratamientos más comunes son los físicos, químicos y biológicos [4], [18], [19], aunque también, debido a la complejidad de los efluentes coloreados, pueden ser combinados para procurar maximizar la eliminación del color [4], [18].

Los tratamientos físicos se reconocen como sencillos y directos, puesto que no incorporan reacciones dirigidas por elementos presentes en el mismo medio, como seres vivos o productos sintéticos. El mecanismo que impera es la transferencia de masa y los más frecuentes son adsorción y filtración por membrana [3], [4], [18], [20], extendiéndose a ósmosis inversa, intercambio iónico e irradiación [3], [4]. Los tratamientos químicos, por ejemplo, coagulación, floculación, coagulación-floculación, oxidación y ozonización, requieren que se añada un reactante y que se apliquen teorías químicas. La desventaja al implementarlos es la formación de lodos o potencial generación de contaminantes secundarios [21]. Los tratamientos biológicos involucran la degradación de compuestos por la acción microbiana ejercida por bacterias, algas, levaduras y hongos durante el proceso aeróbico, anaeróbico o secuencial anaeróbico-aeróbico [22]. La cualidad de esos métodos es el respeto por el medio ambiente, menor volumen de lodos y consumo energético, pero es menos eficaz en la eliminación del colorante [4].

La alternativa a los medios convencionales mencionados en el párrafo anterior es la electrooxidación u oxidación electroquímica perteneciente a los procesos de oxidación avanzada. En este método de naturaleza electroquímica se somete a una diferencia de potencial a los electrodos, por lo menos un ánodo y un cátodo, con el agua fluyendo entre ellos en modo continuo o sujetos a inmersión en condiciones relativamente estáticas en modo descon-

tinuo [23]. El propósito es la degradación de contaminantes por medio de reacciones estimuladas por el electrón, radicales hidroxilo o agentes oxidantes electrogenerados a partir de sales inorgánicas [24]. Sus virtudes son bien conocidas: alta eficiencia, compatibilidad ambiental, posibilidad de automatización, seguridad bajo condiciones suaves, cantidad de productos químicos moderada y versatilidad [25]. El desafío típico que representa en la investigación es la optimización de la eficiencia de remoción mediante el ajuste de parámetros operacionales: densidad de corriente, tiempo de electrólisis, pH, temperatura, conductividad, tipo de electrolito, concentración de electrolito, relación superficie electrodo/volumen líquido y concentración colorante, coordinado con los estructurales distancia y conexión entre electrodos e igualmente el tipo de material electródico [26].

Los electrodos que se utilizan en la electrooxidación son más valiosos cuando cumplen las propiedades de larga vida útil, gran área superficial, alta actividad catalítica, físicamente estable, resistencia a la corrosión, medio ácido o básico extremo y facilidad de fabricación [27]. Consecuentemente, la investigación respecto a las numerosas capas de características particulares, aparte de los métodos de cubrimiento de los sustratos, se ha mantenido incesante. Los ánodos dimensionalmente estables, que se abrevian como DSA, por ejemplo, comenzaron a ser estudiados exhaustivamente desde 1990 por Christos Comninellis *et al.* [28], aunque preliminarmente ya se habían revisado por Sergio Trasatti en 1980 [29], con preparaciones estructuradas por el metal base o sustrato, componentes conductores y óxidos inertes. El titanio soportó nueve capas seleccionadas: $\text{RuO}_2\text{-TiO}_2$, $\text{RuO}_2\text{-ZrO}_2$, $\text{RuO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$, $\text{IrO}_2\text{-TiO}_2$, $\text{IrO}_2\text{-ZrO}_2$, $\text{IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$, Pt-TiO_2 , Pt-ZrO_2 y $\text{Pt-Ta}_2\text{O}_5$. El resultado de esas pruebas específicas estableció que $\text{Ti/IrO}_2\text{-Ta}_2\text{O}_5$ fue el mejor electrodo de los nueve sistemas. Los DSA han permanecido hasta 2023 como un elemento meritorio de exploración en la degradación electroquímica de colorantes [30].

El diamante dopado con boro (DDB) ha sido ampliamente utilizado aprovechando la abundante cantidad de radicales hidroxilo que origina. La electrooxidación de múltiples compuestos orgánicos con ese ánodo se puede reunir en farmacéuticos, plaguicidas y colorantes [31], [32]. Los soportes sólidos comunes para el DDB fueron silicio y titanio, mientras que los diversos cátodos grafito, platino, DSA, acero inoxidable, electrodo de difusión de aire y zirconio.

La variante que ha motivado interés en los investigadores, prácticamente con una temporalidad simultánea al DDB, es el revestimiento de PbO_2 . Los primeros intentos propagaron incertidumbre por la liberación ocasional de Pb^{2+} en el curso del experimento electroquímico atribuida a la corrosión superficial. Ulteriormente, nuevos o mejorados métodos resolvieron ese perjuicio para transformar a los electrodos con esa cobertura en más activos y estables [33], [34], [35]. La evolución ha perdurado, convergiendo también a la fabricación de ánodos de PbO_2 dopados, con mayor atención desde hace 12 años [33].

La forma en la que esos materiales reseñados dirigen la oxidación de compuestos orgánicos difiere según si son de tipo activo o no activo, presentada enseguida en la sección C (Electrodos Activos y Pasivos). El otro factor es la vía que se implementa directa o indirecta con electrolitos en la sección B (Electrooxidación Directa e Indirecta). Por tanto, las eficiencias de remoción que se pueden alcanzar o esperar dependerá del mecanismo y el tipo de electrodo.

En esta revisión se resumen, si no todas, sí algunas publicaciones a las que se pudo acceder en bases de datos sobre la electrooxidación, conocida también como oxidación electroquímica o anódica, de colorantes en aguas residuales sintéticas. Primeramente, se exponen los mecanismos directo e indirecto de oxidación electroquímica que se promocionan en el esquema más elemental por la ausencia o presencia de electrolitos, respectivamente, como las sales inorgánicas. En segundo lugar, se distinguen los electrodos según su actuación referente a la interacción sustancias orgánicas-radicales $\bullet\text{OH}$ adsorbidos superficialmente, definidos como activos e inactivos. Finalmente, las investigaciones con condiciones experimentales particulares controladas, como intensidad de corriente, tiempo de reacción, pH u otras, se reportan para las mayores eficiencias logradas con distintos materiales electródicos más utilizados.

A. TIPOS DE COLORANTES

El primer colorante orgánico sintético fue elaborado inesperadamente por William Henry Perkin en 1856, patentándose ese mismo año. La malveína o mauveína de apariencia morada tuvo origen a escala laboratorio y pronto se convirtió en un éxito, por lo que se comenzó a fabricar masivamente. La materia prima intermedia requerida, nitrobenzeno y anilina, estaba disponible comercialmente. Perkin & Sons instalaron una planta química cerca de Londres en 1857 para producir el tinte [2], [36].

Los colorantes han sido designados conforme a una publicación patrocinada por la Sociedad de Tintoreros y Coloristas, 1971-1996, además de la Asociación Americana de Químicos y Coloristas Textiles, que es una referencia para la variante a los nombres tradicionales conocida como índice internacional de color. El principio consiste en dos números de referencia, uno respecto al método industrial de aplicación y el otro es la descripción química en cinco dígitos. Por ejemplo, el azul de metileno, un colorante básico, se denomina CI 52015 o azul básico 9. El rojo Sirio 4B, CI 28160, rojo directo 81, porque pertenece al grupo de colorantes directos para algodón [1], [37].

La clasificación de los tipos de colorantes se ha propuesto con base en su estructura química o método de aplicación. Los químicos orgánicos admiten la primera perspectiva puesto que es más congruente con su formación académica o intereses respectivos a la investigación. Por otra parte, el tecnólogo de tintes o tintorero esta preponderantemente persuadido por la segunda, ya que se ocupa del procedimiento para fijar el tinte en la fibra, tal como reactivos para algodón o dispersos para poliéster [2], [38].

La industria textil, cosmética, de cuero, alimentaria, farmacéutica, de pinturas y barnices, al igual que de pulpa y papel son las más importantes fuentes que contaminan con colorantes del tipo ácido, básico, directo, de tina, disperso, nitro, mordiente, reactivo, de azufre y azo [39].

Las propiedades de cada conjunto son las siguientes:

Azo: Contabiliza entre 60-70 % de todos los grupos; producen colores brillantes e intensos [40]. La presencia del grupo azo ($-N=N-$) forma un puente entre anillos aromáticos, aunque pueden contener dos (disazo), tres (trisazo), cuatro (tetrakisazo) o más (poliazazo), también sirviendo de enlace [41], [42].

Tinte de azufre: Es una clase especial, considerada a veces compleja [43], respecto a la preparación y conocimiento de su constitución química [42]. La preparación es por tianación de aromáticos como fenoles, aminas aromáticas y aminofenoles a temperaturas entre 150-200 °C [44].

Reactivo: Forma una unión estable con la fibra, como algodón, vía enlace covalente de sustitución o adición nucleofílica, derivando en colorantes sustitutivos y aditivos, respectivamente. La eliminación con agua hir-

viendo en ambiente neutro se dificulta sumamente, ya que los tintes se “funden” a la fibra [45], [46].

Mordiente: Posee la cualidad de formar un complejo organometálico estable con iones metálicos de sales metálicas que son los mordientes. Los quelatos resultantes a partir de diferentes mordientes desarrollan mayor solidez del color. Las sales de cromo, aluminio, cobre, hierro, estaño y cobalto se usan comúnmente como mordientes [47], [48].

Nitro: Es aromático consistente de un grupo NO_2 en la posición orto respecto a un sustituyente electrodonante como $NH-R$ u OH [49].

Disperso: Modela moléculas pequeñas que suelen ser compuestos azoicos, de antraquinona o de difenilamina sustituidos sin grupos iónicos dentro de la estructura y solubilizantes en agua. Este conjunto es conocido como disperso, puesto que se debe mantener en dispersión con un tensoactivo en el baño de tintura. La orientación es hacia fibras termoplásticas hidrofóbicas, incluidos nailon, poliéster, acrílico y otros sintéticos [47], [50].

Tinte de tina: Se divide en dos subconjuntos: índigo y antraquinónico. El primero incluye índigo, tioíndigo y sus derivados, en tanto que el segundo, procedentes de antraquinona, así como quininas heterocíclicas. La particularidad es su insolubilidad en agua, pero que por reducción alcalina se convierte en solubles leucoenolatos. El leucocompuesto se absorbe por la fibra con la ayuda de un electrolito, sulfato de sodio [51], [52].

Directo: Este conjunto contiene grupos ácidos o básicos y se combina con grupos polares en la fibra. La aportación de color se consigue en un tejido directamente cuando la fibra se sumerge en una solución acuosa del tinte que se calienta gradualmente, añadiendo sal para promover el teñido [53], [54].

Ácido: Son sales de sodio o, en menor frecuencia, amonio, con un grupo de ácido sulfónico, carboxílico o fenólico. El teñido sobre las fibras se lleva a cabo en medio ácido, como vinagre, ácido acético o sulfúrico [55], [56]. Los tintes ácidos premetalizados reaccionan con un mordiente antes del teñido, confiriéndoles suficiente solubilidad para teñir en ambiente análogo [47].

Básico: Este conjunto se conoce igualmente con el nombre de colorantes catiónicos debido a la carga positiva

que tiene generalmente como resultado del catión amonio [54], denominadas similarmente sales catiónicas de aminas $-\text{NH}_2$, $-\text{NHR}$, $-\text{NR}_2$. La porción catiónica migra hacia la aniónica en la superficie de la fibra [47], [57].

B. ELECTROOXIDACIÓN DIRECTA E INDIRECTA

La versatilidad de la electrooxidación se extiende desde la implementación básica a escala laboratorio funcionando por lotes hasta especies electrogeneradas en la solución acuosa. La utilización de un par de electrodos sumergidos produce una serie de reacciones al interior del líquido que contiene la materia orgánica, las cuales ocasionan su degradación por dos mecanismos: directo e indirecto [58], [59].

De ambos mecanismos existen diferentes argumentos para diferenciarlos, según la preferencia de los autores: un grupo (inciso a) concibe que los radicales $\bullet\text{OH}$ participan en la oxidación directa [58] y para el otro (inciso b) el electrón es el reactivo que sustrae un compuesto de la superficie electródica [60]. El mecanismo directo e indirecto que adoptan se expresa de la manera siguiente:

Oxidación directa:

- a) Involucra la formación de radicales hidroxilo, producto de la electrólisis del agua, como especie principal que se encuentran adsorbidos en la superficie del electrodo u oxígeno activo que esta quimiosorbido en la red óxido, conocido como óxido superior, adherido también a la superficie. En breves palabras, la oxidación de orgánicos se atribuye a los radicales hidroxilo u oxhidrilo adosados a la superficie.
- b) El electrón se ocupa de la oxidación de la materia orgánica en la superficie del electrodo. Por lo tanto, la eficiencia está gobernada por la transferencia electrónica hacia el sustrato en las inmediaciones de la superficie.

Oxidación indirecta

- a) Hay una producción adicional a los radicales hidroxilo de otros oxidantes electrogenerados a partir de la adición de sales de cloruro o sulfato, por ejemplo, que conducirían al hipoclorito o peroxodisulfato. Otras sales provocarían otros oxidantes, no limitándose únicamente a esos aniones. Aún más, es viable la creación electroquímica del reactivo Fenton, peróxido u ozono [61].
- b) Considera el mismo concepto de subproductos contribuyentes a la electrooxidación vía indirecta, ade-

más del radical hidroxilo, puesto que originalmente no estaría estimado como el electrón disponible en superficie; más bien, su aparición procede de una reacción subsecuente en el agua. En otras palabras, el radical hidroxilo también es electrogenerado y sería considerado dentro de un proceso indirecto.

C. ELECTRODOS ACTIVOS Y PASIVOS

El material que compone al electrodo, refiriéndose a una capa idealmente uniforme más externa, tiene una marcada influencia en la selectividad y eficiencia de la electrooxidación. Las evaluaciones de oxidación anódica de orgánicos en medio ácido que han realizado algunos investigadores demostraron que los electrodos pueden ser activos o inactivos [62], [58].

Como ya se había manifestado, en la superficie del metal se encuentran adsorbidos los radicales hidroxilo a consecuencia de la electrólisis del agua. A partir de aquí la reactividad química y electroquímica dependerá del material electródico.

Los electrodos activos [62], [58] promueven una intensa interacción de los radicales con la superficie. El oxígeno en las colindancias con el ánodo puede experimentar, en combinación con los radicales, la transición a un óxido superior como consecuencia de la disponibilidad de estados de oxidación superiores para la superficie anódica. Después se plantea que el óxido superior actúa como intermediario en la oxidación.

No obstante, esa especie también está sujeta a una reacción secundaria o en competencia de descomposición con otra conocida como reacción de evolución de oxígeno, la cual es limitante durante la generación de oxígeno molecular [63]. La transformación de componentes en la superficie, atribuida al acoplamiento metal/óxido superior, llega a ser más selectiva que la condicionada únicamente a radicales hidroxilo. Algunos ejemplos de estos materiales son [64] carbón, grafito, IrO_2 , RuO_2 y platino.

Los electrodos no activos o inactivos [62], [58] se caracterizan por una débil interacción entre los radicales hidroxilo y la superficie electródica. La oxidación de orgánicos está dirigida por esos radicales que pueden dar lugar a una oxidación completa con productos como CO_2 y H_2O . El compuesto no deberá estar unido a heteroátomos, pero sí disponer de oxígeno. Al igual que

los activos, hay una competencia desde los hidroxilo adsorbidos a la formación de oxígeno, vía peróxido de hidrogeno como intermediario, sin la participación de la superficie del ánodo. Los ejemplos de esta clase son [64] SnO_2 , PbO_2 y DDB.

II. INVESTIGACIONES DE OXIDACIÓN ELECTROQUÍMICA

A. DIAMANTE DOPADO CON BORO

Los DDB se distinguen por una alta estabilidad, aceptable conductividad, carácter inerte, baja actividad de evolución de oxígeno, que es idéntico a alto sobrepotencial, y deficientes propiedades de adsorción de $\bullet\text{OH}$. Por tanto, se aproximan en gran medida al electrodo inactivo ideal [65]. Adicionalmente, es bien conocido que entre más escasa sea la interacción con los radicales adsorbidos, la reactividad anódica es mayor, es decir, la reacción química ocurre a mayor velocidad.

Aquino *et al.* [66] verificaron la degradación de los colorantes azul ácido 62, rojo reactivo 141, negro directo 22 y naranja disperso 29, según los cambios de absorbancia, demanda química de oxígeno (DQO) y carbono orgánico total (COT) con la intervención de sulfato y sulfato/cloruro. El ánodo, diamante dopado con boro, y el cátodo, acero inoxidable, con diámetro de 100 mm cada uno. La solución de concentración 100 mg/L, recirculada a razón de 400 L/h, contenía 100 mM de Na_2SO_4 y en ocasiones también 20 mM de NaCl. La densidad de corriente de 30 mA/cm², en conjunto con el NaCl, condujo casi a la desaparición de DQO y COT con la carga en A•h/L de 1 y 8, respectivamente, para el azul ácido 62. Los colorantes negro directo 22 y rojo reactivo 141 requirieron de mayor carga (12.5 A•h/L) sin llegar a valores tan bajos en COT. La DQO disminuyó 90 % con el naranja disperso 29. Los iones cloruro formaron oxidantes que contribuyeron a la oxidación.

Ramírez *et al.* [67] buscaron los valores óptimos de densidad de corriente (j), concentración de naranja de metilo y tiempo de electrólisis actuando independientemente en la decoloración por metodología de superficie de respuesta (MSR). En el reactor electroquímico, 3 L de solución se recircularon con concentraciones entre 50-250 mg/L de naranja de metilo, 0.5 M Na_2SO_4 y j sobre 3.1-39 mA/cm². Una eficiencia óptima de 94 % fue obtenida con la técnica MSR, tomando en cuenta un diseño factorial 23. La operación transcurrió a 31 mA/

cm², 100 mg/L, 138 minutos, pH inicial 3, Na_2SO_4 0.05 M y flujo volumétrico igual a 12 L/min. El COT disminuyó 60.3 % y el color 94 % con un consumo energético de 7.66 kWh/m³. Los ácidos carboxílicos identificados, dentro de otras especies, maleico, fumárico y oxálico, desaparecieron en menos de 120 minutos.

Bogdanowicz *et al.* [68] realizaron la oxidación electroquímica de Rubina reactiva F-2B con DDB. La influencia de la relación de concentraciones boro/carbono (B/C), en la estructura cristalina de película delgada depositada en silicio, se examinó en la degradación. La técnica que ocuparon fue deposición química de vapor mejorada con plasma por microondas. Los ánodos fabricados con DDB tenían la relación B/C = 2000 (DDB₂) o B/C (DDB₁₀) = 10 000. El cátodo de acero inoxidable, al igual que cada ánodo, fueron piezas planas de 4 cm². La j se ajustó a 2.5 y 5 mA/cm² para DDB₁₀ y DDB₂, respectivamente. El Na_2SO_4 0.05 M o NaCl 0.12 M se añadió como electrolito a la solución con 20 mg/L de Rubina, pH inicial 6.2, para determinar su absorbancia inicial a 545 nm y a intervalos de tiempo apropiados. Los resultados, como absorbancia normalizada (Abs/Abs₀) mostraron que DDB₁₀ fue superior a DDB₂ y, además, el NaCl rebasó la eficiencia del Na_2SO_4 en ambos. El cociente Abs/Abs₀ llegó casi a 0 a una carga A•h/L de 0.05 con DDB₁₀-NaCl y 0.625 a 0.280 con DDB₁₀- Na_2SO_4 . El DDB generó más oxidantes a partir de NaCl, comparado con Na_2SO_4 .

Brito *et al.* [69] evaluaron el desempeño del DDB adherido como una delgada capa a silicio o niobio para electrooxidación de violeta ácido 7 (VA7). El ánodo y contraelectrodo de titanio se situaron en un reactor de 110 cm³, operando en recirculación con bomba peristáltica en razón de 160 L/h. El volumen de líquido igual a 1 litro con 200 mg/L de VA7 en Na_2SO_4 0.05 M se sometió a 15, 30 y 60 mA/cm². La eficiencia de decoloración aumentó con el incremento de j , se alcanzó 97 % a 15 mA/cm² con Si/DDB después de 120 min y la decoloración total ocurrió después de 90 minutos a 30 y 60 mA/cm². El electrodo de Nb/DDB produjo 95 % a 15 mA/cm² transcurridos 120 minutos y 100 % en 90 y 60 minutos con 30 y 60 mA/cm². La remoción de materia orgánica cuantificada con DQO reflejó 85 y 83 % para Si/DDB y Nb/DDB con 60 mA/cm² al completar 120 minutos. Los consumos de energía empleando 60 mA/cm² correspondieron a 134.7 y 125.8 kWh/m³ en el mismo orden electródico. El electrodo con base a niobio fue apropiado para el proceso.

Migliorini *et al.* [70] estudiaron el efecto de los electrolitos 0.1 M H_2SO_4 , 0.1 M HClO_4 , 0.1 M K_2SO_4 a pH = 6.5 y 0.1 M K_2SO_4 a pH = 10 sujetos a 50 mA/cm². La electrooxidación de 150 mg/L de naranja reactivo 16 con DDB (DDB/Ti) arreglado con un cátodo de malla de platino se efectuó en una celda con capacidad de 0.45 L. Posterior a la primera etapa con $j = 50 \text{ mA/cm}^2$ fija, la solución tratada que reveló el mejor desempeño fue elegida para inspeccionar el efecto de otros valores de j : 25, 75 y 100 mA/cm². Las técnicas analíticas constaron de UV-VIS, cromatografía líquida de alta presión (HPLC) y COT. La reducción de las intensidades de las 2 bandas de absorbancia fue 96 % en el medio básico, K_2SO_4 a pH = 10, al término de 90 minutos. La remoción de COT creció con la densidad de corriente según los porcentajes 10, 15, 22 y 30 % concernientes a 25, 50, 75 y 100 mA/cm² en el entorno de 0.1 M K_2SO_4 a pH = 10. La HPLC exhibió que los intermediarios formados fueron compuestos de tipo biodegradable.

Tang *et al.* [71] dedicaron experimentos para electrolizar amarillo brillante reactivo X-6G a través de ánodo DDB y cátodo Pt. El volumen de 100 mL de agua residual sintética con el colorante se vertió en un recipiente de 150 mL para introducir los electrodos verticalmente y conectarlos a una fuente de alimentación. Se analizó la influencia de j , electrolito, pH inicial, temperatura y concentración inicial. Los valores de 100 mA/cm², 0.05 M, 3.03, 60 °C y 100 mg/L respecto a j , electrolito Na_2SO_4 , pH, temperatura y colorante X-6G fueron establecidos como los mejores. En ese escenario, la decoloración se obtuvo en 0.75 h y la eliminación de COT progresó hasta 72.8 % una vez completadas 2 h. En cuanto al consumo de energía, se necesitó 44.86 kWh/m³. La sugerencia versó en combinar el proceso con un método biológico.

B. PLATINO

Los ánodos de platino tienen una larga historia de uso como materiales electródicos debido a su buena conductividad y estabilidad química, incluso a potenciales altos, además de destinarse para la oxidación de compuestos orgánicos [72], [73].

Khezrianjoo *et al.* [74] ejecutaron la electrooxidación de rojo ácido 73, RA 73, bajo la acción de ánodo-cátodo de platino, y estudiaron la incidencia de parámetros electrolito de soporte, voltaje, pH, temperatura y concentración inicial de colorante, comprobada mediante espectroscopía UV-Vis, en el curso de la electrólisis. El ánodo

de serpentín se colocó dentro del cátodo cilíndrico vertical y ambos quedaron organizados paralelamente con un espacio entre ellos de 17 mm. Las dimensiones del cilindro posibilitaron su colocación al interior de un vaso de 500 mL encaquetado con flujo de agua para regular la temperatura. La decoloración, casi completa a partir de 50 mg/L de RA 73, T = 25 °C, pH inicial = 6.9, voltaje = 6 V, se mostró con 1.5 g/L de NaCl o KCl al conseguir 97 o 96 % en 15 minutos. Las especies electrogeneradas a partir de las sales degradaron rápidamente el RA 73.

Khalifaoui *et al.* [75] plantearon la oxidación electroquímica avanzada asistida con ion férrico de la rodamina 6G y el ánodo de DDB o rejilla cilíndrica de platino con cátodo de fieltro de carbono. Antes de comenzar la electrólisis se añadió ion férrico, ácido sulfúrico y Na_2SO_4 hasta llegar a 0.1 mM, pH = 3 y 50 mM. La intensidad de corriente de 300 mA mejoró la electrogeneración de H_2O_2 , a partir del O_2 burbujeado, así como del Fe^{2+} , por lo que se eligió una evaluación dentro de 50 a 500 mA. El electrodo de platino provocó la desaparición completa de R6G con concentración 50 mg/L en 5 minutos a 300 y 500 mA, dejando únicamente intermediarios. La reducción de COT, una vez que transcurrieron 6 horas, fue de alrededor de 97.5 y 98.7 % con platino y DDB, ejerciendo 500 mA. La cromatografía, vía HPLC, expuso la formación de ácidos carboxílicos de cadena corta oxálico, glioxílico y fórmico, además del pirúvico a un nivel traza en el tratamiento con platino.

Nordin *et al.* [76] examinaron una serie de ánodos contra cátodo de acero inoxidable durante la oxidación electroquímica de azul reactivo 109 (AR 109). La celda electroquímica capaz de almacenar 50 mL contuvo a diferentes electrodos de materiales platino, iridio, paladio, níquel, cobalto, cobre o plata preparados mecánicamente. La fase acuosa fue formulada a partir de concentraciones 1000 mg/L de AR 109 y NaCl 0.1 M. El impacto de NaCl, j , pH inicial y duración de la electrólisis fueron definidos en agua residual de la industria textil. El suministro de voltaje igual a 10 V, con el ambiente ya mencionado, propició que el platino haya decolorado hasta 99 % luego de 30 minutos sin evidenciar erosión o desgaste, acompañado de un abatimiento de DQO = 94 %. Por lo tanto, la elección de ese material fue esencial para los siguientes experimentos programados por los autores.

Jović *et al.* exploraron la electrooxidación de los colorantes reactivos azul 52, negro 5, verde 15 y amarillo 125.

La celda, además de alojar el par electrodico de platino, alambre en cátodo, contaba con una variante para división a través de una membrana Flemion 0820. La solución medida de 400 mL estaba compuesta con 200 mg/L de colorante y Na_2SO_4 0.1 M. El azul reactivo 52 se sujetó a tratamiento con voltajes 6, 12 y 24 V para elección del valor que ocasionara mayor degradación. La DQO disminuyó a cantidades inferiores a 30 mg/L de O_2 para azul 52, verde 15 y amarillo 125, mientras que para negro reactivo 5 decayó 57.95 % con membrana y 35.28 % sin membrana. Los resultados demandaron 12 V y pH inicial original de 6.7 y 60 minutos. Fue determinante a la degradación de intermediarios, verificada por HPLC, mediante oxidación electroquímica indirecta.

Aggadi *et al.* [78] ocasionaron la degradación de azul reactivo 21 (AR 21) en agua por mediación electroquímica con platino y una placa auxiliar de carbón vítreo. La intervención de KCl o Na_2SO_4 , ambos 0.1 M, y una j en el intervalo 50-300 mA/cm² en 100 mL fue inspeccionada con valores de pH inicial entre 3-11. La decoloración constatada vía HPLC, comenzando con 0.1 mM de AR 21, rebasó el 99 % en todo el intervalo de j y pH probado a partir de 15 minutos utilizando KCl, pero fue cercano a 40 % con la contribución de Na_2SO_4 . Los oxidantes creados por la oxidación anódica de los iones cloruro desempeñaron una función importante en la eficiencia.

C. GRAFITO

Este material particularmente se ha asignado en incontables ocasiones a la oxidación electroquímica avanzada para originar radicales $\bullet\text{OH}$ partiendo de peróxido de hidrógeno bajo la catálisis de Fe^{2+} . Antes que nada, los materiales carbonosos han sido ampliamente estudiados como electrocatalizadores y soportes de catalizadores debido a su buena conductividad y alta estabilidad química, al igual que excelente actividad electrocatalítica frente a una variedad de reacciones redox [79].

Kariyajjanavar *et al.* [80] probaron la factibilidad de degradación del café de tina 1 utilizando electrodos de grafito. Las magnitudes de 4.5 cm y 0.8 cm en el cilindro permitieron un área electrodica efectiva de 11.82 cm². La electrólisis se fomentó con NaCl o Na_2SO_4 para incrementar la conductividad de la solución. El ambiente de 50 ppm del colorante, $j = 170$ mA/cm² y tiempo 240 minutos causó una decoloración de 82 y 94.5 % con 25 g/L de Na_2SO_4 y NaCl. La prosecución de ensayos con NaCl sobre un intervalo de j entre 85 y 425 A/m² deri-

vó en porcentajes de DQO desde 67.5 hasta 82.5 %. El último valor permanece casi constante a partir de 170 A/m². El pH menor a 7 aminora la eficiencia, a diferencia del rango 9-11 que la incrementa. La espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier evidenció la ruptura de los anillos aromáticos.

Kariyajjanavar *et al.* [81] postularon la degradación de negro de tina 27 (NO 27) conducida con electrodos de grafito cilíndricos sumergidos en solución, la cual se preparó con electrolito, 25 g/L de NaCl o Na_2SO_4 , y 50 ppm respecto al NO 27. La decoloración se situó en 79 y 98 % según el uso de Na_2SO_4 o NaCl, además de 170 A/m² sostenida 240 minutos a pH 9. La DQO se redujo 67.5 % con el mejor electrolito. Igualmente, el pH menor a 7 decrece la remoción, pero los valores posicionados entre 9-11 la aumentan. La concentración 20 g/L constituyó un punto de inflexión para el abatimiento de DQO, resultando 20 % o menos a niveles menores a 20 y 65 % o más después de 20 hasta 35 g/L. La fragmentación del compuesto fue confirmada con espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier.

Abdel-Aziz *et al.* [82] propusieron la oxidación de los colorantes azul de metilo y metileno en presencia de iones Cl^- en una celda de configuración electrodica peculiar con rodillos de grafito entre dos mallas de acero inoxidable, ambos colocados horizontalmente. La intención principal del arreglo fue aumentar el cociente área superficial/unidad de volumen de la celda, que a su vez incrementaría la cinética de degradación. Asimismo, las mallas proporcionan el beneficio adicional de una mejor distribución ascensional de las burbujas generadas, anulando el requerimiento de agitación mecánica. La concertación de pH = 3, colorante = 50 ppm, $j = 42.55$ mA/cm², NaCl = 2.5 g/L para un lapso de 30 minutos causó que el color decayera 95 y 98 % en el azul de metileno y metilo, respectivamente. La DQO bajó 58 % independientemente del tinte, según pH = 3, colorante = 75 ppm, $j = 42.55$ mA/cm² y NaCl = 1.5 g/L transcurrido 60 minutos. El impacto de la temperatura permaneció como factor adicional para trabajos futuros.

Kariyajjanavar *et al.* [83] utilizaron electrodos cilíndricos de grafito para la electrooxidación de naranja de tina 2. La influencia de la concentración del NaCl y Na_2SO_4 en una primera etapa se examinó. El allanamiento de un pico de absorción, localizado entre 440 y 560 nm, ocurrió progresivamente conforme la adición de NaCl o Na_2SO_4 desde 20 a 35 g/L cuando hubo pH = 9, $j = 170$

mA/m², colorante = 50 ppm y duración 240 minutos. La especificación de 25 g/L propició una decoloración de 45 y 99 % con Na₂SO₄ y NaCl. La DQO se atenuó 78 % con la última sal. Los mejores valores de pH para ganar eficiencia oscilaron entre 9-11, así como entre 25 y 35 g/L de electrolito. La destrucción de anillos aromáticos se corroboró con los análisis de espectroscopía de infrarrojo por transformada de Fourier y cromatografía líquida de alta presión acoplada a espectrometría de masas.

Sürme *et al.* [84] sometieron a oxidación electroquímica el violeta directo 51 con un par electrodico de rodillos de grafito exponiendo 2.35 cm² al sumergirse. La celda cilíndrica simple capaz de almacenar hasta 150 mL se llenó con 100 mL de solución cuya concentración fue de 20 mg/L. Los experimentos con base en la aproximación de variar un parámetro a la vez abarcaron la exploración de conductividad, promovida con Na₂SO₄, pH, *j* e iones interferentes. Las cantidades *I* = 100 mA, pH = 9, conductividad = 4.5 mS/cm y 50 minutos propiciaron 95 % de decaimiento en la coloración. La presencia de los iones K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, Al³⁺ y Pb²⁺ a concentraciones 200, 200, 200, 1000, 100 y 100 mg/L no afectó significativamente la oxidación puesto que todas las eficiencias no fueron menores a 90 %. El monitoreo practicado mediante UV-Vis, λ_{MÁXIMA} = 545 nm, ratificó la descomposición del sistema conjugado.

D. PbO₂ DOPADO

El aprovechamiento de las ventajas que posee en sí mismo el PbO₂ motiva a modificaciones para la mejora adicional de su desempeño. En general, los esfuerzos encauzados a ese propósito son: 1) la capa de PbO₂ agregando materiales transformadores a la solución de deposición electroquímica como cationes, Bi²⁺, Fe³⁺, Ce²⁺, Zr⁴⁺, Cu²⁺, Pr³⁺ y La²⁺ o aniones [Fe(CN)₆]³⁻ y F⁻, y 2) acrecentar la capacidad como la estabilidad con materiales no iónicos, nanotubos de carbono, polietilenglicol, politetrafluoroetileno y polivinilpirrolidona [85].

Las estructuras en las que puede revelarse el PbO₂ están bien identificadas α-PbO₂ (ortorrómbico) y β-PbO₂ (rutilo). Indistintamente de la que se desarrolle en el transcurso de la preparación, ambas formas presentan al ion Pb⁴⁺ en el centro de un octaedro o bipirámide tetragonal. La semejanza radica en la manera en la que se siguen o empaquetan los octaedros. El β-PbO₂ está integrado como cadena lineal, producto de que cada unidad comparte bordes opuestos con las más próxi-

mas. Por otra parte, α-PbO₂ tiene cada octaedro compartiendo bordes no opuestos con otros dos vecinos, resultando secuencias alternadas o zigzag. La distinción cualitativa se realiza con difracción de rayos X [86].

Lyu *et al.* [87] aprovecharon la electrodeposición para modificar electrodos de Ti-PbO₂ con Ce incorporado como Ce(NO₃)₃ a diferentes molaridades: 0, 2.0, 4.0, 8.0, 12.0 mmol/L. La electrocatalisis se dirigió al azul brillante reactivo KN-R. El procedimiento devino en la aglomeración de partículas que paulatinamente construyeron estructuras ramificadas hasta, lo que los autores denominaron, un coral. La consecuencia se acentuó más con 12 mmol/L. La mediación del electrolito Na₂SO₄ 0.5 M, 60 mg/L de colorante, 30 mA/cm², Ti-PbO₂-4 mmol/L Ce y 120 minutos rindió 82 % de decoloración, mientras que el Ti-PbO₂ sin dopar 42 %.

Qiao *et al.* [88] investigaron la electrooxidación del naranja ácido 7 (NA 7) con electrodos de PbO₂ enriquecidos en la superficie con cobalto, neodimio o cerio. El recipiente acumulaba 50 mL de líquido con NA 7 concentrado a 100 mg/L. El mejor elemento dopante se ocupó para proseguir con las pruebas bajo la repercusión de pH inicial, *j*, concentración inicial del NA 7 y electrolito acorde a los niveles 2-11, 5-200 mA/cm², 50-200 mg/L y 0.05-0.3 M Na₂SO₄. Los patrones de todos mostraron señales típicas de geometría β-PbO₂. Las remociones cercanas a 100 y 94 %, de coloración y COT, se consiguieron al establecer NA 7 = 100 mg/L, Na₂SO₄ = 0.2 M, pH inicial = 5 y *j* = 20 mA/cm² al culminar 180 minutos de electrólisis con el electrodo Ti/SnO₂-Sb₂O₃/PbO₂ dopado Ce. La mineralización de ácidos alifáticos sucedió después del rompimiento del enlace azo (-N=N-) como se verificó por medio de los análisis instrumentales UV-visible, fluorescencia, espectroscopía de masas y cromatografía iónica.

Han *et al.* [89] dispersaron nitruro de boro (BN) sobre electrodos de sustrato de titanio con PbO₂. La etapa medular consistió en la inmersión de las placas en una mezcla reaccionante de Pb(NO₃) 0.5 M, NaF 0.5M, HNO₃ 0.1M y varias cantidades de BN 1, 3, 5, 7 y 9 g, además de la aplicación de corriente a temperatura controlada. La capacidad de oxidación electroquímica que ganaron se revisó con la generación de radicales •OH bajo *j* = 35 mA/cm² y Na₂SO₄ 0.1 M. La conversión implica la formación de ácido p-hidroxibenzoico, detectado con espectroscopía de fluorescencia, a partir de ácido benzoico y los radicales. La creación no se manifestó

proporcionalmente, puesto que el mejor desempeño fue de la muestra con 5 g de BN y cantidades más grandes limitan los $\bullet\text{OH}$. El azul brillante reactivo KN-R a una concentración de 60 mg/L reflejó una decoloración del 95 % tratado con Ti/PbO₂@BN-5 y un periodo de 120 minutos. La proliferación de $\bullet\text{OH}$ fue coincidente con la mengua del color.

Weng *et al.* [90] analizaron la degradación del azul turquesa catiónico ATC con PbO₂ dopado con Ce impregnado conforme a la técnica de descomposición térmica-electrodeposición. El curso de la reacción se evaluó con relación al influjo de j , concentración de electrolito y electrodo. El ATC 100 mg/L, $j = 40 \text{ mA/cm}^2$ y Na₂SO₄ 0.2 M fue removido después de 60 minutos de tratamiento 97.89 y 85.39 % con PbO₂ dopado y $\beta\text{-PbO}_2$ sin dopar. La DQO se redujo con $j = 20 \text{ mA/cm}^2$ hasta 50.23 y 64.33 % con $j = 40 \text{ mA/cm}^2$ con PbO₂ modificado. El mismo tipo decoloró 94.11, 97.89 y 93.42 % en lo que atañe a 0.1, 0.2 y 0.5 M de Na₂SO₄. La ligera variación demostró que la concentración de electrolito contribuyó poco en la degradación al culminar 60 minutos. El mismo comportamiento no se repitió a 90 minutos, ya que la diferencia en los porcentajes fue alrededor de 17-18 %. Los intermediarios descubiertos con cromatografía iónica y cromatografía de gases acoplada a espectroscopía de masas coincidieron con los ácidos orgánicos benzoico, acético, oxálico y fórmico. Adicionalmente, se identificó poco ion nitrato consecuencia de algún producto nitrogenado.

Xu *et al.* [91] introdujeron vía codeposición TiO₂ en capa externa de PbO₂ soportada en sustrato interno de Ti/SnO₂-Sb. El polvo de TiO₂ P25 se formuló con 5 g en 1 litro de agua, añadiéndose en la deposición electroquímica con una $j = 10 \text{ mA/cm}^2$ por 120 minutos a temperatura de 65 °C. La degradación de 50 ppm de naranja de metilo por 2 horas se llevó a cabo en un reactor con ventana de cuarzo para posibilitar la fotoelectrocatalisis o la simple electrocatalisis coincidente con lo planeado. La eliminación de color con electrodo no dopado alcanzó 74.3 % en ausencia y 77.1 % en presencia de UV. Por otra parte, en el mismo orden con material dopado se posicionó en 66.4 y 99.6 % con un pH = 2.5 y potencial 1.5 V. El ajuste del pH a 6.5 y 11 menoscabó las eficiencias a 97.2 y 82.3 %. Las dosis que difieren de 5 g/L de P25 impuestas en 0, 2, 8 y 10 g/L suscitan remociones menores con la acción de la radiación. La degradación se favoreció en condiciones ácidas debido a una preferente adsorción del naranja de metilo en las partículas de TiO₂ P25.

E. PbO₂ SIN DOPAR

Las propiedades más atractivas del PbO₂ no dopado son buena conductividad, un sobrepotencial relativamente alto en las reacciones de evolución de oxígeno, un tiempo de servicio mayor al SnO₂ cuando está soportado en titanio y un precio bajo en comparación con los electrodos de metales nobles o DDB [85], [92].

El incremento en el rendimiento se ha procurado con 1) mejoras en el método de preparación utilizando la electrodeposición por pulsos o con líquidos como ácido metanosulfónico para la deposición y 2) remplazo del sustrato de titanio, por ejemplo, con arreglos de nanotubos de titanio [85].

Ammar *et al.* [93] compararon la eficiencia de oxidación anódica con PbO₂, DDB y Pt del rojo de alizarina S en medio acuoso neutro. La capa de 300 μm de PbO₂ se acondicionó depositando galvanostáticamente el óxido en tántalo con acero inoxidable como contraelectrodo. La celda cónica no dividida estuvo diseñada para retener 100 mL. Los parámetros j y concentración inicial fueron monitoreados con la medición de COT tomando en cuenta el soporte de Na₂SO₄ 0.05 M. Los electrodos con área de 3 cm² se conservaron distanciados 1 cm. La reducción de COT de la solución coloreada 100 mg/L, equivalentes a 70 mg/L de COT teórico inicial, se logró a 70 y 80 % con 33 y 100 mA/cm² en 6 Ah/L de carga. El grado de mineralización de 90 % requirió de 18 horas con 33 mA/cm². El DDB condujo a la desaparición de COT con 33 mA/cm² en 18 horas. La atenuación de COT empleando Pt en función del tiempo fue muy ligera. El paso de 40 minutos produce 7 % de remoción que no diverge notoriamente en 18 horas ascendiendo a 35 %. Los orgánicos exhibieron más alta resistencia a la oxidación con Pt.

Chen *et al.* [94] fabricaron electrodos de PbO₂ en sustrato de Pb de acuerdo con el método de oxidación térmica-electroquímica. El pretratamiento con diversos compuestos en ambiente alcalino para remover grasa predispuso al Pb al calentamiento en mufla a 300 °C por 3 horas. El seguimiento estribó en administrar oxidación electroquímica mediada con Na₂SO₄ 0.5 M en el transcurso de 3 minutos limitada a 2 V y 50 °C. La oxidación secundaria similar a la anterior a 1.5 V para cinco plazos: 0, 3, 4, 5 y 6 horas, permitió registrar los electrodos 0-PbO₂, 3-PbO₂, 4-PbO₂, 5-PbO₂ y 6-PbO₂. Los espesores crecieron desde 1.30, 2.71,

4.47, 10.81 y 12.03 μm . La producción de $\bullet\text{OH}$ realizó lo propio revelando 8.11×10^{-5} , 2.73×10^{-4} , 4.59×10^{-4} , 5.97×10^{-4} y 7.82×10^{-4} $\mu\text{M}/\text{min}$ en cumarina 0.5 mM y 8 mA/cm². La disminución de concentración de rojo congo, 20 mg/L, Na₂SO₄ 0.1 M en 20 minutos a 10 mA/cm² y 6-PbO₂, equivalió a 70.19 %, además con 2 mA/cm² a 60 %. El método térmico-electroquímico podría incrementar la oxidación electrocatalítica.

