



CUNOC

Dirección General de Investigaciones

Baldomero Arriaga Jerez

Investigación en Ingeniería 2026

Profesor: Eddy Flores y Colaboradores



USAC
TRICENTENARIA
Universidad de San Carlos de Guatemala

CENTRO UNIVERSITARIO DE OCCIDENTE -CUNOC-

Olimpiadas de matemáticas, una herramienta para la mejora en el aprendizaje de esta materia

H. O. Hernández¹ y E. O. Flores¹

¹División de Ciencias de la Ingeniería, Centro Universitario de Occidente (CUNOC), Universidad de San Carlos de Guatemala

humbertohernandez@cunoc.edu.gt · eddie.flores@cunoc.edu.gt

RESUMEN

En la División de Ciencias de la Ingeniería del Centro Universitario de Occidente (CUNOC) se realizó, en octubre de 2025, un evento académico con el objetivo de motivar a los estudiantes en el aprendizaje de las ciencias, específicamente de las matemáticas. La finalidad fue emplear este evento como una herramienta que impulsara el aprendizaje colaborativo de las matemáticas mediante una metodología grupal y participativa, distinta de las pruebas escritas en espacios cerrados que se acostumbran en este tipo de eventos. La participación fue amplia y el estudiantado se mostró muy motivado para seguir aprendiendo matemáticas.

Palabras clave: aprendizaje lúdico, matemáticas, motivación, olimpiada, trabajo en equipo.

1. INTRODUCCIÓN

La motivación para estudiar ciencias básicas, y específicamente matemáticas, muchas veces es muy limitada. En las carreras de ingeniería es importante alcanzar un nivel de conocimiento excelente que permita desarrollar un pensamiento crítico y analítico; por ello se cursan en promedio siete cursos de matemáticas, desde básicas e intermedias hasta aplicadas. Sin embargo, en países en desarrollo como Guatemala existe un rezago educativo en el área de matemáticas, asociado a recursos insuficientes, metodologías tradicionales y un sinnúmero de factores que afectan el rendimiento de los estudiantes, lo que da como resultado una baja motivación para el estudio de las ciencias.

Por ello se ha visto necesario implementar nuevas metodologías e ideas que motiven a los estudiantes. Una de ellas ha sido la olimpiada de matemáticas, pero con un enfoque diferente al de las olimpiadas tradicionales, que son más individualistas y menos emocionantes. En este documento se describe una experiencia de olimpiada matemática distinta, que busca motivar el aprendizaje de esta ciencia y ofrecer a los estudiantes una experiencia única y divertida, fomentando valores como el trabajo en equipo y, sobre todo, el carácter lúdico del aprendizaje de la matemática.

La realización de olimpiadas de matemáticas en la División de Ciencias de la Ingeniería del Centro Universitario de Occidente, de la Universidad de San Carlos de Guatemala, ofrece una oportunidad importante para promover el interés por las matemáticas entre los estudiantes de ingeniería, desarrollar habilidades y competencias fundamentales, fomentar la colaboración y el trabajo en equipo, y elevar el prestigio y la reputación de la División.

Estas olimpiadas también ofrecen a los estudiantes la oportunidad de participar en desafíos matemáticos que les permitan descubrir el lado creativo y apasionante de las ciencias exactas, lo que podría inspirarlos a profundizar en su estudio y a explorar nuevas áreas dentro de estas disciplinas.

En cuanto al desarrollo de competencias, la resolución de problemas complejos exige pensamiento crítico y razonamiento lógico; la actividad de las olimpiadas brinda la oportunidad de desarrollar y fortalecer estas habilidades de manera práctica y aplicada.

2. MARCO TEÓRICO

El aprendizaje de las matemáticas constituye uno de los principales desafíos de los sistemas educativos, debido a que muchos estudiantes perciben esta asignatura como compleja y poco motivadora. En este contexto, el uso de juegos como estrategia didáctica ha adquirido relevancia, ya que favorece la participación activa del estudiante, promueve el desarrollo del pensamiento lógico y fortalece la comprensión de conceptos matemáticos de manera significativa.

El aprendizaje basado en juegos es una metodología que incorpora actividades lúdicas con objetivos pedagógicos específicos. A diferencia del juego libre, los juegos educativos son diseñados o seleccionados para desarrollar competencias, habilidades y conocimientos determinados. Diversos estudios han mostrado que esta estrategia incrementa la motivación, la atención y el compromiso de los estudiantes durante el proceso de enseñanza-aprendizaje, y favorece un ambiente más dinámico y participativo.

Desde la perspectiva del desarrollo cognitivo, Piaget (1962) sostiene que el juego constituye un medio fundamental mediante el cual los niños construyen su conocimiento al interactuar con su entorno. A través de la exploración, la experimentación y la resolución de situaciones problemáticas, los estudiantes desarrollan estructuras cognitivas que facilitan la comprensión de conceptos matemáticos como la clasificación, la seriación, la conservación y el número.

Por su parte, Vygotsky (1978) plantea que el aprendizaje ocurre mediante la interacción social y que el juego crea una zona de desarrollo próximo, en la cual los estudiantes pueden resolver problemas con el apoyo de sus compañeros o del docente. En este sentido, los juegos matemáticos favorecen el trabajo colaborativo, la comunicación y el intercambio de estrategias para resolver desafíos, fortaleciendo tanto el aprendizaje individual como el colectivo.

Asimismo, Dienes (1971) destaca la importancia de utilizar materiales manipulativos y actividades lúdicas para facilitar la comprensión de conceptos matemáticos abstractos. Según este autor, el aprendizaje de las matemáticas resulta más efectivo cuando los estudiantes experimentan diferentes representaciones de un mismo concepto antes de llegar a su formulación simbólica. Los juegos permiten precisamente esa transición desde la experiencia concreta hacia el pensamiento abstracto.

De igual manera, Skemp (1976) distingue entre el aprendizaje instrumental, basado en la memorización de procedimientos, y el aprendizaje relacional, que implica comprender las relaciones entre los conceptos matemáticos. Los juegos educativos promueven este último tipo de aprendizaje al exigir que los estudiantes analicen situaciones, formulen estrategias y justifiquen sus respuestas, lo que desarrolla un conocimiento más profundo y duradero.

En la actualidad, organismos como el National Council of Teachers of Mathematics (NCTM, 2014) recomiendan incorporar metodologías activas que promuevan la resolución de problemas, el razonamiento y la comunicación matemática. Entre estas metodologías, los juegos representan una herramienta didáctica eficaz para fortalecer el aprendizaje significativo y fomentar una actitud positiva hacia las matemáticas.

En síntesis, el uso de juegos como estrategia didáctica contribuye al desarrollo de habilidades matemáticas, incrementa la motivación de los estudiantes y favorece la construcción activa del conocimiento. Su implementación permite transformar la enseñanza tradicional en un proceso más dinámico, participativo y centrado en el estudiante, facilitando el logro de aprendizajes significativos y el desarrollo de competencias matemáticas aplicables en diversos contextos de la vida cotidiana.

3. METODOLOGÍA

La olimpiada se organizó bajo una metodología participativa: se conformó un grupo de estudiantes con alto grado de colaboración para el apoyo logístico de la actividad, coordinado por la supervisión del área de matemáticas de la División de Ciencias de la Ingeniería.

Se establecieron dos niveles de conocimiento. En el **nivel 1** se evaluaron los contenidos de Matemática Básica 1 y 2 (álgebra, geometría analítica, trigonometría, modelado matemático y cálculo elemental), con la participación de estudiantes que ingresaron en 2024 y 2025. En el **nivel 2** se evaluaron los contenidos de Matemática Intermedia 1, 2 y 3 (cálculo avanzado y ecuaciones diferenciales), y en él podían participar todos los estudiantes inscritos en la División de Ciencias de la Ingeniería del CUNOC.

Las preguntas y los ejercicios fueron elaborados en consenso con los docentes de los distintos cursos de matemáticas, procurando que fueran acordes al nivel de conocimiento de los estudiantes.

Los organizadores decidieron que la olimpiada tuviera una forma más dinámica y participativa, a diferencia de ocasiones anteriores, en las que se resolvían ejercicios de forma individual dentro de un aula, sin más espectadores que los docentes encargados de vigilar las pruebas.

De acuerdo con lo anterior, en cada nivel se convocó a la participación de los estudiantes en grupos, que debían responder 10 preguntas y resolver 5 ejercicios previamente preparados. Los ejercicios se proyectaban en una pantalla gigante (Fig. 1) y se daba un tiempo prudencial para discutir y consensuar una respuesta; al tenerla lista, el grupo debía presionar un botón que encendía un foco y activaba un timbre como señal de que había resuelto el ejercicio.



Fig. 1. Presentación de las preguntas durante el concurso.

Posteriormente se recogían las propuestas de solución de los estudiantes y se proyectaba y explicaba la solución correcta en la pantalla. Un panel de jueces conformado por docentes asignaba un puntaje de acuerdo con la exactitud del resultado y el tiempo empleado. Esta dinámica hizo que también los espectadores, quienes igualmente son estudiantes, intentaran resolver los ejercicios y aprendieran al ver la solución proyectada, lo que volvió la actividad más interesante y motivadora para el aprendizaje de la matemática.

Un grupo de estudiantes se encargó de sistematizar los puntajes de cada grupo participante, obtener el cómputo total y determinar los tres primeros lugares de cada nivel. La misma metodología se aplicó en ambos niveles.

Por último, se premió a los tres equipos ganadores de cada nivel (Fig. 2), parte final del evento que también sirvió para motivar aún más a los estudiantes participantes y al público en general.



Fig. 2. Premiación de los equipos ganadores de la olimpiada.

4. RESULTADOS

Los resultados de la olimpiada pueden analizarse desde dos puntos de vista: el primero, respecto a la participación; el segundo, respecto a los puntajes ponderados obtenidos por los grupos en los dos niveles.

En cuanto a la participación directa, en el nivel 1 participaron 18 grupos de 3 integrantes, para un total de 54 estudiantes, y fue el nivel con mayor participación. En el nivel 2 la participación fue menor: 9 grupos de 3 integrantes, para un total de 27 estudiantes.

Por la forma en que se llevó a cabo, la participación indirecta fue mucho mayor, ya que la actividad se realizó en un área abierta y desde diferentes ángulos se podían observar las preguntas y los ejercicios (Fig. 3), así como las soluciones y las ponderaciones de cada grupo. Se estima la presencia de aproximadamente 300 estudiantes y unos 30 docentes.



Fig. 3. Vista de la actividad, realizada en espacio abierto, desde el tercer nivel del Módulo «G».

En cuanto a los puntajes, en el nivel 1 el primer lugar obtuvo 65 %, el segundo 54 % y el tercero 45 %; en el nivel 2, el primer lugar obtuvo 84.5 %, el segundo 73.5 % y el tercero 69 %. En ambos niveles se consideró la ponderación de las respuestas a las preguntas y de los ejercicios.

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Es muy importante realizar actividades fuera de la clase tradicional para que el estudiante se motive a aprender. De esa forma se vence el temor o la dificultad que implican las ciencias, en particular las matemáticas. Este tipo de actividades además genera confianza en los estudiantes y, para los ganadores, fortalece su hoja de vida para buscar nuevas oportunidades.

En relación con el sector docente, se considera que está dispuesto a participar en la organización y realización de las olimpiadas, conformando equipos de trabajo para proponer las preguntas y los ejercicios de ambos niveles: en el nivel 1 participaron 6 docentes y en el nivel 2 contribuyeron 4, lo que representa aproximadamente el 80 % de los docentes del área de matemáticas de la División de Ciencias de la Ingeniería.

La participación de los estudiantes en la organización se considera positiva, ya que aproximadamente 30 estudiantes colaboraron en la promoción y la logística del evento, lo que fomentó en ellos el trabajo en equipo y la gestión de proyectos académicos.

En cambio, la participación directa en la olimpiada se considera limitada: participaron aproximadamente 80 estudiantes de un total aproximado de 500 inscritos en los cursos del área común, que comprende los dos primeros años de la carrera, es decir, alrededor de un 16 %. Por ello es importante organizar más eventos académicos similares que motiven la participación.

Sin embargo, el evento se considera exitoso: como se mencionó, por su naturaleza abierta la participación indirecta fue mayor y más estudiantes se involucraron en la resolución de los problemas y en la observación de las soluciones, lo que motivó el aprendizaje de forma colectiva y participativa.

Las ponderaciones obtenidas en el nivel 1 se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Equipos participantes y punteos obtenidos en el nivel 1.

Equipo	Puntos de preguntas	Puntos de problemas	Tiempo total (min:s)	Total	Observaciones
Trío Calavera	54	0	23:58	54	Segundo lugar
Las Manzanas de Newton	45	0	25:53	45	
Vengadores de Álgebra	8	0	28:12	8	
Seguidores de Leithold	46	19	15:32	65	Primer lugar
Infinito Girls	0	0	—	0	
Eternos MB2	24	0	15:08	24	
Serway's	33	9	14:52	42	Tercer lugar
Los 2MB2	0	0	—	0	
Potencia Total	0	0	—	0	
Los Euler	27	10	24:03	37	
Los Analíticos	18	10	27:23	28	
Sigma	0	0	—	0	
Teorema Crew	18	0	10:21	18	
Los Productivos	0	0	—	0	
Pepi	30	0	27:28	30	
Binomio de Oro	18	0	29:53	18	
X ²	26	0	26:25	26	
Sin Miedo al Éxito	24	8	12:19	32	

Se observa que los grupos de los primeros lugares obtuvieron poco puntaje en la solución de los ejercicios y que la mayor parte de su puntaje proviene de las respuestas a las preguntas. Esto sugiere que los estudiantes tienen mayor dificultad en el modelado y en la habilidad matemática para resolver ejercicios prácticos, por lo que es necesario profundizar en actividades pedagógicas que fomenten la habilidad numérica, la lectura, el análisis, el trabajo en equipo y el modelado matemático.

Es importante señalar que las ponderaciones son bajas: solo el primer lugar supera el 60 %, el segundo apenas rebasa el 50 % y el tercero no lo alcanza, mientras que el resto de los grupos se sitúa alrededor del 20 % y cinco grupos no obtuvieron puntos. Esto hace necesario implementar acciones concretas desde la docencia para subsanar esta situación.

Los resultados del nivel 2 se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Equipos participantes y puntajes obtenidos en el nivel 2.

Equipo	Puntos de preguntas	Puntos de problemas	Total	Observaciones
Botrancitos	57	27.5	84.5	Primer lugar
Alvaritos Franquitos	43	12.5	55.5	
Vector Alpha	24	0	24	
Los DespejaX	26	10	36	
Ochoa Gang	50	19	69	Tercer lugar
Photomath	0	0	0	
Los Matemáticos	44	15	59	
Covenant	26	7.5	33.5	
Alfa	71	2.5	73.5	Segundo lugar

En el nivel 2 las ponderaciones son más altas que en el nivel 1: los tres primeros lugares superan el 65 %, lo que se considera bastante aceptable en comparación. Esto puede interpretarse como un mayor compromiso de los estudiantes con el estudio y una mayor experiencia en este tipo de eventos.