Elaissaoui *et al.* [95] concibieron dos electrodos de PbO₂ soportados en Pb y acero inoxidable (AS30) por mediación de los métodos galvanostático y corriente pulsada, respectivamente. El primero demandó una j de 10 mA/cm² aplicada 90 minutos en una solución de H₂SO₄ al 10 % a 25 °C. El segundo precisó de HNO₃ 0.5 M y Pb(NO₃)₂ 0.5 M acompañados de 170 pulsos de altura 30 mA/cm², ancho 1 s a 30 mA/cm² y relajación 5 s a corriente cero. Los discos con superficie 12.56 cm² rendidos a 25 mA/cm² admitían flujo volumétrico de 138 L/h en un régimen de recirculación. La electrólisis de amaranillo E123, 0.05 mM, por un periodo de 420 minutos, se efectuó a pH 2 y natural en Na₂SO₄ 0.1 M. La difracción de rayos X, el microscopio electrónico de barrido y de fuerza atómica reflejaron el dominio de la forma β -PbO₂. El descenso de color 95 y 91 %, sumado a 82 y 76 % de DQO, fue satisfecho con Pb/PbO₂ y AS30/PbO₂ a pH 2. La más grande creación de $\bullet\text{OH}$ aconteció a ese pH que disminuyó el consumo de energía. Un escaso desprendimiento de PbO₂ sobrevino posterior a 60 minutos en AS30/PbO₂.

Elaissaoui *et al.* [96] proyectaron un nuevo método para un ánodo multicapa de Al (acero inoxidable)/ SiOx/PbO₂ para mejorar su durabilidad y rendimiento comparado con capa de PbO₂. La electrodeposición pulsada para el electrodo de PbO₂ sobre acero inoxidable (Al/PbO₂) se sintetizó con Pb(NO₃)₂ 0.5 M y HNO₃ 0.5 M asistida con 170 pulsos de altura 30 mA/cm², ancho 1 s a 30 mA/cm² y relajación 5 s. El electrodo de Al/SiOx/PbO₂ exigió que el Al previamente se desengrasara con 2-propanol y acetona antes que las películas de SiOx fueran sometidas a deposición química de vapor mejorada con plasma (PECVD). El proceso se confeccionó a temperatura menor a 70 °C en plasma alimentado con mezclas de argón, oxígeno y tetraetoxisilano (TEOS) en diferentes proporciones. Los tres materiales resultantes SiOx-1, SiOx-2 y SiOx-3 tenían las relaciones 20:20:1, 30:10:1 y 40:00:1 de Ar:O₂:TEOS. Los ensayos ocuparon una celda resguardando 1 litro de colorante amaranillo 0.015 mM, Na₂SO₄ 0.1 M, H₂SO₄ 0.1 M, pH = 2, j = 25

mA/cm², 5 horas y 25 °C. El grado de remoción con SiOx-1, SiOx-2, SiOx-3 y Al/PbO₂, obtenido 95, 85, 60 y 80 % para color, así como 80, 60, 32 y 47 % para DQO, distinguió la función de Al/SiOx(20:20:1)/PbO₂. La intercapa de SiOx acrecentó la adhesión de la externa y estimuló la formación cristalina β -PbO₂ respecto a α -PbO₂.

Duan *et al.* [97] construyeron un electrodo de espuma de PbO₂ macroporoso en 3D. El método implicó una esponja macroporosa comercialmente disponible que se limpió con etanol preliminarmente a la etapa de inmersión-secado [98]. La esponja fue sumergida en una tinta de nanotubo de carbono (NTC) con dodecilbenzeno sulfonato de sodio para llenar vacíos y cubrir poros. Ulteriormente, se concedió el secado a 90 °C. La secuencia repetida varias ocasiones acentuó la carga de NTC. La culminación consistió en secado al horno a 100 °C por 24 horas.

La electrodeposición a temperatura ambiente con cátodo de acero inoxidable, corriente constante de 40 mA durante 2 h, actuó en baño de 150 g/L Pb(NO₃)₂, 0.5 g/L NaF y pH 0.5-2 controlado con goteo de HNO₃. El electrodo de PbO₂ base titanio fue encauzado igualmente, excepto la existencia de NTC. Las corridas electroquímicas de rodamina B, azul de metileno y naranja II se realizaron imponiendo 20 mA/cm², 500 mg/L de colorante, volumen = 50 mL, electrolito Na₂SO₄ 0.25 M, 120 minutos y temperatura ambiente. La exclusión de la adsorción de colorante sobre los nanotubos de carbono obligó a la experimentación de equilibrio de adsorción, el cual apareció en 40 minutos con eficiencias alrededor de 9 %. Las diferencias de decoloración de 95, 99 y 99 % fueron poco significativas para rodamina B, azul de metileno y naranja II. La posición de los picos de difracción confirmó la reflexión característica de β -PbO₂.

F. ELECTRODOS DSA

Los conocidos también como electrodos de óxido de metal mixto. Las ventajas que gozan son resistencia mecánica, estabilidad, potencial anódico, durabilidad, potencial intensificación de aplicación industrial y alta área electroquímicamente activa [99], [100]. Las opciones de fabricación son diversas, aunque el electrodo modelo deseado sea una tarea desafiante.

En efecto, los métodos comprenden fase en solución y gaseosa, el primero relativo al recubrimiento por in-

mersión, recubrimiento por rotación, pintado, pirólisis por aspersión y sol-gel, los cuales emplean una solución precursora de sales metálicas, y el segundo referido a deposición química de vapor y de capa atómica. Las vías electroquímicas ocupadas considerablemente son anodización y deposición electroquímica [27].

Nakamura *et al.* [101] emplearon un electrodo transformado acorde al método de Pecchini [102] con precursor polimérico y soporte de titanio. La placa fue arenada para desarrollar rugosidad, garantizando la adherencia del óxido metálico. El siguiente paso pretendió garantizar la remoción de TiO_2 residual anticipándose al cubrimiento. Por lo tanto, el material se condicionó a ebullición en agua, sonicación en isopropanol, sumersión en HCl y después en ácido oxálico hirviendo. La resina de titanio y rutenio, 70:30, se esparció en el Ti para predisponer una polimerización térmica a 120 °C. La calcinación subsiguiente a 450 °C en atmósfera de oxígeno ratificó la última etapa del conjunto que se reiteró hasta un espesor de capa igual a 2 μm . La celda termostatzada a 35 °C albergó al ánodo, $\text{Ti/Ru}_{0.15}\text{Ti}_{0.85}\text{O}_2$, y al cátodo cilíndrico hueco de PVC, electrodo difusor de aire, con extensión de 3 cm^2 . La electrooxidación de 150 mL conteniendo 231 mg/L de azul reactivo 4, Na_2SO_4 0.05 M a pH 3 y 360 minutos de electrólisis indujo un decaimiento de color equivalente a 83 y 92 % con 100 y 200 mA.

Baddouh *et al.* [103] estudiaron la oxidación electroquímica de rodamina B (RB) comparando los ánodos dimensionalmente estables (DSA) $\text{Ti/RuO}_2\text{-IrO}_2$ contra SnO_2 en el escenario de valores constantes en todos los parámetros j , pH inicial, electrolito de soporte y temperatura, exceptuando uno. La RB se vertió en un reservorio de vidrio termorregulado preparado a 50 mg/L y la mezcla $\text{NaCl}+\text{Na}_2\text{SO}_4$. La placa de platino estaba distanciada 1 cm del ánodo que exponía un área de 1 cm^2 . La adecuación de 40 mA/cm^2 , 25 °C, NaCl 0.05 M, Na_2SO_4 0.1 M, 90 minutos y pH 3 o 6.5 con DSA provocó 100 % de decoloración e igualmente ocurrió con SnO_2 . Por otra parte, la DQO decayó 92.4 y 57.6 % en 180 minutos a pH 3 actuando DSA y SnO_2 si permanecen los demás parámetros igual. La j , en función del tiempo, mostró que la oxidación de iones cloruro por efecto de la electrooxidación indirecta ejerció una misión electroquímica relevante.

Baddouh *et al.* [104] decidieron electrolizar azul de metileno, 100 mg/L, atendida por $\text{Ti/RuO}_2\text{-IrO}_2$ y SnO_2 para contrastar su actuación. Los elementos ánodo y cátodo de platino que expusieron una superficie de 1 cm^2

fueron distanciados 1 cm. Las circunstancias operativas incluyeron j , concentración de NaCl , pH inicial y temperatura. El cumplimiento de 90 minutos, 40 mA/cm^2 , NaCl 0.1 M, pH 3 y 25 °C posibilitó bajar 100 y 95 % el color original a través de DSA y SnO_2 . Análogamente, la DQO menguó a 97.5 y 65 % supeditada a las mismas restricciones experimentales, exceptuando el tiempo, 180 minutos. El consumo de energía por 100 mL de agua tratada fue superior 3.348 contra 2.766 $\text{kW}\cdot\text{h/m}^3$ concorde al mismo orden anódico. La transformación del NaCl hacia agentes altamente oxidantes promovió la degradación intervenida por oxidación indirecta.

Zeb *et al.* [105] efectuaron la oxidación anódica de café ácido 98 en 500 mL de solución acuosa concentrada a 180 mg/L. El ánodo $\text{Ti/Ru}_{0.3}\text{Ti}_{0.7}\text{O}_2$ y el acero inoxidable se ubicaron al interior de un reactor de vidrio apto para almacenar 600 mL. La zona exhibida por los electrodos correspondió a 14 cm^2 , a la vez que estaban separados 2 cm. La transferencia de masa del NaCl , Na_2SO_4 , H_2SO_4 u otros se fomentó preservando la agitación a 400 rpm. El impacto del tipo de electrolito, j y pH fueron de interés en la progresión. El ejercicio preparatorio indicó que a 20 mA/cm^2 y 35 minutos el NaCl no tiene equiparación con relación a la deficiente decoloración de 10 y 18 % usando Na_2SO_4 y H_2SO_4 . La asistencia de NaCl 0.1 M, manteniendo la fuerza iónica con Na_2SO_4 0.1 M, la extendieron inclusive 90 % a pH 3 en 35 minutos, desfavoreciéndola a 78.75 % con pH 10. El COT se mitigó 67 % en 60 minutos. El consumo de energía se amplió a 2 $\text{kW}\cdot\text{h/m}^3$ con 20 mA/cm^2 .

Cotillas *et al.* [106] evaluaron la electrooxidación del colorante rojo reactivo M5B (RR MB5) contrastando DDB y DSA. La celda de un solo compartimento sujetaba los electrodos circulares DDB o DSA y al auxiliar de acero inoxidable de 50 cm^2 idéntico en dimensión al ánodo. La fase líquida portaba 100 mg de RR MB5 y 5000 mg de Na_2SO_4 por cada litro manteniéndola en recirculación con bomba peristáltica. Independientemente de la j (10-60 mA/cm^2), la coloración y DQO se desvanecieron completamente con la injerencia de DDB después de 240 minutos y pH 6. Por tanto, los autores optaron por continuar con 30 mA/cm^2 . El flujo volumétrico menor a 180 L/h no cambió notablemente el patrón de degradación a desemejanza de 300 L/h que propició una mejoría adjudicada a la transferencia de masa del contaminante al ánodo de DDB. La adición de una dosis de 100 mg/L de Cl^- aumentó la tasa o rendimiento de remoción extraordinariamente con DSA, aunque tam-

bién un poco con DDB. Sin embargo, la DQO solamente descendió alrededor de 42 %, en presencia o ausencia del Cl⁻, con DSA.

La [Tabla 1](#) reúne los escenarios que ocasionan los mayores porcentajes de remoción de color y/o materia orgánica

medida como DQO o COT. Los ánodos en la primera columna de la izquierda aparecen progresivamente en conjuntos de investigaciones realizadas con DDB, platino, grafito, PbO₂ dopado, PbO₂ sin dopar y DSA. También se muestran el colorante utilizado en el estudio y la referencia correspondiente.

TABLA 1
REMOCIÓN DE COLORANTES SINTÉTICOS DEL AGUA CON DIFERENTES ÁNODOS

TIPO DE ELECTRODO		CONDICIONES EXPERIMENTALES	MÁXIMA EFICIENCIA	REF.
ÁNODO	CÁTODO			
DDB	Acero inoxidable AISI 304	$j = 30 \text{ mA/cm}^2$, $C_{0C} = 100 \text{ mg/L}$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 = 100 \text{ mM}$, $\text{NaCl} = 20 \text{ mM}$, $\text{pH} = 7$, $T = 35 \text{ }^\circ\text{C}$, $Q_{\text{recirculado}} = 400 \text{ L/h}$	Azul ácido 62: $\text{DQO} \approx 100 \%$, $q = 1$; $\text{COT} \approx 100 \%$; $q = 8$. Negro directo 22 y rojo reactivo 141: $q = 12.5$, $\text{COT} = 80$ y 90% . Naranja disperso 29: $\text{DQO} = 90 \%$, $q = 2.5$	[66]
DDB	Acero inoxidable AISI 304	$j = 31 \text{ mA/cm}^2$, $C_{0C} = 100 \text{ mg/L}$, $t = 138 \text{ min}$, $\text{pH}_0 = 3$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 0.05 \text{ M}$, $Q = 12 \text{ L/min}$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	Anaranjado de metilo: color = 94 %, $\text{COT} = 60.3 \%$	[67]
Si/DDB	Acero inoxidable	Boro/carbono = 2000 (DDB ₂) o 10 000 (DDB ₁₀), DDB ₁₀ @ $j = 2.5 \text{ mA/cm}^2$, DDB ₂ @ $j = 5 \text{ mA/cm}^2$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 0.05 \text{ M}$ o $\text{NaCl} 0.12 \text{ M}$, $C_{0C} = 20 \text{ mg/L}$, $\text{pH}_0 = 6.2-$, $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$	Rubina reactiva F-2B Abs/Abs ₀ : DDB ₁₀ > DDB ₂ , $\text{NaCl} > \text{Na}_2\text{SO}_4$ DDB ₁₀ -NaCl: Abs/Abs ₀ ≈ 0 , $q = 0.05$ DDB ₁₀ -Na ₂ SO ₄ : Abs/Abs ₀ = 0.625, $q = 0.280$	[68]
Si/DDB Nb/DDB	Titanio	$Q = 160 \text{ L/h}$; $C_{0C} = 200 \text{ mg/L}$; $\text{Na}_2\text{SO}_4 0.05 \text{ M}$; $j = 15, 30$ o 60 mA/cm^2 ; $t = 30, 60, 90$ o 120 min	Decoloración de violeta ácido 7 Si/DDB: 100 %, 30 mA/cm^2 , 90 min Nb/DDB: ídem Si/BDD y Nb/BDD DQO : 85 y 83 % @ 60 mA/cm^2 , $t = 120 \text{ min}$	[69]
DDB/Ti	Malla de platino	$j = 50 \text{ mA/cm}^2$, $C_{0C} = 150 \text{ mg/L}$, $\text{H}_2\text{SO}_4 0.1 \text{ M}$, $\text{HClO}_4 0.1 \text{ M}$, $\text{K}_2\text{SO}_4 0.1 \text{ M}$ a $\text{pH} = 6.5$, $\text{K}_2\text{SO}_4 0.1 \text{ M}$ a $\text{pH} = 10$, $t = 90 \text{ min}$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$	Reducción de absorción de naranja reactivo 16 $\text{K}_2\text{SO}_4 = 96 \%$, $\text{pH} = 10$ $\text{COT} = 30 \%$ a 100 mA/cm^2	[70]
DDB	Platino	$j = 100 \text{ mA/cm}^2$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 0.05 \text{ M}$, $\text{pH}_0 = 3.03$, $C_{0C} = 100 \text{ mg/L}$, $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$	Amarillo brillante reactivo X-6G Decoloración = 100 %, 45 min $\text{COT} = 72.8 \%$, 120 min	[71]
Platino espiral	Platino cilíndrico	$C_{0C} = 50 \text{ mg/L}$, $V = 6 \text{ V}$, NaCl o $\text{KCl} 1.5 \text{ g/L}$, $\text{pH}_0 = 6.9$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $t = 15 \text{ min}$	Decoloración de rojo ácido 73 $\text{NaCl} = 97 \%$, $\text{KCl} = 96 \%$	[74]
Platino rejilla cilíndrica Nb/DDB	Filtro de carbono 3D	$\text{Ion Fe}^{3+} 0.1 \text{ mM}$, $\text{pH}_0 = 3$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 50 \text{ mM}$, $I = 300 \text{ mA}$, $C_{0C} = 50 \text{ mg/L}$	Rodamina 6G Decoloración = 100 %, $t = 5 \text{ min}$ $\text{COT} = 97.5$ y 98.7% con Pt y DDB, $I = 500 \text{ mA}$	[75]
Platino placa	Acero inoxidable	$C_{0C} = 1000 \text{ mg/L}$, $\text{NaCl} 0.1 \text{ M}$, $V = 10 \text{ V}$, $t = 30 \text{ min}$	Azul reactivo 109 Decoloración = 99 % $\text{DQO} = 94 \%$	[76]
Platino	Platino alambre	$C_{0C} = 200 \text{ mg/L}$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 0.1 \text{ M}$, $V = 12 \text{ V}$, $\text{pH}_0 = 6.7$, $t = 60 \text{ min}$, división membrana Flemion 0820	Colorantes reactivos: azul 52, negro 5, verde 15, amarillo 125 a) azul 52, verde 15 y amarillo 125: $\text{DQO} < 30 \text{ mg/L}$ de O ₂ ; b) negro 5, DQO : 57.95 % membrana, 35.28 % sin membrana	[77]
Platino	Carbón vítreo	$C_{0C} = 0.1 \text{ mM}$; $\text{KCl} 0.1 \text{ M}$ o $\text{Na}_2\text{SO}_4 0.1 \text{ M}$; $j = 50-300 \text{ mA/cm}^2$; $\text{pH}_0 = 3-11$; $t = 15 \text{ min}$	Azul reactivo 21. a) KCl : decoloración > 99 % para todo el intervalo de j y pH ; b) Na_2SO_4 , 100 mA/cm^2 : decoloración $\approx 40 \%$	[78]
Grafito cilíndrico	Grafito cilíndrico	$C_{0C} = 50 \text{ ppm}$, $j = 170 \text{ mA/cm}^2$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 = 25 \text{ g/L}$ o $\text{NaCl} = 25 \text{ g/L}$, $\text{pH}_0 = 9$, $t = 240 \text{ min}$	Café de tina 1. a) Na_2SO_4 : decoloración = 82 %; b) NaCl : decoloración = 94.5 %, $\text{DQO} = 82.5 \%$	[80]
Grafito cilíndrico	Grafito cilíndrico	$C_{0C} = 50 \text{ ppm}$, $j = 170 \text{ mA/cm}^2$, $\text{Na}_2\text{SO}_4 = 25 \text{ g/L}$ o $\text{NaCl} = 25 \text{ g/L}$, $\text{pH}_0 = 9$, $t = 240 \text{ min}$	Negro de tina 27. a) Na_2SO_4 : decoloración = 79 %; b) NaCl : decoloración = 98 %, $\text{DQO} = 67.5 \%$	[81]
Grafito rodillos	Acero inoxidable Mallas horizontal	Grupo A: $\text{pH}_0 = 3$, $C_{0C} = 50 \text{ ppm}$, $j = 42.55 \text{ mA/cm}^2$, $\text{NaCl} = 2.5 \text{ g/L}$, $t = 30 \text{ minutos}$ Grupo B: ídem grupo A, excepto $C_{0C} = 75 \text{ ppm}$, $\text{NaCl} = 1.5 \text{ g/L}$, $t = 60 \text{ min}$	Azul de metileno Azul de metilo Grupo A: decoloración = 95 y 98 % Grupo B: $\text{DQO} = 58 \%$ ambos	[82]

g : carga, $\text{A}\cdot\text{h/L}$; C_{0C} : concentración inicial de tinte; t : tiempo de reacción; pH_0 : pH inicial; Q : flujo volumétrico, T : temperatura; V : voltaje; I : intensidad de corriente; SS: acero inoxidable; EDA: electrodo difusor de aire; Ref.: referencia.

TABLA 1 (CONT.)
REMOCIÓN DE COLORANTES SINTÉTICOS DEL AGUA CON DIFERENTES ÁNODOS

TIPO DE ELECTRODO		CONDICIONES EXPERIMENTALES	MÁXIMA EFICIENCIA	REF.
ÁNODO	CÁTODO			
Grafito cilíndrico	Grafito cilíndrico	$C_{0C} = 50$ ppm; $j = 170$ mA/cm ² ; Na ₂ SO ₄ = 25 g/L o NaCl = 25 g/L; pH ₀ = 9; $t = 240$ min	Naranja de tina 2 Na ₂ SO ₄ : decoloración = 45 % NaCl: decoloración = 99 %, DQO = 78 %	[83]
Grafito rodillo	Grafito rodillo	$C_{0C} = 20$ mg/L, $I = 100$ mA, pH = 9, conductividad = 4.5 mS/cm con Na ₂ SO ₄ , $t = 50$ min	Violeta directo 51 Decoloración = 95 %; interferente NaCl = 1000 mg/L; decoloración = 93 % a $t = 30$ min	[84]
Ti-PbO ₂ dopado con Ce	Titanio	Ti-PbO ₂ dopado con Ce 2.0, 4.0, 8.0, 12.0 mmol/L; Na ₂ SO ₄ 0.5 M, $C_{0C} = 60$ mg/L, $j = 30$ mA/cm ² , $t = 120$ min	Azul brillante reactivo KN-R, Ti-PbO ₂ -4 mmol/L, decoloración 82 %, sin dopar 42 %	[87]
Ti/SnO ₂ -Sb ₂ O ₃ /PbO ₂ dopado con Co, Nd y Ce	Titanio	Dopante = Co, Nd o Ce, $C_{0C} = 100$ mg/L, Na ₂ SO ₄ = 0.2 M, pH ₀ = 5, $j = 20$ mA/cm ² , $t = 180$ min	Naranja ácido 7 Ce-PbO ₂ , decoloración = 100 %, COT = 94 %	[88]
Ti-PbO ₂ dopado con BN	Titanio	Ti-PbO ₂ dopado con BN 1, 3, 5, 7 y 9 g; $C_{0C} = 60$ mg/L; $j = 35$ mA/cm ² , Na ₂ SO ₄ = 0.2 M; $t = 120$ min	Azul brillante reactivo KN-R Ti/PbO ₂ @BN-5, decoloración = 95 %	[89]
Ti-PbO ₂ dopado con Ce	Titanio	$C_{0C} = 100$ mg/L, $j = 40$ mA/cm ² y Na ₂ SO ₄ 0.2 M, $t = 60$ min	Azul turquesa catiónico Decoloración, β-PbO ₂ = 85 %, PbO ₂ /Ce = 98 %, PbO ₂ /Ce: DQO = 64.33 %	[90]
Ti/SnO ₂ -Sb/PbO ₂ dopado con TiO ₂ P25	Cobre	Dopante = TiO ₂ P25 @ 5g/L, $C_{0C} = 50$ mg/L, $V = 1.5$ V, pH = 2.5; $t = 2$ horas, ausencia UV (Auv), presencia UV (Puv)	Naranja de metilo. Decoloración (%). No dopado: Auv = 74.3, Puv = 77.1. Dopado: Auv = 66.4, Puv = 99.6	[91]
Ta/PbO ₂	Acero inoxidable AISI 304	$C_{0C} = 100$ mg/L, Na ₂ SO ₄ 0.05 M, pH = 7, $T = 25$ °C, electrodo = PbO ₂	Decoloración de rojo de alizarina S 100 mA/cm ² , 2 h, 80 %; 33 mA/cm ² , 18 h, 90 %	[93]
Pb/PbO ₂	Platino	Capas a 0, 3, 4, 5, 6 horas; $C_{0C} = 20$ mg/L; $j = 10$ mA/cm ² ; Na ₂ SO ₄ 0.1 M; $t = 20$ min	Decoloración de rojo congo Dopaje 6 h (6-PbO ₂): 70 %	[94]
Pb/PbO ₂ SS/PbO ₂	Acero AS30	$C_{0C} = 0.05$ mM, $j = 25$ mA/cm ² , $Q = 138$ L/h, Na ₂ SO ₄ 0.1 M, pH ₀ = 2 o natural, $t = 420$ min	Amaranto E123 Decoloración pH 2, Pb/PbO ₂ = 95 %, SS/PbO ₂ = 91 %, DQO pH 2, Pb/PbO ₂ = 82 %	[95]
SS/SiO _x /PbO ₂ SS/PbO ₂	Acero inoxidable	Intercapa SiO _x con relaciones Ar:O ₂ : tetraetoxisilano = 20:20:1, 30:10:1, 40:00:1 = SiO _x -1, SiO _x -2, SiO _x -3; $C_{0C} = 0.015$ mM; Na ₂ SO ₄ 0.1 M; H ₂ SO ₄ 0.1 M; pH = 2; $j = 25$ mA/cm ² ; $t = 5$ horas; $T = 25$ °C	Amaranto E123 a) Decoloración: SiO _x -1 = 95 %, SS/PbO ₂ = 80 %; b) DQO: SiO _x -1 = 80 %, SS/PbO ₂ = 47 %	[96]
PbO ₂ 3D Ti/PbO ₂	Acero inoxidable	$C_{0C} = 500$ mg/L, $j = 20$ mA/cm ² , Na ₂ SO ₄ 0.25 M, $t = 120$ min, $T =$ ambiente	Decoloración (%), rodamina B = 95, azul de metileno = 99, naranja II = 99	[97]
Ti/Ru _{0.15} Ti _{0.85} O ₂	Cilíndrico hueco PVC EDA	$C_{0C} = 231$ mg/L, Na ₂ SO ₄ 0.05 M, pH ₀ = 3, $t = 360$ min, $T = 35$ °C	Azul reactivo 4 Decoloración, 83% @ 100 mA, 92 % @ 200 mA	[101]
Ti/RuO ₂ -IrO ₂ SnO ₂	Platino	$C_{0C} = 50$ mg/L, $j = 40$ mA/cm ² , NaCl 0.05 M, Na ₂ SO ₄ 0.1 M, pH ₀ = 3 o 6.5, $t = 90$ min, $T = 25$ °C	Rodamina B Decoloración, Ti/RuO ₂ -IrO ₂ = 100 %, SnO ₂ = 100, DQO @ pH 3, 3 h, Ti/RuO ₂ -IrO ₂ = 92.4 %, SnO ₂ = 57.6 %	[103]
Ti/RuO ₂ -IrO ₂ SnO ₂	Platino	$C_{0C} = 100$ mg/L, $j = 40$ mA/cm ² , NaCl 0.1 M, pH ₀ = 3, $t = 90$ min, $T = 25$ °C	Azul de metileno Decoloración (%), Ti/RuO ₂ -IrO ₂ = 100, SnO ₂ = 95, DQO (%) 3 h, Ti/RuO ₂ -IrO ₂ = 97.5, SnO ₂ = 65	[104]
Ti/Ru _{0.3} Ti _{0.7} O ₂	Acero inoxidable	$C_{0C} = 180$ mg/L, $j = 20$ mA/cm ² , Na ₂ SO ₄ 0.1 M, NaCl 0.1 M, pH = 3, $t = 35$ min	Café ácido 98 Decoloración = 90 %, COT = 67 % @ 1 h	[105]
DSA Comercial DeNora DDB	Acero inoxidable	$C_{0C} = 100$ mg/L, Na ₂ SO ₄ = 5000 mg/L, $j = 30$ mA/cm ² , $Q = 180$ L/h, pH = 6, $t = 240$ min, $T = 25$ °C	Rojo reactivo M5B a) DDB, decoloración y DQO = 100 % @ 10-60 mA/cm ² ; b) DSA, decoloración = 100 % @ NaCl 100 mg/L, 25 min, DQO ≈ 42 % @ NaCl 100 o 0 mg/L	[106]

g : carga, A·h/L; C_{0C} : concentración inicial de tinte; t : tiempo de reacción; pH₀: pH inicial; Q : flujo volumétrico, T : temperatura; V : voltaje; I : intensidad de corriente; SS: acero inoxidable; EDA: electrodo difusor de aire; Ref.: referencia.

III. CONCLUSIONES

De la exposición representativa de las investigaciones llevadas a cabo en oxidación electroquímica con seis diferentes materiales anódicos se derivan las conclusiones siguientes:

- a) Las especies de cloro altamente oxidantes, creadas en varios tipos de ánodos, detonadas por el Cl_2 gaseoso hasta llegar a ácido hipocloroso HOCl e iones hipoclorito OCl^- , clorato ClO_3^- y perclorato ClO_4^- , dependiendo del ambiente químico, por ejemplo, pH, son capaces de asistir extraordinariamente la modificación u oxidación de estructuras orgánicas de los colorantes. El conteo de artículos contemplados excede el 90 % del total que sustentaron la decoloración con NaCl .
- b) El electrolito de soporte Na_2SO_4 , ocupado en menor medida, se reconoce como un sobresaliente oxidante que después de experimentar hidrólisis en el agua libera el anión sulfato SO_4^{2-} , a partir del cual se genera electroquímicamente los radicales sulfato $\text{SO}_4^{\cdot-}$ y peroxodisulfato $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$, aunque también su función conservante de fuerza iónica es relevante para disminuir el consumo de energía eléctrica cuando se combinó con NaCl .
- c) La exploración de otros electrolitos de soporte, con el propósito de aplicación a escala piloto o real, sería deseable que se extendiera más allá del cloro activo, conjunto de mediadores de Cl_2 , puesto que con NaCl se generan subproductos organoclorados potencialmente tóxicos o cancerígenos. Los que alternativamente ameritan atención son peroxodifosfato $\text{P}_2\text{O}_8^{4-}$ u otros iones haluro como Br^- .
- d) Los electrodos especificados, necesaria u opcionalmente evaluados por sustrato, intercapa y capa, alcanzaron, en combinación con los electrolitos Na_2SO_4 , NaCl o $\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{NaCl}$, sobresalientes porcentajes de remoción de color superiores a 90 %, exhibiendo la esmerada búsqueda y determinación de condiciones experimentales más favorables para la electrooxidación.
- e) La oxidación electrolítica aún sigue representando un motivo de análisis para encontrar óptimas correlaciones entre el grado de remoción y el ánodo sólido sumergido en el agua. Las pruebas con pla-

cas u otras geometrías, cubiertas o desprotegidas, evidencian en ocasiones elevada efectividad específica con alguna sustancia disuelta o suspendida, especialmente esta última distribución que requiere más estudio.

- f) La vasta variedad de electrodos que virtualmente se podrían preparar, así como materiales electrónicos, es impresionante recurriendo a los métodos disponibles. El aumento del empleo de nanotecnología factible para configurar características electrocatalíticas mejores con base en nanopartículas o nanoestructuras incorporadas se vislumbra como justificada tendencia futura.

REFERENCIAS

- [1] G. R. Chatwal, "Introduction to dyes", en *Synthetic Dyes*, M. Arora, ed. Himalaya Publishing House Pvt. Ltd, 2016, cap. 1, pp. 1-9.
- [2] M. Iqbal, "Dyes & colour", en *Textile Dyes*, M. Iqbal ed. Karachi: Rehbar Publishers, abr. 2008, cap. 1, pp. 1-6.
- [3] V. Katheresan, J. Kannedo y S. Y. Lau, "Efficiency of various recent wastewater dye removal methods: A review", *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 6, n.º 4, pp. 4676-4697, ag. 2018, doi: [10.1016/j.jece.2018.06.060](https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.06.060).
- [4] B. M. Adesanmi, Y-T. Hung, H. H. Paul. y C. R. Huhnke, "Comparison of dye wastewater treatment methods: A review", *GSC Adv. Res. Rev.*, vol. 10, n.º 2, pp. 126-137, feb. 2022, doi: [10.30574/gscarr.2022.10.2.0054](https://doi.org/10.30574/gscarr.2022.10.2.0054).
- [5] S. Benkhaya, S. M'rabet, H. Lgaz, A. E. Bachiri y A. E. Harfi, "Dyes: Classification, Pollution, and Environmental Effects" en *Dye Biodegradation, Mechanisms and Techniques. Recent Advances*, S. S. Muthu y A. Khadir, eds. Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2022, pp. 1-50, doi: [10.1007/978-981-16-5932-4_1](https://doi.org/10.1007/978-981-16-5932-4_1).
- [6] S. Gita, A. Hussan y T. G. Choudhury, "Impact of textile dyes waste on aquatic environments and its treatment", *Environment & Ecology*, vol. 35, n.º 3C, pp. 2349-2353, 2017.
- [7] R. Al-Tohamy *et al.*, "A critical review on the treatment of dye-containing wastewater: Ecotoxicological and health concerns of textile dyes and possible remediation approaches for environmental safety", *Ecotoxicol.*

- Environ. Saf.*, vol. 231, p. 113160, feb. 2022, doi: [10.1016/j.ecoenv.2021.113160](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.113160).
- [8] S. Khan y A. Malik, “Environmental and Health Effects of Textile Industry Wastewater” en *Environmental Deterioration and Human Health*, A. Malik, E. Grohmann, R. Akhtar, eds. Dordrecht: Springer, dic. 2013, pp. 55-72, doi: [10.1007/978-94-007-7890-0_4](https://doi.org/10.1007/978-94-007-7890-0_4).
- [9] B. Lellis, C. Z. Fávaro-Polonio, J. A. Pamphile y J. C. Polonio, “Effects of textile dyes on health and the environment and bioremediation potential of living organisms”, *Biotechnol. Res. Innov.*, vol. 3, n.º 2, pp. 275-290, jul.-dic. 2019, doi: [10.1016/j.biori.2019.09.001](https://doi.org/10.1016/j.biori.2019.09.001).
- [10] R. Kant, “Textile dyeing industry an environmental hazard”, *Natural Science*, vol. 4, n.º 1, pp. 22-26, en. 2012, doi: [10.4236/ns.2012.41004](https://doi.org/10.4236/ns.2012.41004).
- [11] S. Khan y A. Malik, “Toxicity evaluation of textile effluents and role of native soil bacterium in biodegradation of a textile dye”, *Environ Sci Pollut Res*, vol. 25, n.º 5, pp. 4446-4458, nov. 2017, doi: [10.1007/s11356-017-0783-7](https://doi.org/10.1007/s11356-017-0783-7).
- [12] K. Hunger y Sewekow, “Health and Safety Aspects” en *Industrial dyes: Chemistry, properties and applications*, K. Hunger, ed. Weinheim: Wiley-VCH, dic. 2002, cap. 8, pp. 625-641, doi: [10.1002/3527602011.ch8](https://doi.org/10.1002/3527602011.ch8).
- [13] D. M. Leme, F. L. Primo, G. G. Gobo, C. R. Vieira da Costa, A. C. Tedesco y D. Palma de Oliveira, “Genotoxicity assessment of reactive and disperse textile dyes using human dermal equivalent (3D cell culture system)”, *J Toxicol Environ Health*, vol. 78, n.º 7, pp. 466-480, mar. 2015, doi: [10.1080/15287394.2014.999296](https://doi.org/10.1080/15287394.2014.999296).
- [14] P. Gregory, “Toxicology of textile dyes” en *Environmental aspects of textile dyeing* (Serie Textiles), R. M. Christie, ed. CRC press, 2007, cap. 3, pp. 44-73, doi: [10.1533/9781845693091.44](https://doi.org/10.1533/9781845693091.44).
- [15] F. M. D. Chequer *et al.*, “The azo dyes Disperse Red 1 and Disperse Orange 1 increase the micronuclei frequencies in human lymphocytes and in HepG2 cells”, *Mutat Res*, vol. 676, n.º 1-2, pp. 83-86, may. 2009, doi: [10.1016/j.mrgentox.2009.04.004](https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2009.04.004).
- [16] J. Feng, C. E. Cerniglia y H. Chen, “Toxicological significance of azo dye metabolism by human intestinal microbiota”, *Front. Biosci. (Elite Ed)*, vol. 4, n.º 2, pp. 568-586, en. 2012, doi: [10.2741/e400](https://doi.org/10.2741/e400).
- [17] S. Mondal, M. K. Purkait y S. De, “Introduction”, en *Advances in Dye Removal Technologies* (Serie Green Chemistry and Sustainable Technology). Springer Nature Singapore Pte Ltd, oct. 2017, cap. 1, pp. 1-48, doi: [10.1007/978-981-10-6293-3_1](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6293-3_1).
- [18] C. V. Nachiyar, A.D. Rakshi, S. Sandhya, N. B. D. Jebasta y J. Nellore, “Developments in treatment technologies of dye-containing effluent: A review”, *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 7, p. 100339, en. 2023, doi: [10.1016/j.cscee.2023.100339](https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100339).
- [19] V. Khandegar y A. K. Saroha, “Electrocoagulation for the treatment of textile industry effluent A review”, *J Environ Manage*, vol. 128, pp. 949-963, oct. 2013, doi: [10.1016/j.jenvman.2013.06.043](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.06.043).
- [20] J. Fadzli, K. H. K. Hamid, N. R. N. Him y S. W. Puasa, “A critical review on the treatment of reactive dye wastewater”, *Desalin. Water Treat.*, vol. 257, pp. 185-203, may. 2022, doi: [10.5004/dwt.2022.28028](https://doi.org/10.5004/dwt.2022.28028).
- [21] S. Samsami, M. Mohamadi, M.-H. Sarrafzadeh, E. R. Rene y M. Firoozbahr, “Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: Overview and perspectives”, *Process Saf. Environ. Prot.*, vol. 143, pp. 138-163, nov. 2020, doi: [10.1016/j.psep.2020.05.034](https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.034).
- [22] P. K. Singh y R. L. Singh, “Bio-removal of Azo Dyes: A Review”, *Int. j. appl. sci. biotechnol.*, vol. 5, n.º 2, pp. 108-126, 2017, doi: [10.3126/ijasbt.v5i2.16881](https://doi.org/10.3126/ijasbt.v5i2.16881).
- [23] S. Pulkka, M. Martikainen, A. Bhatnagar y M. Sillanpää, “Electrochemical methods for the removal of anionic contaminants from water – A review”, *Sep. Purif. Technol.*, vol. 132, pp. 252-271, ag. 2014, doi: [10.1016/j.seppur.2014.05.021](https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.05.021).
- [24] M. Panizza, “Importance of electrode material in the electrochemical treatment of wastewater containing organic pollutants”, en *Electrochemistry for the Environment*, C. Comninellis y G. Chen, eds. Nueva York: Springer New York, 2010, cap. 2, pp. 25-54, doi: [10.1007/978-0-387-68318-8_2](https://doi.org/10.1007/978-0-387-68318-8_2).
- [25] H. Hamad, D. Bassyouni, El.-S. El-Ashtoukhy, N. Amin y M. A. El-Latif, “Electrocatalytic degradation

- and minimization of specific energy consumption of synthetic azo dye from wastewater by anodic oxidation process with an emphasis on enhancing economic efficiency and reaction mechanism”, *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 148, pp. 501-512, feb. 2018, doi: [10.1016/j.ecoenv.2017.10.061](https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.10.061).
- [26] Ö. Kahraman y I. Şimşek, “Color removal from denim production facility wastewater by electrochemical treatment process and optimization with regression method”, *J. Clean. Prod.*, vol. 267, p. 122168, sept. 2020, doi: [10.1016/j.jclepro.2020.122168](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122168).
- [27] A. N. S. Rao y V. T. Venkatarangaiah, “Metal oxide-coated anodes in wastewater treatment”, *Environ Sci Pollut Res Int*, vol. 21, n.º 5, pp. 3197-3217, nov. 2013, doi: [10.1007/s11356-013-2313-6](https://doi.org/10.1007/s11356-013-2313-6).
- [28] C. Comninellis y G. P. Vercesi, “Characterization of DSA[®]-type oxygen evolving electrodes: Choice of a coating”, *J Appl Electrochem*, vol. 21, pp. 335-345, abr. 1991, doi: [10.1007/BF01020219](https://doi.org/10.1007/BF01020219).
- [29] S. Trasatti, “Electrocatalysis by oxides – Attempt at a unifying approach”, *J. Electroanal. Chem.*, vol. 111, n.º 1, pp. 125-131, jul. 1980, doi: [10.1016/S0022-0728\(80\)80084-2](https://doi.org/10.1016/S0022-0728(80)80084-2).
- [30] M. Pacheco-Alvarez, R. Fuentes-Ramírez, E. Brillas y J. M. Peralta-Hernández, “Assessing the electrochemical degradation of reactive orange 84 with Ti/IrO₂-SnO₂-Sb₂O₅ anode using electrochemical oxidation, electro-Fenton, and photoelectro-Fenton under UVA irradiation”, *Chemosphere*, vol. 339, p. 139666, oct. 2023, doi: [10.1016/j.chemosphere.2023.139666](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139666).
- [31] X. Yu, M. Zhou, Y. Hu, K. G. Serrano y F. Yu, “Recent updates on electrochemical degradation of bio-refractory organic pollutants using DDB anode: a mini review”, *Environ Sci Pollut Res*, vol. 21, n.º 14, pp. 8417-8431, abr. 2014, doi: [10.1007/s11356-014-2820-0](https://doi.org/10.1007/s11356-014-2820-0).
- [32] P. V. Nidheesh, G. Divyapriya, N. Oturan, C. Trelly y M. A. Oturan, “Environmental applications of boron-doped diamond electrodes: 1. Applications in water and wastewater treatment”, *Chem Electro Chem*, vol. 6, n.º 8, pp. 2124-2142, abr. 2019, doi: [10.1002/celec.201801876](https://doi.org/10.1002/celec.201801876).
- [33] W. Sun, D. Liu y M. Zhang, “Application of electrode materials and catalysts in electrocatalytic treatment of dye wastewater”, *Front. Chem. Sci. Eng.*, vol. 15, n.º 6, pp. 1427-1443, oct. 2021, doi: [10.1007/s11705-021-2108-0](https://doi.org/10.1007/s11705-021-2108-0).
- [34] Q. Zhou, X. Zhou, R. Zheng, Z. Liu y J. Wang, “Application of lead oxide electrodes in wastewater treatment: a review”, *Sci Total Environ*, vol. 806, parte 1, p. 150088, feb. 2022, doi: [10.1016/j.scitotenv.2021.150088](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150088).
- [35] E. Brillas y C. A. Martínez-Huitle, “Decontamination of wastewaters containing synthetic organic dyes by electrochemical methods. An updated review”, *Appl. Catal. B: Environ.*, vol. 166-167, pp. 603-643, may. 2015, doi: [10.1016/j.apcatb.2014.11.016](https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2014.11.016).
- [36] E. N. Abrahart, “Dyestuffs” en *The Chemical Industry*, C. A. Heaton, ed. Blackie & Son Limited, 1986, cap. 2, pp. 64-125, doi: [10.1007/978-1-4615-8541-1_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8541-1_3).
- [37] J. A. Kiernan, “Classification and naming of dyes, stains and fluorochromes”, *Biotech Histochem*, vol. 76, n.º 5-6, pp. 261-278, sept.-nov. 2001, doi: [10.1080/bih.76.5-6.261.278](https://doi.org/10.1080/bih.76.5-6.261.278).
- [38] K. Hunger, “Dyes, General Survey” en *Industrial Dyes Chemistry: Properties, Applications*, K. Hunger, ed. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, dic. 2002, cap. 1, pp. 1-12, doi: [10.1002/3527602011.ch1](https://doi.org/10.1002/3527602011.ch1).
- [39] S. Dutta, B. Gupta, S. K. Srivastava y A. K. Gupta, “Recent advances on the removal of dyes from wastewater using various adsorbents: a critical review”, *Mater. Adv.*, vol. 2, n.º 14, pp. 4497-4531, jun. 2021, doi: [10.1039/D1MA00354B](https://doi.org/10.1039/D1MA00354B).
- [40] A. E. Ghaly, R. Ananthashankar, M. Alhattab y V. V. Ramakrishnan, “Production, characterization and treatment of textile effluents: a critical review”, *J Chem Eng Process Technol*, vol. 5, n.º 1, p. 1000182, en. 2014, doi: [10.4172/2157-7048.1000182](https://doi.org/10.4172/2157-7048.1000182).
- [41] G. R. Chatwal, “Chemical Classification of Dyes”, en *Synthetic Dyes*. M. Arora, ed. Himalaya Publishing House Pvt. Ltd, 2016, cap. 4, pp. 1-10.
- [42] K. Hunger, P. Gregory, P. Miederer, H. Berneth, C. Heid y W. Mennicke, “Important chemical chromophores of dye classes” en *Industrial Dyes Chemistry: Properties, Applications*, K. Hunger, ed. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, dic. 2002, cap. 2, pp. 13-112, doi: [10.1002/3527602011.ch2](https://doi.org/10.1002/3527602011.ch2).