6. CONCLUSIONES

- La implementación de este tipo de actividades fortalece e incrementa el deseo de aprender ciencias, ya que el deseo de destacar motiva a los estudiantes a estudiar en mayor medida.
- Este tipo de actividades motiva el trabajo en grupo: los estudiantes deben colaborar con sus compañeros si quieren ganar la olimpiada, lo que mejora el trabajo en equipo.
- Las ideas innovadoras para realizar olimpiadas permiten relacionar la ciencia con el juego, lo que genera un aprendizaje significativo y lúdico que resulta trascendental para los estudiantes.
- La actividad evidenció que el nivel matemático de los estudiantes de la División de Ciencias de la Ingeniería es de intermedio a bajo, con deficiencias principalmente en el modelado y la solución numérica de problemas matemáticos.

AGRADECIMIENTOS

A todos los profesores y estudiantes de la División de Ciencias de la Ingeniería que apoyaron la actividad.

REFERENCIAS

Dienes, Z. P. (1971). *Building up mathematics*. Hutchinson Educational.

National Council of Teachers of Mathematics. (2014). *Principles to actions: Ensuring mathematical success for all*. NCTM.

Piaget, J. (1962). *Play, dreams and imitation in childhood*. W. W. Norton & Company.

Skemp, R. R. (1976). Relational understanding and instrumental understanding. *Mathematics Teaching*, 77, 20–26.

Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in society: The development of higher psychological processes*. Harvard University Press.

Enseñanza de la física clásica: experiencias

Eddie Omar Flores Aceituno

Profesor de Ciencias Básicas, División de Ciencias de la Ingeniería, Centro Universitario de Occidente (CUNOC), Universidad de San Carlos de Guatemala

eddie.flores@cunoc.edu.gt

RESUMEN

Esta investigación descriptiva relata la experiencia de un profesor en la enseñanza del curso de Física Básica a nivel universitario durante 12 años. Este tipo de investigaciones es valioso porque muchos profesores excelentes nunca escribieron sus experiencias docentes y no nos ha quedado nada de ellas. Otra razón importante es obtener elementos para mejorar la enseñanza de esta materia en las ciencias de la ingeniería y en otras áreas interesadas en ella, ya que el aprendizaje parece no ser significativo. Se describe un recorrido desde los inicios del autor como profesor auxiliar hasta llegar a profesor titular, y desde la enseñanza presencial hasta la enseñanza exclusivamente virtual. El objetivo es describir experiencias que sirvan de base para otros proyectos educativos, como la escritura de un libro, la implementación de laboratorios, la motivación hacia la investigación y la reflexión sobre la física, y la creación de un programa de enseñanza y didáctica de la física. A partir de este documento pueden generarse nuevas iniciativas para la mejora de la enseñanza.

Palabras clave: aprendizaje significativo, ciencias naturales, enseñanza, deserción, física básica.

1. INTRODUCCIÓN

La física es la ciencia natural que se centra en las propiedades e interacciones de la materia, la energía, el espacio y el tiempo; los componentes fundamentales del universo forman parte de su campo de acción. Dentro de la ingeniería es una disciplina fundamental, no solo por los conceptos que aporta a la mayoría de los programas de estudio, sino por el desarrollo de la lógica en quienes la estudian.

Las ciencias de la ingeniería son un grupo de materias pertenecientes a las ciencias naturales que apoyan a la ingeniería en su entendimiento y aplicación. La ingeniería utiliza estas ciencias, específicamente la física, para entender los fenómenos naturales y aprovecharlos en beneficio de la sociedad y en la creación de tecnologías.

La enseñanza de la física en las carreras de ingeniería se ha realizado durante mucho tiempo de la misma forma, y el aprendizaje ha sido poco significativo. Esto se refleja en los niveles de repitencia y en la escasa aplicación de los conceptos, las cantidades físicas y el estudio de fenómenos en aplicaciones propias de la ingeniería. Estudiamos las ciencias físicas, pero probablemente no las comprendemos a fondo y mucho menos las podemos aplicar en la ingeniería.

El objetivo de esta investigación es describir la enseñanza actual de la física en Guatemala a partir de la experiencia docente del autor.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ¿Qué es ciencia?

Es la rama del saber humano constituida por el conjunto de conocimientos objetivos y verificables sobre una materia determinada, obtenidos mediante la observación y la experimentación, la explicación de sus principios y causas, y la formulación y verificación de hipótesis. Se caracteriza, además, por utilizar una metodología adecuada para su objeto de estudio y por la sistematización de los conocimientos.

2.2 ¿Qué son las ciencias naturales?

Las ciencias naturales, también llamadas ciencias de la naturaleza, ciencias físico-naturales o ciencias experimentales, son aquellas que tienen por objeto el estudio de la naturaleza siguiendo la modalidad del método científico conocida como método empírico-analítico.

2.3 ¿Qué es la física?

Es la ciencia que estudia las propiedades de la materia y de la energía y establece las leyes que explican los fenómenos naturales, excluyendo los que modifican la estructura molecular de los cuerpos. También puede decirse que la física es una ciencia natural que estudia cómo opera el universo y busca describir el funcionamiento de las cosas a nuestro alrededor.

2.4 ¿Qué es la didáctica?

La didáctica es una disciplina científico-pedagógica que estudia los procesos y elementos de la enseñanza-aprendizaje.

2.5 ¿Qué es la didáctica de la física?

La enseñanza de la física se refiere a los métodos utilizados para enseñar esta ciencia, mientras que la investigación en enseñanza de la física es el área de investigación pedagógica que busca mejorar esos métodos.

3. METODOLOGÍA

Se trata de una investigación descriptiva y autorreflexiva, aunque redactada en tercera persona. Es importante por los bajos índices de aprendizaje e interés por las ciencias en Guatemala, y porque muchos profesores de ciencias en nuestro medio han enseñado y acumulado muchas experiencias que nunca escribieron, con lo que ese aprendizaje se perdió para las futuras generaciones.

4. TRAYECTORIA DE APRENDIZAJE DEL PROFESOR

Durante sus estudios de nivel medio, antes de la universidad, el profesor tomó dos cursos de física fundamental, pero puede decirse que no comprendió casi nada; de allí nace su interés por enseñar mejor, para que los fenómenos físicos se comprendan de mejor manera. Tenía interés en asistir a algún curso extraordinario o de vacaciones, pero no contaba con los recursos y, además, en esa época no era común hacerlo; aun así, el interés por esta rama de las ciencias siempre estuvo presente.

En su formación universitaria tomó precisamente el curso de Física Básica. Logró aprobarlo, pero le quedó un vacío de aprendizaje, como si muchos conceptos no se hubieran asimilado: el enfoque con el que recibió la física fue muy cuantitativo, muy numérico y poco explicativo de los fenómenos.

Inició su labor universitaria alrededor de 1994 como ayudante de cátedra en el Departamento de Matemáticas, y fue requerido para una escuela de vacaciones en el Departamento de Física de la Facultad de Ingeniería de la USAC, donde fue profesor auxiliar del Lic. César Izquierdo Merlo, muy conocido por su canal de YouTube sobre física (Izquierdo, s. f.). La experiencia en esta etapa no fue muy relevante, pues el trabajo consistió principalmente en calificar tareas del curso de Física 2.

En 2007 ingresó como profesor titular del curso. Desde entonces inició un proceso de enseñanza y de mayor conocimiento de la materia; aunque se considera un curso relativamente fácil para los futuros ingenieros, su inicio y su aprendizaje resultan bastante difíciles. Impartió la materia de 2007 a 2010, año en que solicitó licencia para realizar sus estudios de doctorado; regresó en julio de 2012 y continúa con la enseñanza de la física hasta la fecha.

5. EXPERIENCIAS DE ENSEÑANZA EN LA CLASE PRESENCIAL

El requisito para cursar esta materia es Matemática Básica 1; sin embargo, a pesar de haberla aprobado, los alumnos aún presentan dificultades numéricas, por ejemplo en el cálculo rápido, en la resolución de sistemas de ecuaciones y, principalmente, en el planteamiento y la modelación matemática. Esto último es la principal dificultad para resolver problemas numéricos o cuantitativos de física.

En cuanto al análisis cualitativo de la física, el estudiante tiene muchos problemas para entenderla. Al inicio de su labor docente, el profesor impartió la mayor parte del curso en forma cuantitativa, generando cálculos tal como él aprendió, pero con poca reflexión sobre los fenómenos físicos. Hay preguntas que aún hoy muchos estudiantes no pueden responder. Casi puede decirse que los primeros años de enseñanza fueron muy cuantitativos y poco cualitativos: el profesor lo aprendió así y lo enseñó así, sin evolucionar ni reflexionar sobre un cambio. Solo recientemente se ha dado cuenta de que esta ha sido una debilidad de su clase y desea implementar cambios.

La enseñanza se basa en el aprendizaje mediante la resolución de problemas. El estudiante que viene de la secundaria normalmente ha cursado uno o dos cursos de física, pero, salvo raras excepciones, demuestra un aprendizaje casi nulo. Parte del problema es que la mayoría de los estudiantes que llegan a este curso pueden leer, pero comprenden muy poco; abstraer información, observar y plantear matemáticamente les resulta muy difícil. Por ello, en la educación previa a la universidad debería trabajarse con suma importancia la lectura, la comprensión, el análisis y la síntesis.

El profesor se apoya mucho en los libros de texto; entre los más citados están los de Serway (2019), Resnick y Halliday (1987) y Tippens (2007), tres libros con los que él mismo aprendió cuando era estudiante. Estos textos son muy útiles y aportan muchos conceptos; al principio de su experiencia docente, se apoyaba únicamente en el libro físico. Sin embargo, encasillan al estudiante en ciertas ideas, cuando el mundo y las aplicaciones de la física son mucho más amplios. Por ejemplo, como la mayoría son traducciones de libros estadounidenses, el contexto puede no ser atractivo para nuestros estudiantes: se habla de nieve o de deportes poco conocidos aquí, como el hockey. Pero era lo único con lo que se contaba, y ha habido poca proactividad por parte de los profesores y, en general, del sistema educativo de Guatemala para crear textos más contextualizados con la realidad del país. La física es la misma en todas partes y en todos lados hay gravedad, pero cuando se habla, por ejemplo, de la nieve, la mayoría de los estudiantes, por no decir todos, no la conocen.

5.1 La matematización de la física

Un problema grande que enfrentamos es la matematización de los textos, que dan mucha importancia al cálculo y a las matemáticas dentro de la física. Esto es relevante porque muchos estudiantes de ingeniería terminan siendo buenos para realizar cálculos físicos, pero entienden muy poco los fenómenos físicos en realidad.

5.2 Los simuladores

Recientemente se han empleado simuladores como apoyo, principalmente en el laboratorio. Los simuladores PhET (University of Colorado Boulder, 2022) presentan cada vez más aplicaciones de física y constituyen una buena herramienta de apoyo al aprendizaje: incluyen simulaciones de movimiento en dos dimensiones, movimiento circular como caso especial del movimiento en dos dimensiones, leyes de Newton, aplicaciones con resortes, energía y colisiones. Han sido una herramienta muy útil en la enseñanza de la física (Fig. 1).

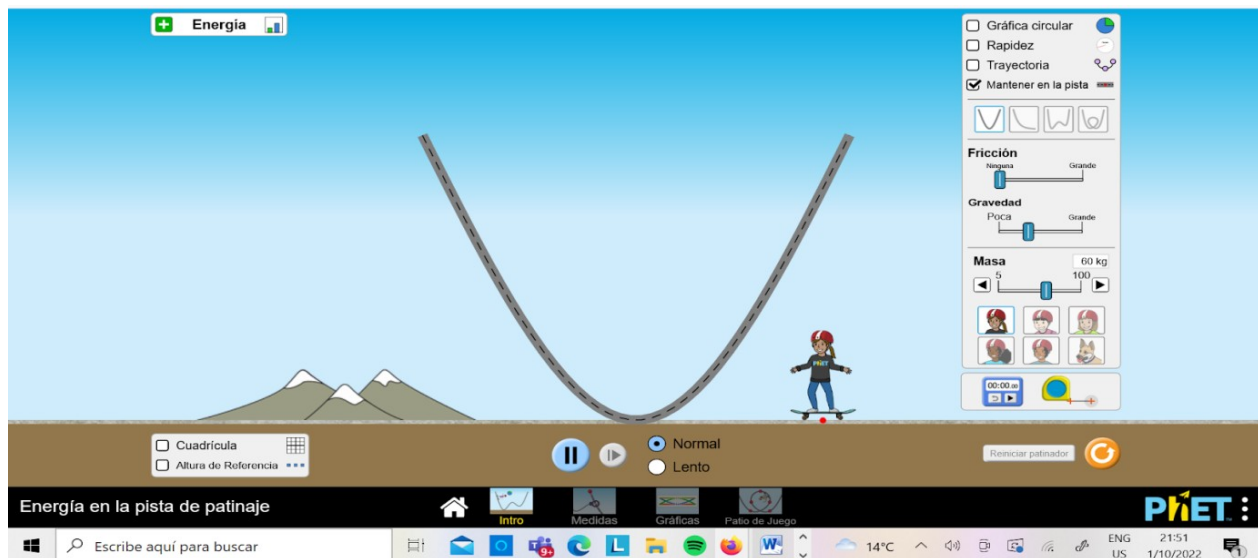


Fig. 1. Captura de pantalla del simulador PhET «Energía en la pista de patinaje», que presenta conceptos de energía.

5.3 Estudiantes destacados

Durante el tiempo en que el autor ha enseñado ciencias básicas, hubo un período de cinco años en que el Centro Universitario de Occidente (CUNOC) destacó con varios estudiantes en los primeros puestos a nivel nacional en física, y en un par de ocasiones con campeones nacionales (Facultad de Ingeniería USAC, 2015). Sobre ellos puede decirse que, en general, eran bastante sencillos —uno de ellos, especialmente reservado—, con muchos deseos de superación, una gran pasión por el aprendizaje de las ciencias y mucha autonomía para estudiar. Es decir, triunfaron no tanto por lo que se les enseñó en la universidad, sino por su interés personal en perfeccionarse.

Ganadores de Novena Olimpiada In De Ciencias y Tecnología		
MATEMÁTICA		
LUGAR	NOMBRE	NIVEL 1 UNIVERSIDAD
1	Eduardo Alberto Bardales España	USAC
2	José Pablo Ortega Grajeda	UVG
3	Luis Alfredo Medrano Yat	USAC
4	Edgar Daniel Cil Peñate	USAC
5	Melanie Rebeca Cerón Torres	URL
MATEMÁTICA		
LUGAR	NOMBRE	NIVEL 2 UNIVERSIDAD
1	Josué Ricardo Rabanales Gómez	USAC
2	Balam Luis Gregorio Lol Alvarez	USAC
3	César Reginaldo Tzoe Alvarado	USAC- Cunoc
4	Jonatan Eduardo Sam Elías	URL-Occidente
5	Fernando José Mazariegos Camas	USAC
FÍSICA		
LUGAR	NOMBRE	NIVEL 1 UNIVERSIDAD
1	Héctor Daniel Castillo Cajas	USAC- Cunoc
2	Sergio David Zapeta Tzul	UVG

Fig. 2. Tabla de ganadores de olimpiadas universitarias nacionales, en la que aparecen varios estudiantes del CUNOC en los primeros lugares, con José Pérez como campeón nacional.

Hoy en día, algunos de estos ganadores de olimpiadas se desempeñan en buenos empleos en Guatemala y otros estudian y trabajan en Japón y Europa.

6. ENSEÑANZA DE LA FÍSICA PRESENCIAL Y VIRTUAL

Desde el 15 de marzo de 2020 fue necesario trasladar completamente la clase a la modalidad virtual, y desde esa fecha no se ha regresado a la enseñanza presencial. La virtualidad tiene ventajas y desventajas. Entre las desventajas están la interacción con el estudiante y su motivación para aprender, que es mucho más difícil de lograr; también su atención, tanto en clase como fuera de ella, debido a los numerosos distractores digitales y del hogar. Otra desventaja es el menor uso del libro físico. Aunque parezca obsoleto, el libro físico no lo es: sirve, aunque tiene algunas deficiencias, y las habilidades cognitivas y de aprendizaje se desarrollan mucho más con un libro de texto impreso que con documentos o libros digitales.

La parte experimental ha perdido mucho con la modalidad virtual; aunque la enseñanza se ha apoyado en los simuladores, la experiencia de laboratorio no es la misma. Con todo, en realidad todo nuestro mundo constituye un verdadero laboratorio para experimentar con la física.

Como antecedente, la mayoría de los estudiantes que ingresan a la universidad tiene muy poca curiosidad, esa curiosidad que tenían de niños cuando preguntaban el porqué de todo; pareciera que con los años, al cursar la educación primaria y secundaria, se fue perdiendo el interés. Como formación previa, algunos estudiantes han cursado uno o, como máximo, dos cursos de física; pero en la experiencia del autor, tras impartir el curso de forma consecutiva durante más de 14 años, en su mayoría llegan sin saber ni comprender casi nada, solo con algunas ideas y pocos conceptos, generalmente limitados o mal aprendidos.

Es muy raro el estudiante que trae una base sólida. El autor recuerda el caso de una estudiante que venía de una de las mejores instituciones de nivel medio de Quetzaltenango y tenía mucho interés en la física; de hecho, se inscribió en ingeniería porque la licenciatura en física no se imparte en Quetzaltenango, y tiempo después se trasladó a la ciudad de Guatemala para continuar sus estudios en esa área. Otro estudiante, con mucho interés pero poca base, logró gracias a su esfuerzo y autoestudio un nivel muy alto, hasta ser campeón nacional universitario en una olimpiada de física. Otro estudiante destacado estudió el nivel medio en una institución muy modesta; al llegar a la universidad reprobó el curso de Física Básica y, tiempo después, también fue campeón nacional universitario de física. Fuera de estos casos, la generalidad de los estudiantes llega con un nivel y una formación muy limitados.

Por ello, generalmente se parte de cero con los estudiantes que llegan a la universidad. En la División de Ciencias de la Ingeniería toman primero el curso de Física Básica, en el que tienen un mayor acercamiento a esta disciplina y al estudio de los fenómenos naturales; sin embargo, aunque lo aprueben, eso no significa que hayan aprendido y comprendido los fenómenos físicos.

7. LA ENSEÑANZA ACTUAL DE LA FÍSICA

La enseñanza generalmente ha sido magistral y sin mucha innovación: el profesor expone el tema, presenta las fórmulas y luego se resuelven problemas. La física se aborda mayoritariamente mediante cálculos, es decir, utilizando ampliamente las matemáticas por medio de modelos que intentan describir lo que sucede en el fenómeno físico. Así, la física se vuelve muy cuantitativa y se deja de lado lo cualitativo, que puede definirse como el análisis y la explicación sin entrar en cálculos: explicar el porqué de los fenómenos físicos de la naturaleza.

El enfoque cuantitativo es común en nuestro medio; es importante, pero no suficiente, porque muchos estudiantes pueden estimar y calcular los fenómenos físicos sin comprenderlos a fondo, y por lo tanto les resulta difícil aplicarlos y relacionarlos con la ingeniería. El planteamiento cuantitativo genera un número; llegar a él es interesante, pero el estudiante no pasa de allí y muchas veces ni siquiera comprende qué significa ese número.

7.1 ¿Por qué el enfoque cuantitativo no es suficiente?

A lo largo del tiempo, este profesor ha enseñado el curso de forma muy cuantitativa, dejando de lado el análisis cualitativo; recordemos que así lo aprendió y continuó con ese patrón. Sin embargo, se ha dado cuenta de que calcular es importante para la ingeniería, pero no es suficiente para comprender realmente los fenómenos físicos: obtener una respuesta es bueno, pero no basta si no se puede interpretar, explicar o deducir algo más del fenómeno.

El enfoque cualitativo se fundamenta en preguntas, es decir, en cuestionamientos sobre el porqué de las cosas y sobre por qué los fenómenos ocurren de la forma en que ocurren.

7.2 El laboratorio y los recursos tecnológicos

Generalmente estos cursos cuentan con un laboratorio de apoyo, cuyo objetivo es desarrollar mediante experimentos la parte práctica de lo expuesto en clase. Esto está muy bien; sin embargo, muchas veces las prácticas se trabajan como un curso aparte, con poca conexión con la clase. Mejorar las prácticas se vuelve más difícil conforme se avanza en los contenidos: por ejemplo, cuando se estudia electromagnetismo en el curso de Física 2, en el CUNOC no se cuenta con equipo suficiente para realizar experimentos electromagnéticos o de física más avanzada.

Afortunadamente se han empleado los simuladores PhET, desarrollados por la Universidad de Colorado en Boulder, que sustituyen virtualmente un experimento o lo simulan; en otro artículo se ampliará esa experiencia. También es posible apoyarse en otras herramientas tecnológicas como Tracker (Brown, 2022), un programa diseñado para la física que permite analizar videos de fenómenos físicos, principalmente movimientos y desplazamientos muy rápidos, de modo que sea posible obtener datos, graficarlos y extraer conclusiones sobre el tipo de movimiento. Aun con toda esta tecnología, seguimos con un vacío en el aprendizaje de la física y en su aplicación y relación con la ingeniería.

Al final, lo mejor es una combinación de experiencias prácticas y de enfoques cualitativo y cuantitativo, es decir, obtener lo mejor de cada uno.

7.3 Los estudiantes y su formación previa

En cuanto a los conocimientos previos, la mayoría de los estudiantes proviene de institutos públicos y otros de colegios privados; que sean privados no significa que sean mejores, ni que los públicos sean malos. Lo cierto es que, en general, los estudiantes no saben prácticamente nada de física al llegar a la universidad, o llegan con conceptos y aplicaciones mal aprendidos. Son muy pocos los que tienen alguna base, y aun esta no es amplia, aunque por lo menos hayan llevado dos cursos en el ciclo diversificado, que poco les han servido.

Otro problema general es que los estudiantes pueden leer, pero no comprender lo que leen. Es un problema que también afecta la enseñanza de las matemáticas y de otras ciencias, específicamente en la parte del modelado: no tienen la capacidad de abstraer información y luego utilizarla. Por este problema estructural de la educación en Guatemala, cada situación abordada en física les resulta difícil.

7.4 Cómo son los estudiantes actuales

Es algo difícil de describir; se busca hacer una crítica constructiva para mejorar. El estudiante actual está, en general, desmotivado; pareciera que la educación virtual no le ha sentado bien (Flores, 2022), y esto se ha notado en su rendimiento. Hay pocos deseos de superación, de apoyo en clase y de participación; realmente son pocos los estudiantes que desean aprender, que son colaborativos y que muestran valores como disciplina, compromiso y deseos de superación. Se necesita un cambio y mejores estrategias de enseñanza para motivarlos y generarles un mejor clima dentro de la universidad. El panorama actual no es alentador. Sin embargo, en este último semestre de 2022 los estudiantes se han motivado mucho al ver y resumir biografías de físicos destacados como Newton, Einstein y Faraday, y de divulgadores de la ciencia, específicamente de la física, como Javier Santaolalla.

7.5 Tiempo de enseñanza

El tiempo para impartir la materia es corto: aproximadamente 50 minutos tres veces por semana, lo que quizá ha sido una limitante para el aprendizaje, y probablemente se necesita más tiempo. En un semestre son 48 clases presenciales para abordar los contenidos. Cabe mencionar que los contenidos parecen sencillos, pero debido a la formación previa da la impresión de que los estudiantes conocen muy poco de la materia, además de que su formación matemática es relativamente deficiente. Paralelamente a la clase se imparte un laboratorio, a cargo del autor, cuyo objetivo es fortalecer en forma práctica los conceptos teóricos presentados en clase; en la modalidad virtual se ha trabajado con simuladores.

7.6 El tema más difícil de comprender

El contenido de Física Básica comprende tres grandes unidades: 1) introducción y movimiento en una y dos dimensiones; 2) leyes de Newton, y 3) energía y colisiones. A lo largo de la experiencia del autor, a los estudiantes les ha resultado difícil aplicar la primera ley de Newton o ley de la inercia. También les cuesta comprender las situaciones, abstraer información y, sobre todo, aplicar las matemáticas en la solución de problemas. El problema del modelado matemático y del planteamiento es un aspecto que debe trabajarse fuertemente con los estudiantes.

7.7 Contenido que no debería ser contenido

Algo muy importante que los libros contemplan como parte del curso de Física Básica es el tema de escalares y vectores, un tema meramente matemático y no físico, aunque es necesario conocerlo para clasificar las cantidades físicas. Es importante clasificar las cantidades físicas en escalares o vectoriales, pero no enseñar qué es un vector en la forma en que lo hacen los libros, que le dedican un capítulo completo (Serway, 2019), ni estudiar vectores en tres dimensiones, lo cual no es necesario ni útil en física básica. Además, las instituciones de secundaria en Guatemala regularmente invierten tiempo enseñando estos temas.

7.8 La evaluación, un reto pendiente

La evaluación del aprendizaje sigue siendo uno de los retos más grandes, ya que es difícil determinar en qué grado el estudiante responde por su propia cuenta. Actualmente, por la pandemia y otros problemas, la educación sigue siendo virtual, y la evaluación virtual ha sido complicada porque como profesores es difícil estar seguros de que quien responde es realmente el estudiante; además, aunque responda, no se tiene certeza sobre lo que ha aprendido. En el medio en que se desenvuelve el autor, el profesor que más reprueba es visto como estricto y como buen profesor, pero eso no es necesariamente cierto; es cuestionable.

La evaluación virtual deja mucho que desear. El porcentaje de aprobación es muy alto, cercano al 90 %, con estudiantes cada día menos comprometidos y menos apasionados por la ciencia. Este porcentaje contrasta con el de la modalidad presencial, de aproximadamente 40 %. Esto no quiere decir que la educación presencial sea mejor, pero sin duda, y el autor se atreve a decirlo, mucho del trabajo de evaluación virtual no es realizado por los estudiantes que se someten a ella.

8. SITUACIÓN ACTUAL

Actualmente estamos en la pospandemia y, por circunstancias fuera de nuestro alcance, la enseñanza sigue siendo virtual; esto significa que muchos estudiantes aún no conocen presencialmente la universidad. Se menciona porque la motivación en la mayoría es bastante baja, aunque hay excepciones: con algunos estudiantes se han discutido ideas bastante interesantes y profundas, e incluso alguno ha tomado por cuenta propia un curso paralelo de física. Desde el punto de vista de la motivación, ha sido muy difícil; sin embargo, en los últimos tiempos las biografías de físicos los han motivado a seguir esos ejemplos.

9. ¿CUÁL ES EL FUTURO?

La idea es que a partir de este documento se generen nuevos proyectos: uno de ellos es una maestría en didáctica de la física; otro, la escritura de un libro de física en un contexto más cercano a los estudiantes de la región, con mucha más didáctica y atento a sus necesidades. También se busca crear laboratorios y medios de aprendizaje y experimentación física, y aprender a motivar a los estudiantes en el aprendizaje de la ciencia para que la hagan suya como parte importante de su formación.

10. CONCLUSIONES

1. Es importante realizar este tipo de investigaciones y reflexiones, porque estas experiencias permiten establecer las bases para mejorar el aprendizaje y diseñar nuevos proyectos para nuestros estudiantes y para el país.
2. La motivación es importante en los procesos de aprendizaje.

11. RECOMENDACIONES

1. Mejorar e implementar nuevas metodologías en la enseñanza de la física.
2. Extender los proyectos de enseñanza de la física a la secundaria y enlazarlos con la universidad.
3. Implementar laboratorios físicos y virtuales para la mejora de la enseñanza.
4. Que los profesores de física la enseñen de forma práctica, tanto cualitativa como cuantitativamente.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la División de Ciencias de la Ingeniería del CUNOC por la oportunidad que se me ha dado de ser profesor del curso de Física Básica durante muchos años.

REFERENCIAS

- Brown, D. (2022). *Tracker: Video analysis and modeling tool* [Software]. Open Source Physics. <https://physlets.org/tracker/>
- Facultad de Ingeniería, Universidad de San Carlos de Guatemala. (2017). *XI Olimpiada Interuniversitaria de Ciencias y Tecnología*. Guatemala.
- Flores, E. (2022). *Educación presencial vs. virtual*.

Izquierdo, C. (s. f.). *Canal de YouTube de César Izquierdo* [Canal de YouTube].
<https://www.youtube.com/@IzquierdoCesar>

Resnick, R. y Halliday, D. (1987). *Física, parte 1*. CECSA.

Serway, R. (1997). *Física para ciencias e ingeniería* (7.^a ed.). Thomson.

Tippens, P. (2007). *Física: conceptos y aplicaciones*. McGraw-Hill.