- [43] S. M. Burkinshaw, "Application of dyes" en *The chemistry and application of dyes*, D. R. Waring y G. Hallas, eds. Nueva York: Plenum Press, 1990, cap. 7, pp. 237-379, doi: [10.1007/978-1-4684-7715-3_7](https://doi.org/10.1007/978-1-4684-7715-3_7).
- [44] G. R. Chatwal, "Sulphur Dyes", en *Synthetic Dyes*, M. Arora, ed. Himalaya Publishing House Pvt. Ltd, 2016, cap. 19, pp. 1-2.
- [45] S. M. Shang, "Process control in dyeing of textiles" en *Process control in textile manufacturing* (Serie Textiles), A. Majumdar, A. Das, R. Alagirusamy, V. Kothari, eds. CRC press, 2013, cap. 13, pp. 300-338, doi: [10.1533/9781845693091.44](https://doi.org/10.1533/9781845693091.44).
- [46] J. N. Chakraborty, "Dyeing with reactive dye" en *Fundamentals and practices in colouration of textiles*. WPI Publishing New York, 2014, cap. 6, pp. 61-76.
- [47] V. Moody y H. L. Needles, "Color, Dyes, Dyeing, and Printing" en *Tufted carpet textile fibers, dyes, finishes, and processes*. Norwich: William Andrew, 2004, cap. 15, pp. 155-175, doi: [10.1016/B978-188420799-0.50016-6](https://doi.org/10.1016/B978-188420799-0.50016-6).
- [48] J. N. Chakraborty, "Dyeing of silk" en *Fundamentals and practices in colouration of textiles*. WPI Publishing New York, 2014, cap. 21, pp. 262-270.
- [49] H. Zollinger, "Nitro and nitroso dyes" en *Color chemistry: syntheses, properties, and applications of organic dyes and pigments*, 3.^a ed. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, 2003, pp. 637.
- [50] J. Koh, "Dyeing with disperse dyes" en *Textile dyeing*, P. Hauser ed. IntechOpen, dic. 2011, cap. 10, pp. 195-220, doi: [10.5772/800](https://doi.org/10.5772/800).
- [51] I. Holme, "Coloration of technical textiles" en *Handbook of technical textiles*, vol. 1: Technical Textile Processes, 2.^a ed., A. R. Horrocks y S. C. Anand, eds. Woodhead Publishing Series in Textiles, 2016, cap. 9, pp. 231-284, doi: [10.1016/B978-1-78242-458-1.00009-1](https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-458-1.00009-1).
- [52] D. P. Chattopadhyay, "Chemistry of dyeing" en *Handbook of textile and industrial dyeing. Principles, processes and types of dyes*, M. Clark, ed. Woodhead Publishing Series in Textiles, 2011, cap. 4, pp. 150-183, doi: [10.1533/9780857093974.1.150](https://doi.org/10.1533/9780857093974.1.150).
- [53] P. V. Nidheesh, R. Gandhimathi y S. T. Ramesh, "Degradation of dyes from aqueous solution by Fenton processes: a review", *Environ Sci Pollut Res*, vol 20, n.º 4, pp. 2099-2132, en. 2013, doi: [10.1007/s11356-012-1385-z](https://doi.org/10.1007/s11356-012-1385-z).
- [54] A. Gürses, M. Açıkıldız, K. Güneş y M. S. Gürses, "Classification of dye and pigments" en *Dyes and pigments* (Serie SpringerBriefs in Molecular Science), may. 2016, cap. 3, pp. 31-46, doi: [10.1007/978-3-319-33892-7_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-33892-7_3).
- [55] N. N. Mahapatra, "Acid dyes" en *Textile dyes*. Woodhead publishing India Pvt Ltd, abr. 2016, cap. 8, pp. 97-112.
- [56] A. Kumar, U. Dixit, K. Singh, S. P. Gupta y M. S. J. Beg, "Structure and properties of dyes and pigments" en *Dyes and pigments novel applications and waste treatment*, R. Papadakis, ed. IntechOpen, jun. 2021, cap. 8, pp. 1-19, doi: [10.5772/intechopen.97104](https://doi.org/10.5772/intechopen.97104).
- [57] G. R. Chatwal, "Classification of dyes on the basis of mode of application", en *Synthetic Dyes*, M. Arora, ed. Himalaya Publishing House Pvt. Ltd, 2016, cap. 3, pp. 1-6.
- [58] C. A. Martínez-Huitle y S. Ferro, "Electrochemical oxidation of organic pollutants for the wastewater treatment: direct and indirect processes", *Chem Soc Rev*, vol. 35, n.º 12, pp. 1324-1340, jul. 2006, doi: [10.1039/B517632H](https://doi.org/10.1039/B517632H).
- [59] Á. Anglada, A. Urriaga e I. Ortiz, "Contributions of electrochemical oxidation to waste-water treatment: fundamentals and review of applications", *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 84, n.º 12, pp. 1747-1755, may. 2009, doi: [10.1002/jctb.2214](https://doi.org/10.1002/jctb.2214).
- [60] M. J. Martín de Vidales Calvo, "Eliminación de contaminantes orgánicos persistentes de aguas residuales mediante oxidación electroquímica con ánodo de diamante dopado con boro", tesis de doctorado, Depto. de Ing. Química, Universidad de Castilla-La Mancha, España, 2015.
- [61] K. Juttner, U. Galla y H. Schmieder, "Electrochemical approaches to environmental problems in the process industry", *Electrochim. Acta*, vol. 45, n.º 15-16, pp. 2575-2594, may. 2000, doi: [10.1016/S0013-4686\(00\)00339-X](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(00)00339-X).

- [62] B. Marselli, J. Garcia-Gomez, P.-A. Michaud, M. A. Rodrigo y C. Comninellis, "Electrogeneration of hydroxyl radicals on boron doped diamond electrodes", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 150, n.º 3, pp. D79-D83, feb. 2003, doi: [10.1149/1.1553790](https://doi.org/10.1149/1.1553790).
- [63] S. K. Ghosh y H. Rahaman, "Noble metal manganese oxide hybrid nanocatalysts" en *Noble metal-metal oxide hybrid nanoparticles. Fundamentals and applications a volume. Micro and nano technologies*, S. Mohapatra, T. A. Nguyen y P. Nguyen-Tri, eds. Woodhead Publishing an imprint of Elsevier, 2019, cap. 16, pp. 313-340, doi: [10.1016/B978-0-12-814134-2.00009-7](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814134-2.00009-7).
- [64] A. N. S. Rao y V. T. Venkatarangaiah, "Metal oxide-coated anodes in wastewater treatment", *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 21, n.º 5, pp. 3197-3217, nov. 2013, doi: [10.1007/s11356-013-2313-6](https://doi.org/10.1007/s11356-013-2313-6).
- [65] T. Zhang, Z. Xue, Y. Xie, G. Huang y G. Peng, "Fabrication of a boron-doped nanocrystalline diamond grown on an WC-Co electrode for degradation of phenol", *RSC advances*, vol. 12, n.º 41, pp. 26580-26587, sept. 2022, doi: [10.1039/D2RA04449H](https://doi.org/10.1039/D2RA04449H).
- [66] J. M. Aquino, M. A. Rodrigo, R. C. Rocha-Filho, C. Sáez y P. Cañizares, "Influence of the supporting electrolyte on the electrolyses of dyes with conductive-diamond anodes", *Chem. Eng. J.*, vol. 184, pp. 221-227, mar. 2012, doi: [10.1016/j.cej.2012.01.044](https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.01.044).
- [67] C. Ramírez *et al.*, "Electrochemical oxidation of methyl orange azo dye at pilot flow plant using DDB technology", *J. Ind. Eng. Chem.*, vol. 19, n.º 2, pp. 571-579, mar. 2013, doi: [10.1016/j.jiec.2012.09.010](https://doi.org/10.1016/j.jiec.2012.09.010).
- [68] R. Bogdanowicz *et al.*, "Influence of the boron doping level on the electrochemical oxidation of the azo dyes at Si/DDB thin film electrodes", *Diam. Relat. Mater.*, vol. 39, pp. 82-88, ag. 2013, doi: [10.1016/j.diamond.2013.08.004](https://doi.org/10.1016/j.diamond.2013.08.004).
- [69] C. N. Brito *et al.*, "Electrochemical Oxidation of Acid Violet 7 Dye by Using Si/DDB and Nb/DDB Electrodes", *J. Electrochem. Soc.*, vol. 165, n.º 5, pp. E250-E255, abr. 2018, doi: [10.1149/2.1111805jes](https://doi.org/10.1149/2.1111805jes).
- [70] F. L. Migliorini, A. B. Couto, S. A. Alves, M. R. de V. Lanza y N. G. Ferreira, "Influence of supporting electrolytes on RO 16 dye electrochemical oxidation using boron doped diamond electrodes", *Mater. Res.*, vol. 20, n.º 3, pp. 584-591, feb. 2017, doi: [10.1590/1980-5373-MR-2016-0153](https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0153).
- [71] Y. Tang *et al.*, "Electrochemical oxidative degradation of X-6G dye by boron-doped diamond anodes: Effect of operating parameters", *Chemosphere*, vol. 258, p. 127368, nov. 2020, doi: [10.1016/j.chemosphere.2020.127368](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127368).
- [72] M. Panizza y G. Cerisola, "Electrocatalytic materials for the electrochemical oxidation of synthetic dyes", *Appl. Catal. B: Environ.*, vol. 75, n.º 1-2, pp. 95-101, ag. 2007, doi: [10.1016/j.apcatb.2007.04.001](https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2007.04.001).
- [73] S. Salvestrini, A. Fenti, S. Chianese, P. Iovino y D. Musmarra, "Electro-oxidation of humic acids using platinum electrodes: an experimental approach and kinetic modelling", *Water*, vol. 12, n.º 8, p. 2250, ag. 2020, doi: [10.3390/w12082250](https://doi.org/10.3390/w12082250).
- [74] S. Khezrianjoo y H. D. Revanasiddappa, "Evaluation of kinetics and energy consumption of the electrochemical oxidation of Acid Red 73 in aqueous media", *Toxicol Environ Chem*, vol. 98, n.º 7, pp. 759-767, feb. 2016, doi: [10.1080/02772248.2016.1139118](https://doi.org/10.1080/02772248.2016.1139118).
- [75] N. Khalifaoui, H. Boutoumi, H. Khalaf, N. Oturan y M. A. Oturan, "Electrochemical Oxidation of the Xanthene Dye Rhodamine 6G by Electrochemical Advanced Oxidation Using Pt and DDB Anodes", *Curr. Org. Chem.*, vol. 16, n.º 18, pp. 2083-2090, 2012, doi: [10.2174/138527212803532459](https://doi.org/10.2174/138527212803532459).
- [76] N. Nordin, S. F. M. Amir, Riyanto y M. R. Othman, "Textile industries wastewater treatment by electrochemical oxidation technique using metal plate", *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 8, n.º 9, pp. 11403-11415, sep. 2013, doi: [10.1016/S1452-3981\(23\)13193-2](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)13193-2).
- [77] M. Jović *et al.*, "Study of the electrochemical oxidation of reactive textile dyes using platinum electrode", *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 8, n.º 1, pp. 168-183, en. 2013, doi: [10.1016/S1452-3981\(23\)14011-9](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)14011-9).
- [78] S. E. Aggadi, Z. E. Abbassi y A. E. Hourch, "Color removal from dye-containing aqueous solutions by electrooxidation", *Desalin. Water Treat.*, vol. 215, pp. 232-236, mar. 2021, doi: [10.5004/dwt.2021.26766](https://doi.org/10.5004/dwt.2021.26766).
- [79] M.-X. Qiao, Y. Zhang, L.-F. Zhai y M. Sun. "Corrosion of graphite electrode in electrochemical advanced oxida-

- tion processes: degradation protocol and environmental implication”, *Chem. Eng. J.*, vol. 344, pp. 410-418, jul. 2018, doi: [10.1016/j.cej.2018.03.105](https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.03.105).
- [80] P. Kariyajjanavar, J. Narayana y Y. A. Nayaka, “Electrochemical degradation of C.I. Vat Brown 1 dye on carbon electrode”, *Adv. Chem. Lett.*, vol. 1, n.º 1, pp. 32-39, mar. 2013, doi: [10.1166/acl.2013.1002](https://doi.org/10.1166/acl.2013.1002).
- [81] P. Kariyajjanavar, J. Narayana y Y. A. Nayaka, “Degradation of textile dye C.I. Vat Black 27 by electrochemical method by using carbon electrodes”, *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 1, n.º 4, pp. 975-980, dic. 2013, doi: [10.1016/j.jece.2013.08.002](https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.08.002).
- [82] M. H. Abdel-Aziz, M. Bassyouni, M. S. Zoromba y A. A. Alshehri, “Removal of dyes from waste solutions by anodic oxidation on an array of horizontal graphite rods anodes”, *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 58, n.º 2, pp. 1004-1018, en. 2019, doi: [10.1021/acs.iecr.8b05291](https://doi.org/10.1021/acs.iecr.8b05291).
- [83] P. Kariyajjanavar, J. Narayana y Y. A. Nayaka, “Electrochemical degradation of C.I. Vat Orange 2 dye on carbon electrode”, *Inventi Impact: Water Environ*, vol. 2013, n.º 3, pp. 106-112, jul. 2013.
- [84] Y. Sürme y O. B. Demirci, “Determination of direct violet 51 dye in water based on its decolorisation by electrochemical treatment”, *Chem. Zvesti.*, vol. 68, pp. 1491-1497, oct. 2014, doi: [10.2478/s11696-014-0616-9](https://doi.org/10.2478/s11696-014-0616-9).
- [85] X. Hao, G. Wuqi, W. Jia, F. Jiangtao, Y. Honghui y Y. Wei, “Preparation and characterization of titanium-based PbO₂ electrodes modified by ethylene glycol”, *RSC Advances*, vol. 6, n.º 9, pp. 7610-7617, en. 2016, doi: [10.1039/C5RA21195F](https://doi.org/10.1039/C5RA21195F).
- [86] X. Li, D. Pletcher y F. C. Walsh, “Electrodeposited lead dioxide coatings”, *Chem. Soc. Rev.*, vol. 40, n.º 7, pp. 3879-3894, mar. 2011, doi: [10.1039/C0CS00213E](https://doi.org/10.1039/C0CS00213E).
- [87] J. Lyu *et al.*, “Enhancement of the electrocatalytic oxidation of dyeing wastewater (reactive brilliant blue KN-R) over the Ce-modified Ti-PbO₂ electrode with surface hydrophobicity”, *J. Solid State Electrochem.*, vol. 23, pp. 847-859, en. 2019, doi: [10.1007/s10008-018-04170-9](https://doi.org/10.1007/s10008-018-04170-9).
- [88] Q. Qiao, S. Singh, S.-L. Lo, Y. Li, J. Jin y L. Wang, “Electrochemical oxidation of acid orange 7 dye with Ce, Nd, and Co-modified PbO₂ electrodes: Preparation, characterization, optimization, and mineralization”, *J. Taiwan Inst Chem Eng*, vol. 84, pp. 110-122, mar. 2018, doi: [10.1016/j.jtice.2018.01.008](https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.01.008).
- [89] H. Han, J. Lyu, L. Zhu, G. Wang, C. Ma y H. Ma, “Fabrication of BN modified Ti/PbO₂ electrodes with tunable hydrophobic characteristics and their electrocatalytic performance”, *J. Alloys Compd.*, vol. 828, p. 154049, jul. 2020, doi: [10.1016/j.jallcom.2020.154049](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.154049).
- [90] M. Weng, Z. Zhou y Q. Zhang, “Electrochemical degradation of typical dyeing wastewater in aqueous solution: Performance and mechanism”, *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 8, n.º 1, pp. 290-296, en. 2013, doi: [10.1016/S1452-3981\(23\)14020-X](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)14020-X).
- [91] H. Xu, Q. Zhang, W. Yan, W. Chu y L. Zhang, “Preparation and characterization of PbO₂ electrodes doped with TiO₂ and its degradation effect on azo dye wastewater”, *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 8, n.º 4, pp. 5382-5395, abr. 2013, doi: [10.1016/S1452-3981\(23\)14689-X](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)14689-X).
- [92] Y. Jiang *et al.*, “Anodic oxidation for the degradation of organic pollutants: Anode materials, operating conditions and mechanisms. A mini review”, *Electrochem. commun.*, vol. 123, p. 106912, feb. 2021, doi: [10.1016/j.elecom.2020.106912](https://doi.org/10.1016/j.elecom.2020.106912).
- [93] S. Ammar, M. Asma, N. Oturan, R. Abdelhedi y M. A. Oturan, “Electrochemical degradation of anthraquinone dye Alizarin Red: Role of the electrode material”, *Curr. Org. Chem.*, vol. 16, n.º 17, pp. 1978-1985, 2012, doi: [10.2174/138527212803251613](https://doi.org/10.2174/138527212803251613).
- [94] Z. Chen *et al.*, “A novel Pb/PbO₂ electrodes prepared by the method of thermal oxidation-electrochemical oxidation: Characteristic and electrocatalytic oxidation performance”, *J. Alloys Compd.*, vol. 851, p. 156834, en. 2021, doi: [10.1016/j.jallcom.2020.156834](https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.156834).
- [95] I. Elaissoui, H. Akrouy y L. Bousselmi, “Interface behavior of PbO₂ on pure lead and stainless steel as anode for dye degradation”, *Desalin. Water Treat.*, vol. 57, n.º 34, pp. 16161-16176, ag. 2015, doi: [10.1080/19443994.2015.1079250](https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1079250).
- [96] I. Elaissoui, H. Akrouy, S. Grassini, D. Fulginiti y L. Bousselmi, “Role of SiO_x interlayer in the electrochem-

- ical degradation of Amaranth dye using SS/PbO₂ anodes”, *Mater. Des.*, vol. 110, pp. 633-643, nov. 2016, doi: [10.1016/j.matdes.2016.08.044](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.08.044).
- [97] T. Duan, Y. Chen, Q. Wen, Y. Cong, Y. Duana y Y. Wang, “Novel three-dimensional macroporous PbO₂ foam electrode for efficient electrocatalytic decolorization of dyes”, *RSC Advances*, vol. 5, n.º 109, pp. 89363-89367, oct. 2015, doi: [10.1039/C5RA17159H](https://doi.org/10.1039/C5RA17159H).
- [98] X. Xie *et al.*, “Carbon nanotube-coated macroporous sponge for microbial fuel cell electrodes”, *Energy Environ. Sci.*, vol. 5, n.º 1, sept. 2011, doi: [10.1039/C1EE02122B](https://doi.org/10.1039/C1EE02122B).
- [99] O. M. Rodríguez-Narváez, A. R. Picos, N. Bravo-Yumi, M. Pacheco-Alvarez, C. A. Martínez-Huitle y J. M. Peralta-Hernández, “Electrochemical oxidation technology to treat textile wastewaters”, *Curr. Opin. Electrochem.*, vol. 29, p. 100806, oct. 2021, doi: [10.1016/j.coelec.2021.100806](https://doi.org/10.1016/j.coelec.2021.100806).
- [100] J. L. S. Duarte *et al.*, “Electrochemical degradation of 17- α -Methyltestosterone over DSA® electrodes”, *Chem. Eng. Process.: Process Intensif.*, vol. 142, p. 107548, ag. 2019, doi: [10.1016/j.cep.2019.107548](https://doi.org/10.1016/j.cep.2019.107548).
- [101] K. C. Nakamura *et al.*, “Electrochemically-driven mineralization of Reactive Blue 4 cotton dye: On the role of in situ generated oxidants”, *J. Electroanal. Chem.*, vol. 840, pp. 415-422, may. 2019, doi: [10.1016/j.jelechem.2019.04.016](https://doi.org/10.1016/j.jelechem.2019.04.016).
- [102] T. É. S. Santos, R. S. Silva, C. C. Jara, K. I. B. Eguiluz y G. R. Salazar-Banda, “The influence of the synthesis method of Ti/RuO₂ electrodes on their stability and catalytic activity for electrochemical oxidation of the pesticide carbaryl”, *Mater. Chem. Phys.*, vol. 148, n.º 1-2, pp. 39-47, nov. 2014, doi: [10.1016/j.matchemphys.2014.07.007](https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2014.07.007).
- [103] A. Baddouh *et al.*, “Electrochemical decolorization of Rhodamine B dye: Influence of anode material, chloride concentration and current density”, *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 6, n.º 2, pp. 2041-2047, abr. 2018, doi: [10.1016/j.jece.2018.03.007](https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.03.007).
- [104] A. Baddouh, B. E. Ibrahimi, M. M. Rguitti, E. Mohamed, S. Hussain y L. Bazzi, “Electrochemical removal of methylene blue dye in aqueous solution using Ti/RuO₂-IrO₂ and SnO₂ electrodes”, *Sep. Sci. Technol.*, vol. 55, n.º 10, pp. 1852-1861, abr. 2019, doi: [10.1080/01496395.2019.1608244](https://doi.org/10.1080/01496395.2019.1608244).
- [105] S. Zeb, S. Hussain, H. A. Khan, Z. Ali, N. Khan, K. I. Khan, F. Ali, S. Khan, M. del P. T. Sotomayor y S. Gul, “Electrochemical oxidation of Acid Brown 98 using Ti/Ru_{0.3}Ti_{0.7}O₂ composite anode”, *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 13, n.º 10, pp. 9428-9440, oct. 2018, doi: [10.20964/2018.10.06](https://doi.org/10.20964/2018.10.06).
- [106] S. Cotillas, J. Llanos, P. Cañizares, D. Clematis, G. Cerisola, M. A. Rodrigo y M. Panizza, “Removal of Procion Red MX-5B dye from wastewater by conductive-diamond electrochemical oxidation”, *Electrochim. Acta*, vol. 263, pp. 1-7, feb. 2018, doi: [10.1016/j.electacta.2018.01.052](https://doi.org/10.1016/j.electacta.2018.01.052).

Edición especial

Enseñanza de la Física y la Educación para la Ciudadanía

La edición especial “Enseñanza de la Física y la Educación para la Ciudadanía” reúne algunos de los trabajos presentados en la XV Reunión Anual de la Asociación Americana de Profesores de Física-Capítulo México. La reunión tuvo como objetivo promover las mejores prácticas de enseñanza-aprendizaje de la física, así como fomentar y vincular la investigación educativa y la actualización profesional de la comunidad de nuestra asociación. Los temas de la reunión trataron sobre la educación STEM, el aprendizaje activo, el uso de tecnologías de la información, la investigación educativa, la formación docente y la divulgación de la física.

Uno de los trabajos trata sobre la experiencia que los y las estudiantes adquieren al participar en proyectos de investigación. Uno de los beneficios encontrados es que la participación en investigación de nivel de pregrado es un fuerte motivante para que los y las estudiantes continúen con estudios de posgrado. El artículo presenta los hallazgos y reflexiones de Jorge Alberto López, profesor de física de la Universidad de Texas en El Paso.

La enseñanza de la física desde el enfoque forense es identificada como área de oportunidad, ya que permite acercar a las y los estudiantes a aplicaciones de la física en situaciones reales, contribuyendo a su formación integral. Vicente Torres, de la Escuela Nacional de Ciencias Forenses de la UNAM, presenta su análisis bibliográfico bajo criterios relacionados con la física forense.

El uso de simulaciones como herramienta didáctica no solo sugiere oportunidades de mejora en el proceso enseñanza-aprendizaje, sino que también identifica oportunidades de mejora continua de las actividades basadas en las simulaciones PhET. El trabajo presenta los resultados de la implementación piloto en el curso de Física Conceptual de la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.

El enfoque de Enseñanza para la Comprensión es una metodología didáctica para el desarrollo de recursos de aprendizaje activo, alineados con los objetivos educativos de las unidades temáticas. Se encontró que la metodología permite vincular contenidos de diversos cursos de matemáticas, física e informática en el Colegio de Ciencia y Tecnología de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México.

También, la educación STEM y el trabajo por proyectos es explorado en un artículo que trata sobre el diseño y la fabricación de un deshidratador de alimentos. El estudio identificó en los grupos de estudiantes de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí la empatía, resiliencia y actitudes positivas respecto al trabajo colaborativo, siendo parte de las habilidades blandas que se requiere de los y las profesionistas.

Dr. Jesús Manuel Sáenz Villela
Editor invitado

The role of undergraduate research in physics education

El papel de la investigación de pregrado en la educación de la física

Jorge A. López✉¹

¹ Department of Physics, University of Texas at El Paso

ABSTRACT

Research experiences can benefit undergraduate students by providing hands-on experience in research, helping them develop critical thinking, problem-solving and analytical skills. Also, it helps them in establishing professional networking, career exploration, and demonstrable experience for future employers. In this article, the different types of undergraduate research experience that exist are explored. The article annotates several investigations of the benefits of undergraduate research experiences, including two that relate research experiences to the continuation into graduate school. This work also presents statistical data from the author's university of affiliation, to conclude that undergraduate research is the strongest motivator there is for students to continue with graduate studies.

KEYWORDS: undergraduate research; physics; education; graduate studies.

RESUMEN

Las experiencias en investigación pueden beneficiar a estudiantes de pregrado al proveerles experiencia práctica en la investigación, ayudándoles a desarrollar pensamiento crítico y habilidades analíticas y de resolución de problemas. También, les ayuda a establecer colaboración en redes profesionales, en la exploración profesional y a adquirir experiencia demostrable ante sus futuros empleadores. En este artículo se presentan los diferentes tipos de experiencias investigación de pregrado. El artículo da algunos detalles de varias investigaciones sobre los beneficios de las experiencias de investigación de pregrado, incluyendo dos que relacionan las experiencias de investigación con la continuación en estudios de posgrado. Este trabajo también presenta datos estadísticos de la universidad a la que el autor está afiliado, para concluir que la investigación de pregrado es el motivador más fuerte para que los estudiantes continúen con estudios de posgrado

PALABRAS CLAVE: investigación de pregrado; física; educación; estudios de posgrado.

Corresponding author: Jorge A. López
Institution: Department of Physics, University of Texas at El Paso.
Address: 500 W. University Ave. El Paso, TX 79968
E-mail: jorgelopez@utep.edu

Manuscript received: June 21, 2023; accepted: August 23, 2023. Date of publication: September 27, 2023.



I. INTRODUCTION

Undergraduate research can be beneficial in career development in several ways. It provides hands-on experience in conducting research and developing critical thinking, problem-solving, and analytical skills, which are highly valued in many careers. It also allows students to work closely with faculty and other professionals, providing opportunities for mentorship, networking, and career exploration. Additionally, undergraduate research can help students build a strong resume or CV, demonstrating to future employers or graduate schools their ability to work independently, think creatively, and contribute to the advancement of their field.

In spite of these obvious benefits, the literature is still in the early stages of understanding how student researchers become integrated into communities of practice and develop science identities, and much less how these research experiences motivate students to pursue graduate degrees.

This is the central topic of this article.

TYPES OF UNDERGRADUATE RESEARCH

There are many examples of undergraduate research projects in physics, including:

1. **Experimental research in a laboratory:** Undergraduates may work on experimental research projects in areas such as optics, materials science, or condensed matter physics. For example, they may help design and build an experiment to investigate the properties of new materials or the behavior of light under different conditions.
2. **Computational research:** Undergraduates may work on computer simulations of physical systems, such as molecular dynamics, simulations of nuclear reactions or simulations of fluid dynamics. They may also use programming languages like Python, FORTRAN, MATLAB, GEANT4, LabView, or C++ to implement numerical methods in solving mathematical problems.
3. **Theoretical research:** Undergraduates may work on theoretical research projects in areas such as quantum mechanics, nuclear and particle physics, or astrophysics. They may help develop mathematical

models to explain physical phenomena or conduct calculations to predict the behavior of particles in different conditions.

4. **Interdisciplinary research:** Undergraduates may work on projects that integrate physics with other disciplines, such as biology or engineering. For example, they may work on developing new technologies that incorporate principles of physics for medical or environmental applications.

Overall, undergraduate research in physics can provide valuable opportunities for students to gain hands-on experience in conducting scientific research and contribute to the advancement of their field. Undoubtedly, research experience can be of benefit for undergraduate students, but it is not clear if the benefits extend to the area of motivation or encouragement for graduate studies. There have been several studies that help us refine the benefits undergraduate research provide to students, in particular, to physics and other Science, Technology, Engineering, and Mathematics (STEM) students, some of these are presented in the following section.

In the following, several studies of research experiences are discussed.

APPRENTICESHIP RESEARCH EXPERIENCES

Thiry and Laursen studied how undergraduate students learn and develop research skills through apprenticeship-style research experiences^[1]. Their work focused on the concept of “scientific apprenticeship,” which involves working closely with a mentor in a research setting to develop skills and knowledge.

Current interest in undergraduate research (UR) among science educators stems from the traditional role of research apprenticeships in preparing scientist and concerns about the current scientific workforce. Although recent research has demonstrated the benefits of UR for STEM students, little is understood about how student-advisor interactions contribute to these benefits. Thiry and Laursen used Situated Learning Theory to examine the role of these interactions in apprenticing undergraduate researchers. A brief description of Situated Learning Theory is in [Appendix A](#).

The qualitative study of Thiry and Laursen examines interviews with a diverse sample of 73 undergraduate

research students from two research-extensive institutions, articulating a continuum of practices used by research mentors in professional socialization, intellectual support, and personal/emotional support. Novice and experienced students had different needs, while underrepresented minority and female students gained confidence and broadened future possibilities. The advising role of research mentors of students at the undergraduate level has a dual scientific and educational aspects, both of which are significance in shaping the students' identities and career trajectories ^[1].

NETWORKED RESEARCH EXPERIENCES

Thompson, Conaway, and Dolan studied the concept of networked research experiences, which involve collaborations between students, faculty, and other professionals across different institutions and organizations ^[2]. Their work has focused on understanding the benefits and challenges of networked research experiences for undergraduate students. A brief description of Networked Research Experience is in [Appendix B](#).

The Thompson-Conaway-Dolan work discusses the increasing emphasis on integrating research experiences into undergraduate biology education and the use of multi-institution and interdisciplinary research networks. Unlike traditional apprenticeship models, networked research provides opportunities for students to develop relationships with multiple faculty members and students working in different areas of the project. The study aims to examine how students in the network develop social ties and the extent to which a networked research experience contributes to the development of social, cultural, and human capital. The study highlights the need to understand how students gain access to research experiences and the elements of research participation that lead to desired student outcomes. Overall, their study suggests that networked research experiences offer new models for involving undergraduates in research and provide opportunities for students to develop a range of skills and knowledge beyond traditional apprenticeship models.

Furthermore, Thompson, Conaway and Dolan discuss how undergraduates participating in a biology research network utilize and develop different forms of capital important for success in science research. Through a qualitative approach framed by capital theories, the study identified that undergraduates drew upon human, cultural, and social capital to gain access to the network.

Undergraduates built multidimensional social ties with faculty, peers, and others, which yielded social capital that can be drawn upon for information, resources, and support ^[2]. They also developed cultural capital in the form of a scientific habitus and human capital in technical, analytical, and communication skills in scientific research. However, most of the students had limited cross-institutional capital, except for students in one institution that housed three research groups.

The study highlights the importance of developing different forms of capital to access opportunities in science beyond the network, and the need for students to be aware of the resources they have developed that can be used in other scientific contexts.

UNDERGRADUATE RESEARCH AND STUDENT WELL-BEING

Walkington and Ommering argue that undergraduate research can contribute to student well-being, particularly in the context of increasing numbers of university students experiencing mental health problems ^[3]. Their work uses Self-Determination Theory to argue that fulfilling the needs for autonomy, competence, and relatedness fosters well-being. A brief description of Self-Determination theory is in [Appendix C](#).

Walkington and Ommering use authenticity as a lens to understand undergraduate research experiences, their investigation suggests that authentic research-based learning can promote well-being through effective curriculum design and mentoring.

Two case studies are used to demonstrate how curriculum design and mentoring pedagogy can enhance authenticity in research, student motivation, and well-being. The investigators emphasize the importance of early and embedded research-based learning, attention to the quality of learning spaces, and effective mentoring relationships to ensure the well-being of all involved. Overall, they advocate for the use of undergraduate research to stimulate well-being among students and provide an entitlement for all students to engage in authentic research-based learning.

UNDERGRADUATE RESEARCH AND RESEARCH SKILLS IN GRADUATE SCHOOL

Gilmore, Vieyra, Timmerman, Feldon, and Maher investigated the relationship between undergraduate re-

search experiences and research skill performance in graduate school [4]. Using an empirical assessment of research skills, they examined the effects of various research experience characteristics such as duration, autonomy, collaboration, and motivation.

Results indicate that undergraduate research experience is positively associated with research skill performance in graduate school. Duration of the research experience was found to be the most strongly correlated with increased research skill performance, while autonomy and collaboration were emphasized in student interviews. The study recommends incorporating research experiences into undergraduate science curricula and creating centralized offices of undergraduate research, along with faculty incentives for involving undergraduates in research.

PERSONAL AND PROFESSIONAL GAINS FROM RESEARCH

Thiry, Weston, Laursen, and Hunter used a combination of methods, including interviews and surveys, to compare the perceived cognitive, personal, and professional gains of novice and experienced undergraduate students who participated in scientific research [5]. A study of 73 entry-level and experienced undergraduate students in four UR programs at two research extensive universities used in-depth interviews and the URSSA instrument to assess the impact of UR on students' cognitive, personal, and professional development.

Students who had more experience with scientific research reported a number of benefits, including a deeper understanding of the research process, improved personal and professional skills, and a greater sense of accomplishment. This study, like [4], found that multi-year undergraduate research (UR) experiences benefit students. These findings have implications for UR program design, advising practices, and funding structures. The URSSA is briefly described in [Appendix D](#).

EDUCATIONAL VALUE OF EXPERIENTIAL RESEARCH

Thiry, Laursen and Hunter studied the educational value of experiential education, including laboratory and project-based coursework, as well as internships, co-ops, and research, which has long been emphasized in undergraduate education in STEM disciplines [6]. However, evidence from well-designed research and

evaluation studies about the educational value of experiential education is sparse. Only recently have the benefits of undergraduate research been explored, and the value of internships and other professional opportunities has been even less well demonstrated.

Despite the limited evidence on the educational value of experiential education in STEM, research and inquiry-based learning are still widely promoted and supported by faculty, institutions, and funders. In 1998 [7], and again in 2020 [8], the Boyer Commission called for research-based learning to become the standard in undergraduate education, and the number of student research programs and institutions offering them continues to grow. Additionally, many institutions are considering incorporating research-like components into regular coursework. In light of these trends, it is crucial to further explore the role of research and other experiential educational activities in undergraduate STEM education.

Although co-curricular activities are commonly believed to enhance undergraduate learning and development in STEM fields, there is a lack of systematic, multi-institutional research examining the outcomes of student participation in these activities on their learning and professional growth. This study conducted interviews with 62 STEM majors from four liberal arts colleges who participated in a range of out-of-class experiences such as internships, jobs, and undergraduate research at government laboratories and research universities.

The study explores whether the benefits identified in the literature on undergraduate research experiences apply to other forms of experiential learning in STEM undergraduate education. Using an analytic framework developed to categorize benefits, the study examines the gains reported by graduating seniors through their curricular and co-curricular experiences, drawing on sociocultural theories of learning to contextualize the findings and their implications for faculty and others interested in supporting deep learning and professional development in STEM undergraduates.

Several studies suggest that undergraduate research experiences can have a positive impact on students' decisions to pursue graduate studies in STEM fields, as well as their overall academic and career goals. In this section, we review some of these investigations.

THE HATHAWAY-NAGDA-GREGERMAN STUDY

Hathaway, Nagda, & Gregerman evaluated how participating in Undergraduate Research Opportunity Program (UROP) influenced several key outcomes related to students' pursuit of graduate education [9].

The initial research design involved an experimental-control group comparison, but many of the non-UROP students in the control group reported having engaged in some form of undergraduate research activity. Therefore, the study was reconfigured to compare three groups: UROP participants, students who participated in other types of undergraduate research, and students who did not participate in any undergraduate research.

The results showed that undergraduate research participation had a consistently positive impact, as students who engaged in undergraduate research were more likely to pursue graduate education, continue with research after completing their undergraduate studies, and use faculty for job recommendations compared to those who did not participate in undergraduate research.

The findings also revealed that UROP had a unique relationship with the pursuit of professional degree programs, which are typically more competitive and challenging than two-year graduate programs, particularly for underrepresented students of color.

The chi-square analysis showed a significant relationship between students' research experiences and their pursuit of graduate or professional education. Of the students who pursued some form of graduate education, 81.5% of UROP participants, 82.0% of students who participated in other types of research, and 65.4% of students who did not participate in research pursued postgraduate education. The results indicated that UROP and other research students were significantly more likely to pursue postgraduate education compared to students who did not participate in research.

THE 2003-2005 WEB SURVEY

The study conducted by Russell, Hancock and McCullough utilized four web-based surveys, spanning from 2003 to 2005 and involving nearly 15,000 participants [10].

The initial survey included around 4,500 undergraduates and 3,600 faculty, graduate students, and postdoc

mentors who had taken part in UROPs supported by eight National Science Foundation (NSF) programs with a significant undergraduate research component during 2002 or 2003. Two years later, approximately 3,300 of these undergraduates responded to a follow-up survey.

The findings indicated that UROPs boosted understanding, confidence, and awareness among students. Specifically, 73% of surveyed students reported an increase in their awareness of what graduate school entails. Additionally, UROPs contributed to higher expectations of obtaining a PhD, with 29% of respondents stating that they had "new" expectations of pursuing a PhD before attending college, they had not expected to obtain a PhD, but now they did. According to the STEM survey, 19% of sponsored researchers, 12% of nonsponsored researchers, and only 5% of non-researchers reported having "new" expectations of obtaining a PhD after participating in UROPs.

II. METHODOLOGY

Although far from being an unbiased sample, the experience of the author as mentor of over 105 students, allows him to present his case in statistical terms. The author has been a professor of physics at his university of affiliation for 34 years and has had students performing research with him throughout his career.

The author's research projects have been in theoretical nuclear physics (with heavy emphasis on computational studies), experimental materials science, gravitation, astrophysics, physics education, and on applications of mathematical methods in social sciences.

In sum, the author has over 120 refereed articles that have accumulated over 2,000 citations, has written several books and countless general-audience articles for magazines and newspapers. His mentoring efforts have been recognized by The White House with the PAESMEM Award, by the journal Nature with the Mentoring Award, by several professional organizations, such as the American Physical Society, the Mexican Academy of Science, Society of Mexican American Engineers and Scientists (MAES), Society of Hispanic Engineers and Professionals (SHEP), and the like.

The students can be classified as undergraduate, masters and others (the university of affiliation does not have a PhD in physics).

A separate classification is that of the peer leaders that assisted the author in implementing the Peer-Led Team Learning (PLTL) method of teaching. Through the National Science Foundation grant “An Integrative Science Success, Teaching and Retention Program for STEM Education”, three other professors and the author implemented PLTL in six math, chemistry and physics courses for science and engineering students.

For that program the author mentored undergraduate students to turn them into Peer Leaders (PLs) through direct apprenticeship, workshops designed to teach methodologies for constructivist learning, inquiry-based teaching, to induce teamwork, use of in-class demos, and many other active learning strategies.

The author’s mentoring has also reached several high school students. Unfortunately, only anecdotal infor-

mation is known about their whereabouts; but it is known that several won science competitions in local school districts, and one is about to complete a PhD in Chemistry at Rice University.

III. RESULTS AND DISCUSSION

Table 1 shows the distribution of students among the undergraduate, masters, and other classifications. The great majority of the undergraduate students have been physics majors and, except for two, all undergraduate have been of Hispanic origin or Mexican nationals. Eight of them have completed non-required B.S. thesis and about one third have co-authored refereed articles. As shown in Table 1 (and in Figure 1), over half of the author’s advisees continued to graduate school, mostly for PhD in physics, and a few for terminal MS degrees.

TABLE 1
 DISTRIBUTION OF STUDENTS CLASSIFIED AS UNDERGRADUATE, MASTERS, AND OTHERS

CLASSIFICATION	NUMBER	NUMBER CONTINUING TO GRADUATE STUDIES	PERCENTAGE
Undergraduate students	46	25	54%
Master’s students	35	32	91%
Peer leaders	24	16	66%
Other (high school, foreign, etc.)	6	N/A	N/A

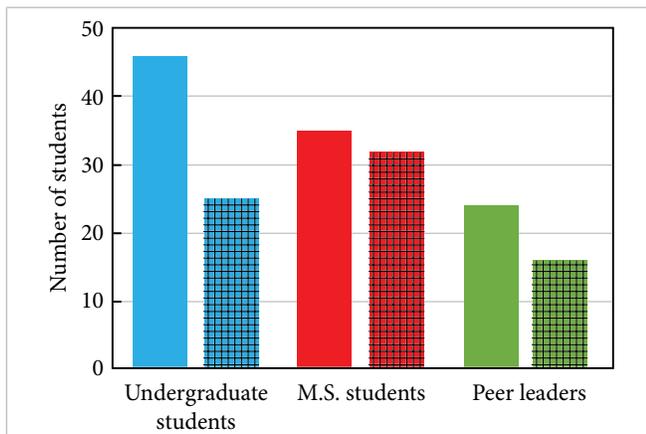


Figure 1. Data from Table 1. The hatched bars correspond to those students know to have continued to graduate studies.