University of Colorado Boulder. (2022). *PhET Interactive Simulations* [Simuladores].
<https://phet.colorado.edu/es/>

Video en YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=Ox3D7u58odw&t=3358s>

APÉNDICE: PROTOTIPOS EXPERIMENTALES

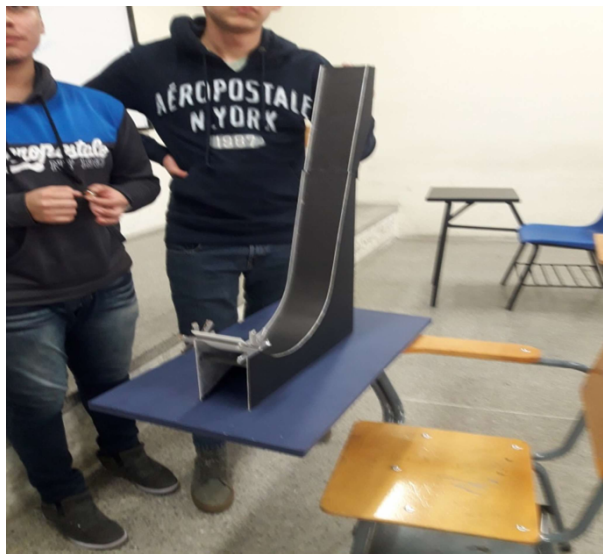


Fig. 3. Estudiantes con un prototipo experimental elaborado en el curso.

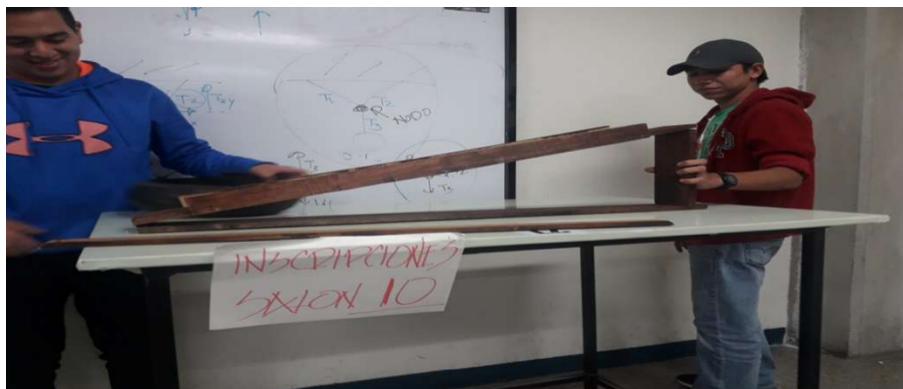


Fig. 4. Estudiantes presentando un prototipo experimental de plano inclinado.

Creación de simulaciones por medio de la IA en la didáctica de la Física

Eddie Omar Flores Aceituno

División de Ciencias de la Ingeniería, Centro Universitario de Occidente (CUNOC), Universidad de San Carlos de Guatemala
eddie.flores@cunoc.edu.gt

RESUMEN

En este artículo se examina el empleo de la inteligencia artificial (IA) como herramienta para la didáctica de la física, principalmente por medio de animaciones. La IA es una herramienta conocida por todos en el ámbito académico; sin embargo, quizá aún se desconocen sus usos potenciales en beneficio del aprendizaje de la física. Se presentan dos casos aplicados en el curso de Física Básica: la caída libre de cuerpos de distinta masa, a partir del experimento atribuido a Galileo Galilei en la torre de Pisa, y la misión Apolo 13. La IA empleada fue Claude, en su versión profesional (Anthropic, 2026).

Palabras clave: animaciones, didáctica, Física, preguntas conceptuales, problemas, *prompts*, Leyes de Newton.

1. INTRODUCCIÓN

Dificultades en el aprendizaje de la física. Después de la pandemia, y ahora con los avances de la inteligencia artificial mal empleados, cada vez más estudiantes pierden el interés por los contenidos que se imparten en clase. Por ello se necesitan nuevas herramientas que los motiven en el aprendizaje de la ciencia y, específicamente, de la física. El empleo de animaciones generadas por IA podría resultar una herramienta muy valiosa para lograr este cometido.

Se trataría de una buena utilización de la IA: un medio de aprendizaje visual para el estudiante que no solamente simula el fenómeno físico, sino que además lo describe tanto cualitativamente, es decir, con palabras, como cuantitativamente, expresando el fenómeno mediante cálculos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ¿Qué es simulación?

La simulación en ingeniería es el uso de modelos virtuales y programas de computadora para imitar y predecir cómo va a funcionar un sistema o producto real.

2.2 ¿Qué es una simulación en física?

Una simulación en física es una representación computacional o matemática que imita el comportamiento de un sistema o fenómeno físico usando las leyes de la ciencia.

2.3 ¿Qué es la didáctica de la física?

La didáctica de la física es la disciplina que estudia cómo enseñar y aprender los conceptos de la física. Analiza los problemas que surgen al explicar la materia, busca métodos para hacerla más fácil de entender y diseña herramientas prácticas para conectar la teoría con la vida real en el aula.

3. METODOLOGÍA

Se seleccionaron dos situaciones difíciles de comprender e ilustrar en un primer curso de Física Básica. Seguidamente se dieron las instrucciones o *prompts* a la inteligencia artificial, solicitándole la generación de una animación con las indicaciones correspondientes. La IA proporciona la animación, la cual se revisa: si es convincente, puede emplearse con los estudiantes; si no, se le siguen dando las instrucciones necesarias para que la mejore según lo que se necesita. Estas instrucciones se formulan con base en el conocimiento y la experiencia del docente sobre el tema.

4. PARTE APLICADA (IMPLEMENTACIÓN DE LA IA)

Tener acceso a la IA es importante, pero si no se sabe utilizar adecuadamente no sirve de nada. El aprovechamiento de la IA para la enseñanza de la física que se presenta en este artículo consiste en utilizar animaciones elaboradas por la IA, de modo que un problema de física que hasta ahora ha sido muy teórico, principalmente en los libros, pueda volverse comprensible, ya que la animación se asemeja mucho a la situación real.

4.1 Caso 1: la caída libre de los cuerpos

Se inicia mostrando la utilidad de la IA en la enseñanza de la física mediante una pregunta conceptual cuya respuesta errónea se tuvo por verdadera durante casi dos mil años, desde los tiempos de Aristóteles, y que fue rebatida y aclarada por Galileo Galilei cuando estudió la caída de los cuerpos bajo la acción de la gravedad, más comúnmente conocida como «caída libre».

Pregunta conceptual: *Se dejan caer al mismo tiempo y desde la misma posición dos objetos de diferente tamaño o masa. ¿Cuál de ellos llega primero al suelo?*

Además de la pregunta, se dieron a la IA (Claude) ciertas indicaciones adicionales (*prompts*): los objetos deben ser de diferentes masas y caer desde una torre como la de Pisa, tal como lo hizo Galileo Galilei; se le pidió generar una animación al respecto, realizar los cálculos respectivos e indicar en qué caso los objetos llegarían al mismo tiempo. Las figuras 1 a 6 recrean los fotogramas principales de la animación que presentó y propuso la IA.



Fig. 1. Planteamiento del problema dentro de la animación.

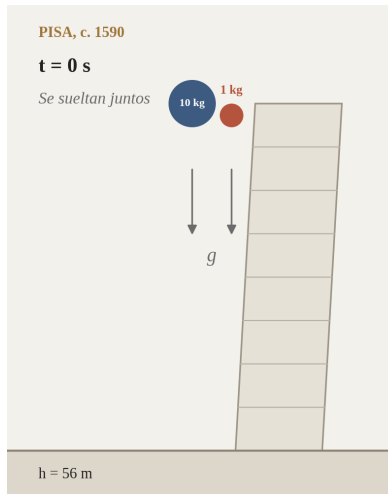


Fig. 2. Instante en que se sueltan simultáneamente los dos objetos de diferente masa.

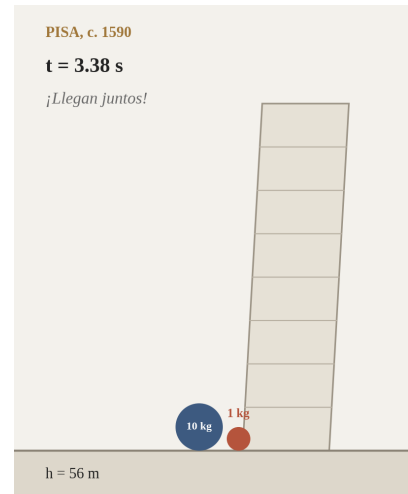


Fig. 3. Llegada simultánea de los dos objetos al suelo.

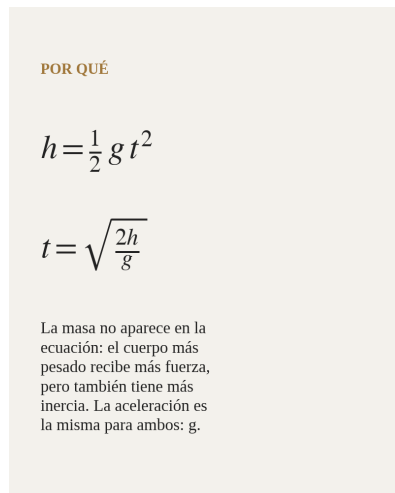


Fig. 4. Cálculos: las ecuaciones muestran que el tiempo de caída no depende de la masa.



Fig. 5. Comparación de dos objetos en caída afectada por la resistencia del aire.



Fig. 6. Conclusión del experimento y de la animación.

Como se observa en las figuras anteriores, la explicación por medio de una animación generada por IA puede ser mucho más didáctica y comprensible para los estudiantes del curso. Además, da respuesta a preguntas físicas que en su momento no fueron fáciles de responder: la del ejemplo anterior tardó cerca de dos mil años en resolverse. En el siglo IV a. C., Aristóteles sostuvo que el cuerpo de mayor masa caía más rápido, hasta que Galileo Galilei rompió con ese paradigma al demostrar que, despreciando la resistencia del aire, los cuerpos caen al mismo tiempo sin importar su masa.

4.2 Caso 2: la misión Apolo 13

Otro ejemplo del potencial de las animaciones con IA como elemento didáctico consiste en pedir a los estudiantes que lean y estudien un caso real que involucre mucha física. En este caso se les asignó el Apolo 13, misión lanzada en abril de 1970 cuya finalidad era alunizar. Sin embargo, durante el viaje de ida la nave sufrió una falla que la obligó a rodear la Luna como estrategia para poder regresar y a utilizar el motor del módulo de alunizaje para darse un impulso que acortara el viaje de regreso, durante el cual ya no se contaba con suficientes recursos como oxígeno y calefacción.

Lo sucedido pudo recrearse mediante una animación con IA que presenta los datos más importantes. Las figuras 7 a 15 muestran fotogramas de esta animación; en el Apéndice se incluye el enlace para verla completa.



Fig. 7. El Apolo 13 parte de la Tierra.



Fig. 8. Órbita alrededor de la Tierra.



Fig. 9. La nave se dirige hacia la Luna.



Fig. 10. Falla en el tanque de oxígeno número 2, a 254,468 km de la Tierra.



Fig. 11. Viaje a la Luna, a 306,115 km de la Tierra, con la falla ya ocurrida y el alunizaje cancelado.



Fig. 12. Órbita lunar: paso por la cara oculta y, a la salida, ignición del motor del módulo lunar para el impulso, a 400,000 km de la Tierra.



Fig. 13. Viaje de regreso.



Fig. 14. Aproximación a la Tierra y reentrada, con un tiempo estimado de 4 minutos.



Fig. 15. Amerizaje en el Pacífico; los tres astronautas sobreviven.

5. CONCLUSIONES

- Las animaciones son importantes para enseñar a los estudiantes de hoy, pues captar su atención es todo un reto.
- La IA es una herramienta didáctica útil en la enseñanza y el aprendizaje de la física.
- Las animaciones con IA favorecen una mejor comprensión de la situación física que se estudia.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda a los profesores usar cualquier IA, de preferencia en su versión profesional.
- Cada profesor debe tener el criterio para distinguir qué material generado por la IA es adecuado y cuál no.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la División de Ciencias de la Ingeniería del CUNOC-USAC por la oportunidad que se me ha dado de ser profesor del curso de Física Básica durante muchos años.

REFERENCIAS

Anthropic. (2026). *Claude* (versión Sonnet 4.5) [Modelo de lenguaje extenso]. <https://claude.ai>

APÉNDICE: ENLACES A LAS SIMULACIONES

A. Simulación de caída libre de objetos

<https://claude.ai/design/p/5ad5807a-4658-4ae4-8385-f2ab66402f85?file=Leyes+de+Newton.dc.html>

B. Simulación de la misión Apolo 13

<https://claude.ai/design/p/2ee5030f-de45-407d-b62a-4e04f26b9146?file=Apolo+13.dc.html>

Economía circular y la ingeniería

E. O. Flores

Profesor, Centro Universitario de Occidente (CUNOC), Universidad de San Carlos de Guatemala
eddie.flores@cunoc.edu.gt

RESUMEN

Este artículo presenta la economía circular como una alternativa real y factible frente al modelo lineal de producción y consumo —extraer, producir, utilizar y tirar—, ineficiente e insostenible. Se describe el origen del concepto y su consolidación a partir de la Fundación Ellen MacArthur y del plan de acción de la Unión Europea de 2015. Se exponen los ciclos biológico y técnico, los principios y características fundamentales del modelo, las fuentes de creación de valor, el marco RESOLVE y la jerarquía de gestión de residuos. Finalmente, se discute el papel del diseño y de la ingeniería en la transición hacia un sistema sostenible desde los ejes económico, social y medioambiental.

Palabras clave: economía circular, economía lineal, ecodiseño, gestión de residuos, sostenibilidad, ingeniería.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo del presente artículo es dar a conocer a los lectores una manera innovadora de producir y consumir productos y servicios, como una alternativa real y factible frente al sistema de producción actual, ineficiente e insostenible.

Desde la Revolución Industrial se han producido grandes cambios, por y para la humanidad, en los planos económico, tecnológico y social, que han traído consigo innumerables externalidades positivas y negativas; estas últimas son las que más preocupan, sobre todo las medioambientales. Pareciera que el desarrollo económico solo puede darse a costa del deterioro medioambiental, como consecuencia de un modelo de producción y consumo ineficientemente lineal, en el que extraer, producir, utilizar y tirar es el orden indiscutible.

Esta situación ha llamado la atención de los líderes mundiales, sobre todo en los últimos años, por lo que se han adoptado acuerdos a escala mundial con el objetivo de lograr un desarrollo sostenible (Naciones Unidas, 2015).

En este sentido, la Unión Europea ha dado un paso importante al adoptar una medida que busca atacar muchos de los problemas de raíz, a diferencia de las acciones llevadas a cabo hasta entonces, centradas en la etapa final del ciclo de vida de los productos. A finales de 2015, la Comisión Europea aprobó la estrategia *Cerrar el círculo: un plan de acción de la UE para la economía circular*, que persigue un desarrollo sostenible considerando todas las etapas de vida de los productos y servicios: diseño, abastecimiento, producción y consumo, gestión de residuos y mercado de materias primas secundarias.

La economía circular es un modelo de producción y consumo innovador, surgido en contraposición al modelo lineal. Busca mantener el valor material y energético depositado en los bienes, como lo hace la propia naturaleza, en la que no existen residuos. Este planteamiento reúne bajo un mismo techo varios conceptos, algunos desarrollados previamente y otros consolidados recientemente, para dar vida a un sistema sostenible y factible, atractivo desde los tres ejes de la sostenibilidad: económico, social y medioambiental.