The master’s students are more international with a large portion from the USA and Mexico, but several from Bangladesh, Canada, Chile, China India, Mongolia, and Montenegro. All students have completed theses under the author’s supervision and 23 co-authored refereed articles. A huge 91% continued for

PhD studies mostly in physics, but a few in geophysics, computer science, material science, environmental science, and engineering.

The PLTL program that lasted from 2008 to 2013 impacted thousands of students, improved retention rates, and was adopted by biology and engineering classes. An unexpected result was that during the five years of operation, the 24 students mentored by the author became very strong in math and physics and got motivated to pursue graduate studies. Out of such group, 16 students (66%) continued to PhD studies in physics and engineering.

The gain in interest produced by the participation of students in research projects can be estimated by comparing to data of the American Institute of Physics (AIP), which indicates that on average only about 15% of undergraduate physics students continue into PhD studies. Since the UTEP results are all higher than 54%, we can conclude that participating in research projects indeed serve as strong motivator for PhD studies.

The American Institute of Physics (AIP) ^[11] compiles data of the number of students earning BS and PhD degrees in physics and related areas, and it further subdivides them in gender, ethnicity, etc. Although the AIP data is the best there is, it does not allow an easy calculation of the number of students that continue from undergraduate to graduate studies, especially because there is a lack of data of the 1st year PhD students. Some of the published numbers, however, permit to establish an estimate of the proportion of students that continue into PhD studies after graduation.

In the period from 2011 to 2019, 5,259 Hispanic students earned a BS in physics and, alternatively, in the period 1997 to 2017, 359 Hispanic students earned a PhD in physics. Prorating these numbers to a period of 8 years, at best the percentage of BS graduates that continued to PhD studies (and graduated) was of the order of 2.73%.

An independent percentage can be estimated by the number of BS degrees in physics awarded to Hispanics in 2019, 1900, and the number of PhD degrees earned by Hispanics in the same year, 42; although these numbers do not correspond to the same students, they allow to determine a ballpark figure of 2.21% of student transfer flow. It is clear that these numbers are extremely low to any of the percentages of student transfer observed in [Table 1](#).

IV. CONCLUSIONS

Research experiences can be a motivating factor for undergraduate students to pursue graduate studies, but it is not always the case. The impact of research experiences on students' decision to pursue graduate studies can vary based on several factors, such as the quality and depth of the research experience, the student's personal interests and goals, the mentorship and support received during the research experience, and the overall academic and career environment in which the research was conducted.

Research experiences can provide students with a firsthand understanding of what it is like to conduct research in their field, which can help them develop a stronger sense of purpose and direction in their academic and career pursuits. This can be particularly impactful for students who may not have been exposed to research before or who may not have had a clear sense of what they wanted to do after completing their undergraduate studies.

Additionally, research experiences can also provide opportunities for students to develop strong relationships with faculty mentors and peers who share similar interests and goals, which can help create a sense of community and support that can be beneficial for students as they navigate their academic and career paths.

Overall, while research experiences can be a motivating factor for some undergraduate students to pursue graduate studies, it is important to recognize that this is not always the case and that students' decisions to pursue graduate studies are influenced by many different factors.

In conclusion, at least for Hispanics, the participation in undergraduate research programs appears to increase tremendously the percentage of students that graduate with a BS in physics and continue into PhD studies.

REFERENCES

- [1] H. Thiry, S. L. Laursen, "The Role of Student-Advisor Interactions in Apprenticing Undergraduate Researchers into Scientific Community of Practice," *J. Sci. Educ. Technol.*, vol. 20, Jan. 2011, doi: [10.1007/s10956-010-9271-2](https://doi.org/10.1007/s10956-010-9271-2).
- [2] J. J. Thompson, E. Conaway, E. L. Dolan, "Undergraduate student's development of social, cultural, and human capital in a networked research experience," *Cult. Stud. Of Sci. Educ.*, vol. 11, pp. 959-990, Apr. 2016, doi: [10.1007/s11422-014-9628-6](https://doi.org/10.1007/s11422-014-9628-6).
- [3] H. Walkington, B. Ommering, "How does engaging in authentic research at undergraduate level contribute to student well-being?," *Stud. In High. Educ.*, vol. 47, pp. 2497-2507, Jun. 2022, doi: [10.1080/03075079.2022.2082400](https://doi.org/10.1080/03075079.2022.2082400).
- [4] J. Gilmore, M. Vieyra, B. Timmerman, D. Feldon, M. Maher, "The Relationship between Undergraduate Research Participation and Subsequent Research Performance of Early Career STEM Graduate Students," *J. of High. Educ.*, Oct. 2016, vol. 86, no. 6, p.834, doi: [10.1080/00221546.2015.11777386](https://doi.org/10.1080/00221546.2015.11777386).
- [5] H. Thiry, T. J. Weston, S. L. Laursen, A.-B. Hunter, "The Benefits of Multi-Year Research Experiences: Differences in Novice and Experienced Students' Reported Gains from Undergraduate Research," *CBE Life Sci. Educ.*, vol. 11, no. 3, pp. 260-272, 2012, doi: [10.1187/cbe.11-11-0098](https://doi.org/10.1187/cbe.11-11-0098).

- [6] H. Thiry, S. L. Laursen, A.-B. Hunter, “What Experiences Help Students Become Scientists? A Comparative Study of Research and other Sources of Personal and Professional gains for STEM Undergraduates,” *J. of High. Educ.*, vol. 11, no. 4, pp. 357-388, Oct. 2016, doi: 10.1080/00221546.2011.11777209.
- [7] Boyer Commission on Educating Undergraduates in the Research University, “Reinventing Undergraduate Education: A Blueprint for America’s Research Universities,” State University of New York, NY, USA, 1998.
- [8] The Boyer 2030 Commission, The Association for Undergraduate Education at Research Universities (UERU), “The Equity-Excellence Imperative: A 2030 Blueprint for Undergraduate Education at U.S. Research Universities,” Undergraduate Education at Research Universities Fort Collins, CO, USA, 2022.
- [9] R. S. Hathaway, B. A. Nagda, S. R. Gregerman, “The relationship of undergraduate research participation to graduate and professional education pursuit: An empirical study,” *J. Coll. Stud. Dev.*, vol. 43, no. 5, pp. 614-631, Sept. 2022.
- [10] S. H. Russell, M. P. Hancock, J. McCullough, “Benefits of undergraduate research experiences.” *Science*, vol. 316, no. 5824, pp. 548-549, Apr. 2007, doi: 10.1126/science.1140384.
- [11] “American Institute of Physics.” AIP.org. <https://www.aip.org> (accessed Feb. 18, 2023).
- [12] J. Lave and E. Wenger, *Situated Learning: Legitimate Peripheral Participation*. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 1991.
- [13] T. Dahlberg, T. Barnes, A. Rorrer, E. Powell, and L. Cairo, “Improving retention and graduate recruitment through immersive research experiences for undergraduates,” *ACM SIGSE Bulletin*, vol. 40, no. 1, pp. 466-470, 2008, doi: 10.1145/1352322.1352293.
- [14] M. Gagné, E. L. Deci, and R. M. Ryan, “Self-Determination Theory Applied to Work Motivation and Organizational Behavior,” in *The SAGE Handbook of Industrial, Work and Organizational Behavior*, D. S. Ones, N. Anderson, C. Viswesvaran, H. K. Sinangil, Eds. London, England: SAGE Publications Ltd, chap. 5, doi: 10.4135/9781473914957.
- [15] T. J. Weston and S. L. Laursen, “The Undergraduate Research Student Self-Assessment (URSSA): Validation for use in Program Evaluation,” *CBE Life Sci. Educ.*, vol. 14, no. 3, 2015, doi: 10.1187/cbe.14-11-0206.

ACKNOWLEDGMENTS

The author acknowledges support from Microsoft Corp.

APPENDIX

A. Situated Learning Theory

Situated Learning Theory is a learning theory developed by Jean Lave and Etienne Wenger in 1991 [12] that proposes that learning is fundamentally situated in social and physical contexts.

The theory argues that knowledge is constructed through social interactions with others in authentic, real-world settings. According to this theory, learning takes place through legitimate peripheral participation in a community of practice, where novices engage in meaningful activities and gradually develop their knowledge and skills by observing and collaborating with more experienced members of the community.

The theory emphasizes the importance of context and practice in learning, and it suggests that learners should be given opportunities to participate in authentic activities that reflect the practices of the communities they are trying to join. Situated Learning Theory has been applied in a variety of educational contexts, including in vocational training, apprenticeships, and informal learning environments.

B. Networked Research Experiences

Networked research experiences [13] involve collaborating across disciplines and institutions to investigate complex research questions, providing new contexts and models for involving undergraduates in research.

In contrast to the traditional apprenticeship model of research, where a student participates in research under the guidance of a single faculty member, Thompson, Conaway, and Dolan explain that:

students participating in networked research have the opportunity to develop relationships with additional faculty and students working in other areas of the project, at their own and at other institutions [2].

This approach allows students to engage with a wider range of perspectives and expertise, and to build multidimensional social ties with a variety of mentors and peers. By doing so, students can develop various forms of capital that are important for success in science research, such as social, cultural, and human capital, which can be drawn upon for information, resources, and support.

Networked research experiences can afford opportunities for students to develop technical, analytical, and communication skills in scientific research and help them to learn to think and work like scientists, which can be valuable as they pursue careers in science or other fields.

C. Self-Determination Theory

Self-Determination Theory (SDT) [14] is a framework for understanding motivation and personality development. It is based on the premise that all individuals have basic psychological needs that must be met to facilitate well-being and optimal functioning. The three basic psychological needs are autonomy, competence, and relatedness. Autonomy refers to the need to feel in control of one's own behavior, competence refers to the need to feel capable of achieving goals, and relatedness refers to the need to feel connected to others and to belong.

SDT posits that people are naturally inclined to seek out environments that support their basic psychological needs, and that when these needs are met, people are more likely

to engage in activities that promote well-being, such as personal growth, relationships, and learning. In contrast, when people experience environments that undermine their basic psychological needs, they are more likely to experience negative outcomes such as burnout, anxiety, and depression.

In addition to the basic psychological needs, SDT also highlights the importance of intrinsic motivation, which is the drive to engage in an activity because of the inherent satisfaction or enjoyment it brings. Intrinsic motivation is seen as critical to well-being and optimal functioning because it leads to more sustained and self-directed engagement in activities, and to greater creativity and persistence in problem-solving.

SDT has been applied to a variety of areas, including education, healthcare, and the workplace. In these contexts, it is used to design environments and interventions that support individuals' basic psychological needs and intrinsic motivation, in order to promote optimal functioning and well-being. For example, in education, SDT suggests that providing students with choices and opportunities for self-direction can increase their sense of autonomy, while providing support and feedback can increase their sense of competence. Similarly, in the workplace, creating a supportive and collaborative environment can foster employees' sense of relatedness, while giving them autonomy and meaningful work can increase their intrinsic motivation and engagement.

Overall, Self-Determination Theory provides a comprehensive framework for understanding human motivation and well-being and has been widely used to guide the design of interventions and environments that support optimal functioning in various settings.

D. The Undergraduate Research Student Self-Assessment

The Undergraduate Research Student Self-Assessment (URSSA) [15] is a quantitative instrument designed to assess undergraduate

students' cognitive, personal, and professional gains from engaging in scientific research.

The instrument was developed by a team of researchers in 2010 and includes questions on research-related skills, personal attributes, professional goals, and research-re-

lated experiences. It is a widely used tool for evaluating the outcomes of undergraduate research programs, with over 10,000 students completing the survey as of 2021. The URSSA can provide valuable insights for program design, advising, and funding decisions related to undergraduate research experiences.

Física forense: Una oportunidad desatendida en los libros de texto

Forensic physics: A neglected opportunity in textbooks

Dr. Vicente Torres Zúñiga¹✉

¹Escuela Nacional de Ciencias Forenses, Universidad Nacional Autónoma de México

RESUMEN

Se realizó una búsqueda en la literatura especializada en enseñanza de la física (en español e inglés) revisando ejercicios, ejemplos y otros materiales didácticos con un enfoque forense. Si bien existen artículos especializados en esta área, no se encontró un libro de texto dedicado al ámbito forense, aunque sí existe un manual de prácticas. Se revisaron 27 libros de texto de física, mediante la exploración de palabras clave del quehacer forense y examinando si el contenido particular cumplía con cuatro criterios didácticos que se considera que definen la instrucción de la física forense: 1) enfoque en problemas inversos, 2) evitar conjeturas injustificadas, 3) uso de datos verosímiles y 4) empleo de una narrativa ético-forense. Solo 12 títulos cumplieron estos requisitos, al contar con mínimo una mención concreta, pero cuatro obras presentan más de cuatro casos puntuales de física forense. Los resultados sugieren que los temas forenses están subrepresentados en los libros de texto de física, en comparación con otros quehaceres. Esto implica una oportunidad para elaborar libros especializados en este contexto, implicando utilizar un recurso pedagógico con énfasis en situaciones reales, fomentadora de ciudadanía y atractiva para los estudiantes. Esta información fortalecerá los planes de estudio de las licenciaturas en ciencia forense y carreras afines.

PALABRAS CLAVE: física; ciencia; forense; libros de texto; ciencia ciudadana; enseñanza.

ABSTRACT

A search of the specialized literature on physics teaching (in Spanish and English) was made, reviewing exercises, examples, and other didactic materials with a forensic approach. Although there are technical articles in this area, a textbook dedicated to the forensic field has yet to be found, although a manual of laboratory activities exists. Twenty-seven physics textbooks were reviewed, exploring forensic keywords, and examining whether content met four didactic criteria that are believed to define forensic physics instruction: 1) focus on inverse problems, 2) avoid unjustified guesswork, 3) use of credible data, and 4) use of an ethical-forensic narrative. Only 12 titles met these requirements, having at least one specific mention. However, four works present more than four specific cases of forensic physics. The results suggest that forensic topics are underrepresented in physics textbooks compared to other subjects. This conclusion implies an opportunity to elaborate specialized books in this context, using a pedagogical resource emphasizing real situations, promoting citizenship, and being attractive to students. This information will strengthen the curricula for bachelor's degrees in forensic science and related careers.

KEYWORDS: physics; science; forensic; textbooks; citizen science; education

Correspondencia:

DESTINATARIO: Vicente Torres Zúñiga.

INSTITUCIÓN: Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Ciencias Forenses.

DIRECCIÓN: Investigación Científica s/n, Ciudad Universitaria, Coyoacán, C. P. 04510, Ciudad de México, México.

CORREO ELECTRÓNICO: vicentz@gmail.com

Fecha de recepción: 16 de junio de 2023. **Fecha de aceptación:** 21 de septiembre de 2023. **Fecha de publicación:** 28 de septiembre de 2023.



I. INTRODUCCIÓN

Si el objeto de estudio de la física es la naturaleza, entonces esta ciencia cuenta con una interrelación de lo más amplia entre las ramas del conocimiento. Por ello, se tienen aplicaciones de la física en campos tan diversos y divergentes como la construcción, el deporte, o bien la medicina. Además, entre todas las áreas prácticas del conocimiento existe una particular: la forense.

En general, la física forense se refiere a la aplicación de la física para auxiliar la investigación o bien a la revisión de hechos de interés para alguna autoridad judicial. El panorama de aplicaciones de la física forense puede ser muy amplio, pero por lo regular suele ser percibido solo alrededor de los temas de mecánica clásica, como el recorrido de los proyectiles a través de diferentes medios y las colisiones de los cuerpos, los cuales son útiles en periciales de balística y hechos de tránsito, respectivamente. Otros usos son menos populares, como puede ser aprovechar conceptos de óptica geométrica para descubrir fotografías falsas ^[1] o el estudio de los tiempos de arribo de una señal acústica para localizar el sitio donde se disparó un arma de fuego, por mencionar un par de ejemplos ^[2].

Por otro lado, con el fin de mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje los libros de texto se han ajustado a perfiles profesionales específicos. Por ello, se tienen títulos de física especializados en la construcción ^[3], el deporte ^[4] o la medicina ^[5]. Además, se publican libros de física con un enfoque más general y presentan ejemplos de diversas aplicaciones. En todo caso, las obras procuran que los estudiantes perciban los temas de un modo más significativo a sus inclinaciones y ocupaciones profesionales. Sin embargo, es notorio que esta oferta de perspectivas soslaya al enfoque forense. Este fenómeno se observa en el plan de estudios de varias instituciones académicas que ofrecen la licenciatura o especialidad en ciencias forenses, investigación criminal, criminalística o equivalente.

En concreto, en la asignatura obligatoria “Física Mecánica” de la Licenciatura en Ciencia Forense (LCF) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), pese a que se enfoca a un perfil especializado, omite la revisión de casos o aplicaciones puntuales. Tampoco recomienda textos de física especializados para tal quehacer ^[6]. Es posible que este hecho se deba a una carencia de temas, casos, ejemplos o ejercicios de física con el enfoque forense.

En este artículo se presentan los resultados de la búsqueda de temas de física forense en 27 libros de texto de física general, con o sin enfoque específico. En primer lugar, este trabajo define las características principales de la ciencia forense, el beneficio didáctico de usar temas forenses en el desarrollo de una clase y las características que debe tener. Posteriormente, se describe la literatura examinada y se presentan resultados cuantitativos y ejemplos emblemáticos de lo que puede ser un ejercicio de física forense. Se finaliza la exposición con las conclusiones de este trabajo.

II. METODOLOGÍA

RASGOS ESENCIALES DE LA CIENCIA FORENSE

En el sentido amplio, los conocimientos científicos aplicados que auxilian a una autoridad legal para definir el rumbo o conclusión sobre un caso concreto serán considerados parte del área de competencia de la ciencia forense. Sin embargo, ciertas características hacen *sui generis* a la ciencia forense del resto de campos de conocimiento, entre las que destacan las siguientes:

- 1) **Es un campo multidisciplinario**, pues al menos se debe interrelacionar alguna especialidad del derecho con una rama científica. Aunque en la práctica, suelen converger más de una especialidad científica en los casos de interés forense.
- 2) **Trata sobre problemas inversos**, en vista de que utiliza datos observables del presente para encontrar las causas, estados y agentes involucrados en los hechos de interés.
- 3) **Es un campo de investigación retroproyectiva**, en otras palabras, la ciencia forense trata de encontrar escenarios verosímiles que representen los hechos del pasado reciente. Disciplinas como la cosmología, la paleontología, la arqueología y la historia también discurren sobre las condiciones pretéritas que derivaron en los hechos del presente. Sin embargo, sus escalas de tiempo son mucho más antiguas que las que tratan los temas forenses, pues generalmente los problemas que le interesa resolver a una autoridad legal son relativamente recientes.

Así, en este contexto, la física es una ciencia que aporta ampliamente al quehacer forense. De injerencia directa se puede encontrar su relación con la medicina legal al

vincularse a través de la biomecánica del cuerpo humano. Por ejemplo, tanto al sufrir lesiones (v. gr., fracturas de huesos) como para ocasionarlas (v. gr., golpes desarrrollados en artes marciales y otros deportes de contacto). También, se vincula con los peritajes de fallas estructurales. Algunos ejemplos representativos en la literatura pueden ser el colapso de los pasillos volados del hotel Hyatt Regency en 1981 (donde el tema particular de física puede ser equilibrio mecánico y fuerza I) ^[7]; el desplome del puente de Tacoma Narrows en 1940 (aquí el tema de física puede ser resonancia mecánica forzada e hidrodinámica) ^[8]; y la pérdida de elasticidad por descenso de la temperatura, ocasionando el desastre del trasbordador Challenger en 1986 (el tema sugerido es termodinámica y física de materiales) ^[9]. Ahora bien, de modo indirecto a través de la instrumentación, la física aporta al desarrollo de la ciencia forense por medio de las técnicas espectroscópicas para la identificación de sustancias, por mencionar un caso.

CONVENIENCIAS DIDÁCTICAS DE LA FÍSICA FORENSE

El beneficio de utilizar temas forenses para complementar el material didáctico de una clase de física no es exclusivo de un perfil determinado. En realidad, es muy ventajoso pedagógicamente para aquellos estudiantes que no se dedicarán profesionalmente a la física, pero que sí estará presente en su vida cotidiana. Entre las principales ventajas destacan:

- 1) **Es un tema cautivante.** Mostrar cómo la ciencia —y en particular la física— puede resolver un crimen es atrayente para el público general. La curiosidad generada es una razón del éxito de toda clase de productos culturales por más de un siglo. Desde las aventuras de Sherlock Holmes hasta las teleseries tipo *CSI: Vegas* han atrapado la atención al mostrar (con sus licencias ficcionales) que el pensamiento racional puede resolver el misterio que envuelve un delito.
- 2) **Permiten formar mejores ciudadanos.** Es deseable que los estudiantes comprendan los beneficios y alcances de la física para diferentes aplicaciones, en especial las relacionadas con la vida pública, que es parte de la ciencia forense. El conocimiento de la física aplicada en la investigación y dictaminación judicial permite a los ciudadanos ejercer mejor su derecho de beneficiarse del conocimiento científico, como expresa el artículo 27 de la Declaración Universal de los Derechos Humanos ^[10].

- 3) **Enfatiza situaciones reales.** La física es una ciencia factual, lo que implica que se auxilie de herramientas de abstracción (como pueden ser los modelos), su evaluación y mejora. En efecto, la física forense es plausible en la realidad.

CARACTERÍSTICAS DIDÁCTICAS DE LA FÍSICA FORENSE

Primero, se definirán los objetivos a buscar en el análisis de los contenidos de las publicaciones. Lo anterior implica establecer a qué se llamaría “un contenido didáctico con enfoque forense”. A continuación, se presentan las características:

- 1) **Enfoque de problemas inversos.** Por las peculiaridades intrínsecas de la ciencia forense, se debe establecer datos observables en el presente con el fin de obtener una condición inicial en el pasado. Esto puede implicar que se cuente con muchas soluciones o ninguna. En tal sentido, lo mejor es establecer que existe un intervalo de posibles soluciones.

Un ejemplo que incumple esta característica, porque la respuesta es una predicción comprobable en el futuro, es el siguiente: “Una cámara de video muestra solo el inicio de una persecución. Desde el mismo punto, reaccionando después de 30 segundos, un policía corre a 6 m/s tras un ladrón, quien corre en línea recta a 5 m/s. ¿A qué distancia el policía alcanzará al ladrón?”.

- 2) **Evitar datos conjeturados injustificados.** En la realidad, algunos datos pueden ser difíciles de obtener, por lo que es una tentación definir un parámetro sin mayor fundamento o razón. En general, el profesorado desea que los alumnos aprendan cómo se obtiene el conocimiento científico, por lo que deben evitar los atajos tergiversados en la obtención de información. Un ejemplo que falla con esta característica es: “Un policía alcanzó a un ladrón después de correr 20 metros en línea recta. Si el policía corrió a 6 m/s y el ladrón a 5 m/s. ¿Cuánto tiempo tuvo de ventaja el ladrón antes de que el policía iniciara la persecución?”. En este caso, las velocidades de carrera son suposiciones sin fundamento.
- 3) **Datos verosímiles.** La narrativa del material didáctico debe mostrar plausibilidad. Con el fin de forzar cálculos más cómodos, puede ser tentador inventar valores, perdiendo (para mal) el carácter factual de

la física. Así, del ejemplo anterior, si se establecieran las velocidades de carrera del policía y el ladrón en 20 y 25 m/s, respectivamente, se estarían involucrando velocidades superiores al récord mundial de carrera en 100 m planos. Esto resulta en una disonancia entre la realidad y el planteamiento.

- 4) **Narrativas éticas y forenses.** Revelar datos personales, ilustraciones violentas o detalles psico-sociales innecesarios vulneran los derechos de los implicados y además pueden trastornar a los estudiantes y amplificar el conflicto sin favorecer la solución. Si bien las minucias pueden resultar atractivas para algunas personas, también pueden ser perturbadoras para otra gente, por lo que es mejor cuidar el aspecto ético de los materiales utilizados. Es posible que se utilicen casos históricos, donde algunos pormenores sean de conocimiento público. Entonces, considérese que después de 100 años —tiempo superior a la expectativa media de vida humana— el caso puede considerarse histórico, por lo que es posible emplear un poco más de contexto para fortalecer la narrativa. Finalmente, un ejercicio no puede considerarse forense si se sustituye por masas puntuales a las personas: “Una masa puntual alcanza a otra después de recorrer 20 m en línea recta. Si la masa puntual se mueve a 6 m/s y la segunda a 5 m/s. ¿Cuánto tiempo tuvo de ventaja la segunda masa puntual sobre la primera?”. Por tanto, debe involucrar una narrativa donde se incluyan personas (p. ej., autoridades, testigos expertos, sospechosos o agraviados). Así, los materiales didácticos deben contar con una narrativa guiada por el quehacer forense y limitada por la ética. Sobre estas cuatro características se construyó la búsqueda en los libros de texto.

TEXTOS DIDÁCTICOS ESPECIALIZADOS EN CIENCIA FORENSE

Existen varios artículos didácticos alrededor de la física forense, aunque no suele ser denominada de tal forma, p. ej., la historia del principio de Arquímedes y la corona del rey Hierón, los trabajos criminalísticos de Rod Cross ^{[11], [12], [13]}, el video-análisis de la muerte de John F. Kennedy por Luis Walter Álvarez ^[14] y las publicaciones de Ernesto N. Martínez ^{[15], [16]}, por mencionar algunos trabajos. Sin embargo, son piezas que no dan forma a un libro de texto de física forense.

Por otro lado, existe el título *Solving Crimes with Physics* ^[17]. Lamentablemente, es una exposición más relacio-

nada con la criminalística tradicional que con la física, pues no desarrolla algún concepto, discusión o vínculo con la ciencia, por lo que carece de ejercicios o experimentos propuestos para el estudiante. De acuerdo con la Biblioteca del Congreso de EE.UU., la obra es literatura juvenil propia para educación básica (grados desde el séptimo al octavo). En fin, es una obra que no cumple con su título.

Sin embargo, el libro *Forensics with Vernier* ^[18] es una obra que propone 14 actividades de laboratorio, de las cuales 12 están relacionadas con física. Las actividades de laboratorio cumplen en general con las cuatro características de didáctica de física forense sugeridas en este documento.

Entonces, se encontró solo una obra que cumple con los criterios propuestos: *Forensics with Vernier*, un manual de laboratorio especializado alrededor de la física forense. Es posible que otras obras utilicen el enfoque forense, pero los contenidos están dispersos entre sus hojas, por lo que se realizó una selección y búsqueda en libros de texto de física.

CARACTERÍSTICAS DE LOS LIBROS DE TEXTO ANALIZADOS

La literatura educativa sobre física es extensa. Así, cada obra puede presentar diferentes niveles de especialización y extensión, además de contar con un estilo definido y dirigirse a un público objetivo, entre otros atributos. Una definición de *libro de texto* amplia —y útil para el propósito de este artículo— es afirmar que es un libro (en soporte físico o electrónico) utilizado como material didáctico para complementar alguna asignatura en un centro educativo.

Por ello, es importante que se delimite el objeto de estudio de esta investigación. En este trabajo se analizaron 27 libros publicados entre los años 1985-2020. Son obras que abarcan al menos dos ramas de la física, tales como la mecánica, la hidrostática y el electromagnetismo, entre otras. En lo general, sus exposiciones son aceptadas por la comunidad y, en términos epistémicos, implica que tratan sobre una “ciencia normal” ^[19]. Son obras dirigidas a un público estudiantil de un nivel previo al universitario y anterior a obtener un título de licenciatura. Los libros que cumplieron con tal descripción fueron considerados libros de texto para este estudio. Además, por razones técnicas se seleccionaron obras en formato digital PDF a las que se les pudiera realizar una búsqueda

de palabras clave en español (o su traducción en inglés, al ser pertinente). En orden alfabético, las 18 palabras clave fueron: abogado, accidente, colapso, corte, crimen, derrumbe, juez, jurado, juzgado, muerte, patrulla, perito, policía, colisión, forense, fractura, testigo experto y víctima. La selección de estas palabras clave no está vinculada a un corpus lingüístico específico. No obstante, este conjunto de términos refleja la intersección entre la física y la ciencia forense en la investigación de eventos de relevancia jurídica, especialmente en el ámbito del derecho penal, donde se emplean comúnmente palabras que identifican a los participantes en un proceso, como “policía” o “víctima”. Otros términos están relacionados con fenómenos físicos que se encuentran en libros de texto y pueden estar relacionados con eventos de interés forense, como “fractura” o “derrumbe”. Después de localizar el ejercicio o ejemplo mediante alguna palabra clave, se estudió el texto siguiendo las propiedades didácticas antes mencionadas de la física forense.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De los 27 libros analizados, 15 no mostraron algún ejercicio o ejemplo de física forense [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], pero 12 títulos cuentan con al menos un caso positivo. Cuatro obras demostraron tener entre seis y doce ejercicios o ejemplos de física forense: Serway [35], Halliday [36], Young [37] y Giancoli [38]. Si bien el conjunto de los libros de texto de física es más amplio que el estudiado aquí, se considera que esta muestra es representativa del estado actual de estas obras pedagógicas de referencia. La [Tabla 1](#) presenta los resultados desglosados, mientras que la [Figura 1](#) resume visualmente el resultado principal: el número de ejercicios/ejemplos que cumplen con todas las características

comparado con el número de ejercicios/ejemplos que cumple como mínimo con una palabra clave.

Se observó que los criterios “datos verosímiles” y “sin conjeturas injustificadas” fueron los más sencillos de cumplir, lo cual certifica la calidad de los libros de texto como obras que pretenden ser factuales. En contraste, el carácter de “problema inverso” y la “narrativa ético-forense” fueron menos comunes de encontrar. Muchos textos exponían una situación forense, pero carecían de alguna contextualización, siendo textos informativos y no ejercicios o ejemplos de trabajo. En tal sentido, un lugar común entre las obras fue presentar cómo los policías aprovechan el efecto Doppler para identificar autos que superan el límite de velocidad, aunque tal ejemplo no se expresa como un problema inverso [39, p. 254]. Ahora bien, muchos textos que fallaron en algún rubro podrían adaptarse para construir un compendio de problemas con contexto físico forense.

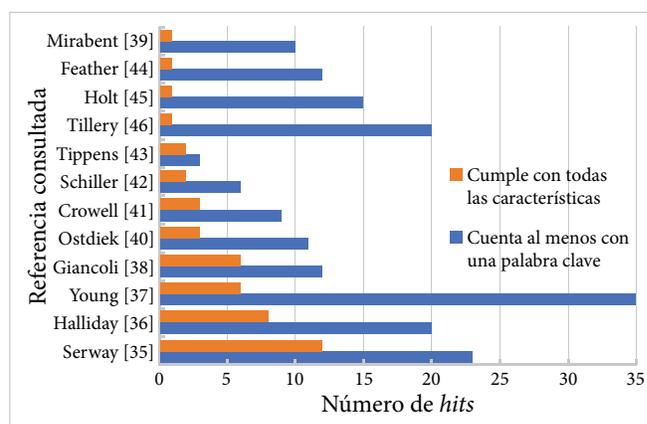


Figura 1. Comparación del número de ejercicios o ejemplos relacionados con la física forense y el número de los que cumplen con las cuatro características propuestas.

TABLA 1
LIBROS DE TEXTO CON CASOS POSITIVOS DE EJERCICIOS O EJEMPLOS DE FÍSICA FORENSE

CLAVE Y REFERENCIA	TOTAL DE HITS	CUMPLE TODAS LAS CARACTERÍSTICAS	PROBLEMA INVERSO	SIN CONJETURA INJUSTIFICADA	DATOS VEROSÍMILES	NARRATIVAS ÉTICAS Y FORENSES
1) Serway [35]	23	12	14	20	20	14
2) Halliday [36]	20	8	10	13	14	9
3) Young [37]	35	6	7	34	35	16
4) Giancoli [38]	12	6	6	9	12	9
5) Mirabent [39]	10	1	6	10	10	1
6) Ostdiek [40]	11	3	3	11	11	4
7) Crowell [41]	9	3	3	9	9	3
8) Schiller [42]	6	2	4	6	6	2
9) Tippens [43]	3	2	2	3	3	2
10) Feather [44]	12	1	1	12	12	3
11) Holt [45]	15	1	1	15	15	2
12) Tillery [46]	20	1	1	20	20	1

Por último, la mayoría de los ejemplos identificados con narrativa forense extiende el texto, en comparación con otros problemas. Posiblemente, este fenómeno es porque los autores deseaban ganar mayor verosimilitud. Entre los ejemplos emblemáticos encontrados se destacan los siguientes tres:

- Serway, cap. 12, p. 331, problema 46: “Ha sido contratado como testigo experto en un caso que involucra una lesión en una fábrica. El abogado que lo contrató representa al trabajador lesionado. Se le dijo al trabajador que levantara un extremo de una caja larga y pesada que estaba horizontalmente en el piso y la inclinara hacia arriba para que quedara de pie. Él comenzó a levantar el extremo de la caja, siempre aplicando una fuerza que era perpendicular a la parte superior de la caja. Cuando el extremo de la caja se elevó, en cierto ángulo, la parte inferior de la caja se deslizó en el suelo, y el trabajador, al tratar de recuperarse, dio un paso adelante y la caja cayó sobre su pie, dañándolo gravemente. Como parte de su investigación, va a la fábrica y mide el coeficiente de fricción estática entre una caja y el piso de concreto liso. Usted encuentra que es 0.340. Prepare un argumento para el abogado que demuestre que era imposible levantar la caja de la manera descrita sin que se deslizara sobre el suelo”.
- Halliday-Resnick, cap. 2, p. 38, problema 13: “Suponga que lo llaman para que haga alguna recomendación a un abogado sobre la física de uno de sus casos. Se quiere determinar si un conductor rebasó la velocidad máxima de 30 mi/h antes de efectuar un frenado de emergencia, con los frenos puestos y la ruedas deslizándose. Las marcas del deslizamiento en la carretera eran de 19.2 ft de largo. El policía supuso que la desaceleración máxima no superaría la aceleración de un cuerpo en caída libre ($= 32 \text{ ft/s}^2$) y no multó al conductor. ¿Iba el conductor a exceso de velocidad? Explique su respuesta”.
- Ostdiek, cap. 3, p. 112, problema 30: “En enero de 2003, un estudiante de 18 años ganó un poco de fama por sobrevivir, con sólo heridas leves, a un notable accidente de tráfico. El vehículo que conducía fue “golpeado” por otro, salió de la carretera y rodó varias veces. Fue arrojado hacia arriba desde el vehículo (no llevaba cinturón de seguridad) y terminó colgando de un cable telefónico aéreo y un cable de tierra a unos 8 metros del suelo. Los rescatistas

lo derribaron después de 20 minutos. Se estima que alcanzó una altura máxima de unos 10 metros. (a) Estime la velocidad vertical del conductor cuando fue arrojado del vehículo. (b) Si no hubiera aterrizado en los cables, ¿qué tan rápido habría ido cuando golpeó el suelo?”.

IV. CONCLUSIONES

Este trabajo ha mostrado que, si bien existe una gama amplia de literatura sobre física didáctica aplicada en el quehacer forense —tal como artículos de divulgación y enseñanza— es un tema relativamente poco abordado en los ejercicios y ejemplos de los libros de texto, bajo el examen de las cuatro características propuestas que debe seguir la didáctica de la física forense.

Pese a que la física forense ofrece una didáctica basada en situaciones reales, atractivas y que fomenta una mejor conducta cívica, ha sido poco utilizada por los autores, por lo que el día hoy (hasta donde se sabe) se carece de un libro de texto de física forense en español o en inglés.

Consideramos que este estudio puede guiar la incorporación de este enfoque a las asignaturas de física pre-universitaria general para aquellos perfiles profesionales que no serán físicos e incluso de los primeros semestres de la licenciatura en física. Así, en el campo particular de la ciencia forense, este trabajo puede ser útil para complementar planes de estudio, así como bibliografías esenciales y recomendadas en asignaturas de física y afines.

REFERENCIAS

- [1] Ramírez-Ornelas y Torres-Zúñiga, “Exhibiendo adulteración fotográfica vía inconsistencia física de sombras”, *Revista del Instituto Federal de Defensoría Pública*, no. 29, pp. 111-122, 2020.
- [2] Martínez y Pregliasco, “Gunshot location through recorded sound: a preliminary report”, *J. Forensic Sci.*, vol. 47, no. 6, pp. 1309-1318, 2002.
- [3] H. Nottoli, *Física aplicada a la Arquitectura*. Buenos Aires: Nobuko, 2004.
- [4] M. Lisa, *The Physics of Sports*. Nueva York, NY: McGraw-Hill Education, 2015.

- [5] P. Davidovits, *Physics in Biology and Medicine*. Londres: Academic Press, 2008.
- [6] Universidad Nacional Autónoma de México, *Plan de estudios de la LCF*, 2013. [En línea]. Disponible en: http://www.cienciaforense.facmed.unam.mx/wp-content/uploads/2015/03/Primer_Sem_Plan_LCF_UNAM.pdf (accedido: abr. 7, 2021).
- [7] G. F. W. Hauck, "Hyatt-Regency Walkway Collapse: Design Alternates", *J. Estruct. Eng.*, vol. 109, no. 5, pp. 1226-1234, 1983.
- [8] A. M. Boge y F. M. Pedersen, "The reasons for the collapse of the Tacoma Narrows Bridge and the lessons for the classroom", tesis de licenciatura, Universidad de Stavanger, Noruega, 2022.
- [9] B. Finio, "Stretch it! How does temperature affect a rubber band?", *Scientific American*, abr. 9, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://www.scientificamerican.com/article/stretch-it-how-does-temperature-affect-a-rubber-band/> (accedido: ag. 28, 2023).
- [10] Organización de las Naciones Unidas. "La Declaración Universal de Derechos Humanos". UN.org. <https://www.un.org/es/about-us/universal-declaration-of-human-rights> (accedido: feb. 2, 2021).
- [11] R. Cross, "Fatal falls from a height: two case studies", *J. Forensic sci.*, vol. 51, no. 1, pp. 93-99, 2006.
- [12] R. Cross, "Forensic Physics 101: Falls from a height", *Am. J. Phys.*, vol. 76, no. 9, pp. 833-837, 2008.
- [13] R. Cross, "The Chappaquiddick Incident", *Phys. Teach.*, vol. 54, no. 9, pp. 520-522, 2016.
- [14] L. W. Alvarez, "A physicist examines the Kennedy assassination film", *Am. J. Phys.*, vol. 44, no. 9, pp. 813-827, 1976.
- [15] E. N. Martínez, *La física forense en el aula*. Centro de Formación Continua, Instituto Balseiro, Centro Atómico Bariloche, 2004. [En línea] Disponible en: <https://fisica.cab.cnea.gov.ar/forense/publicaciones/for-aula.pdf>.
- [16] E. N. Martínez, "Accidentes viales: la mitología del choque", en *Memorias del Segundo Seminario Regional de Física Forense*, Bariloche, Argentina, pp. 49-67, nov. 2001.
- [17] W. Hunter, *Solving Crimes with Physics*. Hollywood, FL: Mason Crest, 2013.
- [18] J. Bonneau, *Forensics with Vernier*. Beaverton, OR: Vernier Software & Technology, 2008.
- [19] T. S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*. Chicago, IL: University of Chicago Press, 1962.
- [20] J. Barojas, J. Villa, F. Cárdenas, C. Soto, M. S. Ruiz y J. Lara, *Problemario de Física I*. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana, 1993.
- [21] H. Pérez, *Física General*. Ciudad de México: Patria, 2014.
- [22] I. K. Kikoin, *Physics in Your Kitchen Lab*. Moscú: Mir, 1985.
- [23] I. P. Herman, *Physics of the Human Body*, 2.ª ed. Cham: Springer, 2016.
- [24] P. Gluck y J. Jing, *Physics Project Lab*. Oxford: Oxford, 2015.
- [25] A. González Arias, *Problemas resueltos de mecánica para estudiantes de la educación superior*. La Habana: Universidad de la Habana, 2017.
- [26] L. C. MacDermott y P. S. Shaffer, *Tutorials in Introductory Physics*. University of Washington & Prince Hall, 2002.
- [27] F. Bueche y E. Hetch, *Física General Shaum*, 10.ª ed. Ciudad de México: McGraw Hill, 2007.
- [28] R. Muller, *Physics and Technology for Future Presidents: An Introduction to the Essential Physics Every World Leader Needs to Know*. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2010.
- [29] B. Crowell, *Discover Physics*. Studium Publishing, 2018.
- [30] College Entrance Examination Board, *AP Physics 1, Practice Workbook, Book 1*, 2009. [En línea]. Disponible en: https://web.mit.edu/~yczeng/Public/WORKBOOK_1_FULL.pdf (accedido: may. 31, 2023).

- [31] L. D. Kirkpatrick y G. E. Francis, *Physics: A Conceptual World View*. Belmont, CA: Cengage Learning, 2009.
- [32] W. Bauer y G. D. Westfall, *Física para Ingeniería y Ciencias*, vol. 2, 2.^a ed. Ciudad de México: McGraw-Hill Interamericana, 2000.
- [33] M. Alonso y E. J. Finn, *Física*, vol. II: campos y ondas. Pearson Educación, 1999.
- [34] P. Hewitt, *Física Conceptual*. Naucalpan de Juárez: Pearson Educación, 2011.
- [35] R. A. Serway y J. W. J. Jewett, *Física para Ciencias e Ingeniería*, vol. 1, Ciudad de México: Cengage, 2019.
- [36] D. Halliday, *Física*, Ciudad de México: Patria, 2013.
- [37] H. D. Young, *College Physics*, 9.^a ed. Boston, MA: Pearson, 2012.
- [38] D. C. Giancoli, *Physics: Principles with Applications*, global ed. Pearson, 2016.
- [39] D. J. Mirabent, J. E. Llebot Rabagliati y C. Pérez, *Física para Ciencias de la Vida*, 2.^a ed. McGraw Hill Interamericana de España, 2009.
- [40] V. Ostdiek y D. J. Bord, *Inquiry into Physics*, 8.^a ed. Boston, MA: Cengage, 2018.
- [41] B. Crowell, *Mechanics. Light and Matter*. 2017.
- [42] C. Schiller, *La montaña del Movimiento*, vol. 1. Christoph Schiller, 2020.
- [43] P. E. Tippens, *Física Conceptos y Aplicaciones*, 7.^a ed. Perú: McGraw Hill, 2011.
- [44] R. Feather *et al.*, *Glencoe Physics Science with Earth Science*. Columbus, OH: McGraw-Hill, 2005
- [45] R. A. Serway y J. S. Faughn, *Holt McDougal Physics*. Holt McDougal, 2011.
- [46] B. W. Tillery, S. J. Slater y T. F. Slater, *Physical Science*, 11.^a ed. Nueva York, NY: McGraw-Hill, 2017.

Implementación de Hojas de Actividades y Clases Interactivas Demostrativas con Simulaciones PhET en Física Conceptual

Implementation of Activities and Interactive Lecture Demonstrations with PhET Simulations in Conceptual Physics

Karen Yael Castrejón Parga¹, Jesús Manuel Sáenz Villela¹✉, Eunice Sarai Lara Pérez¹, Diana Berenice López Tavares²

¹Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología, Departamento de Física y Matemáticas, Programa de Ingeniería Física

²University of Colorado Boulder, PhET Interactive Simulations, PhET Global

RESUMEN

Esta investigación tiene como objetivo presentar los resultados de la implementación de un compendio de Hojas de Actividades y Clases Interactivas Demostrativas basadas en los simuladores interactivos PhET. La implementación del compendio fue puesta a prueba en dos grupos piloto en la asignatura de Física Conceptual durante el semestre agosto-diciembre 2021 en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Se realizó un análisis de las respuestas de los grupos de estudiantes a las hojas de actividades y a las predicciones de las hojas de Clases Interactivas Demostrativas contenidas en el compendio. Los resultados del estudio muestran que la implementación tuvo una buena aceptación entre los grupos de estudiantes y el estudio de seguimiento de una muestra de estudiantes sugiere una mejora progresiva en sus predicciones. Las conclusiones derivadas del estudio identifican las áreas de oportunidad para la mejora de las hojas de trabajo y ayudan a obtener diversas perspectivas sobre el diagnóstico de las bases conceptuales del estudiantado de nuevo ingreso, ambas útiles en la mejora y rediseño del compendio.

PALABRAS CLAVE: PhET; simulaciones; física; aprendizaje; educación.

ABSTRACT

This research presents the results of implementing a compendium of activities and Interactive Lecture Demonstrations based on PhET Interactive Simulations. The implementation of the compendium was tested in two pilot groups in the Conceptual Physics course during the August-December 2021 semester at the Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. The students' responses to the activity and Interactive Lecture Demonstrations sheets were analyzed. The study results show that the implementation had a good acceptance among the groups of students, and the follow-up study of a sample of students suggests a progressive improvement in their predictions. The conclusions derived from the study identify the areas of opportunity to improve the worksheets and help to obtain different perspectives on the diagnosis of the conceptual bases of the new student body, both helpful in the improvement and redesign of the compendium.

KEYWORDS: PhET; simulations; physics; learning; education.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Jesús Manuel Sáenz Villela.

INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Instituto de Ingeniería y Tecnología.

DIRECCIÓN: Av. del Charro núm. 450, col. Partido Romero, C. P. 32310, Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

CORREO ELECTRÓNICO: jessaenz@uacj.mx

Fecha de recepción: 17 de julio de 2023. **Fecha de aceptación:** 6 de noviembre de 2023. **Fecha de publicación:** 17 de noviembre de 2023.



I. INTRODUCCIÓN

Con el objetivo de mejorar el proceso de enseñanza-aprendizaje, además de incrementar la interacción grupal y fomentar discusiones entre estudiantes, se implementaron Hojas de Actividades y Clases Demostrativas Interactivas (ILD, por sus siglas en inglés) para la asignatura de Física Conceptual en la Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, a la cual están afiliados los autores del presente trabajo.

Las Hojas de Actividades e ILD están basadas en las simulaciones PhET Interactive Simulations desarrolladas por la Universidad de Colorado-Boulder ^[1], que cuenta con talleres virtuales en donde se presentan los lineamientos sugeridos en el diseño de actividades basadas en PhET. En ^[2] se describe cómo las ILD permiten al estudiantado ejercitar tanto la escritura de sus predicciones como el dibujo de diagramas. Además, en ^[3] se tiene a disposición un taller virtual en donde se detallan las estrategias a seguir en la preparación e implementación de las Hojas de Actividades.

Las simulaciones PhET están diseñadas para facilitar la comprensión de varios conceptos y el diseño de las simulaciones está basado en resultados previos sobre investigación educativa ^[4].

Existen estudios sobre la efectividad del uso de simulaciones, junto con otros recursos, como se discute en ^[5], en donde se encontró que los grupos de estudiantes que recibieron enseñanza sobre óptica con el uso de PhET tuvieron un mejor desempeño en comparación con los estudiantes que se formaron de manera tradicional. El desempeño fue medido a través de los resultados de un examen sobre comprensión de los conceptos de óptica geométrica.

Las Hojas de Actividades e ILD de Física Conceptual para el presente caso fueron diseñadas a lo largo del semestre agosto-diciembre 2021 en reuniones semanales de trabajo, siguiendo la filosofía de las actividades didácticas con PhET ^[2], ^[3], en donde se fomenta entre los estudiantes la exploración de los conceptos físicos, pero sin recibir instrucciones acerca de la manipulación de la simulación.

La asignatura de Física Conceptual está ubicada en el primer semestre y siempre se ha ofertado de forma presencial, en modalidad convencional, sin embargo, dada

la situación de la pandemia de COVID-19, cambió a distancia en 2020 y 2021 a través de Microsoft Teams. En 2020, la manera de trabajar fue que el docente hizo la exposición de los temas de la clase, con participación limitada de parte de los estudiantes, mientras que en 2021 consistió en el uso de las ILD y de Hojas de Actividades, en donde los estudiantes exploraron las simulaciones y contestaron una serie de preguntas.

Los temas tratados en la asignatura de Física Conceptual y abordados con la metodología expuesta en este trabajo son primera ley de Newton; movimiento rectilíneo; segunda ley de Newton; tercera ley de Newton; cantidad de movimiento; energía; rotación, gravedad; balística y satélites; naturaleza atómica de la materia; sólidos, líquidos, gases y plasmas; calor y temperatura; transferencia de calor; cambios de fase; y termodinámica.

La investigación educativa en estos temas es amplia, como se discute a continuación.

En cuanto a las leyes de Newton, en ^[6] se estudió las actitudes y comportamientos en el aprendizaje de las leyes de Newton con PhET, obteniendo resultados negativos. Sin embargo, el estudio se implementó en modalidad completamente virtual durante la pandemia, por lo que se contemplaron factores adicionales que pudieran afectar las actitudes del grupo de estudiantes. En ^[7] se usó una plataforma con PhET como laboratorio virtual para evaluar la motivación e independencia de un grupo de estudiantes. Los resultados muestran que el uso de PhET incrementó el nivel de independencia y motivación en el grupo. En ^[8] se encontraron resultados satisfactorios en un estudio sobre la implementación de PhET en un grupo de docentes en Indonesia. Según el grupo de docentes, las simulaciones PhET en temas de leyes de Newton mostraron ser adecuadas para cubrir el plan de las asignaturas.

La enseñanza de las leyes de Newton basada en actividades antes de la introducción de conceptos se presenta en ^[9] y un caso de la enseñanza basada en simuladores de la segunda ley de Newton se propone en ^[10].

En el tema de movimiento rectilíneo, la interpretación de gráficas de posición, velocidad y aceleración por parte del grupo de estudiantes se discute en ^[11]. Por otro lado, el uso de simuladores PhET en la obtención de gráficas de posición y velocidad respecto al tiempo ha sido tratado en ^[12]. La asociación de los conoci-

mientos previos con la comprensión de la cinemática es discutida en [13].

El concepto de momento lineal usando simulaciones PhET es discutido en [14]. En [15], el uso de las simulaciones PhET en el tema de impulso y cantidad de movimiento mostró que se incrementan los resultados de aprendizaje en comparación con los métodos tradicionales. También, se encontró evidencia de entusiasmo y motivación entre los estudiantes asociados al uso de las simulaciones. Por otra parte, algunas estrategias de resolución de problemas de colisiones son exploradas en [16] y [17].

El concepto y definición de energía son discutidos en [18] y [19]. El uso de simuladores PhET para la enseñanza del concepto de trabajo y energía han sido explorados en [20] y [21].

Con respecto al movimiento rotacional, los preconceptos de parte de los estudiantes han sido estudiados en [22]. En [23] y [24] se presentan diversas estrategias pedagógicas sobre movimiento rotacional. En [25], las simulaciones PhET fueron usadas para evaluar el aprendizaje conceptual del tema de cinemática rotacional entre estudiantes de preparatoria. Los resultados muestran una mejor comprensión del tema en el grupo de prueba, en comparación con el grupo de control.

En el tema de gravedad, en [26] se investigó la viabilidad de la implementación de hojas de trabajo basadas en las simulaciones PhET. Los resultados muestran que la hoja de actividades propuesta en ese estudio puede ser usada como material didáctico de laboratorio virtual. Por otra parte, algunos enfoques didácticos en la enseñanza de la gravedad pueden encontrarse en [24], [27] y [28]. También, en [29], el aprendizaje del concepto de fuerza gravitacional fue estudiado con base en una hoja de actividades e indagación guiada con PhET. Los resultados exponen ganancia en la comprensión en aquellos estudiantes con un conocimiento previo aceptable pero pérdida en la comprensión en casos de estudiantes con conocimientos previos deficientes. Los preconceptos sobre gravedad han sido explorados en [30].

En cuanto al movimiento de proyectiles, en [31] se encontró que el uso de simulaciones computacionales, donde PhET fue una de las usadas, mejora la comprensión de las gráficas de movimiento de proyectiles, permitiendo una mejor conexión entre el dominio del concepto con

su representación gráfica. El uso de simuladores, software, teléfonos inteligentes y enfoques alternativos es discutido en [32]-[35]. En [36] se estudió algunos conceptos erróneos sobre el movimiento de proyectiles con el apoyo de las simulaciones PhET.

Algunos enfoques didácticos sobre el modelo atómico de la materia y los conceptos introductorios de la física nuclear son narrados en [37]-[39]. En [37] se usó la simulación PhET sobre la estructura atómica con la intención de incrementar la motivación de los estudiantes y mejorar los resultados de aprendizaje, lo cual fue verificado en el estudio. En [38] se encontraron mejoras en los resultados de aprendizaje del concepto de vida media al usar las simulaciones PhET como laboratorio virtual.

La enseñanza sobre los conceptos relacionados con los estados de la materia se expone en [40]. En [41] se muestra una estrategia didáctica factible apoyada en simuladores PhET sobre el tema de gases ideales.

En [42] se presenta un efecto positivo en los resultados de aprendizaje en el tema de calor y temperatura, luego de la implementación de actividades basadas en simulaciones PhET. En [43] se muestra un efecto positivo en la evaluación del pensamiento crítico de estudiantes de preparatoria en el tema de procesos termodinámicos con material didáctico basado en las simulaciones PhET. Finalmente, en [44]-[46] se tienen propuestas didácticas para la enseñanza de los conceptos de calor y temperatura.

Aunque la lista de referencias no es exhaustiva, solo en [6], [7], [8], [10], [12], [14], [15], [20], [21], [25], [26], [29], [31], [32], [34], [36], [37], [38], [39], [41], [42], [43] se incorpora el uso de simulaciones PhET como estrategia didáctica, pero enfocado a algún tema de la física en particular. El presente estudio analiza los resultados de la implementación de simulaciones PhET en varios temas de la asignatura de Física Conceptual y es similar a [39] en cuanto a la elección de criterios y sus limitantes para analizar respuestas de estudiantes.

La carta descriptiva de la asignatura de Física Conceptual está basada en los temas descritos en el libro de texto de Hewitt [47], por lo que en el diseño de Hojas de Actividades e ILD propuestas en este trabajo no se consideraron cálculos numéricos con el uso de ecuaciones.

Los propósitos de las Hojas de Actividades e ILD basadas en simulaciones PhET son mejorar la interacción estudiantes-docentes y facilitar el proceso de enseñanza-aprendizaje.

De forma general, las ILD fomentan la indagación grupal y facilitan la implementación de metodologías didácticas basadas en indagación y participación grupal [10]. En este sentido, las ILD descritas en el presente trabajo concuerdan con la metodología didáctica basada en cuestionamiento, como la discutida en [10] y [48].

Las Hojas de Actividades e ILD han mostrado resultados prometedores en cuanto a su implementación como metodología educativa, como se discute en [49], en donde se reportan resultados favorables en la implementación de actividades, especialmente en lo referente al cambio de rol de los estudiantes en la modalidad a distancia con respecto a la convencional. En este sentido, la presente investigación también explora la factibilidad del uso de simulaciones PhET en la modalidad a distancia de la asignatura de Física Conceptual.

Además, en [49] se contempla la posibilidad de diseñar un curso completo basado en Hojas de Actividades e ILD. En este aspecto, el presente trabajo de investigación muestra un ejemplo de la implementación para un curso de Física Conceptual completo.

En [50] se reportan resultados favorables respecto al uso de simulaciones PhET como herramienta didáctica, apoyadas con Hojas de Actividades como tareas asignadas a grupos de estudiantes en los temas de circuitos eléctricos. Los análisis de la ganancia conceptual, factor de concentración y test de retención muestran que el uso de las simulaciones en secuencias didácticas es efectivo. Por otra parte, la opinión de los grupos de estudiantes sobre el uso de las simulaciones fue favorable.

La problemática didáctica sobre el uso de las simulaciones PhET por parte de docentes y la información relevante para su diseño ha sido explorado en [51], en donde se concluye que los docentes requieren información sobre el uso de las simulaciones por parte de los estudiantes para evaluar de una mejor manera su desempeño y aprendizaje, y para evaluar y rediseñar las Hojas de Actividades.

Una posibilidad no explorada en esta investigación fue la aplicación de exámenes previos al uso de las simu-

laciones, debido a que el tiempo transcurrido apenas fue suficiente para implementar para implementar y responder las Hojas de Actividades e ILD y dar retroalimentación a los grupos de estudiantes a través de las discusiones grupales, reduciendo notoriamente la posibilidad de emplear tiempo de la clase a la aplicación de pre exámenes. El objetivo de esta investigación está centrado en indagar si la implementación del compendio [53] para el temario completo de la asignatura de Física Conceptual es factible, teniendo oportunidades para la mejora de su diseño, lo cual se valoró a partir de las respuestas de las Hojas de Actividades o de las ILD.

II. METODOLOGÍA

En el presente estudio, el proceso de diseño de Hojas de Actividades e ILD basadas en simuladores PhET constó de varias etapas, en la primera de las cuales se identificaron las simulaciones disponibles que sirvieron para cubrir los temas del formato de planeación didáctica de la asignatura de Física Conceptual. Cada tema de la asignatura fue asociado a una simulación que sirvió como base para diseñar la actividad o ILD correspondiente.

En el diseño de las Hojas de Actividades e ILD se tomaron como guía las ideas de la filosofía PhET, que se discute en [52], donde los objetivos de aprendizaje deben ser específicos, usando verbos que sean medibles y que provean retos para que los estudiantes puedan explorar las simulaciones.

El compendio de Hojas de Actividades e ILD diseñadas para la asignatura de Física Conceptual está disponible en [53].

La selección de datos para el análisis presentado en este trabajo se derivó de la elección y evaluación de reactivos representativos de las Hojas de Actividades y las ILD.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LAS HOJAS DE ACTIVIDADES

El proceso de diseño de las Hojas de Actividades basadas en simulaciones PhET inició con una reunión de docentes, en la cual se plantearon los objetivos de los temas de la asignatura y cómo las simulaciones serían usadas para desarrollar actividades.

Las Hojas de Actividades diseñadas se implementaron en el aula. Con base en la respuesta de los estudiantes,

se identificaron áreas de oportunidad para mejorarlas. También se identificaron algunas problemáticas relacionadas con la implementación, cuyos detalles se describen en la sección de conclusiones.

Las Hojas de Actividades fueron distribuidas al grupo y trabajaron de forma independiente con el uso de las simulaciones. Después, los temas y preguntas se revisaron en el grupo correspondiente para dar retroalimentación. Para este estudio, las respuestas del grupo se clasificaron en tres categorías: satisfactoria (S), parcialmente satisfactoria (PS) y no satisfactoria (NS).

Una de las limitantes en este trabajo relacionada con la clasificación es que no se distinguen las respuestas satisfactorias que hayan surgido de la interacción estudiante-simulación, complementando sus conocimientos previos, de aquellas respuestas satisfactorias que se deben mayormente a los preconceptos de cada estudiante.

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE LAS ILD

El proceso de diseño e implementación de las ILD en la asignatura de Física Conceptual se basó en la misma metodología para el diseño de Hojas de Actividades. Las Clases Interactivas Demostrativas constan de hojas de respuestas en las cuales los estudiantes respondieron con base en sus creencias o conocimientos previos. Después, las docentes procedieron a usar la simulación correspondiente al tema de la clase. Los grupos de estudiantes pudieron volver a contestar las preguntas basándose en los resultados de la simulación. De esta manera obtuvieron retroalimentación inmediata, pudiendo contrastar las predicciones iniciales contra lo mostrado por la simulación.

En cuanto a la clasificación de respuestas a las ILD, dado que están basadas en predicciones e ideas que cada estudiante aporta previo a la simulación, se consideró medir en este trabajo el impacto que esta tuvo en cada tema, es decir, se clasificaron como alto impacto (AI) si las predicciones están alejadas de la respuesta correcta, mediano impacto (MI) si están relacionadas medianamente con la respuesta correcta y nulo impacto (NI) si son considerablemente consistentes con la respuesta correcta, lo cual sugiere que el estudiante ya sabía la respuesta previamente a la demostración hecha en clase.

Dado que se consideró que *a priori* las predicciones hechas por los grupos de estudiantes no deben clasificarse

como correctas/incorrectas o satisfactorias/insatisfactorias, se optó en este trabajo por observar el contraste entre las predicciones y las respuestas basadas en la simulación PhET.

ESTUDIO DE SEGUIMIENTO DE ESTUDIANTES

Para evaluar globalmente la implementación de las Hojas de Actividades e ILD se hizo un estudio de seguimiento a 17 estudiantes que cumplieron con la entrega de todos los trabajos. Esto es una limitante del seguimiento, ya que sería deseable que una mayor cantidad de estudiantes cumpliera con la entrega de todos los trabajos. A cada estudiante se le asignó un índice promedio entre 0 y 1, dependiendo de la clasificación de las respuestas seleccionadas mencionadas en este estudio, para darle seguimiento a lo largo del semestre.

En las Hojas de Actividades se les dio seguimiento a las respuestas de la primera ley de Newton, tercera ley de Newton y energía. Por otro lado, se le dio seguimiento a las ILD de la segunda ley de Newton, colisiones, gravedad, movimiento de proyectiles, naturaleza atómica y líquidos.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la implementación de las Hojas de Actividades e ILD basadas en PhET propuestas en el compendio mostrado en ^[53]. No se incluye en esta sección el análisis de las respuestas a la actividades de rotación, de gases ni de cambios de fase, debido a que en un grupo no se aplicaron las actividades de gases y cambios de fase y en los dos grupos se abordaron versiones diferentes a la actividad de rotación mostrada en ^[53].

ACTIVIDAD SOBRE LA PRIMERA LEY DE NEWTON

Los objetivos de aprendizaje de esta actividad están centrados en la definición del concepto de fuerza, fuerza neta y equilibrio de fuerzas ^[53, p. 2].

De la actividad sobre la primera ley de Newton, basada en la simulación PhET Fuerzas y Movimiento, se seleccionó para este estudio estas preguntas: 1.- Juega con la simulación y define con tus propias palabras: ¿qué es una fuerza?; 7.- ¿Cómo le puedes llamar a esa suma de fuerzas? y 8.- ¿En cuál de los tres casos tu carrito de dulces está en equilibrio? Se analizaron 50 Hojas de Actividades.

En cuanto a la pregunta 1, se encontró que hubo 38 S (satisfactoria), 9 PS (parcialmente satisfactoria) y 3 NS (no satisfactoria). Se determinó que las clasificadas como PS se debió a respuestas incompletas: usaron términos o conceptos incorrectos o, aunque algunos fueron parcialmente correctos al referirse a la fuerza como una “cantidad vectorial”, no aportaron información relacionada con el movimiento o estado de un objeto.

En relación con la pregunta 7, se encontró que hubo 43 S, 1 PS, 5 NS. Las PS se clasificaron de esta forma dado que la fuerza neta se explicó como una “diferencia de fuerzas” o ideas similares. Las 5 NS se clasificaron de esa manera debido a que no identificaron la suma de fuerzas como una fuerza neta o resultante. Finalmente, en la pregunta 8 se encontraron 50 S. La Figura 1 resume los resultados.

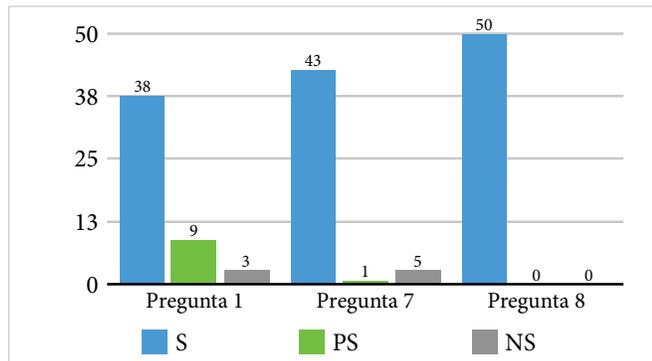


Figura 1. Resultados del análisis de respuestas de la actividad sobre la primera ley de Newton. La clasificación es satisfactorias (S), parcialmente satisfactorias (PS) y no satisfactorias (NS).

ACTIVIDAD SOBRE LA TERCERA LEY DE NEWTON

Esta actividad está basada en la simulación PhET sobre la tercera ley de Newton-gravedad y órbitas. Los objetivos de aprendizaje de esta actividad fueron identificar las fuerzas de acción-reacción y describir cualitativamente la fuerza de interacción entre el sol y la tierra [53, p. 5].

De la actividad sobre la tercera ley de Newton se seleccionaron las preguntas 1.5 y 1.6, que respectivamente consisten en dibujar un diagrama de fuerzas de acción-reacción e identificar las cantidades físicas que determinan la magnitud de la fuerza en el sistema sol-tierra. Se analizaron 46 Hojas de Actividades.

De los resultados para la pregunta 1.5, se tuvieron 19 S (satisfactoria), 22 PS (parcialmente satisfactoria) y 5 NS

(no satisfactoria). Se determinó que la principal causa para clasificar las respuestas a la pregunta 1.5 como PS se debió a la falta del diagrama solicitado. La Figura 2 muestra un ejemplo de los diagramas considerados como satisfactorios. Se tomaron medidas al respecto para hacer más clara esta pregunta, como se discutirá más adelante. La obtención de las NS se debió principalmente a que no se respondió a esta pregunta.

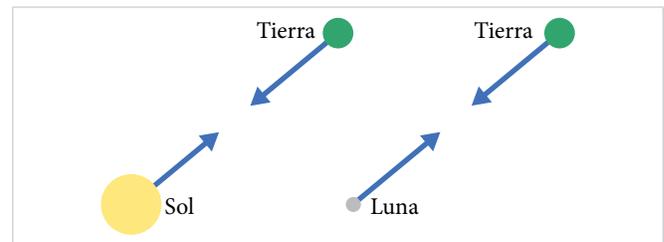


Figura 2. Ejemplo de respuesta clasificada como satisfactoria (S) de la pregunta 1.5 de la actividad sobre la tercera ley de Newton.

En la pregunta 1.6 se obtuvo 41 S, 3 PS y 2 NS. Se consideró PS a las respuestas que omitieron la masa o la distancia. La razón por la que se clasificó una respuesta como NS fue principalmente porque la respuesta no está relacionada con las cantidades de masa y distancia en los sistemas mostrados en la simulación. La Figura 3 resume los resultados de la actividad.

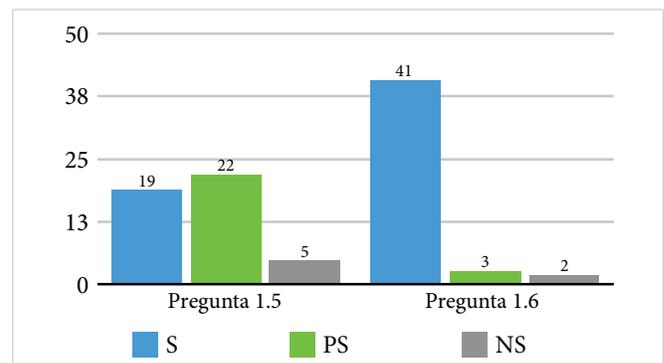


Figura 3. Resultados del análisis de respuestas de la actividad sobre la tercera ley de Newton.

ACTIVIDAD SOBRE ENERGÍA

La actividad de energía tuvo como objetivo de aprendizaje la definición de los conceptos de energía mecánica, cinética y potencial, así como explicar el principio de conservación [53, p. 9].

En este trabajo, se seleccionó la pregunta 1, que está relacionada con la información que muestra la simulación PhET Energía en la Pista de Patinaje, para identificar la

energía cinética y la energía potencial de una persona en una patineta. En específico, se seleccionaron las preguntas 1.1, que consiste en describir las energías cinética, potencial y total en el punto más alto de la rampa de la patineta, y 1.2, que consiste en describir las mismas energías en el fondo de la rampa. Se analizaron 40 Hojas de Actividades.

Con respecto a la pregunta 1.1, se obtuvo 33 S (satisfactoria), 6 PS (parcialmente satisfactoria) y 1 NS (no satisfactoria). Las respuestas se clasificaron como PS en los casos en donde se omitió mencionar la energía cinética, la energía potencial o la energía total. La respuesta NS se clasificó de esta forma debido a que no se contestó la pregunta.

En lo relacionado con la pregunta 1.2, del análisis de las Hojas de Actividades se obtuvo 24 S, 6 PS y 10 NS. El criterio de clasificación de las respuestas PS se basó en si la respuesta es clara o no. Se observó que 3 de las 6 PS tenían una redacción confusa, mientras que las otras 3 estaban incompletas en el mismo sentido que la pregunta 1.1. Las respuestas NS fueron clasificadas de esta manera principalmente porque mencionaron que la persona en la patineta estaba en reposo, lo cual contradice a lo mostrado en la simulación. Hay indicios que 4 de las 6 NS se basaron en una interpretación incorrecta de la imagen mostrada en la simulación. Los resultados del análisis presentado en esta sección condujeron a la conclusión de la necesidad de reformular la pregunta 1.2, como se discutirá en la sección de conclusiones. La Figura 4 resume los resultados de la actividad.

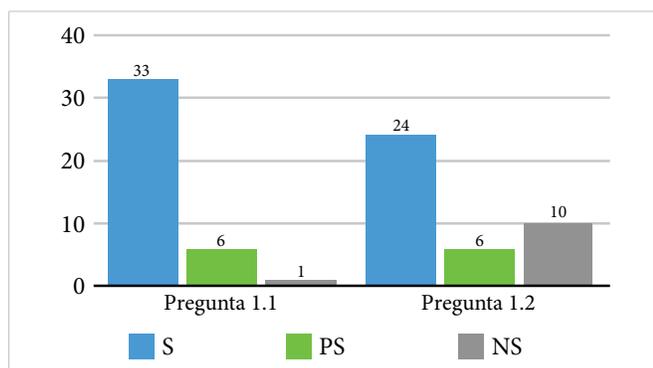


Figura 4. Resultados del análisis de respuestas de la actividad sobre la energía cinética y potencial.

ILD SOBRE MOVIMIENTO EN UNA DIMENSIÓN

Los objetivos de la ILD sobre movimiento rectilíneo fueron que el grupo hiciera predicciones de la forma de

la gráfica de posición con respecto al tiempo en diversas situaciones, por ejemplo, que un objeto se mueva de cierta posición a otra a rapidez constante o que se mueva al ser empujado por una fuerza constante. También se pidió que hicieran predicciones sobre las gráficas de velocidad y tiempo y aceleración con respecto al tiempo, y que justifiquen sus respuestas. La ILD sobre movimiento en una dimensión estuvo basada en la simulación PhET Fuerzas en una Dimensión [53, p. 18].

Para el análisis presentado en este trabajo se seleccionó la demostración 1 de la ILD, la cual consiste en que se predigan y dibujen las gráficas de posición, velocidad y aceleración de un objeto que se mueve desde la posición de -10 m hasta la posición $+10$ m a rapidez constante. Se seleccionaron 13 hojas de respuestas, dado que el resto de las hojas de trabajo se basaron en una versión distinta a la del compendio [53, p. 18].

Los resultados del análisis consisten en 11 AI (alto impacto), 0 MI (mediano impacto) y 2 de NI (nulo impacto) en cuanto a la predicción de la gráfica de posición. Las predicciones acerca de la gráfica de velocidad del objeto fueron clasificadas como 10 AI, 0 MI y 3 NI. En lo que respecta a las predicciones sobre la gráfica de aceleración, las respuestas fueron clasificadas como 11 AI, 0 MI y 2 NI. Los resultados son claros: la gran mayoría de las predicciones dibujadas no concordaron con las gráficas de posición, velocidad y aceleración del problema discutido, previo al uso de la simulación. La Figura 5 resume los resultados de la actividad.

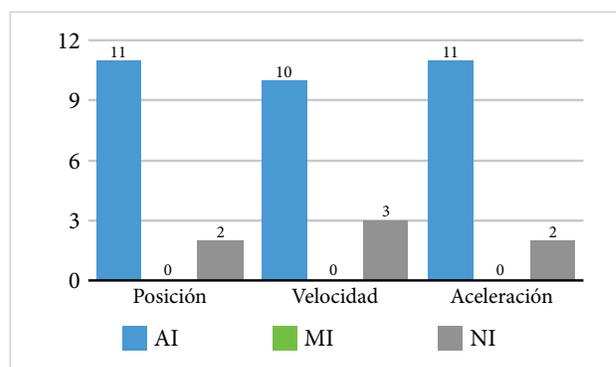


Figura 5. Resultados del análisis de respuestas de la ILD sobre movimiento en una dimensión.

ILD SOBRE LA SEGUNDA LEY DE NEWTON

La ILD sobre la segunda ley de Newton solicitó predicciones acerca de la magnitud de la fuerza aplicada de varios objetos de diferente masa en comparación con la

fuerza de fricción entre el piso y el objeto, si es que se quiere moverlos.

Para el análisis se usaron las respuestas de las hojas ILD Segunda Ley de Newton, basada en la simulación PhET Fuerzas y Movimiento [53, p. 24]. Las preguntas seleccionadas para el análisis fueron la 1, que consiste en predecir la magnitud de la fuerza aplicada con respecto a la fuerza de fricción entre el piso y un cajón de madera, y la 3, que consiste en dibujar un diagrama de fuerzas en donde se muestre la fuerza aplicada y la fuerza de fricción para varios objetos, como una cubeta con agua, una persona, un refrigerador y una niña. Se analizaron las repuestas en el caso específico de una fuerza de 500 N aplicada a una cubeta con agua con una masa de 100 kg. Se analizaron 43 hojas de respuestas de la ILD sobre la segunda ley de Newton.

Los resultados obtenidos en este análisis para la pregunta 1 fueron 1 AI (alto impacto), 0 MI (mediano impacto) y 42 NI (nulo impacto). Esto significa que la gran mayoría de las predicciones concuerdan con que la fuerza necesaria para mover el cajón debe ser mayor que la fuerza de fricción entre el piso y el cajón de madera.

Respecto a la pregunta 3, los resultados obtenidos fueron 8 AI, dado que no se incluyó el diagrama solicitado, 2 MI, dado que las magnitudes mostradas en los diagramas parecen ser arbitrarias (como las de la Figura 6), y 33 NI, en las que se mostraron diagramas razonables.

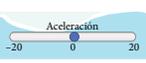
Objeto	Con una fuerza de 500 N, ¿se movería el objeto? Explica.	Dibuja el diagrama de fuerzas (aplicada y de fricción).	Dibuja cómo quedaría el medidor de aceleración.
 100 kg	No, creo que el bote está muy pesado como para que se mueva con tan poca fuerza.		
 80 kg	Yo creo que sí, pero su aceleración sería un poco menor a la que se generó con la caja de 50 kg, pero sí se movería		
 200 kg	No, si con una caja de 50 kg la aceleración ya se ve reducida, no me imagino con un refrigerador.		
 40 kg	Definitivamente, la niña se movería y tendría incluso más aceleración que la caja, ya que es menos pesada.		

Figura 6. Ejemplo de predicciones de la pregunta 3, clasificadas como mediano impacto (MI).

Los resultados de la pregunta 5 fueron 15 respuestas AI, dado que en las predicciones no identificaron ni a la masa ni a la fuerza neta como necesarias para conocer la aceleración de un objeto; 8 MI, dado que se omitieron la masa o la aceleración, y 20 NI, en las que correctamente se identificó a la masa del objeto y a las fuerzas que actúan sobre dicho objeto como necesarias para conocer la aceleración.

Un hallazgo importante del estudio de las respuestas AI es que más de la mitad mencionaron al tiempo y a la velocidad del objeto como necesarios para conocer su aceleración, probablemente porque los estudiantes tienen conocimiento previo de las ecuaciones de la cinemática. Sin embargo, las consideraciones de la ILD sobre la segunda ley de Newton están basadas en cambiar la masa de algún objeto y la magnitud de la fuerza aplicada para saber si se mueve con cierta aceleración o no, por lo que el omitir las cantidades físicas de masa y fuerza neta en la predicción fue considerado como respuesta AI. La Figura 7 resume los resultados de la actividad.

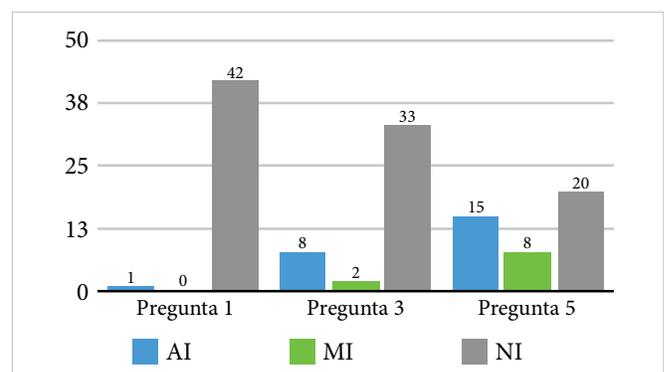


Figura 7. Resultados del análisis de respuestas de la ILD sobre la segunda ley de Newton.

ILD SOBRE COLISIONES

La ILD de colisiones fue diseñada para que el grupo hiciera predicciones acerca de lo que sucede luego de la colisión entre dos bolas con masas distintas. La actividad está basada en la simulación PhET Colisiones [53, p. 30].

Para este estudio se seleccionó las preguntas 1.4, la cual se trata de identificar la bola que tiene mayor momento en la simulación; 2.4, que consiste en predecir si dos bolas de la misma masa y rapidez que se mueven en direcciones opuestas tienen el mismo momento o no, y 3.1 y 4.1, orientadas a predecir el movimiento posterior a la colisión de dos bolas con masa y rapidez distintas y

masa y rapidez iguales, respectivamente. Se analizaron 40 hojas de predicciones de esta ILD.

En la pregunta 1.4 se obtuvo 14 AI (alto impacto), que fueron clasificadas de esta forma debido a que no se consideró la masa de la bola en la definición de su momento; 1 MI (mediano impacto), dado que fue una respuesta correcta pero no relacionada con la pregunta 1.4, y 25 NI (nulo impacto), pues en las respuestas se observó que se consideró la masa y la velocidad de la bola para definir su momento.

Los resultados de la pregunta 2.4 consistieron en 12 AI, 1 de MI y 27 de NI, es decir que 27 estudiantes respondieron que ambas bolas tienen el mismo momento lineal. Las respuestas AI fueron variadas: se respondió que las bolas se detienen o que salen disparadas hacia arriba o que una de las dos tiene mayor momento que la otra. La respuesta de MI se debe a que la respuesta es confusa en su redacción.

Los resultados de la pregunta 3.1 fueron 8 AI, 3 MI y 29 NI. Las respuestas AI fueron clasificadas de esta manera debido a que en la predicción una de las bolas o ambas se detienen. Las respuestas MI se debe a que se predijo una dirección incorrecta de la dirección de movimiento de la bola 2, siendo esta de mayor masa y rapidez antes de la colisión.

Los resultados de la pregunta 4.1 fueron 27 AI (similares a la predicción mostrada en la Figura 8), 1 clasificada como MI debido a su redacción confusa y 12 NI. Los resultados muestran que hubo dificultad en predecir el resultado de la colisión inelástica de dos bolas de la misma masa y rapidez que se mueven en direcciones opuestas para colisionar en una dimensión, siendo el resultado correcto que las bolas se detienen como resultado de su colisión. La Figura 9 resume los resultados de la actividad.

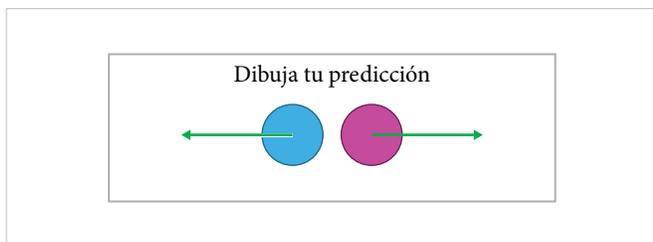


Figura 8. Ejemplo de predicciones de la pregunta 4.1, clasificadas como AI. En la pregunta se tiene la situación de la colisión inelástica de dos masas iguales que viajan en sentidos opuestos en una dimensión con la misma rapidez.

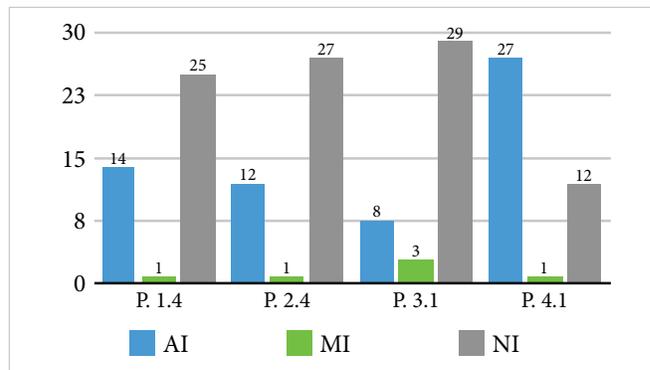


Figura 9. Resultados del análisis de respuestas de la ILD sobre colisiones en una dimensión.

ILD SOBRE FUERZA DE GRAVEDAD

Las demostraciones en la ILD de la fuerza de gravedad [53, p. 36] fueron diseñadas para que el grupo hiciera predicciones respecto a la magnitud de la fuerza de gravedad entre dos esferas con masas iguales o distintas, estando sus centros separados por una cierta distancia. Se les pidió también que hicieran predicciones acerca de la magnitud de la fuerza de gravedad entre las esferas si la distancia de separación aumenta.

En este trabajo se seleccionó para su análisis las respuestas a las preguntas 1.1, 1.2 y 2.1. La pregunta 1.1 está relacionada con la predicción de la magnitud de la fuerza gravitacional entre dos objetos de la misma masa y separados cierta distancia. La pregunta 1.2 consiste en predecir qué ocurre con las magnitudes de las fuerzas si una de las masas aumenta al doble. Finalmente, la pregunta 2.1 consiste en indagar lo que le ocurre a la magnitud de la fuerza gravitacional si la distancia de separación se duplica. Se presenta a continuación los resultados de esta investigación, que consta del análisis de 41 hojas de predicciones de la ILD de gravedad.

En relación con la pregunta 1.1 se obtuvo 2 AI (alto impacto), 2 MI (mediano impacto) y 37 NI (nulo impacto). Esto significa que la mayoría de los estudiantes predijo que la magnitud de las fuerzas de atracción entre las dos masas es igual. Las respuestas MI fueron clasificadas de esta forma debido a que no se incluyeron los diagramas solicitados en la hoja ILD.

Las respuestas a la pregunta 1.2 muestran que 27 estudiantes consideraron que las fuerzas de atracción entre dos objetos de diferente masa son distintas en magnitud (como se ejemplifica en la Figura 10) o no se consideró la masa en la definición de la fuerza gravitacional, por

lo que fueron clasificadas como AI. Se obtuvo también 1 respuesta MI, dada la redacción confusa, y 13 NI, en las que se predijo correctamente que la magnitud de la fuerza de atracción gravitacional es mayor que en la pregunta 1.1, pero que siguen siendo iguales entre los objetos de la situación de la pregunta 1.2.

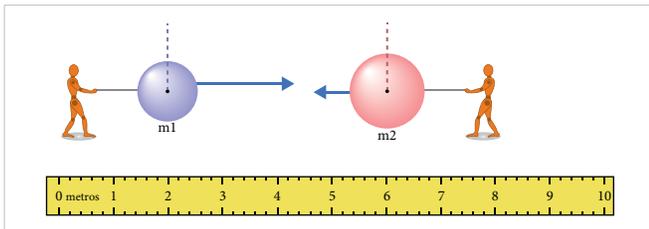


Figura 10. Ejemplo de predicciones de la pregunta 1.2 clasificadas como de alto impacto.

De los resultados de la pregunta 2.1 se encontró 11 AI, 1 MI y 29 NI. Se observa aquí que la mayoría de los estudiantes predijo correctamente que la fuerza de atracción gravitacional disminuye. Sin embargo, las 11 respuestas AI predijeron un factor incorrecto por el cual la magnitud de la fuerza debe disminuir si se duplica la distancia. Nótese que en la hojas ILD de gravedad del compendio no se hace mención explícita a la expresión matemática de la ley de gravitación de Newton, por lo que no se espera en la predicción que se mencione un factor en específico. No se determinó en este estudio el porqué se predijeron factores incorrectos. La Figura 11 muestra un resumen del análisis de las respuestas a la ILD de gravedad.

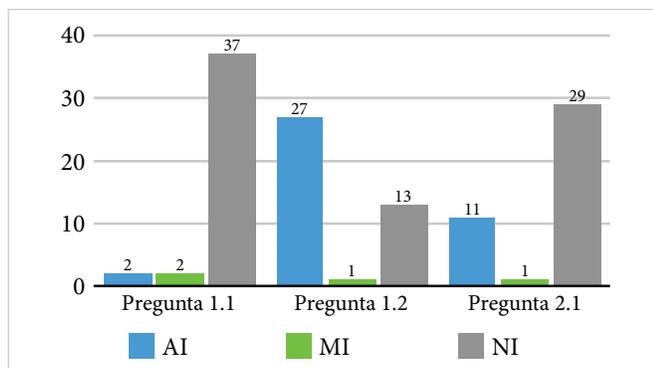


Figura 11. Resultados del análisis de respuestas de la ILD sobre gravedad.

ILD SOBRE PROYECTILES

La ILD sobre movimiento de proyectiles [53, p. 40] se basó en que se hicieran predicciones acerca de la trayectoria de un proyectil disparado con un cañón en el cual se cambia el ángulo con respecto de la horizontal.

Para el análisis se seleccionó la pregunta 1, que consistió en que se hicieran predicciones de la trayectoria de un proyectil lanzado a diferentes ángulos con respecto a la horizontal y a partir de un ejemplo mostrado en las hojas de la ILD. También se seleccionó la pregunta 3, en la que había que dibujar los vectores de velocidad y aceleración de un proyectil en varios puntos de la trayectoria resultante luego de ser lanzado por un cañón en la simulación. Se analizaron 36 hojas de predicciones sobre el movimiento de proyectiles.

Los resultados de la pregunta 1 sobre las predicciones de trayectorias fueron clasificados como 0 AI (alto impacto), 2 MI (mediano impacto) y 34 NI (nulo impacto). Esto significa que la gran mayoría de las predicciones concuerda con las trayectorias descritas por el proyectil en diversas circunstancias.