2. DEFINICIÓN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR

2.1 ¿Cómo surge la economía circular?

El modelo circular de la economía no surgió espontáneamente: se ha venido gestando desde finales del siglo pasado, con aportes de profesionales de diferentes áreas del conocimiento que formularon planteamientos que hoy fundamentan el modelo. Entre los conceptos más relevantes están «de la cuna a la cuna», la permacultura (Mollison y Slay, s. f.), la ecología industrial (Torre-Marín, 2009) y el biomimetismo; su descripción detallada sale del alcance de este artículo.

2.1.1 Consolidación del modelo

El modelo se consolidó en 2010 gracias a la Fundación Ellen MacArthur, que lleva el nombre de su fundadora. Desde su origen, la fundación ha desarrollado diversos proyectos académicos, científicos y de sensibilización encaminados a acelerar la transición hacia este nuevo modelo económico. Gracias a ello logró reintroducir el concepto de economía circular en el marco europeo, al punto de que en 2015 la idea fue plenamente aceptada por la Comisión Europea y por las juntas directivas de grandes corporaciones multinacionales. Entre sus socios globales figuran Danone, Google, H&M, Intesa Sanpaolo, Nike Inc., Philips, Renault y Unilever, entre muchos otros, y cuenta además con el apoyo de gobiernos y universidades de todo el mundo (Ellen MacArthur Foundation, 2015).

2.2 ¿Qué es la economía lineal?

Para facilitar la comprensión de la economía circular, se define primero la economía lineal. Se considera que la economía actual funciona bajo un modelo lineal: extraer, producir, utilizar y tirar. Se extraen de la naturaleza materias primas cuyos costos económicos, energéticos y medioambientales aumentan a medida que escasean; con ellas se producen objetos a los que, contradictoriamente, se les añade valor al mismo tiempo que se les diseña para una vida útil corta, como en el caso de la obsolescencia programada; después de esa corta vida, son desechados. Se impone así un ciclo de consumo de productos desechables, en el que se invita, o más bien se empuja, a los consumidores a adquirir siempre artículos nuevos entre una oferta amplia y variada. Detrás de este sistema existe un gran derroche de materiales y energía en cada etapa de vida de los productos.

2.3 ¿Qué es la economía circular?

La economía circular es un modelo de producción y consumo que surge en contraposición al sistema lineal. Tiene como objetivo mantener el valor material y energético depositado en los bienes, como lo hace la naturaleza, permitiendo que materiales y energía fluyan a través de ciclos durante el mayor tiempo y el mayor número de veces posible.

Para comprender mejor el concepto es necesario conocer los principios que la rigen y las características que la distinguen, expuestos en el informe *Hacia una economía circular: motivos*

económicos para una transición acelerada de la Fundación Ellen MacArthur (2015), que se analizan a continuación.

2.3.1 Ciclos de la economía circular

Ciclo biológico. Comprende las materias renovables y su gestión. Al tratarse de productos orgánicos, una vez aprovechados, sus residuos se gestionan para que los nutrientes y otras fuentes de valor puedan ser metabolizados y aprovechados dentro del sistema.

Ciclo técnico. Comprende las materias finitas y su gestión. Se busca que los materiales permanezcan el mayor tiempo posible y circulen el mayor número de veces dentro del ciclo mediante diferentes procesos.

2.3.2 Principios de la economía circular

Selección óptima de los recursos. Cuando el sistema circular necesita utilizar materias primas y recursos, selecciona de forma óptima tanto las materias como las tecnologías y los procesos, de manera que se maximice el rendimiento y se minimicen las externalidades negativas. También fomenta la mejora del capital natural al facilitar el flujo de nutrientes dentro del sistema y propiciar condiciones regenerativas en el medio ambiente.

Circularidad desde el origen: el diseño. Los productos deben diseñarse para un desempeño óptimo en todo momento de su vida o vidas: fabricación, utilización, mantenimiento, reacondicionamiento y reciclaje, de modo que los componentes técnicos y las materias sigan circulando en el ciclo técnico y contribuyendo a la economía. Los sistemas se orientan a maximizar el tiempo funcional, el número de ciclos consecutivos, la reutilización y el tiempo empleado en cada ciclo, así como a optimizar la energía empleada en cada uno. Los componentes biológicos se conciben para que los nutrientes vuelvan a la biosfera e inicien un nuevo ciclo, como ocurriría de manera natural, o para ser consumidos o metabolizados por la propia economía y regenerar el valor del nuevo recurso.

Eliminación de las externalidades negativas desde el diseño. El sistema, consciente de su interrelación con otros sistemas, contribuye a reducir daños en ámbitos como la alimentación, la movilidad, la vivienda, la educación, la salud y el ocio, mediante una gestión eficaz de las externalidades negativas que afectan al medio ambiente, como la erosión del suelo, la contaminación del aire y del agua o el ruido.

2.3.3 Características fundamentales de la economía circular

Los residuos se eliminan desde el diseño. Según el ciclo que vayan a seguir los materiales, técnico o biológico, estos deben diseñarse para no generar residuos. Las materias técnicas —polímeros, aleaciones, entre otras— deben poder recuperarse, renovarse o mejorarse; las materias biológicas no deben ser tóxicas y deben permitir una fácil descomposición natural que facilite su vuelta al suelo. Todo ello con el menor consumo energético posible.

La diversidad genera solidez. En un mundo que cambia aceleradamente, la adaptabilidad y la versatilidad son necesarias. La economía circular apuesta por incluir a todas las empresas en el sistema, sin importar su tamaño: las grandes aportan volumen de producción y eficiencia mediante curvas de aprendizaje y economías de escala, y las pequeñas aportan modelos alternativos en momentos de crisis gracias a su mayor flexibilidad. En conjunto, generan mayor resiliencia.

Las energías renovables impulsan la economía. No tendría sentido una producción con materiales que circulen en ciclos si no se utilizaran energías renovables.

Pensar en sistemas. En el mundo real, todo fenómeno está interconectado en todos los niveles y direcciones.

Los precios y otros mecanismos de retroalimentación deben reflejar los costos reales. Actualmente muchos productos y servicios, como los combustibles o la energía eléctrica, están subsidiados, lo que impide ver los costos reales de nuestras actividades. En la economía circular, los costos reales ayudan a regular el uso de los recursos e invitan a innovar.

2.3.4 Fuentes de creación de valor en una economía circular

El poder del círculo interior. Cuanto más cerrado sea un círculo, más valiosa es la estrategia: es mejor dar mantenimiento que reparar, reparar que reutilizar, reutilizar que refabricar y refabricar que reciclar. Cuanto más estrecho es el círculo, más se conserva el valor incorporado en mano de obra, energía y otros recursos.

El poder de circular más tiempo. Se trata de mantener los productos en los círculos internos el mayor tiempo posible, ya sea mediante un ciclo de vida largo o mediante ciclos de vida consecutivos; en cualquier caso, el camino elegido debe ser el óptimo en cuanto a preservación de valor y uso de energía.

El poder del uso en cascada. La reutilización no se da solo dentro de la misma línea de producto, sino que puede diversificarse en toda la cadena de valor para evitar el ingreso de materias vírgenes.

El poder de los insumos puros. El uso de materias no contaminadas a lo largo de los ciclos, sobre todo del ciclo técnico, incrementa la vida de los productos y optimiza su gestión dentro del sistema.

2.3.5 El marco RESOLVE

La Tabla 1 resume las seis palancas de acción del marco RESOLVE.

Tabla 1. Marco RESOLVE de la economía circular.

Palanca	Acciones
Regenerar (<i>Regenerate</i>)	Cambiar a materias y energías renovables. Recuperar, retener y restablecer la salud de los ecosistemas. Devolver a la biosfera los recursos biológicos recuperados.
Compartir (<i>Share</i>)	Compartir activos (p. ej., automóviles, habitaciones, aparatos). Reutilizar y usar bienes de segunda mano. Prolongar la vida útil mediante mantenimiento, diseño orientado a la durabilidad y actualización.
Optimizar (<i>Optimise</i>)	Incrementar el rendimiento y la eficiencia del producto. Eliminar los residuos de la producción y de la cadena de suministro. Utilizar big data, automatización, detección y dirección remotas.
Ciclar (<i>Loop</i>)	Refabricar productos o componentes. Reciclar materiales. Digerir anaeróbicamente. Extraer componentes bioquímicos de los residuos orgánicos.
Virtualizar (<i>Virtualise</i>)	Desmaterializar directamente (p. ej., libros, CD, DVD, viajes) e indirectamente (p. ej., compras por internet).
Intercambiar (<i>Exchange</i>)	Sustituir materiales antiguos por materiales avanzados no renovables. Aplicar nuevas tecnologías (p. ej., impresión 3D). Elegir nuevos productos y servicios (p. ej., transporte multimodal).

Fuente: Fundación Ellen MacArthur (2015).

2.3.6 Jerarquía de la gestión de residuos según su sostenibilidad y valor económico

Mediante el análisis de ciclo de vida (ACV) de los productos y la jerarquía de gestión de residuos que propone la Comisión Europea en el Plan de Economía Circular, es posible visualizar la mejor manera de gestionar los residuos. Para comprender mejor este elemento se retoma lo expuesto en el informe *Iniciativas empresariales de economía circular en el País Vasco. Descripción de 36 proyectos*, de la sociedad pública Ihobe (2017) (Fig. 1):

1. **Prevención y ecodiseño.** Es la principal estrategia para evitar la generación de residuos, al incorporar las mejores técnicas disponibles en los procesos productivos desde su origen.
2. **Recuperación de productos y equipos.** Incluye la remanufactura, la reutilización y la reparación, diferenciando los productos completos de sus piezas y componentes.
3. **Recuperación de materiales secundarios.** Tanto la de alto valor como la de menor valor, denominadas en inglés *upcycling* y *downcycling*, respectivamente.
4. **Recuperación energética.** Incluso cuando se destina a la generación de combustibles; es aún la única respuesta posible para numerosas corrientes de residuos.
5. **Eliminación en vertedero.** No genera valor alguno; al contrario, se desechan recursos y se generan externalidades negativas que deben ser gestionadas.

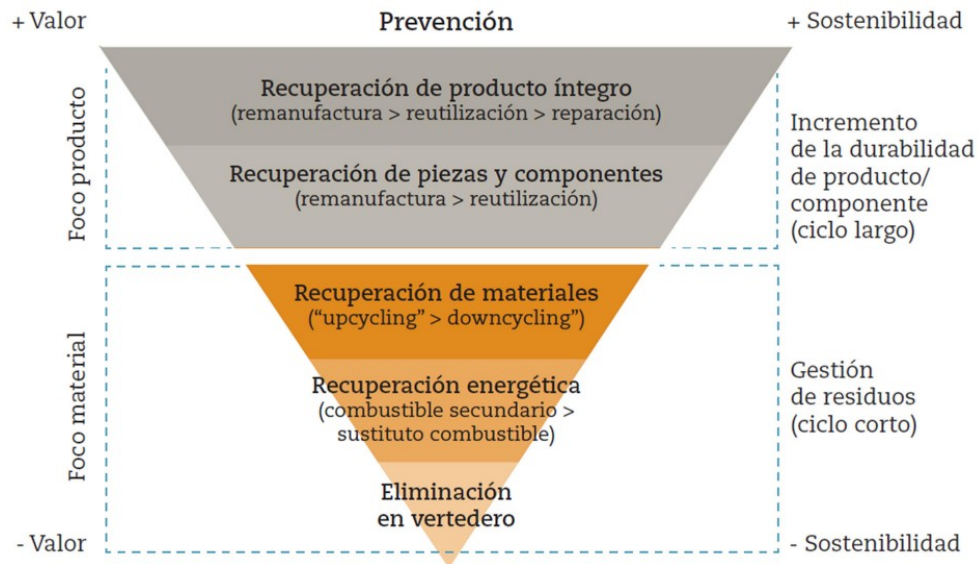


Fig. 1. Economía circular y jerarquía de residuos. Fuente: Ihobe (2017, p. 9).

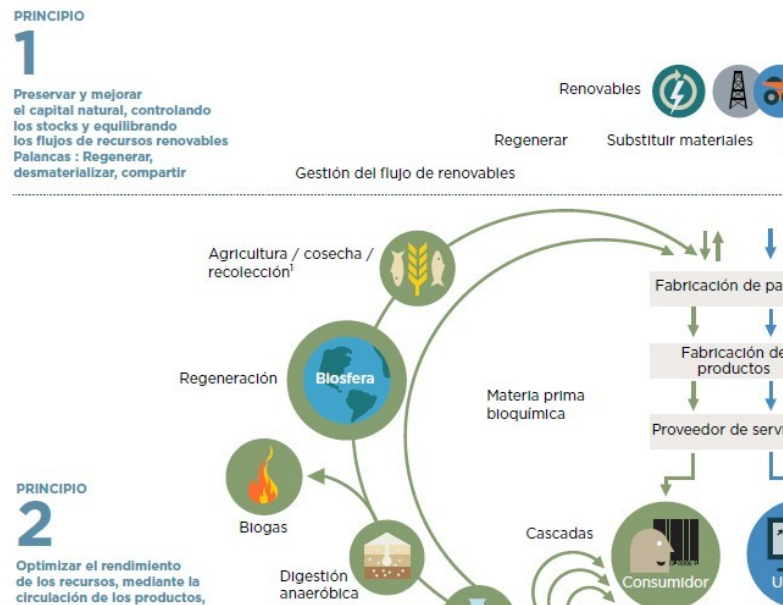


Fig. 2. Esquema de una economía circular («diagrama de la mariposa»). Fuente: Fundación Ellen MacArthur (2015, p. 6).

3. CONCLUSIONES

La economía circular abre la puerta hacia un modelo productivo y de consumo amigable con el medio ambiente y económicamente atractivo, y por tanto beneficioso para la sociedad. Da paso a muchos modelos de negocio nuevos en sectores como la producción textil, la alimentación, la construcción y el transporte, e incluso permite aplicar sus principios a los centros urbanos.

En los sectores industriales se producirán grandes cambios, sobre todo en la etapa de diseño, ya que la economía circular la considera la más importante: en ella se definen los materiales y procesos que se utilizarán, la vida o vidas útiles del producto y de sus materiales, y su posterior eliminación como

última alternativa. Esto coloca a la ingeniería en el centro de la transición.

La economía circular no solo impactará la industria, sino también sectores como la construcción, donde la domótica y el biomimetismo desempeñan un papel importante, junto con el uso de materiales reciclados. La forma en que se construyen y funcionan los edificios adquiere cada vez más importancia, como lo muestra el creciente interés en las certificaciones de construcción sostenible, como la certificación LEED.