Los resultados de la pregunta 3, sobre el dibujo de los vectores de velocidad y aceleración en tres puntos de la trayectoria parabólica, fueron clasificados como 21 AI, 7 MI y 8 NI, en las cuales los vectores de velocidad son razonablemente tangentes a la trayectoria y en donde la aceleración apunta siempre hacia abajo. Las respuestas AI fueron clasificadas de esa manera en los casos donde no se dibujaron los vectores o en donde los vectores velocidad y aceleración no representó la situación física del proyectil. Algunas de estas respuestas consistieron en dibujos de vectores velocidad siempre horizontales o aceleración en direcciones opuestas en dos puntos de la trayectoria. En uno de los casos se predijo que la aceleración “siempre es contraria al movimiento del proyectil”. Los resultados de esta ILD se muestran en la Figura 12. La sección de conclusiones menciona algunos comentarios respecto a los resultados de esta subsección.

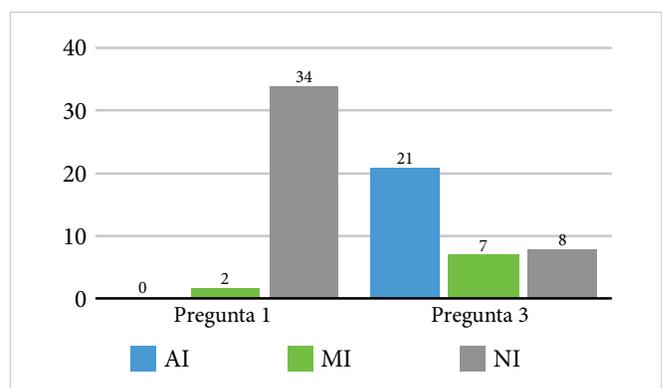


Figura 12. Resultados del análisis de respuestas de la ILD sobre el movimiento de proyectiles.

ILD SOBRE NATURALEZA ATÓMICA DE LA MATERIA

La simulación PhET llamada Construyendo un Átomo aborda la naturaleza atómica de la materia y permite construir un átomo al agregar protones y neutrones al núcleo y electrones a su alrededor. En la ILD se pidió que hicieran predicciones de la carga neta y número de masa de un átomo en diversas situaciones. También se exploró el concepto de estabilidad nuclear.

En este trabajo se eligió la pregunta 1.1 de la demostración 1 de la hoja ILD de Naturaleza Atómica de la Materia [53, p. 56], que consiste en predecir los cambios en la carga neta y número de masa de un átomo, empezando desde cero, si se agrega primero un protón, luego un neutrón y finalmente un electrón. La demostración 1 de la ILD define el número de masa como la cantidad de protones y neutrones que contiene el átomo. Esta pregunta se eligió para análisis porque resume a nivel fundamental la definición de carga neta y masa atómica de un átomo. Se analizaron 34 hojas de respuestas a la ILD sobre la naturaleza atómica.

En la pregunta 1.1, al agregar un protón se obtuvo 3 AI (alto impacto, como el ejemplo de la Figura 13), 0 MI (mediano impacto) y 31 NI (nulo impacto). Esto muestra que la mayoría de las respuestas predijeron correctamente que al agregar un protón se incrementa la carga en 1 y la masa en 1. Y al añadir el neutrón en la simulación se obtuvo 5 AI, 0 MI y 29 NI, lo que indicó que 5 predicciones no consideraron la aportación a la masa atómica del neutrón.

1.1 Si se agrega cada una de las siguientes partículas, en el orden que se indica, ¿cómo cambiarán la carga neta y el número de masa? Escribe tus predicciones en la siguiente tabla:

Se agrega:	Carga neta	Número de masa
protón	positiva	1
neutrón	neutra	2
electrón	neutra	3

Figura 13. Ejemplo de predicciones de la pregunta 1.1 clasificadas como alto impacto.

Respecto a la pregunta 1.1, al agregar el electrón se obtuvo 8 AI, 0 MI y 26 NI. Esto significa que 8 estudiantes tuvieron dificultad con la definición de carga neta y masa atómica desde el inicio de la ILD. Las dificultades están principalmente centradas en que consideraron que el electrón aporta masa al átomo, lo cual no está en la definición dada en la ILD. La justificación está relacionada con que la masa atómica “es la suma de partícu-

las” en el átomo, por lo que erróneamente se predijo que al agregar el electrón, la masa sube a 3. Los resultados de este análisis se resumen en la Figura 14.

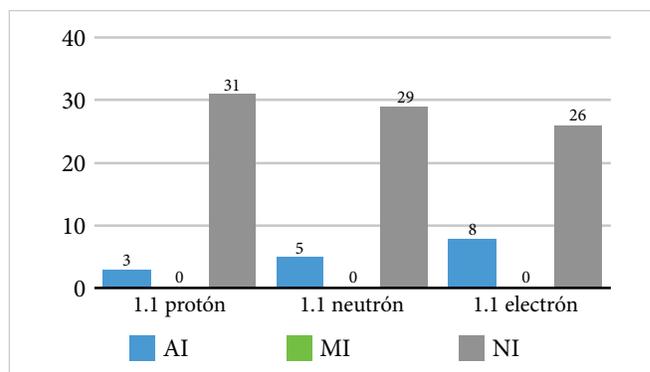


Figura 14. Resultados del análisis de respuestas de la ILD sobre naturaleza atómica de la materia.

ILD SOBRE LÍQUIDOS

En las demostraciones de la ILD sobre líquidos [53, p. 62] se exploran los conceptos de la presión de fluidos en el fondo de un tanque que los contiene o en la superficie. Se le pidió al grupo que hiciera predicciones respecto a mediciones de presión en diversas situaciones, considerando o no la presión atmosférica o llenando el tanque con líquidos de distintas densidades.

Para el análisis de resultados mostrado en este trabajo se seleccionó las preguntas 1.3, que está relacionada con la identificación de presión atmosférica y la ejercida por un líquido; 1.4, que consiste en que se identifiquen las variables físicas que determinan la medida de presión en el manómetro mostrado en la simulación; 1.5, que consiste en predecir qué es lo que pasa en la medida de la presión si se desprecia la presión atmosférica en la simulación, y 2.1, que consiste en cambiar la situación de la simulación a un líquido de mayor densidad que el agua (se cambió el líquido a miel). Se analizaron las respuestas y predicciones de 30 hojas de la ILD de líquidos.

Las predicciones de la pregunta 1.3 fueron clasificadas como 10 AI (alto impacto), principalmente porque las predicciones rondan alrededor de que en el fondo del recipiente la presión sería 0; 1 MI (mediano impacto), dado que la explicación es confusa, y 19 NI (nulo impacto). Como puede verse, la tercera parte de las predicciones manifestaron incorrectamente que la lectura en el fondo del tanque es nula, lo cual se discutirá un poco más en la sección de conclusiones.

Con respecto a la pregunta 1.4 sobre la identificación de variables, se encontró que las predicciones fueron 6 AI, dado que no están relacionadas con los conceptos de profundidad, densidad y/o gravedad; 9 MI, porque omiten alguna de estas cantidades en su descripción o mencionan otra que está relacionada como el volumen o el área, y 15 NI. Los resultados muestran que en la mitad de las predicciones a esta pregunta no se identificaron correcta y completamente las variables relevantes en el problema.

Los resultados de la pregunta 1.5 se clasificaron en 10 AI, principalmente porque estas respuestas predicen que la presión en el fondo del tanque será 0 al apagar la presión atmosférica en la simulación; 0 MI y 20 NI, dado que concuerda que al apagar la presión atmosférica en la simulación, la lectura del manómetro marcará la presión del líquido en el tanque.

Cuando se cambió de agua a miel en la simulación en la pregunta 2.1, los resultados se clasificaron en 4 AI y 3 MI, por no reconocer o reconocer parcialmente que la profundidad en el tanque con miel tendrá efectos sobre la medida de la presión, y 23 NI, por lo que se muestra que la mayoría de las predicciones concuerda con el aumento de presión cuanto más profunda es la medición en el tanque que contiene miel. Un resultado interesante es que solo 3 de las respuestas no identificaron las variables físicas relevantes en la medición de la presión pero predijeron el aumento de presión con la profundidad en el tanque. Se identificó también una posible causa de confusión en la operación de la simulación PhET Bajo Presión, en la que se basa la ILD propuesta en el compendio. Los detalles se discuten en la sección de conclusiones.

La Figura 15 resume los resultados del análisis de las predicciones sobre la ILD de líquidos.

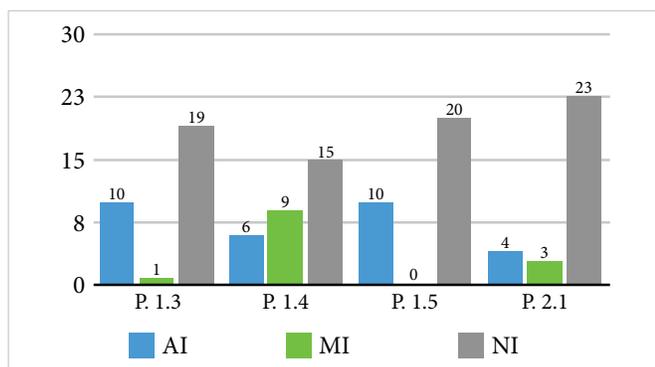


Figura 15. Resultados del análisis de respuestas de la ILD sobre líquidos.

GRADO DE ACEPTACIÓN Y PORCENTAJE DE APROVECHAMIENTO

Durante el desarrollo del semestre agosto-diciembre de 2021 se observó que los estudiantes no tuvieron problemas para trabajar en las actividades basadas en simulaciones en PhET y estas fueron entregadas generalmente a tiempo, aunque no completamente por la totalidad del estudiantado, por lo que se corroboró la factibilidad del uso del compendio. Por otro lado, se observó que en el desarrollo de las clases, las ILD funcionaron como se esperaba: lo estudiantes hicieron preguntas relacionadas con la variación de los diversos parámetros en las simulaciones para explorar sus efectos. Sin embargo, el tiempo de las clases no siempre resultó suficiente para responder a todos estos cuestionamientos frente a grupo.

Otro de los resultados obtenidos de la implementación piloto de las Hojas de Actividades e ILD fue que en algunas ocasiones el grupo cuestionó el funcionamiento de alguna simulación dado que lo mostrado en la misma contradecía sus expectativas. Los resultados presentados de la ILD en las subsecciones anteriores muestran las predicciones de mayor impacto.

La Figura 16 expone el nivel de aceptación de estudiantes de las Hojas de Actividades e ILD basadas en simulaciones PhET. Específicamente, se muestra el resultado al cuestionamiento de si consideran que las Hojas de Actividades e ILD “Me ayudan a entender mejor”. Puede verse que la mayoría respondió estar “de acuerdo” o “completamente de acuerdo”. Se identificó solo un caso en donde el uso de las simulaciones, aunado a la modalidad a distancia mediante el uso de la plataforma Microsoft Teams, trajo problemas adicionales al uso en sí de los simuladores.

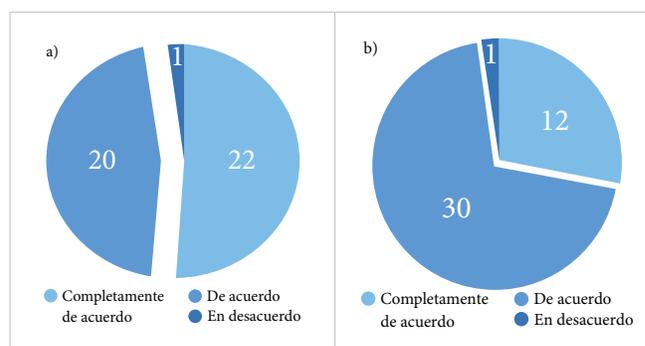


Figura 16. a) Nivel de aceptación de las ILD y b) aceptación de actividades. Se muestran las respuestas del grupo a si consideran que las Hojas de Actividades e ILD basadas en PhET “Me ayudan a entender mejor”.

Los resultados de satisfacción de usuarios son análogos a los reportados en [54], en donde se manifiesta la aceptación de estudiantes de nivel licenciatura de las secuencias didácticas diseñadas para el uso de simuladores PhET.

Una de las mediciones preliminares en este trabajo consistió en tratar de identificar alguna diferencia entre los promedios de calificación final, tomando como referencia los grupos del semestre agosto-diciembre de 2020, los cuales se desarrollaron sin el uso de las simulaciones pero en modalidad a distancia, también a través de la plataforma Microsoft Teams. El número de estudiantes inscritos en 2020 fueron 25 en el grupo A, 31 en el B, 28 en el C y 27 en el D.

La Figura 17 muestra los promedios de la asignatura para los dos grupos piloto del semestre agosto-diciembre 2021 (17 alumnos inscritos en el grupo A y 36 en el D) y para 4 grupos en 2020 en modalidad a distancia pero sin el uso de las Hojas de Actividades e ILD basadas en las simulaciones PhET. Una limitación de esta comparación es que aunque los grupos de 2020 se basaron en la misma carta descriptiva, cada docente cubrió el material de acuerdo con su propia metodología didáctica, todas sin el uso de PhET.

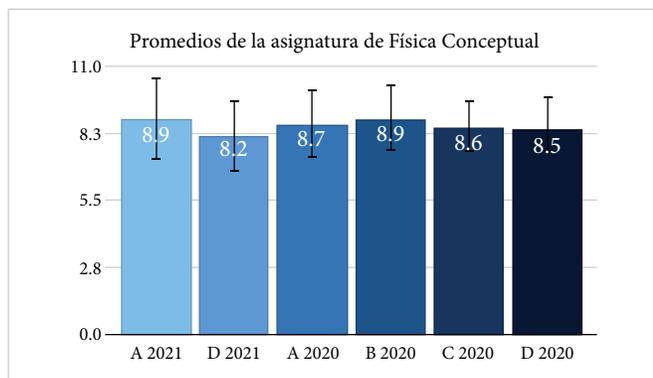


Figura 17. Comparación del promedio final de la asignatura. Se muestra el promedio de 4 grupos en modalidad a distancia sin el uso de PhET para el semestre 2020-II y 2 grupos piloto del periodo 2021-II en modalidad a distancia con Hojas de Actividades e ILD basadas en simulaciones PhET.

La Figura 17 no muestra para 2021 el grupo B (17 alumnos inscritos), dado que no participó en el grupo piloto, ni el grupo C (4 alumnos inscritos), debido a que este se llevó completamente en modalidad en línea sin el uso de las simulaciones.

Nótese que las mediciones mostradas en la Figura 17 parecen determinar que en la modalidad a distancia de

los semestre agosto-diciembre de 2020 y 2021, siendo en este último donde se aplicaron las Hojas de Actividades e ILD, el aprovechamiento fue el mismo, aunque el papel de los estudiantes cambió de ser mayormente pasivo a mayormente activo. Esto no debe ser sorprendente, se ha reportado en [55] que el uso de simulaciones PhET en actividades previas a los temas de alguna asignatura no produce un efecto directo en el aprendizaje de los temas.

En este aspecto, este trabajo concuerda con los resultados presentados en [55] respecto a que no se observa evidencia de un incremento en el porcentaje de aprovechamiento y a que las actividades con simulaciones PhET son bien aceptadas por los grupos de estudiantes. Se espera tener mediciones adicionales ya en modalidad presencial a partir de 2023.

RESULTADOS DEL ESTUDIO DE SEGUIMIENTO DE ESTUDIANTES

A continuación, se presentan los resultados del seguimiento a lo largo del semestre, para una muestra de 17 estudiantes que cumplieron con la entrega de todas las Hojas de Actividades y predicciones en las ILD.

En cuanto a las Hojas de Actividades, se tiene que solo 4 de los 17 estudiantes mostraron una tendencia a la alta, con base en el índice promedio (entre 0 y 1) asignado de acuerdo con sus respuestas a lo largo el semestre. De los 17 estudiantes, 8 tuvieron un índice aproximadamente estable (4 estudiantes con índice 1 y 5 estudiantes con índice promedio de 0.92) y 5 estudiantes tuvieron índice con comportamiento a la baja. La Figura 18 muestra tres casos como ejemplo del índice de seguimiento de las hojas de actividades.

Por otro lado, los resultados de seguimiento sugieren que hubo una mejoría progresiva en las predicciones de las ILD. El índice de seguimiento presentó una tendencia creciente en 10 de los 17 estudiantes de la muestra y 5 de los 17 estudiantes tuvieron un índice con comportamiento estático mientras que los restantes 2 mostraron una tendencia a la baja. La Figura 19 muestra tres casos como ejemplo del índice de seguimiento de las ILD.

IV. CONCLUSIONES

La utilidad del estudio presentado en este trabajo respecto a la implementación piloto del compendio de Hojas de Actividades e ILD queda manifiesta en los his-

togramas presentados en la sección de resultados y discusión. El histograma de resultados de la actividad de la primera ley de Newton (Figura 1) muestra que el uso de la simulación condujo a los estudiantes a respuestas mayormente satisfactorias, lo mismo que la actividad de energía.

La actividad de la tercera ley de Newton derivó en un histograma de resultados mayormente satisfactorio en la pregunta 1.6, pero en la pregunta 1.5 se identificó un componente importante de respuestas clasificadas como parcialmente satisfactorias. Los histogramas de las Figuras 1, 3 y 4 sugieren que las actividades correspondientes fueron útiles al momento de responder las preguntas, dado que los grupos piloto pudieron formular sus respuestas de forma satisfactoria en la mayoría de los casos. Además, el análisis de estos histogramas permite identificar problemáticas ya sea en el diseño de las Hojas

de Actividades o en la manipulación e interpretación de los resultados de las simulaciones.

En lo que respecta a la interpretación de los resultados del análisis de las ILD, los histogramas también son bastante elocuentes. Obsérvese que en la Figura 5 de los resultados del análisis de la ILD sobre movimiento en una dimensión se muestra claramente que existió una dificultad para que los estudiantes hicieran predicciones sobre las gráficas de posición, velocidad y aceleración. Aunque esto no es en sí un hallazgo novedoso, muestra claramente que es un problema para resolver en la asignatura de Física Conceptual.

Los histogramas de las Figuras 7, 11, 12 y 14 indican la problemática identificada en la implementación de las ILD, respectivamente, de la segunda ley de Newton, gravedad, movimiento de proyectiles y modelo atómico.

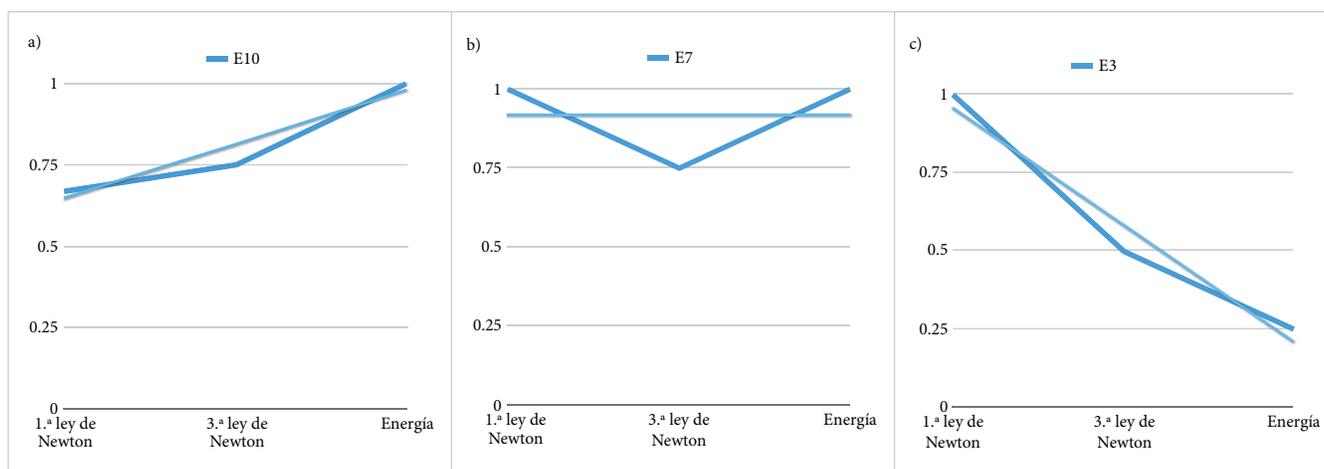


Figura 18. Ejemplos de índices promedio de estudiantes (E10, E7, E3) con tendencia a crecer (a), tendencia constante (b) y tendencia a la baja (c) en la clasificación de respuestas a las hojas de actividades.

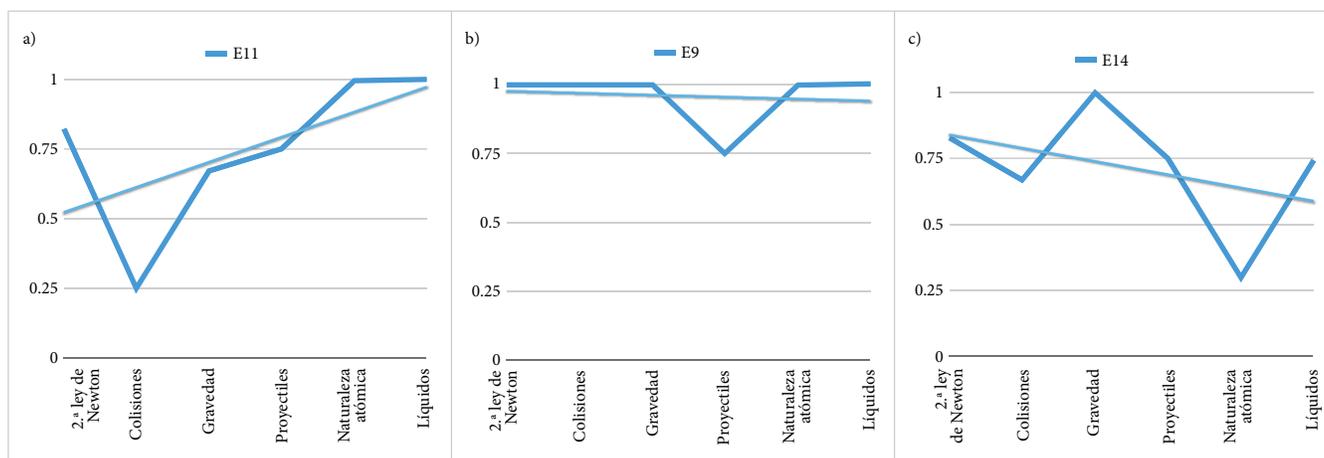


Figura 19. Ejemplos de índices promedio de estudiantes (E11, E9, E14) con tendencia a crecer (a), tendencia constante (b) y tendencia a la baja (c) en la clasificación de predicciones en las ILD.

La interpretación directa de los histogramas de las ILD sobre colisiones y líquidos, en las Figuras 9 y 15, quizá sea más complicada, dado que los histogramas muestran una clasificación variada de respuestas de alto, medio y nulo impacto. Sin embargo, aun en estos casos es posible identificar oportunidades de mejora en las hojas de las ILD. Se discuten los detalles particulares de cada actividad e ILD a continuación.

En lo que respecta a la actividad sobre la tercera ley de Newton, a partir de los resultados se deduce que la pregunta 1.5 debe ser modificada para indicar explícitamente que se debe incluir el diagrama de fuerzas. Por otro lado, se concluye también que debe agregarse una pregunta a la actividad para que se comparen las respuestas a las preguntas 1.5 y 1.6 que son en algunos casos incongruentes y parece haber indicios de que las magnitudes de los vectores mostrados en la simulación conducen a respuestas contradictorias.

Con base a los resultados del análisis de la pregunta 1.2 de la actividad de energía, se concluye que la pregunta debe modificarse para hacer notoria la medición de la rapidez de la persona en la patineta, ya que las respuestas NS se basan en afirmar que la persona está en reposo, lo cual es contradictorio con la rapidez que muestra la simulación.

El análisis de las predicciones sobre las gráficas de posición, velocidad y aceleración de un objeto, en la ILD sobre movimiento en una dimensión, muestra la utilidad de las simulaciones PhET como herramienta didáctica. Si, por un lado, las predicciones pueden diferir del comportamiento real del objeto bajo ciertas condiciones, los estudiantes pueden comprobar sus respuestas al presenciar la simulación de la situación física, ya que muestra las gráficas de posición, velocidad y aceleración en tiempo real, según las condiciones del montaje inicial del problema.

Se considera que el hecho de que un porcentaje alto de las predicciones no concuerda con los resultados reales abre una ventana de oportunidad para explorar los tópicos de la asignatura con el diseño de secuencias didácticas, como las sugeridas en este trabajo. Como se muestra en los resultados, en la ILD sobre movimiento en una dimensión las predicciones contrastaron más con respecto a los comportamientos reales de las diversas situaciones físicas exploradas.

De los resultados de la ILD de la segunda ley de Newton se concluye que los estudiantes requieren más ayuda en cuanto a la representación de un diagrama de fuerzas, como en el caso de la fuerza aplicada sobre un objeto y la fuerza de fricción entre este y el piso. Lo anterior se debe a que los resultados del análisis indican que casi la cuarta parte de las respuestas no incluyeron un diagrama de fuerzas.

Otra conclusión es que en las Hojas de Actividades e ILD propuestas en este trabajo no debe suponerse que los estudiantes identifican de manera inmediata las cantidades físicas relevantes en la definición de algún concepto de la física, aun cuando las Hojas de Actividades o de predicciones se basen en las relaciones entre estas cantidades. En los resultados se identificó que más de la mitad de las predicciones no identificaron a la masa y a la fuerza neta como necesarias para conocer la aceleración de un objeto en la simulación sobre la segunda ley de Newton. Se propone modificar la pregunta 5 de la ILD sobre esta simulación para que se exponga una justificación de la predicción con base en las respuestas anteriores.

Respecto a la ILD de colisiones, se concluye que el grupo tuvo mayor dificultad para predecir el resultado de la colisión inelástica en una dimensión de dos bolas de la misma masa y rapidez. Los resultados muestran mayor contraste entre las predicciones y sus respuestas correctas. Se especula que las figuras ilustrativas de los ejercicios mostrados en la hoja de ILD de colisiones quizá estén actuando como distractores, ya que las ilustraciones no representan lo que las preguntas intentan indagar. Se propone poner a prueba el impacto de las respuestas obtenidas por parte del grupo al modificar las imágenes para que representen exactamente lo que la pregunta cuestiona, para investigar si las ilustraciones guiarán a los estudiantes a la respuesta correcta.

Nótese en los resultados de la ILD de gravedad que la cantidad de estudiantes que predicen que en un sistema de dos objetos de masas distintas, las fuerzas de atracción gravitacional son distintas. Por citar algunos casos, se afirmó que “el objeto de mayor masa jala más fuertemente” o, similarmente, “que el objeto de menor masa es jalado más fuertemente”. Se concluye, a partir de estos resultados, que hubo poca retención respecto a la actividad de la tercera ley de Newton, que fue la primera trabajada en el semestre, hasta llegar a la ILD sobre gravedad. Es vital reforzar los esfuerzos dedicados a mejorar el proceso enseñanza-aprendizaje. Una de las

ideas deducidas de este estudio está relacionada con la predicción sobre lo que le ocurre a la fuerza de atracción gravitacional entre dos objetos si la distancia entre ellos se duplica. Se identificó, con base en las predicciones, que es necesario solicitar en la hoja de ILD de gravedad una explicación del porqué se hizo la predicción.

Los resultados de la ILD sobre movimiento de proyectiles muestran que, por un lado, las predicciones de la trayectoria que describe un proyectil, en diversas situaciones de ángulo de lanzamiento, concuerda con el comportamiento mostrado en la simulación PhET. Por otro lado, la intuición sobre la descripción de la trayectoria parece no estar directamente relacionada con las predicciones de las direcciones de velocidad y aceleración del objeto en varios puntos de la trayectoria. Una de las ventajas del uso de las simulaciones PhET es que permiten verificar el comportamiento real y compararlo con las predicciones.

En este trabajo también se enfatiza la importancia de desarrollar secuencias didácticas que permitan evaluar el aprendizaje desde el nivel fundamental al comienzo de la actividad, y no necesariamente hasta el final de la secuencia. Del análisis de los resultados de la ILD sobre la naturaleza atómica de la materia se tiene que casi una cuarta parte de las predicciones al comienzo de la actividad no son consistentes con las definiciones presentadas en la ILD sobre la carga neta y masa atómica de un átomo. Una conclusión importante de este estudio es que se debe incorporar a la ILD algún reactivo que ayude al estudiante a verificar su respuesta antes de continuar con el resto de los ejercicios basados en la simulación, especialmente cuando estos están diseñados en secuencia lineal.

Otro hallazgo está relacionado con la interpretación que algunos estudiantes hicieron de la lectura de presión usando el manómetro en la ILD de líquidos. La simulación PhET Bajo Presión muestra la lectura de la presión en el aire y dentro de los líquidos, pero no muestra lectura alguna justo en el fondo del tanque que está bajo tierra. La lectura alrededor de la interfaz tanque-tierra desapareció, por lo que causó algo de confusión al momento de hacer la demostración. La conclusión emanada de este análisis es que debe incluirse un comentario adicional sobre la operación de la simulación y comunicarlo oralmente durante la toma de datos de las predicciones por parte de estudiantes.

De acuerdo con el testimonio de las docentes de la asignatura de Física Conceptual, se observaron en los gru-

pos piloto mayor interacción y participación en discusiones de indagación grupal, así como un considerable intercambio de ideas y opiniones, todo esto con respecto a la asignatura en modalidad convencional del semestre agosto-diciembre de 2020.

Con respecto a la recolección de datos para la investigación educativa, se encontró en este trabajo que la revisión por parte de los docentes debe mejorarse para ser más eficiente, aunque es capaz de ofrecer perspectivas sobre el proceso de enseñanza-aprendizaje basado en las simulaciones PhET, como se muestra aquí y en la sección de resultados.

Un hallazgo relevante del presente estudio es que en el grupo de seguimiento se encontró una tendencia a la alta en cuanto a las respuestas de las ILD seleccionadas mientras que se no se observó lo mismo en las respuestas de las Hojas de Actividades. De la misma forma, los resultados muestran que la implementación del compendio es factible. El análisis de la implementación de las Hojas de Actividades e ILD nuevas y mejoradas habrá de guiar el rediseño de la planeación didáctica de la asignatura de Física Conceptual en los semestres subsecuentes, en búsqueda de la mejora continua del proceso de enseñanza-aprendizaje.

REFERENCIAS

- [1] “Interactive Simulations of Sciences and Math”. Phet.colorado.edu. <https://phet.colorado.edu> (accedido: mar. 25, 2022).
- [2] “Estrategias de Implementación para la Clase Entera”. Phet.colorado.edu. <https://phet.colorado.edu/es/teaching-resources/virtual-workshop/whole-class-strategies> (accedido: oct. 31, 2022).
- [3] “Diseño de Actividades para Ciencias”. Phet.colorado.edu. <https://phet.colorado.edu/es/teaching-resources/virtual-workshop/science-activity-design> (accedido: oct. 31, 2022).
- [4] K. Perkins *et al.*, “PhET: Interactive Simulations for Teaching and Learning Physics”, *Phys. Teach.*, vol. 44, pp. 18-23, en., 2006, doi: 10.1119/1.2150754.
- [5] K. Ndiokubwayo, J. Uwamahoro y I. Ndayambaje, “Effectiveness of PhET Simulations and YouTube Videos to Improve the Learning of Optics in Rwandan

- Secondary Schools”, *Afr. J. of Res. in Math., Sci. and Technol. Educ.*, vol. 24, no. 2, pp. 253-265, oct., 2020, doi: [10.1080/18117295.2020.1818042](https://doi.org/10.1080/18117295.2020.1818042).
- [6] M. Eng y K. H. Chua, “The effect of using PhET in Changing Malaysian Students’ Attitude to learning physics in a full virtual environment”, *Peranika J. Soc. Sci. & Hum.*, vol. 31, no. 2, pp. 545-560, 2023.
- [7] D. D. Utami, A. Halim, Y. Yusrizal, E. Elisa y F. Herliana, “The impact Edmodo assisted by the Virtual Laboratory on Students’ Learning Motivation and Independence”, *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, vol 8, no. 6, 2022, doi: [10.29303/jppipa.v8i6.2207](https://doi.org/10.29303/jppipa.v8i6.2207).
- [8] A. K. Haquiqui, R. F. Rahmawati, Z. Asizati, U. N. L. Sulistyani, W. F. Albar, “Virtual Laboratory-based learning media training form MGMP IPA Teachers at Madrasah Tsanawiyah in Kudus Regency”, presentado en *The 4th Int. Conf. on University-Community Engagement*, IAIN Syekh Nurjati, Cirebon, Indonesia, oct. 24-26, 2022.
- [9] J. Lutz, K. Sylvester, K. Oliver y D. Herrington, “3, 2, 1... Discovering Newton’s Laws”, *Phys. Teach.*, vol. 55, pp. 149-151, mar. 2017, doi: [10.1119/1.4976656](https://doi.org/10.1119/1.4976656).
- [10] F. E. Imbert, “Efecto de las simulaciones de fuerza y movimiento en el aprendizaje de la Física Básica”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 16, no. 1, mar., 2022.
- [11] S. Tejeda-Torres y Á. Domínguez, “Dificultades conceptuales en la relación de gráficas de cinemática: Estudio de casos”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 9, no. 1, jul., 2015.
- [12] Y. Cortez, S. C. Zúñiga y C. del P. Suárez, “Enseñanza del concepto de movimiento a velocidad constante y su representación gráfica mediante el uso de clases interactivas demostrativas con un video experimento”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 11, no. 2, jun., 2017.
- [13] E. Berryhill, D. Herrington y K. Oliver, “Kinematics Card Sort Activity: Insight into Student’s Thinking”, *Phys. Teach.*, vol 54, pp. 541-544, dic., 2015, doi: [10.1119/1.4967894](https://doi.org/10.1119/1.4967894).
- [14] A. Malik, Y. Dirgantara y S. M. Karmini, “The application of higher order thinking laboratory (HOT Lab) in momentum concept using PhET simulation”, *AIP Conf. Proc.*, vol. 2572, no. 1, mar., 2023, doi: [10.1063/5.0118433](https://doi.org/10.1063/5.0118433).
- [15] Z. A. Ghiffary, “Implementing STAD cooperative learning model integrated interactive PhET simulation to enhance high school students’ learning outcomes: a case of momentum-impulse concepts”, *Res. Phys. Educ.*, vol. 1, no. 1, 2022.
- [16] K. Koenig, A. Maries, R. B. Teese y M. Chabot, “Promoting Problem Solving Through Interactive Video-Enhanced Tutorials”, *Phys. Teach.*, vol. 60, no. 5, pp. 331-334, may., 2022, doi: [10.1119/5.0050673](https://doi.org/10.1119/5.0050673).
- [17] J. Sztrajman y A. Sztrajman, “An Easy Way to One-Dimensional Elastic Collisions”, *Phys. Teach.*, vol. 55, no. 3, pp. 164-165, mar., 2017, doi: [10.1119/1.4976660](https://doi.org/10.1119/1.4976660).
- [18] A. González, “¿Cómo definir la energía en los cursos básicos?”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 2, no. 3, sept., 2018.
- [19] A. González, “Use and misuse of the concept energy”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 6, supl. 1, ag., 2012.
- [20] P. E. Niyanti, F. P. Setyaningrum, G. W. Rachman y F. Wandita, “Implementasi Pembelajaran Fisika Topik Usaha dan Energi Berdasarkan Publikasi Ilmiah”, *Mitra Pilar*, vol 1., no. 2, dic. 2022, doi: [10.58797/pilar.0102.05](https://doi.org/10.58797/pilar.0102.05).
- [21] C. E. Wieman, W. K. Adams, P. Loeblein y K. K. Perkins, “Teaching Physics Using PhET Simulations”, *Phys. Teach.*, vol. 48, no. 4, pp. 225-227, abr., 2010, doi: [10.1119/1.3361987](https://doi.org/10.1119/1.3361987).
- [22] C. Escudero, M. A. Moreira y M. C. Caballero, “A research on undergraduate student’s conceptualizations of physics notions related to non-sliding rotational motion”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 3, no. 1, en., 2009.
- [23] E. J. Sojourner, A. J. Burgasser y E. D. Weise, “Let’s Get Physical: Teaching Physics Through Gymnastics”, *Phys. Teach.*, vol. 56, no. 1, pp. 43-46, en., 2018, doi: [10.1119/1.5018692](https://doi.org/10.1119/1.5018692).
- [24] P. Schwartz, “Focusing on Concepts by Covering Them Simultaneously”, *Phys. Teach.*, vol. 55, no. 5, pp. 280-284, may., 2017, doi: [10.1119/1.4981034](https://doi.org/10.1119/1.4981034).
- [25] M. Suárez, S. Pandiella y J. Benegas, “Tutorials + PhET: a simple and efficient active -learning approach for the teaching of kinematics of circular motion in a techni-

- cally-oriented high school”, *Phys. Educ.*, vol, 58, no. 3, 2023, doi: 10.1088/1361-6552/acb8f8.
- [26] F. Sugianto, “Validity of Newton’s Law of Gravitation Student Worksheet Integrated of PhET Simulation Software”, *TGO J. of Educ. Sci. and Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 122-129, jul. 2023, doi: 10.56070/tgojest.v1i2.22.
- [27] J. Balukovic, J. Slisko y A. Corona, “A demonstration of ‘weightlessness’ with 1-kg mass and balloon”, *Phys. Teach.*, vol. 53, no. 7, pp. 440, 441, oct., 2015, doi: 10.1119/1.4931016.
- [28] K. Clay, “The Pendulum, Gravity, and that Number 9.8”, *Phys. Teach.*, vol. 42, no. 1, pp. 14-15, en., 2004, doi: 10.1119/1.1639961.
- [29] O. D. Pranata, “Enhancing Conceptual Understanding and Concept Acquisition of Gravitational Force through Guided Inquiry Utilizing PhET Simulation”, *Sainstek: Jurnal Sain Dan Teknologi*, vol. 5, no. 1, pp. 44-52, jun. 2023, doi: 10.31958/js.v15i1.9191.
- [30] K. E. Williamson, S. Willoughby y E. E. Prather, “Development of the Newtonian Gravity Concept Inventory”, *Astron. Educ. Rev.*, vol. 12, no. 1, pp.1 -20, dic., 2013, doi: 10.3847/AER2012045.
- [31] J. C. Uwayezu y L. L. Yadav, “Effect of computer-simulated teaching tools on Rwandan senior four students’ understanding of graphs of projectile motion”, *J. Math. Sci. Teach.*, vol. 3, no. 2, 2023, doi: 10.29333/mathsciteacher/13593.
- [32] R. Sánchez, “Propuesta didáctica de aprendizaje del movimiento de un proyectil con simulación PhET y Aprendizaje Activo para estudiantes de Nivel Medio Superior”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 11, no. 2, jun., 2017.
- [33] C. A. de Sousa, “Another look at the projectile motion”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 6, no. 1, mar., 2012.
- [34] E. Azhikannickal, “Sports, Smartphones, and Simulation as an Engaging Method to Teach Projectile Motion Incorporating Air Resistance”, *Phys. Teach.*, vol. 57, no. 5, pp. 308-311, may., 2019, doi: 10.1119/1.5098919.
- [35] P. Martín-Ramos, M. Ramos-Silva y P. S. Pereira da Silva, “El teléfono inteligente en la enseñanza de las Leyes de la Física: movimiento de proyectiles”, *RIED*, vol. 20, no. 2, pp. 213-231, 2017, doi: 10.5944/ried.20.2.17663.
- [36] R. D. Agustina, W. Setya, A. Malik, R. P. Putra, S. Andhika, A. N. Fitriani y Y. Cesariyanti, “Graphical analyzer for misconception of angle 45 as optimal angle of projectile motion”, *AIP Conf. Proc.*, vol. 2468, no. 1, 2022, doi: 10.1063/5.0102851.
- [37] A. Sadiyah y A. Lufti, “Atomic Structure Teaching Module with PhET Simulation to Increase Student Motivation and Learning Outcomes”, *Hydrogen*, vol. 11, no. 4, pp. 459-468, 2023.
- [38] Masfaratna y A. Rosadi, “PhET Simulation Media Part Time Using a Problem Based Learning Model Improves Student Learning Outcomes”, *JPPG*, vol 1, no. 1, 2023.
- [39] S. B. McKagan, K. K. Perkins y C. E. Wieman, “Why we should teach the Bohr model and how to teach it effectively”, *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.*, vol. 4, no. 010103, mar., 2008, doi: 10.1103/PhysRevSTPER.4.010103.
- [40] N. Erceg, I. Aviani, V. Mešić, M. Glunčić y G. Žauhar, “Development of the kinetic molecular theory of gases concept inventory: Preliminary results on university students’ misconceptions”, *Phys. Rev. Phys. Educ. Res.*, vol. 12, no. 020139, nov., 2016, doi: 10.1103/PhysRevPhysEducRes.12.020139.
- [41] M. A. Ridho y A. S. D. Sari, “Validity of PhET Simulation Assisted Poe2we Learning Model on Ideal Gas Materials”, *SAGA: Journal of Technology and Information Systems*, vol. 1, no. 1, feb. 2023, doi: 10.58905/saga.v1i1.14.
- [42] N. Novita, I. T. Aulia S y N. Fatmi, “Pengaruh Model Pembelajaran PBL dengan Media PhET Terhadap Hasil Belajar Kognitif Siswa”, *JoE*, vol. 5, no. 3, pp. 6092-6100, feb., 2023, doi: 10.31004/joe.v5i3.1375.
- [43] P. Anjani, C. E. Rustana y L. A. Snajaya, “The Effect of Using PhET in Thermodynamic Process Material About Critical Thinking Skills Senior High School Student”, *Prosiding SNF*, vol. 11, no. 1, pp. PF-239, en., 2023, doi: 10.21009/03.1102.PF33.
- [44] C. Xie, “Interactive Heat Transfer Simulations for Everyone”, *Phys. Teach.*, vol. 50, no. 4, pp. 237-240, abr., 2012, doi: 10.1119/1.3694080.

- [45] H. J. Díaz, M. A. Martínez y A. López, “El uso del aprendizaje cooperativo para la enseñanza de los conceptos de calor y temperatura a nivel medio superior”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 10, no. 2, jun., 2016.
- [46] M. de la C. Medina, “Transmisión de calor: Una alternativa de enseñanza y aprendizaje basada en la investigación dirigida”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 4, supl. 1, nov., 2010.
- [47] P. G. Hewitt, *Física Conceptual*, 12.^a ed. Ciudad de México: Pearson Educación, 2016.
- [48] C. Lidnstrøm, “The Pedagogical Power of Wonder Questions”, *Phys. Teach.*, vol. 59, no. 4, pp. 275-277, abr., 2021, doi: 10.1119/10.0004156.
- [49] D. B. López y J. Orozco, “Clases interactivas Demostrativas con el uso de simulaciones PhET para Mecánica en Preparatoria”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 11, no. 2, jun., 2017.
- [50] D. B. López, “Implementación de una Estrategia Activa Complementada con TIC para la Enseñanza de Circuitos Eléctricos en Nivel Bachillerato”, tesis de maestría, CICATA-Legaria, IPN, Ciudad de México, 2015.
- [51] D. B. López, “Learning analytics dashboard for interactive educational simulations”, tesis de doctorado, CICATA-Legaria, IPN, Ciudad de México, 2019.
- [52] “Virtual Workshop Math”. Phet.colorado.edu. <https://phet.colorado.edu/en/teaching-resources/virtual-workshop/math> (accedido: mar. 25, 2022).
- [53] “Compendio de Actividades e ILDs basadas en simulaciones PhET”. Phet.colorado.edu. <https://phet.colorado.edu/en/contributions/view/6873> (accedido: jun. 11, 2022).
- [54] M. Sandoval, J. Moreno y C. Mora, “Uso de simuladores PhET para la enseñanza del comportamiento de gases ideales”, *Lat.-Amer. J. of Phys. Educ.*, vol. 15, no. 1, 2021.
- [55] J. B. Strang, M. Barker, S. Perez, J. Ives e I. Roll, “Active learning in pre-class assignments: Exploring the use of interactive simulations to enhance reading assignments”. arXiv.org. doi: 10.48550/arXiv.1607.04588 (accedido: jun. 11, 2022).