Cada vez son más los gobiernos nacionales y locales que se suman a esta transformación, entre los que destaca la Unión Europea, que no solo ha incluido políticas que fomentan la economía circular, sino que ha destinado fondos millonarios a la investigación y la implementación de proyectos circulares. A estos gobiernos se han sumado importantes corporaciones multinacionales como Google, Apple, Nike, Unilever, Danone, Philips, McDonald's, Mitsubishi, H&M, HP, Ikea, SC Johnson, Coca-Cola y Michelin, entre otras, así como reconocidas universidades de todo el mundo.

En la economía circular, la educación y la concienciación de los consumidores desempeñan un papel importante, y en ello internet es clave, no solo como instrumento de difusión, sino también como canal de distribución y venta de modelos de negocio innovadores y sostenibles. Algunas aplicaciones de esta herramienta son el internet de las cosas, el big data, las ciudades inteligentes y la realidad aumentada.

REFERENCIAS

- ABC. (15 de noviembre de 2012). *ABC, tu diario en español*. Recuperado el 11 de mayo de 2017, de <http://www.abc.es/natural-vivirenverde/20121115/abci-turistas-residuos-europa-201211151315.html>
- Cotec. (2017). *Situación y evolución de la economía circular en España*. Fundación Cotec.
- Ellen MacArthur Foundation. (2015). *CE100 directory*. Recuperado el 2 de abril de 2017, de <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/ce100/directory>
- Fundación Ellen MacArthur. (2015). *Hacia una economía circular: motivos económicos para una transición acelerada*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/es/publicaciones>
- Ihobe. (2017). *Iniciativas empresariales de economía circular en el País Vasco. Descripción de 36 proyectos*. Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental; Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial y Vivienda, Gobierno Vasco.
- Mollison, B. y Slay, R. M. (s. f.). *Introducción a la permacultura*. Recuperado el 15 de abril de 2017, de https://ecocosas.com/wp-content/uploads/Biblioteca/perma/Introduccion_a_la_Permacultura-BiII_Mollison.pdf
- Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Nueva York.
- Torre-Marín, C. (2009). Ecología industrial. *Ingeniería, Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán*, 13. Recuperado el 14 de marzo de 2017, de http://www.revista.ingenieria.uady.mx/volumen13/ecologia_industrial.pdf

Reutilización de equipo institucional dado de baja en dispositivos médicos

Un estudio de caso de innovación frugal en un hospital público

Daniel Arturo Orozco Leal¹ y Eddie Omar Flores Aceituno²

¹Estudiante de Ingeniería Mecánica Industrial, ²Profesor. Centro Universitario de Occidente (CUNOC),
Universidad de San Carlos de Guatemala
danielorozco202030551@cunoc.edu.gt · eddie.flores@cunoc.edu.gt

RESUMEN

Los hospitales públicos guatemaltecos suelen descartar equipo en desuso sin evaluar el valor individual de sus partes. Este artículo documenta la reutilización de tres componentes sin registro patrimonial (carcasas de fuentes de poder, empuñaduras de sillas de ruedas y perillas) en la fabricación de una bicicleta estática de rehabilitación de bajo costo en el Hospital Nacional de San Marcos. Cada caso detalla el componente de origen, su nueva función y el criterio técnico de adaptación aplicado. Se propone incorporar una revisión técnica a nivel de componente previa a la disposición final del equipo hospitalario, para recuperar piezas aprovechables dentro del marco legal vigente.

Palabras clave: innovación frugal; reutilización de equipo institucional; gestión de bienes en desuso; dispositivos médicos de bajo costo; hospital público.

ABSTRACT

Public hospitals in Guatemala often discard end-of-life equipment without evaluating the individual value of its parts. This article documents the reuse of three non-inventoried components (power supply casings, wheelchair grips, and knobs) in the fabrication of a low-cost stationary rehabilitation bicycle at the Hospital Nacional de San Marcos. Each case describes the source part, its new function, and the technical adaptation criteria applied. The article proposes incorporating a component-level technical review prior to final disposal to recover reusable parts within the current legal framework.

Keywords: frugal innovation; institutional equipment reuse; end-of-life asset management; low-cost medical devices; public hospital.

1. INTRODUCCIÓN

Los hospitales públicos de Guatemala operan con presupuesto limitado, y el equipo médico especializado resulta, muchas veces, inaccesible para estas instituciones. El área de fisioterapia de consulta externa del Hospital Nacional de San Marcos «Dr. Moisés Villagrán Mazariégo» (HNSM) carecía de equipo adecuado para la rehabilitación de extremidades superiores e inferiores. Esta situación motivó el desarrollo de un prototipo de bajo costo durante un Ejercicio Profesional Supervisado (EPS) de Ingeniería Mecánica Industrial (Orozco Leal, 2026).

En Guatemala, el Decreto 19-2024 regula la disposición de bienes muebles inservibles del Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social. La norma declara inservibles los bienes registrados en inventario y ordena su venta como lote consolidado (Congreso de la República de Guatemala, 2024). En julio de 2026, el HNSM vendió tres expedientes de material ferroso desechado bajo este procedimiento (Hospital Nacional de San Marcos, 2026). Sin embargo, no todo el equipo fuera de uso tiene número de inventario: parte de él llega por donación o sin origen definido, y se acumula sin seguir ese procedimiento. En la práctica, ambas categorías terminan descartadas sin una revisión a nivel de componente.

La innovación frugal describe el desarrollo de soluciones médicas funcionales con recursos limitados, mediante la simplificación de tecnología o la adaptación de medios ya disponibles (Tran y Ravaut, 2016). Dentro de ese marco, este artículo documenta tres casos de reutilización de componentes de equipo institucional sin registro patrimonial, empleados en la fabricación del prototipo desarrollado en el HNSM. A partir de estos casos, se examina el potencial de complementar la evaluación técnica existente con una revisión a nivel de componente, aplicable tanto a bienes del Estado registrados como a equipo sin inventario.

2. MÉTODOS

2.1 Contexto y alcance

Este trabajo se basa en la documentación generada durante el desarrollo del prototipo en el HNSM, entre octubre de 2025 y junio de 2026. El prototipo fue entregado a la institución al finalizar el proyecto.

El equipo institucional fuera de uso se distingue en dos categorías. La primera corresponde a bienes del Estado registrados en inventario, sujetos al procedimiento del Decreto 19-2024 y destinados a la venta pública. La segunda corresponde a equipo sin número de inventario, de origen donado o no determinado, que se encuentra tanto en el área de mantenimiento, donde se guarda material de uso diverso, como en un espacio de chatarra separado, donde se agrupan los lotes antes de su venta. Los tres casos de este artículo provienen únicamente de la segunda categoría.

2.2 Autorización

La extracción de cada componente contó con autorización verbal del encargado del área de Mantenimiento y Servicios Generales del hospital. Al tratarse de equipo sin registro patrimonial, no existió un acta formal equivalente a la exigida por el Decreto 19-2024 para bienes del Estado.

2.3 Criterio de evaluación derivado de los casos

Una vez concluido el proyecto, se identificó un criterio común a partir del análisis conjunto de los tres casos: si la forma del componente resolvía el requerimiento de diseño sin modificación mayor, si su material y su historial de uso eran seguros para el contacto con el paciente, y si su adaptación era posible con las herramientas del taller. Este criterio no fue un instrumento validado de forma prospectiva; se presenta como una sistematización posterior de la lógica de decisión seguida en cada caso.

3. RESULTADOS

La Tabla 1 resume los tres casos documentados, y las Figs. 1 a 3 muestran los componentes reutilizados en su nueva función.

Tabla 1. Casos de reutilización documentados.

Componente	Nuevo uso	Criterio aplicado
Dos carcacas de fuente de poder	Caja de control electrónico	Compartimiento en buenas condiciones; no requirió fabricar una caja nueva
Empuñaduras de silla de ruedas	Manijas del sistema superior	Diámetro adecuado para agarre; material ya probado en contacto con el usuario
Lote de perillas	Tornillos con perilla del ajuste telescópico	Diámetro compatible con M8; sin equivalente comercial individual



Fig. 1. Caja de control electrónico fabricada a partir de dos carcacas de fuente de poder reutilizadas.

Las carcacas de fuente de poder y el lote de perillas se obtuvieron del espacio de chatarra del hospital, antes de la separación formal de los lotes. Las empuñaduras de silla de ruedas se obtuvieron del área de mantenimiento, donde la silla permanecía sin reparación.



Fig. 2. Manijas del sistema superior fabricadas a partir de empuñaduras de silla de ruedas reutilizadas.



Fig. 3. Tornillos con perilla fabricados a partir de perillas de equipo institucional reutilizadas.

Ninguno de los tres componentes tiene un equivalente comercial disponible de forma individual en el mercado local. Los tornillos con perilla no se encuentran a la venta en San Marcos, y las empuñaduras

ergonómicas y las carcasas metálicas equivalentes se fabrican como parte de otros equipos, no como piezas sueltas. La reutilización evitó el costo de adquisición y el tiempo de fabricar estas piezas desde cero.

El análisis conjunto de los tres casos permite proponer tres criterios de evaluación para componentes de equipo institucional sin registro patrimonial:

- Que la forma o dimensión del componente resuelva el requerimiento de diseño sin modificación estructural mayor.
- Que el material y el historial de uso del componente sean seguros para el contacto con el paciente.
- Que la adaptación sea posible con las herramientas ya disponibles en el taller institucional.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Los tres casos documentados muestran que determinados componentes de equipo institucional sin registro patrimonial resultaron reutilizables en este proyecto concreto, y que ninguno de ellos tenía equivalente comercial disponible de forma individual en el mercado local.

Los ejemplos de innovación frugal descritos por Tran y Ravaut (2016) suelen basarse en la simplificación de tecnología existente o en materiales externos genéricos, como las ambulancias adaptadas a partir de bicicletas. Los casos de este estudio provienen, en cambio, de equipo que ya pertenecía a la misma institución que recibió el dispositivo terminado.

El HNSM aplica el procedimiento del Decreto 19-2024 para sus bienes registrados. Antes de declarar un equipo inservible, el personal de mantenimiento elabora un dictamen técnico que evalúa si el equipo, como unidad completa, es reparable. Ese dictamen no evalúa si alguno de sus componentes individuales conserva valor funcional una vez declarada inservible la unidad. Los tres casos documentados sugieren que una revisión complementaria a nivel de componente, realizada por el mismo personal de mantenimiento dentro del proceso legal vigente, podría identificar piezas aprovechables antes de que el equipo llegue a su disposición final. Esta posibilidad se plantea como propuesta para consideración institucional, no como una práctica ya implementada.

Esta lógica de aprovechamiento por componente ya ocurre de forma informal en el hospital. Durante el proyecto se observó que el personal de mantenimiento conserva, de las reparaciones de equipo inventariado, componentes que sustituye pero que aún pueden servir en intervenciones futuras. Estas piezas no corresponden a equipo completo dado de baja, sino a componentes específicos retirados durante una reparación, mientras el equipo original permanece en servicio con la pieza nueva instalada. Este ejemplo respalda la propuesta: extender la revisión a nivel de componente, tanto en reparaciones como en equipo próximo a su disposición final, ampliaría el aprovechamiento de recursos ya presentes en la institución.

4.1 Limitaciones

Este estudio documenta un caso único en una sola institución. El criterio de evaluación propuesto no se ha validado en otros proyectos. Tampoco se dispone de seguimiento sobre la durabilidad de los componentes reutilizados, ya que el prototipo fue entregado a la institución al finalizar el EPS.

5. CONCLUSIONES

Los tres casos documentados muestran que el equipo institucional sin registro patrimonial puede constituir un recurso de fabricación aprovechable para hospitales públicos con presupuesto limitado. En este proyecto, tres componentes sin registro patrimonial resolvieron requerimientos específicos de diseño sin costo de adquisición y sin tener equivalente comercial disponible de forma individual en el mercado local.

Este hallazgo sustenta una propuesta concreta: complementar el dictamen técnico existente, que evalúa el equipo como unidad completa, con una revisión a nivel de componente. Esta revisión, aplicable tanto a bienes del Estado registrados bajo el Decreto 19-2024 como a equipo sin inventario, permitiría identificar piezas aprovechables antes de la disposición final, sin comprometer el cumplimiento del marco legal vigente.

Este caso sugiere que la innovación frugal en salud no depende únicamente de materiales externos o de tecnología simplificada. El propio inventario hospitalario, evaluado con un criterio técnico definido a nivel de componente, puede convertirse en un recurso de fabricación válido para el desarrollo de equipo médico de bajo costo.

REFERENCIAS

- Congreso de la República de Guatemala. (2024). Decreto Número 19-2024, Ley para la Disposición de Bienes Muebles Inservibles del Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social. *Diario de Centro América*, CCCXXV(76).
- Hospital Nacional de San Marcos «Dr. Moisés Villagrán Mazariegos». (2026, 20 de julio). *Transparencia y gestión eficiente al servicio de la población* [Publicación]. Instagram. @hnsmsocial.
- Orozco Leal, D. A. (2026). *Diseño y fabricación de prototipo de bicicleta estática de rehabilitación de extremidades superiores e inferiores para fisioterapia en el Hospital Nacional de San Marcos, San Marcos* [Trabajo de graduación no publicado]. Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario de Occidente.
- Tran, V.-T. y Ravaut, P. (2016). Frugal innovation in medicine for low resource settings. *BMC Medicine*, 14, 102. <https://doi.org/10.1186/s12916-016-0651-1>

Frenado dinámico con disipación resistiva como alternativa a la resistencia por fricción

Diseño e implementación de un sistema de resistencia dinámica en mecanismos de movimiento cíclico para rehabilitación

Daniel Arturo Orozco Leal¹ y Eddie Omar Flores Aceituno²

¹Estudiante de Ingeniería Mecánica Industrial, ²Profesor. Centro Universitario de Occidente (CUNOC),
Universidad de San Carlos de Guatemala
eddie.flores@cunoc.edu.gt

RESUMEN

Los equipos de ejercicio y rehabilitación con resistencia ajustable suelen emplear fricción mecánica, sujeta a desgaste y mantenimiento. Este artículo documenta el diseño de un sistema de frenado dinámico con disipación resistiva, implementado como alternativa a la fricción en un prototipo hospitalario de rehabilitación. El sistema aprovecha que un motor de corriente directa actúa como generador cuando gira por una fuerza externa, disipando la corriente producida en una resistencia de potencia controlada por un transistor MOSFET. Se describen el fundamento teórico del frenado, la arquitectura del circuito, las conexiones entre sus componentes y la lógica de control necesaria para regularlo. Las pruebas realizadas confirmaron el principio de frenado dinámico y permitieron ajustar, de forma empírica, un rango de resistencia utilizable para el prototipo evaluado.

Palabras clave: frenado dinámico; disipación resistiva; motor de corriente directa; rehabilitación de bajo costo; control por PWM.

ABSTRACT

Exercise and rehabilitation equipment with adjustable resistance commonly relies on mechanical friction, which wears down over time and requires maintenance. This article documents the design of a dynamic braking system with resistive dissipation, implemented as an alternative to friction in a hospital rehabilitation prototype. The system takes advantage of the fact that a direct current motor acts as a generator when its shaft is turned by an external force, dissipating the resulting current through a power resistor controlled by a MOSFET transistor. The theoretical basis of the braking effect, the circuit architecture, the connections between its components, and the control logic required to regulate it are described. The tests performed confirmed the dynamic braking principle and allowed an empirical adjustment of a usable resistance range for the prototype evaluated.

Keywords: dynamic braking; resistive dissipation; direct current motor; low-cost rehabilitation; PWM control.

1. INTRODUCCIÓN

Los equipos de ejercicio y rehabilitación con resistencia ajustable emplean con frecuencia sistemas de fricción mecánica: almohadillas, bandas o discos que se ajustan manualmente. Estos sistemas se desgastan con el uso y requieren mantenimiento periódico. El frenado electromagnético o electrónico es una alternativa ya empleada en ergómetros de ejercicio, con ventajas de precisión y ausencia de desgaste. En el área de fisioterapia del Hospital Nacional de San Marcos «Dr. Moisés Villagrán Mazariegos» (HNSM) se desarrolló un prototipo de rehabilitación que sustituyó la fricción mecánica por un sistema de este tipo (Orozco Leal, 2026).

Un motor de corriente directa con escobillas es una máquina reversible: cuando una fuerza externa gira su eje, el motor genera corriente en sus terminales (Chapman, 2012). Esa corriente puede conducirse hacia una resistencia de potencia; el ciclo de trabajo de la señal PWM que controla el transistor MOSFET regula la conducción de ese circuito y, con ella, la corriente generada y el torque de frenado resultante. Este principio permite construir resistencia ajustable sin piezas mecánicas de fricción.

Este artículo documenta el fundamento teórico, la arquitectura, las conexiones y la lógica de control de un sistema de frenado dinámico con disipación resistiva, implementado como alternativa a la fricción mecánica en un mecanismo de pedaleo cíclico para rehabilitación.

2. MÉTODOS

2.1 Contexto y alcance

Este trabajo se basa en la documentación generada durante el desarrollo del prototipo en el HNSM, entre octubre de 2025 y junio de 2026.

2.2 Fundamento teórico del frenado dinámico

El frenado dinámico de un motor de corriente directa se explica mediante dos principios del electromagnetismo. La ley de Faraday establece que un conductor que se mueve dentro de un campo magnético induce una tensión proporcional a la velocidad de ese movimiento. La ley de Lenz establece que la corriente inducida se opone al cambio que la origina (Chapman, 2012). Aplicado al motor, esto se expresa mediante la tensión inducida:

$$V_{\text{fem}} = k_e \cdot \omega \quad (1)$$

donde k_e es la constante de tensión del motor y ω su velocidad angular. La corriente resultante sigue la ley de Ohm:

$$I = V_{\text{fem}} / R \quad (2)$$

con R como la resistencia total del circuito. El torque de frenado es proporcional a esa corriente:

$$T_{\text{freno}} = k_t \cdot I \quad (3)$$

donde k_t es la constante de torque del motor (Chapman, 2012). El MOSFET no impone una resistencia fija: su ciclo de trabajo D determina la fracción del tiempo en que el circuito conduce. De forma aproximada, el torque de frenado promedio puede expresarse como:

$$T_{\text{freno}} \approx k_t \cdot (D \cdot V_{\text{fem}}) / R \quad (4)$$

Esta expresión es una aproximación de primer orden, útil como guía de diseño; no sustituye una calibración instrumentada del sistema. Estos principios no dependen del modelo específico de motor: cualquier motor de corriente directa con escobillas presenta este comportamiento, en mayor o menor medida, según sus propias constantes k_e y k_t , su resistencia interna y su inductancia de armadura.

2.3 Arquitectura del sistema

El sistema se construye alrededor de un motor reversible, un circuito de disipación controlado y un mecanismo de aislamiento del motor. La Tabla 1 resume los componentes esenciales y su función, y la Fig. 1 muestra el circuito electrónico.

Tabla 1. Componentes esenciales del sistema de resistencia.

Componente	Función	Ejemplo empleado
Motor de corriente directa reversible	Actúa como generador y freno	MY1025Z2, 12 V, 250 W
Resistencia de potencia	Disipa la corriente generada	Cerámica, 1 Ω , 100 W
Transistor MOSFET de nivel lógico	Regula la carga mediante PWM	IRLZ44N
Relé de conmutación	Aísla el motor del circuito de tracción	DPDT, 30 A
Microcontrolador con salida PWM	Genera la señal de control	Arduino
Interfaz de ajuste	Permite variar el nivel de resistencia	Pantalla táctil

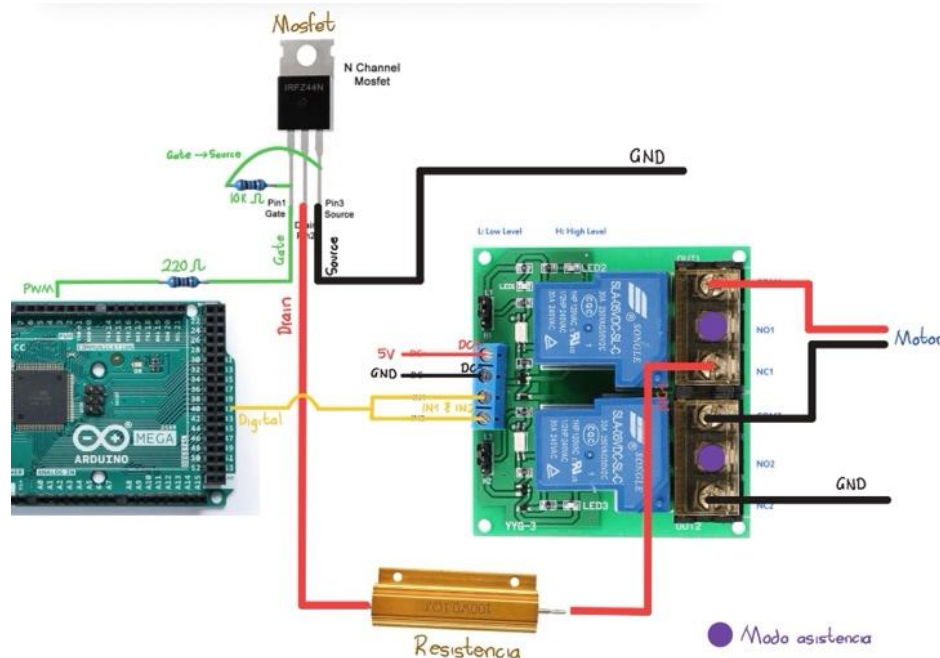


Fig. 1. Circuito electrónico del sistema de resistencia empleado en el proyecto.

La configuración inicial empleó una resistencia cerámica de 3 Ω y un MOSFET IRLZ44N. Este transistor especifica su resistencia de conducción a una tensión de compuerta de 10 V; a los 5 V que entrega un microcontrolador conduce solo parcialmente, con una resistencia de conducción

considerablemente mayor a la nominal. Se sustituyó por un IRLZ44N, un MOSFET de nivel lógico cuya resistencia de conducción está especificada directamente a 5 V, y la resistencia cerámica se cambió a 1 Ω para incrementar la corriente disponible.

2.4 Conexiones del circuito

La Tabla 2 resume las conexiones principales del circuito de resistencia.

Tabla 2. Conexiones del circuito de resistencia.

Terminal	Conexión
Gate (MOSFET)	Resistencia de 220 Ω hacia el pin PWM; resistencia de 10 k Ω hacia el Source
Drain (MOSFET)	Resistencia cerámica de 1 Ω , conectada a NC1 del relé
Source (MOSFET)	GND común de 12 V
COM1 (relé)	Terminal positiva del motor
COM2 (relé)	Terminal negativa del motor
NC1 (relé)	Resistencia cerámica (desde el Drain del MOSFET)
NC2 (relé)	GND común de 12 V
IN1 / IN2 (relé)	Pin digital del microcontrolador (señal de modo)

La resistencia de 220 Ω limita la corriente de control hacia la compuerta del MOSFET. La resistencia de 10 k Ω mantiene la compuerta en un nivel bajo cuando no hay señal, evitando que el transistor conduzca de forma involuntaria. Un diodo de protección (1N5408) conecta los terminales COM1 y COM2 del relé, con el cátodo orientado hacia COM1, para absorber picos de tensión generados por el motor.

2.5 Programación esencial

La lógica esencial del sistema consiste en aislar el motor del circuito de tracción y aplicar un valor de PWM a la resistencia. El siguiente fragmento ilustra esta lógica de forma simplificada, sin especificar un microcontrolador en particular:

```
const int PIN_RES = X;    // pin PWM del microcontrolador
const int PIN_RELE = Y;   // pin digital de control del relé

void setup() {
  pinMode(PIN_RES, OUTPUT);
  pinMode(PIN_RELE, OUTPUT);
  digitalWrite(PIN_RELE, HIGH); // aísla el motor
}

void aplicarResistencia(int nivel) {
  nivel = constrain(nivel, 0, MAX_SEGURO);
  analogWrite(PIN_RES, nivel);
}
```

Listado 1. Lógica esencial de control del frenado dinámico.

En el prototipo, este valor se ajustó mediante una interfaz de diez pasos incrementales; el principio de control, sin embargo, se reduce a variar el nivel de PWM dentro de un rango seguro definido por el diseñador.

2.6 Pruebas realizadas

Se realizaron tres pruebas secuenciales: cortocircuitar directamente las terminales del motor para verificar el principio de frenado dinámico; probar el circuito de resistencia con la configuración inicial (3 Ω , IRFZ44N); y ajustar de forma empírica el rango de PWM utilizable con la configuración final (1 Ω , IRLZ44N), junto con el personal de fisioterapia.

3. RESULTADOS

Al cortocircuitar las terminales del motor, el eje ofreció una oposición significativamente mayor a la de su giro libre, comportamiento consistente con el principio de frenado dinámico descrito en la sección 2.2. El cortocircuito de un motor de corriente directa produce la corriente de armadura más alta posible para una velocidad dada, limitada principalmente por su resistencia interna.

Con la configuración inicial (3 Ω , IRFZ44N), la resistencia percibida al pedalear fue prácticamente nula.

Con la configuración final (1 Ω , IRLZ44N), se percibió una oposición notable al pedaleo. Según la ley de Ohm, reducir la resistencia total del circuito permite una mayor corriente para una misma tensión generada y, con ella, un mayor torque de frenado; este cambio también incrementa la potencia que debe disiparse en la resistencia cerámica.

El rango de PWM utilizable se definió de forma empírica, sin instrumento de medición, hasta alcanzar un nivel considerado adecuado por el personal de fisioterapia. La Tabla 3 muestra los valores de PWM correspondientes a los diez pasos de la interfaz, calculados por interpolación lineal entre los límites definidos en el programa de control.

Tabla 3. Valores de PWM por paso de la interfaz.

Paso	PWM aplicado (0–255)	Porcentaje del máximo
1	23	9 %
2	46	18 %
3	69	27 %
4	92	36 %
5	115	45 %
6	138	54 %
7	161	63 %
8	184	72 %
9	207	81 %
10	230	90 %

Estos valores corresponden a la señal de control aplicada al MOSFET, no a una medición directa de la resistencia percibida por el usuario en cada paso; esa relación queda pendiente de caracterizar con instrumentación adecuada.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Los resultados de este caso muestran que un motor de corriente directa reversible, combinado con un circuito de disipación controlado por PWM, funcionó como sistema de frenado dinámico en las pruebas realizadas sobre este prototipo, sin recurrir a fricción mecánica.

A diferencia de los sistemas de fricción mecánica, este circuito no incorpora piezas de contacto sujetas a desgaste. El ajuste de la resistencia se realiza mediante una señal eléctrica, en lugar de un mecanismo de presión manual, lo que simplifica la calibración y el mantenimiento del sistema.

La selección de la resistencia cerámica debe considerar la potencia eléctrica que puede disiparse durante la operación. Esta potencia puede estimarse a partir de la corriente y la tensión efectivamente generadas por el motor:

$$P_R = I^2 R = V^2 / R \quad (5)$$

Una resistencia subdimensionada frente a esa potencia puede sobrecalentarse o fallar bajo uso prolongado.

El principio descrito no depende de un mecanismo de pedaleo en particular. Cualquier dispositivo de rehabilitación con movimiento cíclico y un motor de corriente directa acoplado a su transmisión —manivelas, poleas o mecanismos oscilantes— podría emplear la misma arquitectura, ajustando la resistencia cerámica y el MOSFET a la corriente y la potencia esperadas del motor utilizado.

4.1 Limitaciones

Este estudio presenta limitaciones. No se realizó medición instrumentada de la corriente ni del torque de frenado; el rango de operación se definió de forma empírica y cualitativa, sin una curva que relacione el nivel de PWM con la resistencia percibida. El prototipo fue entregado a la institución al finalizar el proyecto, por lo que no fue posible dar seguimiento a su desempeño posterior. El estudio documenta un caso único, aplicado a un mecanismo de pedaleo cíclico.

5. CONCLUSIONES

Los resultados de este caso muestran que un motor de corriente directa reversible, combinado con un circuito de disipación resistiva controlado por PWM, puede sustituir a la fricción mecánica como sistema de frenado dinámico en un mecanismo de pedaleo cíclico.

Este caso documenta el fundamento teórico, la arquitectura, las conexiones y la lógica de control necesarias para implementar esta alternativa, y puede servir como referencia técnica para quienes evalúen un sistema similar en otros mecanismos de movimiento cíclico orientados a la rehabilitación.

Queda pendiente cuantificar, mediante instrumentación adecuada, la relación entre el nivel de PWM aplicado y la resistencia real percibida por el usuario.

REFERENCIAS

Chapman, S. J. (2012). *Electric machinery fundamentals* (5.^a ed.). McGraw-Hill.

Orozco Leal, D. A. (2026). *Diseño y fabricación de prototipo de bicicleta estática de rehabilitación de extremidades superiores e inferiores para fisioterapia en el Hospital Nacional de San Marcos, San Marcos* [Trabajo de graduación no publicado]. Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario de Occidente.

Diseño de estaciones de bajo coste para medir la calidad del aire de la ciudad de Quetzaltenango

C. E. Vargas¹, M. López¹ y E. O. Flores¹

¹Centro Universitario de Occidente (CUNOC), Universidad de San Carlos de Guatemala
eddie.flores@cunoc.edu.gt

RESUMEN

En este trabajo se presenta el diseño de una estación de medición de la calidad del aire de bajo coste desarrollada en el Centro Universitario de Occidente (CUNOC). Se expone la justificación de las estaciones, sus componentes y módulos principales, el diseño y el prototipo, el dimensionamiento de su sistema de alimentación solar y una estimación de su costo. El proyecto surge de la necesidad de mejorar la calidad de vida de la población de la ciudad de Quetzaltenango mediante una tecnología de bajo coste, ya que una estación formal tiene un costo elevado. El prototipo integra sensores de partículas (PM1.0, PM2.5 y PM10), de gases (CO, O₃, NO_x, NH₃, CO₂) y de temperatura y humedad, y transmite los datos en tiempo real a una plataforma IoT, con un costo aproximado de Q2,093.00 en componentes.