Diseño de actividades bajo el marco de enseñanza para la comprensión en el primer año universitario

Design of activities under the framework of teaching for understanding at the first-year university level

Marco Antonio Noguez Córdoba^{1a}✉, Mateo Barkovich^{1a}, Marcos López Chimil^{1b}, Rita Vázquez Padilla^{1c}

¹Universidad Autónoma de la Ciudad de México, Plantel San Lorenzo Tezonco, {^aAcademia de Física, ^bAcademia de Informática, ^cAcademia de Matemáticas}

RESUMEN

La educación centrada en el aprendizaje es uno de los principios de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM) el cual no se ha podido consolidar debido a la persistencia del enfoque de enseñanza basado en la clase magistral, entre otras causas. La propuesta de la Enseñanza para la comprensión (EpC), elaborado por el proyecto Zero de la Universidad de Harvard, propone un marco de trabajo para diseñar unidades temáticas que involucren activamente a los estudiantes al alinear metas de comprensión con actividades de desempeño y una evaluación formativa continua. En este artículo se presenta la descripción cualitativa del trabajo exploratorio de un grupo de profesores de Matemáticas, Física e Informática del Ciclo Básico de las carreras del Colegio de Ciencia y Tecnología de la UACM en el diseño de actividades basadas en la EpC. Como conclusión, se encuentra que la EpC es una metodología que permite desarrollar recursos de aprendizaje activo a través de un trabajo de colaboración colegiado, que puede permitir desarrollar puentes entre diferentes cursos y apoyar el aprendizaje integral en la formación básica de un ingeniero.

PALABRAS CLAVE: aprendizaje activo; enseñanza para la comprensión; educación de la ingeniería; comunidad de aprendizaje.

ABSTRACT

Learning-centered Education is one of the principles of the Autonomous University of Mexico City (UACM), which has not been consolidated due to the persistence of the teaching approach based on transferring knowledge via the master class. The Teaching for Understanding framework -developed by the Zero project at Harvard University- proposes a strategy for designing didactic sequences that actively engage students by aligning understanding goals with performance activities and an ongoing assessment. This article presents a qualitative description of some initial results developed by a group of teachers in charge of different engineering undergraduate courses related to math, physics, and informatics, to design and implement activities based on EpC. In conclusion, it is found that the EpC is a methodology that allows active learning activities through collaborative work, which can help to develop bridges between different courses and support comprehensive learning in the basic formation of an engineer.

KEYWORDS: Active learning; teaching for understanding; engineering education; learning communities.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Marco Antonio Noguez Córdoba.

INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de la Ciudad de México, Plantel San Lorenzo Tezonco.

DIRECCIÓN: Calle Prolongación San Isidro 151, col. San Lorenzo Tezonco, Alcaldía Iztapalapa, Ciudad de México, C. P. 09790.

CORREO ELECTRÓNICO: marco.noguez@uacm.edu.mx

Fecha de recepción: 20 de junio de 2023. **Fecha de aceptación:** 10 de noviembre de 2023. **Fecha de publicación:** 17 de noviembre de 2023.



I. INTRODUCCIÓN

Entre los desafíos actuales que enfrenta la educación superior destacan dos relacionados con el aprendizaje y la inclusión: por un lado, está teniendo lugar un cambio en los métodos de instrucción, en donde la enseñanza basada en la clase magistral está siendo sustituida por clases que tienen como centro la participación de los estudiantes. Este cambio está impulsado por la creciente evidencia en la eficacia del aprendizaje activo ^[1] y por la creciente accesibilidad a repositorios de recursos y estrategias basados en evidencia (por ejemplo, ^[2] y ^[3]). Por otro lado, existe una preocupación creciente sobre el acceso y permanencia de los estudiantes en las carreras relacionadas con la ciencia y la tecnología en donde el índice de abandono es muy grande, sobre todo de los estudiantes que provienen de un ambiente económico desfavorable ^[4].

El proyecto educativo de la Universidad Autónoma de la Ciudad de México (UACM) plantea que la inclusión y permanencia de los estudiantes que normalmente no tienen acceso a la educación superior debe apoyarse en el principio de educación centrada en el aprendizaje ^[5], donde el estudiante adquiere un papel activo construyendo y elaborando sus conocimientos, dotándolos de significado mediante la interacción tanto con los objetos de aprendizaje como con sus compañeros. El profesor, en lugar de ser un transmisor del conocimiento, se convierte en un mediador que apoya al estudiante a adquirir aprendizajes significativos, a partir de sus conocimientos previos, necesidades, intereses y experiencias.

Silva ^[6] apunta que este principio no se ha podido consolidar en esta institución, debido, entre otros factores, a que persiste el enfoque de clases únicamente expositivas y a la ausencia de una política institucional específica que norme y promueva la innovación e investigación educativa. Además, en la UACM no se ha concretado un programa de actualización docente, lo que dificulta el diseño e implementación de materiales didácticos innovadores. Guzmán ^[7] señala que existe una fuerte tradición en la educación superior en donde la formación docente y los conocimientos relacionados con las didácticas y el conocimiento pedagógico del contenido se consideran poco importantes, por lo que es preciso promover espacios de reflexión y análisis acerca de lo que sucede dentro de los salones de clase.

En contraposición a la enseñanza centrada únicamente en la transmisión de conocimientos, se encuentra la enseñanza que promueve la construcción de la comprensión por parte de los estudiantes. Bajo esta premisa, un grupo de académicos del proyecto Zero de la Escuela de Graduados en Educación de la Universidad de Harvard ^[8], construyeron un marco de trabajo centrado en el diseño de actividades, considerando a la comprensión como “la habilidad de pensar y actuar con flexibilidad a partir de lo que uno sabe.” Este enfoque, conocido como Enseñanza para la Comprensión (EpC), retoma los hallazgos de la psicología cognitiva sobre cómo aprendemos y el estudio de casos de profesores que centran su enseñanza en la comprensión de los estudiantes ^[9].

Los integrantes del proyecto Zero han publicado varios recursos donde se exponen esta propuesta: en un primer libro se hace un recuento sobre la investigación que dio origen a la propuesta ^[10]; un segundo libro presenta una guía para su aplicación por parte de los docentes ^[11]; y en un tercer libro se extiende la propuesta para incluir el uso de la tecnología ^[12]. Además, existe una gran cantidad de artículos de investigación y materiales de difusión sobre esta aproximación pedagógica.

El marco de trabajo de la EpC gira en torno a una serie de preguntas que guían el diseño de las actividades para promover la comprensión ^[12]:

1. ¿Cuáles son los tópicos que vale la pena aprender?
2. ¿Qué es lo que el estudiante debe entender acerca de estos tópicos?
3. ¿Cómo los estudiantes desarrollan y demuestran la comprensión?
4. ¿Cómo los estudiantes y profesores evalúan la comprensión?
5. ¿Cómo los estudiantes y profesores aprenden juntos?

Estas preguntas están asociadas a los cinco principios de la propuesta de la EpC: generar tópicos generativos y metas de comprensión, diseñar desempeños de comprensión, realizar una evaluación continua que apoye el aprendizaje y construir una comunidad de reflexión colaborativa.

Aunque la mayoría del trabajo inicial de la EpC surge de la experiencia en la escuela secundaria en Estados Unidos de América, en la actualidad hay un gran interés

para expandir este marco de trabajo a la educación superior. En Costa Rica, Salgado ^[13] reporta cómo la EpC sirvió de base para reestructurar el modelo pedagógico de una universidad costarricense en torno a competencias y establecer proyectos en sustitución de exámenes finales.

Hurtado ^[14] da cuenta de que la mayoría de las investigaciones sobre la implementación de la EpC en Hispanoamérica se han centrado en el nivel universitario, sobre todo en el área de las humanidades, con Argentina y Colombia liderando el número de publicaciones.

Jubert y su equipo ^[15] dieron seguimiento a un cuestionario que sirvió de evaluación diagnóstica en un curso de química, el cual también se utilizó como instrumento para evaluar el nivel de comprensión de las metas establecidas en las actividades. También se destaca el uso del blog como herramienta para socializar el trabajo realizado por los estudiantes. Este estudio reporta que los alumnos avanzaron dos niveles en la comprensión de los objetivos de aprendizaje.

Morán ^[16] analizó la aplicación de la EpC en un curso de robótica para facilitar la comprensión de conceptos básicos del funcionamiento de robots antropomorfos. La construcción y análisis de los proyectos a partir de una rúbrica les permitió determinar que casi dos terceras partes de los estudiantes alcanzaron un nivel satisfactorio de comprensión.

En la Universidad de Antioquia, en Colombia, el diseño de una unidad didáctica para la comprensión del concepto de campo eléctrico fue desarrollado por Mejía ^[17] en su tesis de maestría.

En el caso de la propuesta de Silva ^[18], la EpC se usó como marco de trabajo para rediseñar un curso introductorio de física en una universidad argentina, donde se muestra que las innovaciones en el diseño permitieron mejorar la motivación y, por lo tanto, el desempeño de los estudiantes. En los trabajos de investigación revisados se destaca la prevalencia de la clase expositiva y los ejercicios como forma de trabajo en las instituciones de educación superior, así como la alta tasa de abandono que tienen los cursos STEM, por lo que un resultado esperado de la aplicación de la EpC es disminuir la tasa de abandono, lo cual se reporta en el artículo de Mejía ^[17].

Adicionalmente, es importante considerar el papel del trabajo colegiado en torno a la educación y formación de los estudiantes. En el proyecto educativo ^[5] se especifica que las academias y grupos de trabajo deben analizar las aportaciones pedagógicas que puedan contribuir a mejorar su docencia. La EpC promueve la reflexión colectiva entre profesores a través de una guía de preguntas y actividades para facilitar el aporte de otros profesores, tanto de la misma disciplina como de otras áreas del conocimiento, en el diseño de las actividades de comprensión. El Ciclo Básico de la UACM, que idealmente se debe de completar en cuatro semestres, está conformado por cursos del área de matemáticas y física, con algunas materias relacionadas con la informática, la introducción a la ingeniería y la modelación matemática. De acuerdo con algunos informes internos, el abandono de los cursos que se imparten en el primer semestre por parte de los estudiantes ronda en el 70 %, por lo que es fundamental promover el trabajo colegiado que estudie los retos y problemáticas comunes a los que se enfrentan los estudiantes en los cursos de matemáticas, física e informática.

En el presente artículo se presenta una exploración cualitativa sobre el diseño colaborativo de actividades de física, matemáticas e informática usando el marco de trabajo de la EpC, así como algunos resultados preliminares sobre el impacto de la propuesta. Esta indagación se realizó por parte de un grupo de profesores a cargo de cursos de diferentes áreas en las carreras de ingeniería del Colegio de Ciencia y Tecnología (CCyT) en una reunión semanal que se llevó a cabo durante el semestre 2022-II. Finalmente, se delinean algunos posibles objetivos de aprendizaje comunes que podrían servir como puentes entre los cursos de las diferentes áreas de formación básica, para que los estudiantes puedan tener una experiencia integradora, sobre todo en los primeros años de las carreras de ingeniería.

II. METODOLOGÍA

Como punto de partida se planteó al grupo de profesores la cuestión de definir los tópicos generativos y las metas de comprensión para los cursos de manera colegiada. En el marco de la EpC se reconoce la elección de tópicos generativos como un trabajo con un componente personal, que parte de los intereses del docente y refleja lo que para él o ella es más importante, y también un componente colaborativo, ya que los tópicos generativos pueden tener conexiones con otras materias, por lo que

se enriquecen con el punto de vista y experiencia de los pares y lo que la institución establece como importante.

Cada profesor expuso su propuesta usando, en algunos casos, una red de ideas alrededor del tópico generativo, recibiendo retroalimentación del resto del grupo. Este trabajo sirvió para establecer puntos comunes con relación a la enseñanza desde una perspectiva interdisciplinaria. En particular, se buscó identificar conceptos o habilidades que son transversales a la formación en las tres disciplinas. Luego, cada profesor eligió una unidad de aprendizaje para establecer las metas de comprensión respectivas, las cuales se compartieron en las reuniones de trabajo para refinar su descripción o hacerlas más claras a los estudiantes.

Una vez establecidas las metas de comprensión, cada profesor elaboró actividades relacionadas con cada meta. En las reuniones se discutieron los alcances del diseño, así como algunas de las dificultades que experimentaron los estudiantes. Como primer ejercicio, se realizó una revisión de la estructura del marco general de la EpC a partir de la lectura de la Guía para el docente ^[11] para implementar la propuesta en algunas unidades didácticas.

A continuación, se detallan las partes del marco de la EpC relacionadas con los tópicos generativos y las metas de comprensión.

TÓPICOS GENERATIVOS

Un tópico generativo es un tema que debe conectar con las ideas principales del curso y que pueda también tener conexiones con otras materias. Este tópico debe ser auténtico, accesible y atractivo, por lo que es importante incluir los intereses y experiencias de los estudiantes. Al mismo tiempo, este tema debe ser de interés para el docente y tener una gran variedad de recursos que se puedan utilizar.

Para poder elegir un buen tópico generativo, Wiske ^[12] sugiere hacer una lluvia de ideas y ordenarlas en un formato de red donde se puedan visualizar las diferentes conexiones y donde los temas que tengan más relaciones son candidatos para ser tópicos generativos. Algunos ejemplos de tópicos generativos que se presentan en los casos de estudio son: el razonamiento proporcional, el análisis de patrones usando múltiples sistemas simbólicos y conjeturas o el entendimiento de

las estadísticas a través de los deportes. En el caso de la educación superior, además de conectar los diferentes temas relacionados con los intereses de los estudiantes, es muy importante hacer referencia a la relación de los principales conceptos del curso —tanto con las diferentes áreas de formación de las ciencias básicas como con su uso en el Ciclo Superior—, donde se imparten las materias relacionadas con la práctica profesional.

METAS DE COMPRENSIÓN

Uno de los grandes retos de la enseñanza en educación superior es saber cómo hacer frente a la gran cantidad de contenidos que abarcan los programas de estudio. Las recomendaciones actuales para la transformación de los cursos sugieren realizar una discusión colegiada sobre lo que los estudiantes deben de aprender (véanse por ejemplo ^[19] y ^[20]). En el marco de la EpC, las metas deben de apoyar la comprensión siempre y cuando cumplan las siguientes características:

- Prioricen las ideas claves del curso.
- Abarquen diferentes dimensiones de la comprensión.
- Establezcan conexiones entre las metas de las unidades y las metas globales del curso.
- Sean enunciadas explícita y públicamente.

También es importante considerar que la comprensión se puede desarrollar en diferentes ámbitos: los conocimientos, las herramientas metodológicas que se utilizan en las diferentes disciplinas, como las habilidades de pensamiento científico que se emplean para buscar patrones y regularidades en la naturaleza, y las diferentes formas de comunicación para explicar las ideas de manera clara y adaptadas según el público a quien se dirige. La EpC plantea dos diferentes tipos de metas: los objetivos relacionados con el tópico generativo de una unidad temática particular y las metas de comprensión abarcadoras o hilos conductores que atraviesan diferentes unidades, cursos e incluso ciclos.

Blythe ^[11] aconseja realizar también una lluvia de ideas inicial para tratar de enunciar las metas de comprensión y trabajar de manera colegiada su mejoramiento. Las metas de comprensión deben de socializarse con los estudiantes, de preferencia en forma de preguntas. Analizar las respuestas que dan los estudiantes pueden aportar información acerca del grado de comprensión de cada meta, así como conocer algunas de las dificultades para alcanzarlos. Los trabajos de investigación

—artículos y tesis— sobre la EpC aportan ejemplos de redacción y alcance de las metas en los cursos relacionados con la ingeniería. La investigación en enseñanza de la física (por ejemplo, en ^[21], ^[22]) es otra fuente de posibles referencias de objetivos de aprendizaje, así como algunos libros de texto de física que están comen- zando a incorporar metas de comprensión al inicio de cada capítulo, como lo hacen Knight ^[23] y Chabat ^[24].

DESEMPEÑOS DE COMPRENSIÓN

En el marco de la EpC, el entendimiento de un tema se construye a partir de una secuencia de actividades que de manera gradual va dando sentido a las ideas centrales. Los desempeños de comprensión deben permitir a los estudiantes confrontar los conocimientos previos de manera crítica, para que puedan realizar nuevas conexiones entre ideas, así como también deben dar oportunidad al desarrollo de la autonomía sobre su aprendizaje y poder demostrar públicamente lo que han comprendido. En la UACM, han surgido diversas experiencias en el uso de materiales que promueven el aprendizaje activo, tanto de diseño propio como de materiales emanados de la investigación en enseñanza, como los tutoriales de *Física Introductoria* y de *Física por Indagación* de Lilian McDermott ^[25]. También se ha incorporado el uso de la tecnología a través de software interactivo, como GeoGebra ^[26], y de ejercicios interactivos en matemáticas, a través de la plataforma Grasple ^[27]. En las clases de Introducción a la Programación, parte del aprendizaje se realiza a través de proyectos que funcionan como desempeños culminantes.

VALORACIÓN CONTINUA

En el modelo de la EpC, la evaluación debe apoyar la comprensión al proporcionar una retroalimentación sobre las tareas de desempeño para conocer el nivel de comprensión de ideas, procesos y herramientas. Esto se logra al establecer criterios claros y públicos sobre los desempeños durante el desarrollo de los entendimientos y no únicamente al presentar un examen al terminar una unidad.

De acuerdo con Wiske ^[12], la evaluación apoya a la comprensión cuando:

- los estudiantes entienden lo que implica un trabajo de calidad;
- la colaboración entre pares ayuda a los estudiantes a analizar y mejorar su trabajo;

- la retroalimentación proviene de diferentes fuentes: profesor, compañeros o un sistema tutorial inteligente, y
- los profesores obtienen una mejor fotografía de la comprensión de los estudiantes.

En el proyecto de la UACM, la evaluación está pensada para constituir “un instrumento al servicio de la permanencia y la formación de los estudiantes” ^[5]. En este sentido, la evaluación implica un trabajo colegiado donde se debe consensuar lo que los estudiantes deben saber hacer al terminar cada curso, y sirve a su vez de guía para que estudiantes y profesores tomen decisiones acerca de los apoyos y acciones para avanzar con éxito.

COMUNIDAD DE APRENDIZAJE

En la EpC se recalca la importancia de poder contar con un espacio de trabajo colegiado para reflexionar sobre el trabajo docente. El trabajo de reflexión propuesto por Blythe ^[11] promueve el trabajo con otros profesores de tal manera que los colegas puedan servir como caja de resonancia, lo que permite evaluar y mejorar los cursos. También es fundamental compartir -y negociar- las metas de aprendizaje con profesores que enseñen el mismo curso, pero también es importante socializar el trabajo del aula con colegas que enseñan en niveles superiores o inferiores, así como expertos en otras disciplinas.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La descripción del diseño de cuatro diferentes cursos se presenta a continuación:

1. TALLER DE MATEMÁTICAS

Contexto: El Taller de Matemáticas es un curso dirigido a estudiantes de recién ingreso a la universidad. Es un curso que, debido a su naturaleza, tiene un alto índice de deserción.

Tópicos generativos: Razonamiento inductivo.

Metas de comprensión abarcativas: ¿Para qué pueden ser útiles las matemáticas en mi carrera y en mi vida? y ¿cómo se argumenta en matemáticas?

Metas de comprensión de la unidad: El estudiante comprenderá que el razonamiento inductivo se caracteriza

por hacer inferencias a partir de la observación de situaciones en donde hay un patrón o regularidad.

Metas de comprensión como preguntas: ¿Cómo explicar a alguien más un patrón o regularidad? y ¿en qué consiste hacer una inferencia por inducción?

Desempeños de comprensión: Se presentan diferentes secuencias de figuras para que los estudiantes puedan encontrar un patrón, describir los diferentes comportamientos y poder realizar una inferencia inductiva. Los estudiantes diseñan en equipos sus propias secuencias para retar a otros compañeros a encontrar las regularidades. Después, los ejemplos se diversifican al presentar series de números y situaciones de la vida cotidiana.

Valoración continua: Informal y a través de un cuestionario.

2. TALLER DE FÍSICA

Contexto del curso: El Taller de introducción al CCyT es un curso que se imparte a los estudiantes que ingresan a la UACM y su objetivo principal es prepararlos para que tengan bases sólidas para los cursos de física. Los estudiantes, de acuerdo con los exámenes diagnósticos de matemáticas y comprensión lectora, presentan un muy bajo nivel.

Tópicos generativos: ¿Hasta qué punto podemos predecir el futuro?

Metas de comprensión abarcativas: ¿Cuál es el significado de velocidad constante?, ¿cuáles son sus características? y ¿a qué situaciones, diferentes al del movimiento de un objeto, podemos aplicar el concepto de velocidad constante?

Metas de comprensión de la unidad: Los estudiantes comprenderán el concepto de velocidad como una medida de la tasa de cambio de una magnitud cualquiera en el tiempo, así como a reconocer si una situación corresponde o no a un caso de velocidad constante.

Los estudiantes podrán determinar la pendiente y ordenada al origen de una recta (dada su gráfica o ecuación), así como determinar la ecuación de una gráfica y graficar una recta a partir de su ecuación. También deberán usar diferentes representaciones de un Movimiento Rectilíneo Uniforme (MRU): tabla, representación es-

troboscópica, gráfica y algebraica, reconociendo los parámetros relevantes en cada caso.

Desempeños de comprensión: Las actividades que realizan los estudiantes buscan representar el movimiento de un carro de juguete tanto gráfica como analíticamente. Deben explicar cómo cambian estas representaciones si se modifican algunos parámetros, e identificar una situación diferente al movimiento de un carro (por ejemplo, llenado de un envase cilíndrico a caudal constante) que se pueda modelar mediante un modelo lineal (velocidad constante) y predecir qué va a suceder con el sistema.

Valoración continua: Ejercicios sencillos para reforzar en cada clase, pequeñas evaluaciones formativas semanales, realización de fichas con conceptos y el registro de las actividades en una bitácora y explicaciones diarias informales.

3. MECÁNICA II

Contexto del curso: El curso de Mecánica II está ubicado en el segundo semestre de las carreras del CCyT y es la segunda parte del curso donde se aborda la mecánica de una partícula en una dimensión. Mecánica II presenta un gran reto para los estudiantes, ya que muchos de ellos no han comprendido los conceptos de Mecánica I, por lo que normalmente se hace un repaso de los temas de esta materia. El profesor eligió el estudio del movimiento de tiro parabólico, ya que permite aplicar las ideas del movimiento con rapidez y aceleración constantes y se usan muchas de las herramientas metodológicas necesarias para Mecánica II.

Tópicos generativos: ¿Cómo simular el movimiento del tiro parabólico?

Metas de comprensión: ¿Cómo simular el movimiento de tiro parabólico en GeoGebra?, ¿qué regularidades sobre el movimiento aparecen en el tiro parabólico?, ¿cómo utilizamos el concepto de función para describir (y simular) el movimiento? y ¿qué importancia tienen los vectores en el análisis del tiro parabólico?

Desempeños de comprensión: En la actividad exploratoria, los estudiantes realizan la descripción de un tiro parabólico a partir de un vídeo. En los desempeños de comprensión se trabaja con la foto estroboscópica del movimiento tipo proyectil de un objeto para guiar al estudiante a encontrar las principales características de

este movimiento. Los estudiantes completan una hoja con el modelo matemático del tiro parabólico. El desempeño culminante consiste en calcular la rapidez inicial del lanzamiento de un balón de fútbol a partir de la medición de la distancia total recorrida y el tiempo de vuelo, así como simular el movimiento del balón en GeoGebra.

Valoración continua: El reporte de esta actividad termina con la reflexión sobre las preguntas relacionadas con las metas de comprensión. Se diseñó una rúbrica con los criterios para evaluar la resolución del problema y la simulación.

4. ARQUITECTURA DE SOFTWARE

Contexto del curso: El curso de Arquitectura de Software pertenece a la Licenciatura de Ingeniería de Software y se imparte en el octavo semestre, donde se enseña parte del llamado proceso de software, el cual es un elemento esencial en esta carrera.

Tópicos generativos: ¿Por qué el mantenimiento de software puede resultar muy costoso con relación a su desarrollo?, ¿qué relación hay entre las fallas de un sistema de software y su diseño? y ¿cómo se relacionan los cursos donde se estudian las etapas del proceso de software con el curso de Arquitectura de software?

Metas de comprensión: El estudiante comprenderá los fundamentos de la Arquitectura de Software a través del vínculo con el diseño de software y con base en los principios de diseño iniciará el estudio de la arquitectura y la manera de crearla de modo adecuado. Además, conocerá varios estilos arquitectónicos que puede utilizar, así como el modo de documentar una arquitectura de software.

Desempeños de comprensión: Lectura de textos, aprendizaje interactivo a través de una presentación y un proyecto final para promover el autoaprendizaje.

Valoración continua: Tareas de revisión grupal semanales y evaluaciones escritas. Los exámenes y las prácticas se dividieron en tres grandes grupos con la idea de abarcar todo el contenido del curso. Se propuso a los estudiantes elaborar el proyecto final aproximadamente a la mitad del curso, con el propósito de lo fueran realizando gradualmente.

Aunque este último curso no se imparte en el Ciclo Básico, el grupo consideró importante incluir en la reflexión el punto de vista de los profesores que imparten los cursos de informática.

Como se puede constatar en las diferentes propuestas, el marco de trabajo se adaptó a las características de cada área del conocimiento, así como a la experiencia previa de cada profesor. La discusión colegiada favoreció el intercambio de ideas para poder redactar las metas de comprensión en forma de preguntas, así como revisar la alineación entre las metas de comprensión con sus respectivos desempeños y actividades de valoración. El intercambio también permitió la ampliación del tipo de actividades que normalmente se implementan en los cursos universitarios. Además, la experiencia de cada profesor en la aplicación de actividades de aprendizaje activo permitió compartir nuevas estrategias, como el uso de la revisión por pares en los cursos de informática que se puede adaptar a los otros cursos en la revisión de los ejercicios de matemáticas y física.

Algunos resultados sobre la implementación de la EpC se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1
RESULTADOS DE LA APLICACIÓN DE LA EpC EN LOS CURSOS DEL CCYT

TALLER DE MATEMÁTICAS	TALLER DE FÍSICA	MECÁNICA II	ARQUITECTURA DE SOFTWARE
Mejoraron el desempeño de la argumentación escrita y el uso de elementos matemáticos dentro del argumento. Los estudiantes produjeron ejemplos propios de inferencias inductivas.	Se clarificaron dificultades de los estudiantes y se ajustaron las metas de comprensión para hacerlas más accesibles a los estudiantes de primer ingreso.	En el proyecto final de síntesis, los estudiantes mostraron una mejoría en la descripción del movimiento y en el manejo de diferentes representaciones. Los estudiantes aplicaron sus conocimientos realizando la simulación de un movimiento en GeoGebra.	El proyecto, que se desarrolló con antelación y siguiendo las metas de comprensión correspondientes, permitió que los estudiantes terminaran el proyecto exitosamente. Se evidenció la necesidad de establecer más eventos de evaluación formativa.

A partir de la experiencia en el diseño e implementación de algunas unidades de la EpC en los cursos del ciclo básico del CCyT, se consensuaron los siguientes resultados:

Al iniciar los cursos, los estudiantes han comprendido muy poco de los temas y herramientas relevantes para poder acceder a nuevos contenidos y habilidades. Por ejemplo, Fuentes ^[28] registra que, al aplicar el inventario del concepto de fuerza en estudiantes del primer semestre de la UACM, encuentra que solo el 20 % de los estudiantes logran discriminar entre las cantidades físicas de posición, velocidad y aceleración. La mención constante de las metas de comprensión a lo largo de cada unidad y las respuestas de los estudiantes al terminar los desempeños mostraron que las preguntas pueden servir de guía para tener presente el propósito de las actividades que realizaban y explicar las ideas principales en sus propias palabras. La mejoría en la comprensión de los estudiantes coincide con los resultados que se han obtenido en otras investigaciones. En general, hubo un mayor involucramiento en el trabajo de clase y un porcentaje menor de abandono (alrededor del 30 %) en los cursos impartidos bajo el diseño de la EpC.

Los estudiantes aprecian el acercamiento y cambio de modalidad de trabajo en las clases, más centradas en realizar actividades y el trabajo en equipo, aunque muchas veces sienten cierto desconcierto por ser la primera vez en tener una clase diferente, donde lo único que hacen es escuchar la exposición del profesor y copiar las notas del pizarrón. Sin embargo, esta metodología implica dedicarles más tiempo a ciertos contenidos, en detrimento de cubrir todos los temas del curso. En la UACM no existen exámenes departamentales, pero en cursos subsecuentes los profesores esperan que todos los temas del curso hayan sido cubiertos.

Es importante generar espacios formales e informales de intercambio de experiencias en el aula, así como tener al alcance recursos y cursos para poder contar con ejemplos de cómo diseñar y aplicar metodologías innovadoras. Se requiere de mucho tiempo para diseñar actividades de aprendizaje activo, las cuales van requiriendo ajustes conforme se van implementando en las clases. Muchos profesores no tienen el tiempo ni el interés de desarrollar nuevos materiales, por lo que es importante generar un banco de actividades basadas en investigación para que otros profesores puedan ir incorporando a su trabajo docente.

La evaluación formativa, planteada tanto en el proyecto de la UACM como en el marco de la EpC, es difícil de llevar a cabo de manera sistemática, dando una retroalimentación oportuna e individualizada. El grupo de trabajo coincidió en que el rubro de la valoración continua es el que presenta más retos y oportunidades de cambio.

Este ejercicio de reflexión entre profesores de diferentes áreas del conocimiento permitió localizar posibles tópicos generativos comunes al conjunto de cursos que se imparten en el primer año de la carrera relacionados con las áreas de física, matemáticas e informática: la modelación, el concepto de función, el uso de vectores, así como la simulación y predicción de movimiento.

Plaza ^[29] señala que el uso de la modelación matemática como herramienta para resolver problemas permite a los estudiantes contextualizar fenómenos, tanto de la vida real como de la ingeniería. Por tanto, uno de los trabajos a futuro debe ser integrar a los profesores de ingeniería en el diseño de los cursos para incorporar ejemplos donde se utilicen las herramientas para el modelado de sistemas en aplicaciones de la ingeniería.

Como parte del trabajo futuro, se planea trabajar en la evaluación formativa y la elaboración de rúbricas para poder obtener información cuantitativa sobre la comprensión de los estudiantes y los temas que se les dificultan más, para poder desarrollar actividades de desempeño que les apoye con los temas más retadores, y que también involucren conocimientos y herramientas de las distintas áreas del conocimiento presentes en la formación inicial de un estudiante del CCyT.

IV. CONCLUSIONES

La propuesta de la EpC promueve elementos comunes a las iniciativas de aprendizaje activo y que están en concordancia con el proyecto educativo de la UACM:

- Centrar el trabajo en el aula alrededor de actividades que promuevan y desarrollen la comprensión, en lugar de tener una clase únicamente expositiva.
- Discutir colegiadamente los propósitos de aprendizaje, haciendo énfasis en lo que los estudiantes pueden hacer con los conocimientos aprendidos.
- Incluir a la evaluación como parte del proceso de aprendizaje al brindar retroalimentación (oportuna e individual) a los estudiantes a partir de sus desempeños.

- Tomar en cuenta los intereses y experiencias de los estudiantes, así como las concepciones alternativas y temas que les causan dificultad.
- Promover el trabajo en equipo, tanto entre los estudiantes, como con los profesores.

Es importante destacar que la flexibilidad del marco de trabajo permite su implementación en los diferentes cursos básicos de educación superior, realizando las adaptaciones a partir de las necesidades de formación de los estudiantes en este nivel. Puede ser una herramienta fundamental para apoyar a los estudiantes con mayores dificultades, ya que clarifica la relación entre las actividades que realizan con metas de aprendizaje y evaluaciones que dan cuenta de su avance.

Es posible diseñar actividades especialmente enfocadas en atender dificultades particulares y crear andamiajes que permitan a los estudiantes acceder a los conocimientos y herramientas de las carreras del CCyT. El trabajo colegiado juega un papel central en la propuesta de la EpC, por lo que puede convertirse una herramienta para promover la conexión entre los diferentes grupos de profesores a cargo de los diferentes cursos y ciclos de la universidad.

La adaptación de los cursos bajo esta modalidad de trabajo debe realizarse de manera gradual, comenzando por una o dos unidades, y acompañado por un grupo de profesores que apoye el diseño, implementación y seguimiento de las unidades didácticas. El campo de conocimiento de las didácticas de las ciencias, matemáticas e ingeniería resultan imprescindibles para apoyar la consolidación de las propuestas, sobre todo al desarrollar investigaciones para indagar su impacto. El apoyo institucional puede enfocarse en generar los apoyos necesarios para promover la formación docente y el apoyo a la investigación educativa. Se espera que este tipo de trabajos pueda apoyar a la transición, tanto dentro de la UACM como en otras universidades, hacia una práctica docente con mayor apego al principio de enseñanza centrada en el aprendizaje.

REFERENCIAS

- [1] S. Freeman *et al.*, “Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics”, *PNAS*, vol. 111, no. 23, pp. 8410-8415, jun. 2014, doi: 10.1073/pnas.1319030111.
- [2] AAPT, “ComPADRE Portal”. APPT.org. <https://www.aapt.org/ComPADRE/> (accedido: abr. 5, 2023).
- [3] SALTISE, “Supporting Active Learning & Technological Innovation in Studies of Education”. SALTISE.org. <https://www.saltise.ca/> (accedido: abr. 5, 2023).
- [4] C. Engstrom y V. Tinto, “Access without Support Is Not Opportunity”, *Change*, vol. 40, no. 1, pp. 46-50, 2008.
- [5] UACM, *El proyecto educativo de la UACM*. Ciudad de México: Universidad Autónoma de la Ciudad de México, may., 2007.
- [6] M. Silva Laya, “Tres iniciativas de equidad educativa universitaria en la Ciudad de México”, *Revista mexicana de investigación educativa*, vol. 24, no. 80, pp. 43-68, mar., 2019.
- [7] C. A. Guzmán, G. Campaner, y M. L. Gallino, “Dimensión pedagógica - didáctica en docentes universitarios. El caso de Ingeniería”, *Revista Argentina de Enseñanza de la Ingeniería*, año 4, no. 8, pp. 9-18, abr., 2015.
- [8] Harvard Graduate School of Education, “Project Zero”. PZ.harvard. <https://pz.harvard.edu/> (accedido: abr. 7, 2023).
- [9] H. Ruiz, *¿Cómo aprendemos?: Una aproximación científica al aprendizaje y la enseñanza*. Barcelona: Editorial Graó, 2019.
- [10] M. Stone, ed., *Teaching for understanding linking research with practice* (Jossey-Bass education series), 1.ª ed. San Francisco, CA, EUA: Jossey-Bass Publishers, 1998.
- [11] T. Blythe, *The Teaching for Understanding Guide*. Wiley, 1998.
- [12] M. Stone, K. Rennebohm y L. Breit, *Teaching for Understanding with technology* (Jossey-Bass education series), 1.ª ed. San Francisco, CA, EUA: Jossey-Bass, 2005.
- [13] E. Salgado-García, “Enseñanza para la comprensión en la educación superior: la experiencia de una universidad costarricense”, *Rev. iberoam. educ. super.*, vol. 3, no. 8, pp. 34-50, 2012.

- [14] G. H. Hurtado, “Tendencias investigativas sobre el enfoque de enseñanza para la comprensión (EPC) en Hispanoamérica”, *Revista del Centro de Investigación de la Universidad La Salle*, vol. 11, no. 43, jun. 2015.
- [15] A. Jubert, C. Pogliani, A. M. Tocci y A. Vallejo, “Enseñanza para la comprensión en un curso de química a distancia de nivel básico universitario. El blog como herramienta de trabajo”, *Avances en Ciencias e Ingeniería*, vol. 2, no. 1, pp. 97-106, 2011.
- [16] O. D. Morán y R. R. Monasterolo, “Enseñanza-Aprendizaje en Robótica: Construcción de Simuladores como Actividades de Comprensión”, *Form. Univ.*, vol. 2, no. 4, pp. 31-36, 2009, doi: [10.4067/S0718-50062009000400005](https://doi.org/10.4067/S0718-50062009000400005).
- [17] C. P. Mejía Villagrán, “El marco de la enseñanza para la comprensión aplicado al aprendizaje del concepto de campo eléctrico en estudiantes de ingeniería de sistemas”, tesis de maestría, Fac. de Ciencias Humanas, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7911>
- [18] A. Silva, J. Maeyoshimoto, A. Lacaria y I. Idoyaga, “Innovación en un primer curso de física en la universidad en el marco de la enseñanza para la comprensión”, *Revista de Enseñanza de la Física*, vol. 30, no. extra, pp. 135-140, nov. 2018.
- [19] National Research Council, *Adapting to a Changing World: Challenges and Opportunities in Undergraduate Physics Education*. Washington, DC, EUA: The National Academies Press, 2013, doi: [10.17226/18312](https://doi.org/10.17226/18312).
- [20] S. V. Chasteen, K. K. Perkins, P. D. Beale, S. J. Pollock y C. E. Wieman, “A Thoughtful Approach to Instruction: Course Transformation for the Rest of Us”, *J Coll Sci Teach*, vol. 40, no. 4, pp. 24-30, mar. 2011.
- [21] J. P. Mestre y J. L. Docktor, *The Science of Learning Physics: Cognitive Strategies for Improving Instruction*. Singapur: World Scientific Publishing, 2020.
- [22] C. Wieman, *Improving How Universities Teach Science: Lessons from the Science Education Initiative*. Cambridge, MA, EUA: Harvard University Press, 2017.
- [23] R. D. Knight, *Physics for scientists and engineers: A strategic approach with modern physics*, 4.ª ed. Boston: Pearson, 2017.
- [24] R. W. Chabay y B. A. Sherwood, *Matter & interactions*, 4.ª ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2015.
- [25] L. C. McDermott, *Physics by Inquiry: An Introduction to Physics and the Physical Sciences*, vol. 1, 1.ª ed. Wiley, 1995.
- [26] “GeoGebra | Aplicaciones matemáticas gratuitas - Usado por más de 100 millones de estudiantes y profesores de todo el mundo”, GeoGebra.org. <https://www.geogebra.org/> (accedido: jun. 13, 2023).
- [27] “Grasple - Open Education”. Grasple.org. <https://www.grasple.com/> (accedido: jun. 13, 2023).
- [28] C. Fuentes, “Preconceptos de cinemática y fuerza en estudiantes que inician sus estudios de ingeniería”, *REEC: Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, vol. 15, no. 1, pp. 43-52, 2016.
- [29] L. F. Plaza, “Modelación matemática en ingeniería”, *IE Rev. investig. educ. REDIECH*, vol. 7, no. 13, pp. 47-57, oct. 2016.

Aprendizaje de las ciencias: Secado de alimentos como proyecto STEM

Science learning: Food drying as a STEM project

Fátima María Isabel de los Santos García^{1a} , Carmen del Pilar Suárez Rodríguez^{1b}  

¹Universidad Autónoma de San Luis Potosí, {^aFacultad de Ciencias y Facultad de Ingeniería, ^bIngeniería Mecánica Eléctrica, Coordinación Académica Región Huasteca Sur}

RESUMEN

El aprendizaje bajo enseñanza STEM y el trabajo por proyectos se ha extendido ampliamente, pero aún quedan preguntas acerca de su reproducibilidad y eficacia en diferentes contextos académicos latinoamericanos. El objetivo de este trabajo es describir el desempeño de estudiantes de ingeniería de una zona rural y de una urbana de San Luis Potosí, México, en la fabricación de un deshidratador con fines de preservación de alimentos, evitando el uso de la refrigeración y para alargar el tiempo de vida. Se hizo un estudio cualitativo, descriptivo y observacional, con un análisis del proceso de aprendizaje y de los secadores obtenidos. Se encontraron diferencias en la elección de la fuente de energía, el producto a secar, y los materiales utilizados. Los grupos participantes evidenciaron tener empatía, actitudes positivas al trabajo colaborativo y resiliencia, mejoraron sus habilidades de comunicación oral y escrita. Hubo diferencias sobre las concepciones hacia las energías renovables. Los estudiantes refirieron haber cambiado su creencia hacia la complejidad de la fabricación de prototipos y su relación con los modelos matemáticos. Este trabajo puede ser una guía para que profesores menos experimentados puedan desarrollar un proyecto STEM.

PALABRAS CLAVE: STEM; energías renovables; deshidratadora; proyectos STEM; enseñanza.

ABSTRACT

Learning under STEM teaching and project work has spread widely, but questions remain about its reproducibility and effectiveness in different Latin American academic contexts. The objective of this work is to describe the performance of engineering students from a rural and urban area of San Luis Potosí, Mexico, in the manufacture of a dehydrator for food preservation purposes, avoiding the use of refrigeration and to lengthen the life span. A qualitative, descriptive, and observational study was carried out, analyzing the learning process and the results obtained. Differences were found in the choice of energy source, the product to be dried, and the materials used. The groups that participated showed empathy, positive attitudes to collaborative work, and resilience and improved their oral and written communication skills. There were differences in the concepts towards renewable energies. The students reported having changed their beliefs towards the complexity of prototyping and its relationship with mathematical models. This work can guide less experienced teachers to develop a STEM project.

KEYWORDS: renewable energy; dehydrator; STEM projects; science teaching.

Correspondencia:

DESTINATARIO: Carmen del Pilar Suárez Rodríguez.
INSTITUCIÓN: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
DIRECCIÓN: Km 5, Carretera Tamazunchale San Martín,
Tamazunchale, San Luis Potosí, México, C. P. 79960.
CORREO ELECTRÓNICO: pilar.suarez@uaslp.mx

Fecha de recepción: 20 de noviembre de 2023. **Fecha de aceptación:** 12 de diciembre de 2023. **Fecha de publicación:** 28 de diciembre de 2023.



I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático es evidente y una de las causas es el incremento de los gases de efecto invernadero producido por la quema de combustibles fósiles, que se detonó desde la primera revolución industrial. En la agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) se han identificado 17 Objetivos para el Desarrollo Sustentable (ODS) ^[1], los cuales están interconectados, es decir, si se fomenta el crecimiento económico bajo un enfoque sostenible habrá una disminución de la pobreza y una protección del medio ambiente, lo cual ocurre más fácilmente con una población educada científicamente y con una visión de paz y justicia.

Para atender las necesidades de un mundo en constante cambio ^{[2], [3]}, la enseñanza de las ciencias se ha transformado sustancialmente en los últimos años, especialmente en el área de la física para la ingeniería.

Las metodologías de enseñanza centradas en el estudiante a través del aprendizaje activo han ido ganando terreno ^[4]. Las investigaciones educativas también han girado en torno a aspectos como la transformación conceptual ^[5]; efectividad de recursos para el aprendizaje ^{[6], [7]}; la enseñanza virtual e híbrida ^[8]; las percepciones acerca de la naturaleza de la ciencia ^[9] y el desarrollo de habilidades cognitivas y socioemocionales ^{[10], [11]}. También ha habido un crecimiento en instrumentaciones didácticas e implementación de proyectos educativos basados en la educación STEM (por la siglas en inglés de Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas) para estudiantes de todos los niveles educativos ^[12], ya que ofrece una oportunidad para formar científicos y tecnólogos, pero también para las ciudadanías ^[13].

Si durante la instrucción no se promueve la movilización de saberes, al egresar a los estudiantes se les complica la inserción al mundo laboral, especialmente porque no han profundizado en algún área de especialización y de investigación ^{[14], [15]}.

Cuando se integra el diseño, la selección de materiales y la construcción de objetivos en las tareas realizadas por los ingenieros en formación, se van adentrando en los aspectos teóricos de funcionamiento de prototipos, del cómo funcionan y qué problemáticas pueden tener para los usuarios, así como la instalación y mantenimiento de estos. También, crean oportunidades de em-

prendimiento para su venta y comercialización ^[16]. En este sentido, las actividades de enseñanza-aprendizaje trascienden al aula y se convierten en una oportunidad para la creación de soluciones a los problemas del contexto cercano del estudiante, especialmente importante en comunidades rurales donde existen grandes brechas de desigualdad e inequidad ^{[17], [18]}.

En este trabajo se describe una experiencia de implementación de un proyecto basado en educación STEM, cuyo producto es la fabricación de un secador de hortalizas y de pan. El proyecto se llevó a cabo con estudiantes de segundo semestre de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) de Ingeniería en Nanotecnología y Energías Renovables, ubicada en una zona urbana de San Luis Potosí y de Ingeniería Mecánica Eléctrica, ubicada en una zona rural de Tamazunchale, México.

A. SELECCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA STEM

Desde el ámbito escolar, es común que los problemas que se resuelven en la clase están relacionados más con el contenido disciplinar que se atiende en ese momento que con la identificación de problemas de otra área del conocimiento y menos aún con el entorno ^[19].

Cuando se trabaja en STEM se observa un problema de una manera integral, considerando diferentes aspectos de una situación e identificando los distintos abordajes y disciplinas ^[19]. La observación del entorno y una discusión basada en una lluvia de ideas con los estudiantes es un buen punto de partida. Es importante que las propuestas realizadas por los estudiantes sean consideradas dentro del planteamiento del problema ya que así están cercanos a sus intereses, lo cual se ve reflejado en su motivación y seguridad para llevar a buen término el trabajo. También es importante plantear en colaboración las reglas del trabajo.

Como parte del rol docente, una vez establecida una situación es recomendable hacer una planeación didáctica donde el profesor identifique los contenidos de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas que se relacionan con el problema y su solución. También, que identifique las habilidades a desarrollar: procedurales, cognitivas, del pensamiento, de comunicación, etc. Es importante considerar lo siguiente:

- Los recursos que estarán a disponibilidad de los estudiantes.

- Las herramientas y técnicas.
- Si es necesario integrar un conocimiento nuevo.
- Si se propone un mecanismo para la adquisición de este conocimiento.
- Las rúbricas de evaluación.
- Las fechas de entrega.

La gestión del tiempo es importante para determinar el nivel de profundidad con el que se trabajará, la metodología de enseñanza (aprendizaje basado en proyectos, casos, problemas, indagación, etc.) y, sobre todo, el producto que construirán los estudiantes.

Una parte esencial del proceso instruccional es identificar las preguntas clave que orientarán a los estudiantes a lo largo del desarrollo del producto y que les guiará a hacer sus propios planteamientos y buscar sus respuestas no solo en la búsqueda bibliográfica, sino también dentro el mismo proceso de experimentación.

En este trabajo se aplicó la ingeniería a la solución de los problemas del campo debido a que San Luis Potosí es un estado rico en biodiversidad, especialmente en la zona huasteca donde se cultivan cereales, frutas y hortalizas, pero que no siempre son aprovechados [20], [21], donde en ocasiones se siembra, pero el bajo costo de venta desmotiva a los productores a su corte y se pierde la cosecha [22], coincidente con un problema de otras regiones [23]. También, los productos se descomponen al no venderse rápidamente. Además de las pérdidas económicas se produce contaminación en el ambiente y exceso de fauna nociva, teniendo un desperdicio de millones de toneladas [24], [25].

Lo anterior ha generado con el tiempo el abandono a esta labor productiva y migración de los campesinos a grandes ciudades nacionales o extranjeras buscando un empleo digno y mejor remunerado, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria y la calidad de vida de estas personas [26], [27]. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), entre 2015 y 2020 salieron de San Luis Potosí 70 551 personas para radicar en otra entidad y solamente en 2020 emigraron 25 569 personas para vivir en otro país (92 de cada 100 se fueron a Estados Unidos de América) [28].

Se asume que procesar los productos del campo hace que se incremente su valor comercial y se alargue la vida de anaquel. Para aumentar el tiempo de vida de los

alimentos se utilizan varios métodos: salado, cristalización, escaldado, congelamiento y secado, entre otros.

Para esta investigación se seleccionó buscar formas de realizar el secado, preferentemente con un bajo consumo energético. Desde épocas antiguas se han usado hornos o la exposición al sol para el secado y deshidratación de fibras, frutas, hortalizas y carnes [29].

B. EL SECADO DE PRODUCTOS AGRÍCOLAS

El objetivo del secado es reducir la cantidad de agua en el alimento, de tal manera que pueda preservarse por un periodo de 6 meses a un año, sin la necesidad de refrigeración o de agregar conservadores, dándole de esta forma un valor agregado [30].

La *actividad del agua* (*aw*, por sus siglas en inglés) en los alimentos es la cantidad de agua libre en estos, es decir, el agua disponible para el crecimiento de microorganismos y para que se puedan llevar a cabo diferentes reacciones químicas. Tiene un valor entre 1.0 y 0.0. Cuanto menor sea este valor, mejor se conservará el producto.

Para secar alimentos se pueden utilizar varias técnicas, siendo la más común el quemar algún combustible fósil para generar aire caliente, que se hace circular por una cámara de secado donde se encuentra el alimento. El aire caliente extrae la humedad del alimento en forma de vapor, que es expulsado de la cámara de secado.

Los dos grupos de estudiantes que participaron en el proyecto utilizaron técnicas diferentes. El grupo de Ingeniería Mecánica Eléctrica (IME) tuvo la opción de decidir qué técnica y diseño utilizaría. El grupo de Ingeniería en Nanotecnologías y Energías Renovables (INER) usó energías provenientes de los rayos del sol, aplicando el concepto de deshidratadores solares.

Un deshidratador puede construirse con diferentes materiales y en diferentes maneras, entre ellas las siguientes:

- El más simple es el exponer al sol directamente sobre una superficie. Es barato, pero más lento y suele contaminarse por el medio ambiente (polvo) y por animales que pueden caminar sobre el alimento.
- El deshidratador por convección natural toma el agua del alimento y la extrae en forma de vapor, de-

jando que salga normalmente por la diferencia de densidades. Este proceso repetitivo seca el alimento.

- Si se coloca un ventilador se acelera el proceso de expulsión de vapor, lo que se llama convección forzada.
- Si se coloca una fuente de calor externa, el proceso de expulsión de vapor se acelera y se le llama sistema híbrido.

En la [Figura 1](#) se muestra la clasificación de los deshidratadores solares ^[31].

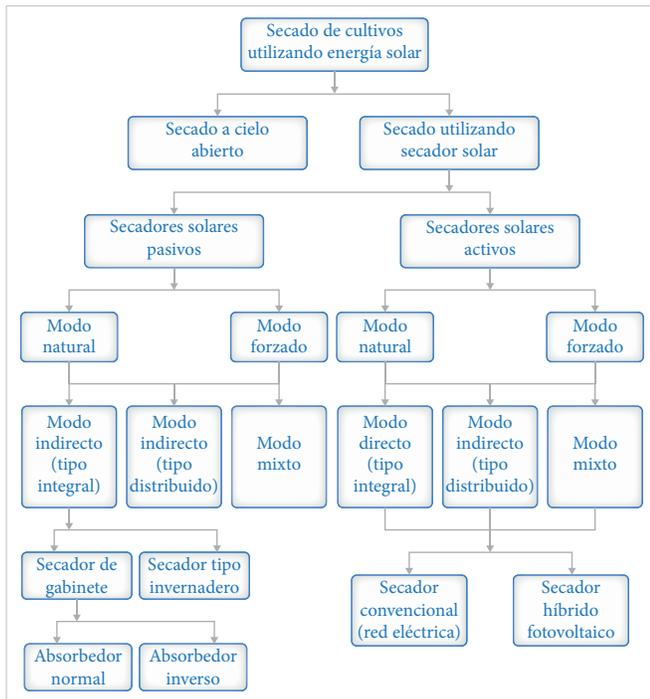


Figura 1. Clasificación de deshidratadores solares, con base en ^[31].

Los conceptos sobre deshidratadores, propiedades térmicas de los materiales, proceso de deshidratación y las propiedades de los materiales a secar fueron explicados a los estudiantes, quienes solamente habían tomado un curso de física general.

Los resultados del deshidratado solar de alimentos están ligados directamente a la radiación solar (en unidades de W/m^2), a la humedad del ambiente y la temperatura. Se revisaron ejemplos reportados en la literatura ^{[31], [32]}, así como la diversidad de sistemas e instalaciones de secado y, especialmente, que usan la energía solar térmica para la conservación de productos agrícolas.

II. METODOLOGÍA

En la zona urbana de San Luis Potosí se solicitó a los estudiantes INER un deshidratador solar, cuyo costo de fabricación no debería de exceder los 2000 pesos mexicanos (aproximadamente 100 dólares al tipo de cambio de 1 dólar por 20 pesos, en ese momento). En cada prueba de deshidratado, los estudiantes pesaron la muestra antes de meterla al deshidratador y registraron las horas que estuvo dentro. Al final, pesaron nuevamente la muestra, para luego calcular la cantidad de agua pérdida de la muestra. Se registró la radiación solar, la temperatura y la humedad relativa de ese día, con base en la capacitación de cómo utilizar los datos de página de la estación de San Luis Potosí del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

Para la zona rural de Tamazunchale, al grupo de estudiantes IME se le dio libertad de elegir la fuente de energía para el secado y el diseño. Una vez terminado, los estudiantes midieron la temperatura con respecto del tiempo, tanto en el calentamiento como en el enfriamiento, graficaron los datos y compararon con la solución analítica usando la ley de enfriamiento de Newton. Los estudiantes observaron las características del deshidratado y seleccionaron deshidratar un pan tipo bolillo.

Los conocimientos y habilidades para desarrollar en el estudiante durante el proyecto se muestran en la [Tabla 1](#).

A. CONCEPTOS BÁSICOS

Se solicitó a los estudiantes realizar un diseño que utilizara material fácil y económico, durable y con diseño robusto para soportar las condiciones climatológicas.

La idea final del proyecto fue desarrollar los deshidratadores y mecanismos para transferir la tecnología a comunidades rurales. Por esto, los estudiantes incluyeron dibujos con las dimensiones de los diseños, de preferencia usando el dibujo técnico para estandarizar los diagramas de construcción.

Se propuso a los estudiantes que usaran la metodología Design Thinking y que dieran evidencia de su implementación en cada fase en su reporte escrito. Las fases de esta metodología son empatizar, definir, idear, prototipar y evaluar. Cada fase del desarrollo del proyecto se presenta en la siguiente sección.

TABLA 1
IDENTIFICACIÓN DE LOS APRENDIZAJES ESPERADOS Y ELEMENTOS DE ANÁLISIS PARA EL DESEMPEÑO

STEM	DESCRIPCIÓN DE SABERES
Ciencia	(a) Ciencia de los materiales: propiedades de los materiales; (b) método científico: conocimiento y aplicación; (c) física: mecanismos de transferencia de calor, energía para la evaporación, pérdida de calor y sus efectos, consumo energético, eficiencia energética; (d) economía: revisión del contexto, gestión de los recursos; (e) ecología: conocimiento del medio ambiente.
Tecnología	(a) Dibujo técnico, uso de software de diseño (SolidWorks, AutoCAD o Inventor); (b) búsqueda de bibliografía y manejo de bases de datos.
Ingeniería	(a) Diseño ingenieril; (b) design thinking; (c) procesos de manufactura.
Matemáticas	(a) Relación entre variables; (b) modelación matemática.
Habilidades cognitivas	(a) Pensamiento crítico; (b) razonamiento lógico
Habilidades socioemocionales	(a) Tolerancia a la frustración cuando los diseños no funcionen al primer intento; (b) responsabilidad; (c) autoconfianza y autoestima; (d) trabajo colaborativo; (e) comunicación efectiva; (f) ética; (g) negociación.
Complementarias	(a) Consumo responsable; (b) emprendimiento; (c) metacognición.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Este trabajo se centra más en discutir acerca de la implementación del STEM que en la evaluación de los secadores y su eficiencia. No se evalúan las propiedades de los productos secados, aunque sí se hace una descripción cualitativa superficial para asociarlos al tipo de equipo construido y las habilidades de los estudiantes utilizadas en el proceso.

Se solicitaron avances periódicos por escrito del proyecto para dar retroalimentación a los estudiantes y asesorarlos con respecto al diseño la selección del material y la manufactura del deshidratador.

A. PRIMERA ENTREGA DE AVANCES

Como parte de la primera entrega, se trabajó en la fase *empatizar* del Design Thinking. Para ello, los estudiantes formaron los equipos de trabajo, definieron los roles de cada uno y organizaron el trabajo colegiado, es decir, cómo debían organizar la información y cuáles recursos iban a utilizar. También, revisaron información relacionada a la preservación de los alimentos y sus propiedades, así como los tipos de deshidratadores y sus mecanismos. Durante la fase *definir*, a partir del análisis anterior los estudiantes seleccionaron qué tipo de alimento iban a secar y qué tipo de horno deseaban construir, así como el tipo de energía a utilizar.

Para la fase *idear*, los estudiantes incluyeron en el reporte tres propuestas diferentes.

El *prototipado* debía considerar lo siguiente:

- Cuáles fueron las razones para la elección de una propuesta final y en qué basaron la decisión final para descartar dos de ellas.
- La descripción de las propiedades que debería tener un material. Por ejemplo, en qué partes se necesitaría aislamiento térmico o buena conductividad térmica y qué materiales tienen esas características.
- La evaluación de las propiedades del alimento a secar.
- El diseño elaborado a lápiz o con un software de diseño como SolidWorks, para hacer el proyecto más profesional.

Los estudiantes de INER no habían cursado en ese momento una materia de diseño ni dibujo técnico, por lo que debieron de aprender de manera independiente. Debían incluir dimensiones e isométrico de cómo sería la construcción final de su deshidratador. Los programas como SolidWorks e Inventor permiten mostrar la pieza dibujada en tres dimensiones, por lo que los estudiantes no solo se imaginaron cómo es su diseño, sino que además cuantificaron la cantidad de material a utilizar. En cambio, los estudiantes de IME no tuvieron el problema de la falta del curso previo, ya que habían cursado la materia de geometría diferencial y dibujo técnico. Lo anterior hace evidente la importancia de tener un currículo adecuado a las nuevas condiciones del contexto, como es el diseño asistido por computadora para la ejecución de los proyectos, especialmente en el área STEM.

En la [Figura 2](#) se muestra un ejemplo de la primera entrega del diseño de uno de los deshidratadores solares con las herramientas que tenían a la mano.

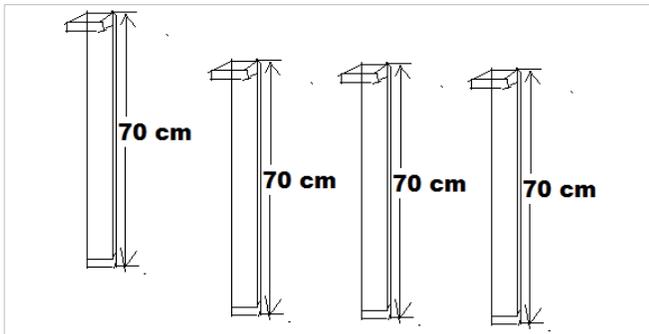


Figura 2. Patas de un deshidratador.

B. SEGUNDA ENTREGA DE AVANCES

Para la fase *prototipado* y con un diseño preliminar, los estudiantes construyeron el prototipo, para lo cual hicieron la lista de los materiales a utilizar y argumentaron, con base en las propiedades de estos, las razones por las que los seleccionaron.

Se les solicitó buscar los materiales en el mercado y contactar proveedores para cotizar y aprender cómo negociar en las compras, para luego comprar el material para su diseño, cuidando que no excediera el costo máximo. Se espera que una vez mejorados, los diseños puedan ser fabricados para su uso en comunidades rurales.

En la [Figura 3](#) se muestra un ejemplo de cómo los estudiantes representaron las dimensiones de las patas que tendría su deshidratador. En esta etapa aún no llegan a un diseño fino del deshidratador, pero se avanzó con respecto a su primera propuesta.

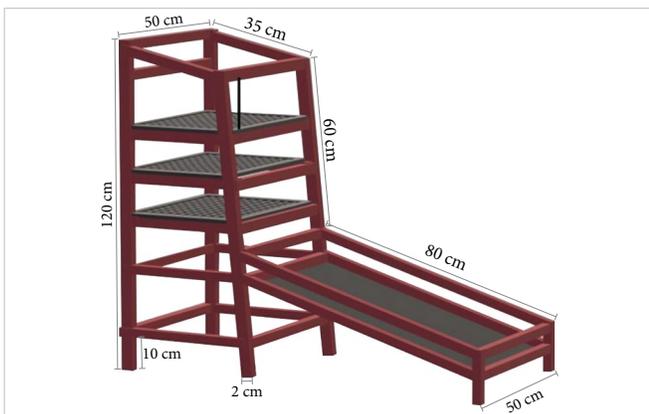


Figura 3. Diseño inicial de un prototipo deshidratador base metálica con medidas elaborado por un equipo.

Esta fase fue particularmente más difícil para los alumnos de Tamazunchale, ya que no se tenía un proveedor que vendiera un material reflejante adecuado y no podían pagar más de 300 pesos por prototipo, por lo que decidieron no hacer un deshidratador solar, sino otro usando otros medios de secado.

En esta fase, los estudiantes pudieron hacer modificaciones al diseño y a la selección de los materiales del deshidratador antes de la segunda entrega, lo cual ocurrió en todos los casos, es decir, al menos cambiaron un elemento del diseño, tanto en la selección de los materiales como en las dimensiones del prototipo. También, al tener mayor conocimiento de las propiedades de los alimentos, cambiaron el secado de semillas por el de hortalizas para el caso de los estudiantes de INER y por pan, en el caso de los estudiantes de IME.

Las propuestas de cada equipo fueron presentadas ante grupo y se hicieron recomendaciones entre sí. Esto les permitió afinar su propuesta al tener una idea más clara de cómo debían realizar las acotaciones y las dimensiones de sus deshidratadores solares.

Los grupos realizaron pruebas por las tardes, al salir de clases, en los deshidratadores del hábitat (para el caso de la INER) y en el laboratorio STEM (para el caso de la IME).

En la [Figura 4](#) se muestran imágenes del avance en los diseños del deshidratador, incluyendo la manufactura de uno de los equipos de IME.

Los resultados de una tarea realizada durante la fase *empatizar* se muestra en la [Figura 4a](#). La primera selección a partir de la revisión bibliográfica funcionaba con el calentamiento de una resistencia eléctrica.

En la fase *idear*, al enfrentarse al problema de la construcción eléctrica del dispositivo, los estudiantes decidieron cambiar de tipo de horno de secado, eligiendo otros materiales, y pensaron hacerlo con carbón, el diseño con el software se muestra en la [Figura 4b](#).

Las [Figuras 4c](#) y [4d](#) se refieren a la fase de *prototipado*. Este equipo aprendió a soldar para armar la estructura y se enfrentaron a problemas de ahumado en el interior al no considerar los efectos de la quema de carbón, por lo que posteriormente abrieron unas ranuras.

En la Figura 4e se muestra el deshidratador finalizado en operación para la fase final de *evaluar*.

La Figura 4f muestra las mediciones de las temperaturas a diferentes tiempos. Los estudiantes identificaron las condiciones iniciales y resolvieron la ecuación diferencial propuesta, compararon los datos analíticos con los experimentales y dieron explicaciones a las diferencias.

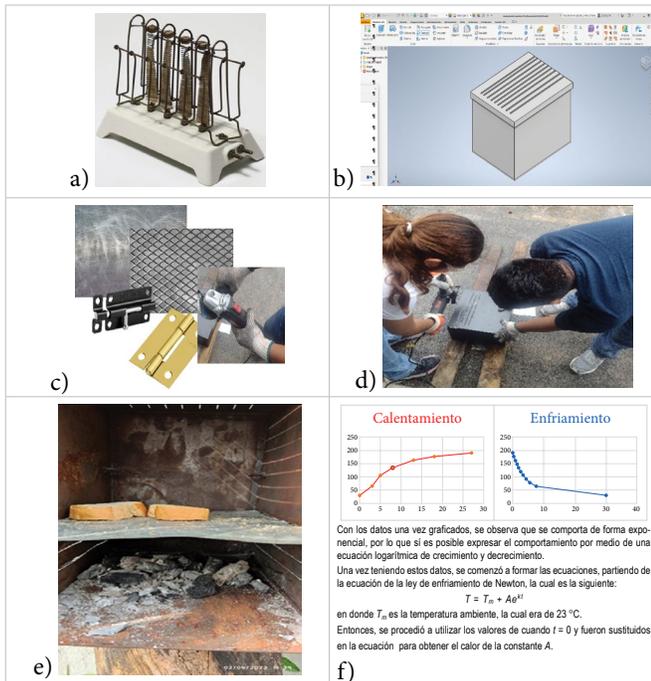


Figura 4. Diferentes fases del Design Thinking de un equipo de Tamazunchale.

Se expusieron en plenaria los avances de cada proyecto, compartiendo las dificultades y experiencias durante el diseño y si las decisiones que habían tomado habían tenido algunas consecuencias. Los prototipos mejoraron, pero aún presentaban dificultades en su operación.

Para el caso de la INER, se les recordó que la prueba final de todos los deshidratadores se realizaría en el techo del Instituto de Física de la UASLP, es decir, se colocarían todos juntos para asegurar que estuvieran expuestos los prototipos a las mismas condiciones meteorológicas, como temperatura, sol, sombra, radiación UV, humedad, precipitación, y poder comparar los resultados.

LA PRUEBA FINAL

Para la INER, la última prueba que se realizó a los deshidratadores fue la de intemperie. Se dejaron los deshidratadores en el techo del Instituto del Física durante

todo el mes de diciembre de 2022 y se registraron los estragos de los deshidratadores ocasionados por el sol, la lluvia y el viento. Algunos de los equipos no resistieron la prueba. A continuación se describen los problemas encontradas en estas pruebas.

Con respecto a las pruebas de deshidratación, los estudiantes se encontraron con el problema de que en días nublados los alimentos no se deshidrataban y se generaba moho, llegaron a sus propias conclusiones y determinaron que la cantidad de humedad en el ambiente era alta, por lo cual no podía deshidratarse el alimento, y que la temperatura máxima de trabajo de esos deshidratadores era de 45 °C, por debajo de lo que menciona la bibliografía. Los resultados de los secadores solares se muestran en la [Tabla 2](#).

TABLA 2
DESHIDRATORAS SOLARES DE HORTALIZAS DE LA ZONA URBANA DE SAN LUIS POTOSÍ

MATERIAL DE LA ESTRUCTURA	RESULTADOS DE LA PRUEBA DE INTEMPERIE	PROTOTIPO
Unicel	Se desarmó a la primera ráfaga de viento y por la lluvia.	
Plástico parecido al policarbonato	Se cayó por ser ligero. El alimento no se deshidrató correctamente porque no llegó a la temperatura adecuada.	
Madera cubierta de vidrio	No tuvo equilibrio, se cayó y se rompió el vidrio del deshidratador.	
Cubo de metal con tapa movible de madera	El viento tiró la tapa y se rompió el vidrio del deshidratador.	
Aluminio cubierto con doble vidrio	Sobrevivió la prueba.	
Refrigerador reusado, acondicionado con vidrio	Sobrevivió la prueba.	

Los reportes entregados por los estudiantes incluyeron lo siguiente:

- Índice.

- Antecedentes del problema y descripción histórica de los secadores.
- Introducción, donde se solicitó integrar una revisión de los productos de la región y cómo se podrían aprovechar, así como los fundamentos del secado y la físico-química del proceso.
- Descripción y análisis de los materiales y sus propiedades.
- Costo y cotizaciones.
- Método de fabricación, materiales y técnicas.
- Evidencia gráfica.
- Bibliografía.
- Anexos.

Los trabajos se revisaron con una rúbrica y, en general, cumplieron con al menos el 80 % de los puntos anteriores y además tuvieron problemas con la redacción y construcción de las ideas y errores de ortografía, pero mejoraron con respecto a la primera entrega, donde la parte de la evolución histórica la habían copiado de algunas fuentes. En este aspecto, en el reporte final hicieron líneas del tiempo, tablas o algún otro organizador gráfico, evidenciando un procesamiento de la información. También reflexionaron acerca del plagio y la importancia de hacer las referencias de manera correcta.

En cuanto a la evaluación de los productos en el caso de INER, se solicitó a los estudiantes dar evidencia específica sobre las propiedades del secado del material y del monitoreo de la temperatura para evaluar la eficiencia del horno, información que representaron en tablas. Los estudiantes hicieron explicaciones acerca de por qué tenía el producto cierta consistencia basada en los resultados del porcentaje de humedad del alimento y lo relacionaron con las características meteorológicas y con la funcionalidad del secador. En general, las explicaciones estuvieron fundamentadas e hicieron asociaciones correctas.

Para el caso de IME, se hizo una presentación mostrando el comportamiento del horno y explicando lo expuesto en el reporte por escrito. Los estudiantes se centraron en la explicación del enfriamiento y calentamiento, comparando el comportamiento teórico con el experimental a partir de la ecuación diferencial del prototipo. También, discutieron las diferencias de operación entre los prototipos y explicaron en términos de los materiales y la fuente de energía. En la [Tabla 3](#) se describen algunos de los deshidratadores de pan.

TABLA 3
DESHIDRATADORES DE PAN DE LA ZONA RURAL DE TAMAZUNCHALE

TIPO DE HORNO	DESCRIPCIÓN	IMAGEN
Convección, con alcohol sólido	Tuvo problemas en la fabricación, alcanzó una temperatura máxima de 191 °C y produjo un buen producto.	
Convección, con carbón o leña	Al inicio, el horno fue completamente cerrado y el pan se ahumó. Al final mejoró mucho la consistencia del tostado del pan.	
Conducción, resistencia eléctrica	La funcionalidad fue buena y pudo cumplirse el objetivo.	
Conducción, resistencia eléctrica	El diseño consideró una parte reflejante para el tostado superior del pan, aunque tuvo poca estabilidad.	

En este proyecto se puso de manifiesto el manejo de contenidos programáticos, el análisis crítico, la búsqueda y selección de la información, además de que se desarrolló en un ambiente de respeto, responsabilidad y colaboración.

En las conclusiones del informe final, los estudiantes expresaron cómo este proyecto había cambiado su visión acerca de la construcción de su propio conocimiento, ya que generalmente resuelven ejercicios haciendo cálculos muy específicos sin que necesariamente tengan una forma de comprobar los resultados.

Los estudiantes afirmaron tener una mayor comprensión de la modelación matemática y su relación con la ingeniería, especialmente con el diseño de maquinaria y otros equipos. También expresaron que había cambiado la creencia de que hacer estos proyectos no requería de “mucho conocimiento teórico” y que lo veían más como una actividad práctica y de manipulación de material “tipo artesanía” que como un desarrollo ingenieril. Explicaron que para construir un prototipo eficiente y duradero necesitaban de más tiempo y otras pruebas y habilidades que no tenían. Estas reflexiones de los

alumnos dan evidencia de que encuentran el sentido entre lo práctico y lo teórico.

Los contextos de estos dos grupos son diferentes debido a su ubicación geográfica y nivel de conocimientos: los puntajes del examen de ingreso a la universidad de estos estudiantes son muy diferentes y los laboratorios en la zona rural son más limitados. A pesar de esto, los productos presentados por los estudiantes cumplieron las características requeridas por las profesoras y pudo evidenciarse que, en coincidencia con las investigaciones reportadas en otros contextos, una actividad de aprendizaje en STEM puede movilizar saberes siempre y cuando exista un acompañamiento docente adecuado y con una planeación bien ejecutada ^[33].

Desde una educación STEM pueden construirse experiencias que abonen al patrimonio cultural y natural, que son claves para el beneficio social y el desarrollo ^[34].

Los resultados y discusiones de este apartado se basaron en las categorías de análisis para el desempeño enlistadas a continuación:

- Conocimientos disciplinares aplicados.
- Habilidades socioemocionales.
- Funcionalidad del prototipo.
- Reporte final.
- Presentación final.
- Creencias hacia la importancia del desarrollo del proyecto.

Una diferencia significativa entre los grupos fue la preocupación por las energías renovables, ya que los estudiantes de INER tienen presente este tema, no así los de IME de la comunidad rural, por lo que resalta la necesidad de reflexionar más ante esta situación. Se propone preparar una serie de talleres cortos sobre este tema y sobre redacción de textos y comunicación oral, así como un curso de soldadura y manejo de herramientas.

IV. CONCLUSIONES

La idea central del proyecto es que los estudiantes desarrollen sus actividades de diseño e investigación y puedan tomar las decisiones para la selección de los materiales de cualquier proyecto en el que se involucren en el futuro, especialmente ir despertando en ellos el interés por la solución a los problemas de su contexto

y la generación de propuestas que podrían convertirse en un emprendimiento, no solo para beneficio personal sino colectivo.

La demanda energética va en incremento y debido al cambio climático urgen propuestas para satisfacer estas necesidades, cuidando el medio ambiente, ya que es un tema de justicia social. La formación de ingenieros con una perspectiva de desarrollo sustentable ayuda a alcanzar estos objetivos y promover una visión desde la ciudadanía para hacer cambios políticos, socioeconómicos, educativos y ambientales que mejoren la calidad de vida.

En este trabajo se ha abordado como problemática la fabricación de prototipos para el secado de hortalizas y otros alimentos. Se ha visto que los estudiantes del primer año aún mantienen una visión de uso de combustibles fósiles, a diferencia de los estudiantes de INER.

Colaborar con equipos de otras escuelas ayuda a completar una visión holística de la práctica de la ingeniería, la aplicación de los conocimientos y de responsabilidad social. Para continuar con este trabajo, como tarea a futuro se buscará la implementación del proyecto y se harán análisis más profundos sobre el funcionamiento de los hornos y se formarán grupos multidisciplinarios con estudiantes de Ingeniería Agroindustrial y de Ingeniería Química de la UASLP.

Una parte importante de los resultados obtenidos es que los estudiantes comprendieron la dificultad del diseño y construcción de cualquier tipo de proyecto y aprendieron a trabajar en equipo, a negociar las ideas de sus propuestas y que pueden ser capaces de realizar la toma de decisiones, lo cual resulta fundamental para el ejercicio de la ingeniería y para la vida.

En las últimas décadas se han buscado alternativas para diseñar procesos y equipos que realicen de manera eficiente las tareas, utilizando energías renovables, pero no todas las personas tienen clara su importancia. Esto es evidente en los estudiantes de un entorno rural, donde las personas suelen cocinar con leña, lo cual es parte de su cultura.

REFERENCIAS

- [1] UNESCO. “UNESCO y los Objetivos de Desarrollo sostenible”. UNESCO.org. <https://es.unesco.org/sdgs> (accedido: ag. 3, 2023).

- [2] NGSS Lead States. “Next generation science standards: For States, by States”. [nationalacademies.org. https://nap.nationalacademies.org/catalog/18290/next-generation-science-standards-for-states-by-states](https://nap.nationalacademies.org/catalog/18290/next-generation-science-standards-for-states-by-states) (accedido: ag. 21, 2023).
- [3] OECD. “PISA 2024 strategic vision and direction for science”. OECD.org. <https://www.oecd.org/pisa/publications/PISA-2024-Science-Strategic-Vision-Proposal.pdf> (accedido: ag. 21, 2023).
- [4] R. Cassidy y A. Ahmad. “Evidence for conceptual change in approaches to teaching”, *Teach. High. Educ.*, vol. 26, n.º 5, pp. 742-758, 2021, doi: [10.1080/13562517.2019.1680537](https://doi.org/10.1080/13562517.2019.1680537).
- [5] A. Hafizhah Putri, A. Samsudin y A. Suhandi, “Exhaustive studies before covid-19 pandemic attack of students’ conceptual change in science education: a literature review”, *J. Turk. Sci. Educ.*, vol. 19, n.º 3, pp. 808-829, 2022, doi: [10.36681/tused.2022.151](https://doi.org/10.36681/tused.2022.151).
- [6] P. J. Grimaldi, D. Basu Mallick, A. E. Waters y R. G. Baraniuk, “Do open educational resources improve student learning? Implications of the access hypothesis”, *PloS one*, vol. 14, n.º 3, 2019, doi: [10.1371/journal.pone.0212508](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212508).
- [7] J. Zeng, S. Parks y J. Shang, “To learn scientifically, effectively, and enjoyably: A review of educational games”, *Hum Behav & Emerg Tech*, vol. 2, n.º 2, pp. 186-195, 2020, doi: [10.1002/hbe2.188](https://doi.org/10.1002/hbe2.188).
- [8] E. Hehir, M. Zeller, J. Luckhurst y T. Chandler, “Developing student connectedness under remote learning using digital resources: A systematic review”, *Educ Inf Technol*, vol. 26, n.º 5, pp. 6531-6548, 2021, doi: [10.1007/s10639-021-10577-1](https://doi.org/10.1007/s10639-021-10577-1).
- [9] J. Håkansson y M. Summer, “Toward a consensus on the nature of empathy: A review of reviews”, *Patient Educ. Couns.*, vol. 104, n.º 2, pp. 300-307, 2021, doi: [10.1016/j.pec.2020.08.022](https://doi.org/10.1016/j.pec.2020.08.022).
- [10] N. Molina-Ruiz, P. González-García, “Ciencias naturales y aprendizaje socioemocional: una experiencia desde la enseñanza de las ciencias basada en la indagación”, *Saberes Educativos*, n.º 6, 2021, pp. 25-58, doi: [10.5354/2452-5014.2021.60683](https://doi.org/10.5354/2452-5014.2021.60683).
- [11] K. Aragundi y C. Game-Varas, “Enseñanza creativa en entornos virtuales para el desarrollo de competencias emocionales”, *Revista Innova Educación*, vol. 3, n.º 4, pp. 71-82, 2021, doi: [10.35622/j.rie.2021.04.005](https://doi.org/10.35622/j.rie.2021.04.005).
- [12] W. Park y H. Cho, “The interaction of history and STEM learning goals in teacher-developed curriculum materials: opportunities and challenges for STEAM education”, *Asia Pacific Educ. Rev.*, vol. 23, pp. 457-474, 2022, doi: [10.1007/s12564-022-09741-0](https://doi.org/10.1007/s12564-022-09741-0).
- [13] M. C. Ramos, B. Castillo y C. M. Godoy, “Ciencias para la ciudadanía: avances para enfrentar los desafíos de formar ciudadanos alfabetizados científicamente en Chile”, *Educación*, vol. 32, n.º 63, pp. 5-20, 2023, doi: [10.18800/educacion.202302.A001](https://doi.org/10.18800/educacion.202302.A001).
- [14] D. R. T. Huamán, “Desarrollo de habilidades investigativas desde la experiencia de los estudiantes de ingeniería”, *Revista de la Universidad del Zulia*, vol. 12, n.º 32, pp. 400-413, 2021, doi: [10.46925//rdluz.32.24](https://doi.org/10.46925//rdluz.32.24).
- [15] R. I. Laguado, P. Ramírez y F. Y. Hernandez, “El aprendizaje basado en proyectos, una experiencia en las prácticas industriales del Programa de Ingeniería Industrial de la UFPS”, *BISTUA*, vol. 17, n.º 3, pp. 80-89, 2019, doi: [10.24054/01204211.v3.n3.2019.3568](https://doi.org/10.24054/01204211.v3.n3.2019.3568).
- [16] Y. Snihur, W. Lamine y M. Wright, “Educating engineers to develop new business models: Exploiting entrepreneurial opportunities in technology-based firms”, *Technol Forecast Soc Change*, vol. 164, p. 119518, 2021, doi: [10.1016/j.techfore.2018.11.011](https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.11.011).
- [17] E. Gavari-Starkie, P. T. Espinosa-Gutiérrez y C. Lucini-Baquero, “Sustainability through STEM and STEAM Education Creating Links with the Land for the Improvement of the Rural World”, *Land*, vol. 11, n.º 10, p. 1869, 2022, doi: [10.3390/land11101869](https://doi.org/10.3390/land11101869).
- [18] L. E. Grimes, M. A. Arrastía-Chisholm y B. Bright, “How can they know what they don’t know? The beliefs and experiences of rural school counselors about STEM career advising”, *TPRE*, vol. 9, n.º 1, pp. 74-90, 2019, doi: [10.3776/TPRE.2019.V9N1P74-90](https://doi.org/10.3776/TPRE.2019.V9N1P74-90).
- [19] E. A. Dare, K. Keratithamkul, B.M. Hiwatig y F. Li, “Beyond content: The role of STEM disciplines, real-world problems, 21st century skills, and STEM careers within science teachers’ conceptions of integrated

- STEM education”, *Education Sciences*, vol. 11, n.º 11, p. 737, 2021, doi: [10.3390/educsci11110737](https://doi.org/10.3390/educsci11110737).
- [20] M. Tenorio-Domínguez, “Flavonoides extraídos de la cascara de naranja tangelo (*Citrus reticulata* x *Citrus paradisi*) y su aplicación como antioxidante natural en el aceite vegetal sacha inchi (*Plukenetia volubilis*)”, *Scientia Agropecuaria*, vol. 7, n.º 4, pp. 419-431, 2016, doi: [10.17268/sci.agropecu.2016.04.07](https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2016.04.07).
- [21] J. Gascón, “Comida no comida: Un análisis del desperdicio de alimentos desde la agroecología”, en ODELA, ed. *Polisemias de la alimentación: Salud, desperdicio, hambre y patrimonio*. Universitat de Barcelona, 2019, pp. 33-52.
- [22] C. Gutiérrez, “Análisis de la actividad agrícola y pecuaria de traspatio de la Huasteca Sur en San Luis Potosí, México”, tesis de maestría, Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Texcoco, México, 2023. [En línea]. Disponible en: <http://193.122.196.39:8080/xmlui/handle/10521/5084>
- [23] C. Priefer, J. Jörissen y K.-R. Bräutigam, “Food waste prevention in Europe – a cause driven approach to identify the most relevant leverage points for action”, *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 109, pp. 155-165, 2016, doi: [10.1016/j.resconrec.2016.03.004](https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.03.004).
- [24] D. Hoehn, I. Vázquez-Rowe, R. Kahhat, M. Margallo, L. Laso, A. Fernández-Ríos, I. Ruiz-Salmón y R. Aldaco, “A critical review on food loss and waste quantification approaches: Is there a need to develop alternatives beyond the currently widespread pathways?”, *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 188, p. 106671, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106671>.
- [25] J. Gascón, C. Solà y C. Larrea-Killinger, “A qualitative approach to food loss. The case of the production of fruit in Lleida (Catalonia, Spain)”, *Agroecol. Sustain. Food Syst.*, vol. 42, n.º 5, 2022, doi: [10.1080/21683565.2022.2061099](https://doi.org/10.1080/21683565.2022.2061099).
- [26] L. Christiaensen, Z. Rutledge y J. E. Taylor, “The Future of Work in Agriculture: Some Reflections”, World Bank, Washington, DC, Policy Research Working Paper 9193, mar. 2020. [En línea]. Disponible en: <https://ssrn.com/abstract=3560626>
- [27] M. Duquesnoy, “La Huasteca hidalguense, migración y retos locales en una región de fuerte concentración indígena”, *Revista Líder*, vol. 16, año 12, pp. 85-103, 2010.
- [28] INEGI, “Movimiento Migratorio”, INEGI.org.mx. https://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/slp/poblacion/m_migratorios.aspx (accedido: ag. 30, 2023).
- [29] P. F. Maupoey, *Introducción al Secado de Alimentos por Aire Caliente*. Universitat Politècnica de València, 2001.
- [30] M. G. Par Gramajo, “Aplicación de los métodos de conservación de alimentos”, *Revista Ingeniería y Ciencia*, vol. 1, n.º 15, 2019.
- [31] V. Belessiotis y E. Delyannis, “Solar drying”, *Solar Energy*, vol. 85, n.º 8, pp. 1665-1691, 2011, doi: [10.1016/j.solener.2009.10.001](https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.001).
- [32] R. Iglesias, R. A. José Gómez, O. Lastres, P. López, N. Farrera y G. R. Ibáñez, “Diseño, construcción y evaluación de un secador solar para mango Ataulfo”, *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, vol. 8, n.º 8, pp. 1719-1732, 2017, doi: [10.29312/remexca.v8i8.697](https://doi.org/10.29312/remexca.v8i8.697).
- [33] C. Grimalt-Álvaro y D. Couso, “¿Qué sabemos del posicionamiento STEM del alumnado? Una revisión sistemática de la literatura”, *Revista de Investigación Educativa*, vol. 40, n.º 2, pp. 531-547, 2022, [10.6018/rie.467901](https://doi.org/10.6018/rie.467901).
- [34] C. P. Suárez, “STEM y su impacto social”, en *La enseñanza de la física y el modelo STEM*, C. E. Mora, C. P. Suárez y J. Félix, eds. Ciudad de México: Comunicación Científica, 2023, pp. 19-29, doi: [10.52501/cc.037](https://doi.org/10.52501/cc.037).

RECONOCIMIENTOS

A la maestra Olivia Infante, profesora en la Facultad del Hábitat, de la UASLP; a los estudiantes de licenciatura en Ingeniería de Nanotecnología y Energías Renovables de la Facultad de Ciencias, y a los alumnos de Ingeniería Mecánica Eléctrica, de la Coordinación Académica Región Huasteca Sur de la UASLP, quienes con su entusiasta participación hicieron posible este trabajo, así como otorgar la autorización para comunicar sus resultados.