Palabras clave: bajo costo; calidad del aire; estaciones de monitoreo; gases; partículas.

ABSTRACT

This work presents the design of a low-cost air quality monitoring station developed at the Centro Universitario de Occidente (CUNOC). It describes the rationale for the stations, their main components and modules, the design and prototype, the sizing of the solar power system, and a cost estimate. The project arises from the need to improve the quality of life of the population of Quetzaltenango through low-cost technology, since a formal monitoring station is expensive. The prototype integrates particulate matter sensors (PM1.0, PM2.5 and PM10), gas sensors (CO, O₃, NO_x, NH₃, CO₂), and temperature and humidity sensors, and transmits data in real time to an IoT platform, at an approximate component cost of Q2,093.00.

Keywords: low cost; air quality; monitoring stations; gases; particulate matter.

1. INTRODUCCIÓN

La calidad del aire es muy importante en las ciudades, ya que afecta drásticamente la calidad de vida. El parque vehicular ha aumentado considerablemente en la ciudad de Quetzaltenango, principalmente desde la pandemia, y es probablemente la principal fuente de contaminación del aire, seguido de la actividad industrial y otras actividades en general. Para determinar el grado de contaminación del aire es necesario medirlo. Los cinco parámetros más importantes son las partículas (PM2.5 y PM10), el ozono, los óxidos de nitrógeno, los óxidos de azufre y el monóxido de carbono.

Actualmente, en la ciudad de Quetzaltenango hay dos estaciones de medición: la denominada «Los Altos», gestionada por el INSIVUMEH, y una particular en Olinstepeque; ambas miden únicamente partículas PM2.5. Además, para medir efectivamente la calidad del aire de una ciudad se necesita una

red de monitoreo, lo cual resulta muy costoso, y las autoridades locales no le han dado importancia, quizá por desconocimiento de los efectos nocivos de la contaminación sobre la salud pública.

Con este proyecto se diseñan prototipos que se busca replicar en toda la ciudad, para monitorear la calidad del aire con información en tiempo real y de forma continua. Esta información se socializaría por diversos medios de comunicación y podría conectarse a redes internacionales como IQAir, plataforma que agrupa unas 80,000 estaciones de monitoreo en el mundo y colabora con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, Greenpeace y ONU-Hábitat. En este trabajo se presenta el diseño de una estación de bajo coste con sus detalles técnicos y económicos. Conocer la calidad del aire permitirá a la población y a las autoridades tomar decisiones informadas para proteger la salud.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ¿Qué es la calidad del aire?

La calidad del aire mide qué tan limpio o contaminado está el aire que respiramos, según la cantidad de gases y partículas dañinas que contiene [1]–[6]. Sus factores principales son:

- **Contaminantes clave:** partículas finas (como polvo o humo) y gases emitidos por vehículos e industrias (como el dióxido de nitrógeno y el monóxido de carbono).
- **Fuentes:** naturales (incendios, volcanes) o antropogénicas (fábricas, transporte).
- **Efectos:** el aire contaminado daña los pulmones y el corazón; un aire limpio protege la salud de todos.

2.2 Índice de Calidad del Aire (ICA)

El Índice de Calidad del Aire (ICA) es un indicador simplificado que informa a la población qué tan limpio o contaminado está el aire cada día y qué efectos puede tener en la salud [7]–[9]. Utiliza una escala de 0 a 500 puntos dividida en seis categorías representadas por colores (Tabla 1) [10]–[12].

Tabla 1. Categorías del Índice de Calidad del Aire.

Rango	Categoría	Significado
0–50	Buena (Verde)	El aire no representa riesgo para la salud.
51–100	Moderada (Amarillo)	Aceptable para la mayoría; puede afectar a personas muy sensibles.
101–150	Dañina para grupos sensibles (Naranja)	Niños, adultos mayores y personas con asma deben limitar el esfuerzo prolongado al aire libre.
151–200	Dañina para la salud (Rojo)	Todos pueden sentir efectos negativos; se recomienda reducir el ejercicio al aire libre.
201–300	Muy dañina (Morado)	Alerta sanitaria: condiciones de emergencia para toda la población.
301–500	Peligrosa (Marrón)	Advertencia sanitaria grave; se debe evitar salir de casa.

3. DISEÑO DE LA ESTACIÓN DE MEDICIÓN

3.1 Arquitectura general

El sistema está organizado en cuatro módulos funcionales que trabajan en conjunto para adquirir, procesar, transmitir y alimentar la estación (Tabla 2). El flujo de datos sigue la secuencia mostrada en la Fig. 1: los sensores entregan sus lecturas al Arduino MEGA, que las procesa y envía una trama al NodeMCU, el cual las publica en la plataforma Ubidots para su visualización.

Tabla 2. Módulos de la estación.

Módulo	Componentes
1. Control central	Arduino MEGA 2560 (<code>sensor_hub.ino</code>)
2. Sensores	DHT11, MQ-7, MQ-135, MQ-131, MQ-136, PMS5003
3. Comunicación	NodeMCU ESP8266MOD (<code>wifi_gateway.ino</code>); Ubidots / MQTT
4. Alimentación	Panel solar de 8 W, BMS 2S 4 A, baterías Li-ion 18650, módulo DC-DC

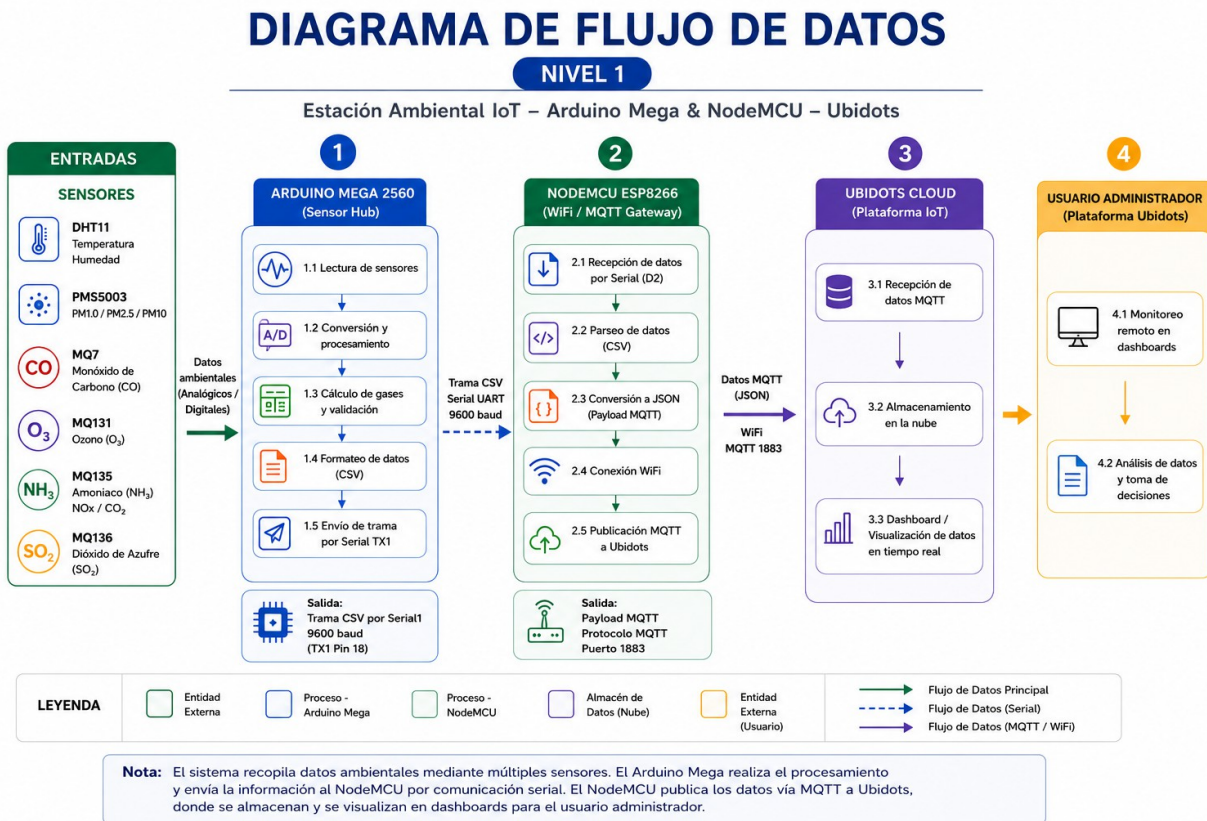


Fig. 1. Diagrama de flujo de datos de la estación, desde los sensores hasta la plataforma Ubidots.

3.2 Módulo 1: control central y procesamiento

El núcleo del sistema es un Arduino MEGA 2560 (microcontrolador ATmega2560), con 54 pines digitales de E/S (15 con PWM), 16 entradas analógicas (A0–A15), memoria flash de 256 KB, SRAM de 8 KB, EEPROM de 4 KB y cuatro puertos UART por hardware. Opera a 5 V, con un voltaje de entrada recomendado de 7 a 12 V; el consumo medido en el proyecto fue de 65 mA a 5 V (0.325 W) en operación normal. La Tabla 3 muestra la asignación de pines.

Tabla 3. Asignación de pines del Arduino MEGA 2560.

Pin	Periférico	Función	Notas
A0	MQ-7	Señal analógica de CO	0–5 V proporcional al gas
A1	MQ-135	Señal analógica CO ₂ /NO _x /NH ₃	Lectura analógica bruta
A2	MQ-131	Señal analógica de ozono	Requiere calibración
A4	MQ-136	Señal analógica de H ₂ S	Entrada analógica
D4	DHT11	Datos digitales de temperatura y humedad	Pull-up externo de 5 kΩ
D12	PMS5003	RX: recepción de partículas	Serial por software, 9600 baud
D13	PMS5003	TX: transmisión	Serial por software
TX1 (pin 18)	NodeMCU ESP8266MOD	Envío de datos procesados	Serial1
5V / GND	Todos los sensores	Alimentación y tierra	Líneas V5 y GND en la placa

El firmware (`sensor_hub.ino`) está implementado en C/C++ sobre el IDE de Arduino y sigue una arquitectura de máquina de estados con bucle principal, con las siguientes etapas:

1. **Inicialización:** configuración de pines, inicio de las interfaces seriales (Serial, Serial1), instanciación de los objetos de los sensores y tiempo de calentamiento de los sensores MQ.
2. **Adquisición de datos:** lectura de señales analógicas (MQ) y digitales (DHT11, PMS5003), con conversión a unidades físicas (ppm, °C, %, µg/m³).
3. **Calibración y conversión:** aplicación del factor R_s/R_0 a los sensores MQ mediante la ecuación (1).
4. **Armado de la trama CSV:** concatenación de las 11 variables en el formato T, H, CO, O3, MQ135_ADC, NH3, NOx, CO2, PM1, PM25, PM10, terminada en salto de línea.
5. **Transmisión:** envío de la trama por Serial1 (TX1, pin 18) hacia el NodeMCU a 9600 baud.
6. **Recuperación de errores:** si el DHT11 no responde, se reintenta la lectura y se envía 0.0 como valor de falla para no bloquear el ciclo.

3.3 Módulo 2: sensores

Sensor DHT11 (temperatura y humedad). Mide la temperatura ambiente (0–50 °C, ±2 °C) y la humedad relativa (20–90 %, ±5 %), y entrega datos digitales estables al microcontrolador sin necesidad de conversión analógica. Se conecta a 5 V, GND y al pin D4 (DATA), con una resistencia pull-up de 5 kΩ entre DATA y 5 V soldada en la placa perforada. Utiliza la librería `DHT.h` de Adafruit, inicializada como `DHT dht(4, DHT11);`.

Sensores MQ (gases). Son dispositivos semiconductores cuya resistencia interna (R_s) varía al entrar en contacto con gases específicos; la variación produce un cambio de voltaje que se lee en la entrada analógica. Todos se conectan a 5 V, GND y a su pin analógico (A0, A1, A2 o A4). La concentración se calcula mediante:

$$\text{ppm} = A \cdot (R_s / R_0)^B \quad (1)$$

donde A y B son constantes de la hoja de datos de cada sensor y R_0 es la resistencia del sensor en aire limpio (sección 5.1). La Tabla 4 resume los sensores de gases empleados.

Tabla 4. Sensores de gases de la serie MQ.

Sensor	Gas detectado	Pin	Rango	Notas
MQ-7	CO (monóxido de carbono)	A0	20–2000 ppm	Calentamiento de ~3 min
MQ-135	CO ₂ , NO _x , NH ₃ , benceno	A1	Calidad del aire	Lectura ADC bruta + conversión
MQ-131	Ozono (O ₃)	A2	Trazas bajas	Calibración pendiente
MQ-136	H ₂ S y otros gases	A4	Variable	Útil para tendencias

Sensor PMS5003 (material particulado). Sensor láser que mide partículas en suspensión PM1.0, PM2.5 y PM10 en µg/m³ mediante dispersión de luz. Se conecta a 5 V y GND; su RX va al pin D13 (TX del Arduino) y su TX al pin D12 (RX del Arduino). La comunicación es UART a 9600 baud (8N1), implementada con SoftwareSerial; la trama de respuesta es de 32 bytes y los datos de PM se extraen de los bytes 4 a 9.

3.4 Módulo 3: comunicación y servidor IoT

La pasarela de red es un NodeMCU ESP8266MOD con WiFi 802.11 b/g/n integrado, puerto micro-USB con conversor CH340 y voltaje de operación de 3.3 V (sensible a voltajes superiores). Recibe datos del Arduino a 9600 baud y su consumo medido es de 42 mA a 5 V (0.21 W) con WiFi activo.

Se utiliza el protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) sobre TCP/IP, adecuado para sistemas embebidos por su bajo consumo de datos y su eficiencia en redes inestables. El broker es industrial.api.ubidots.com (puerto 1883), el tópico de publicación es /v1.6/devices/arduino-estacion-meteorologica, la autenticación se realiza con el token de Ubidots en el campo *username*, se usa QoS 0 para reducir retransmisiones y la librería PubSubClient.

El firmware *wifi_gateway.ino* recibe la trama CSV por el pin D2 (GPIO4) mediante SoftwareSerial, la almacena en una estructura *SensorData* de 11 campos (Tabla 5), valida la longitud de la trama y el parseo correcto de los 11 campos, y publica el payload JSON en Ubidots. La conexión WiFi se verifica en cada iteración del bucle principal y, si el broker MQTT no responde, se reintenta automáticamente cada 10 segundos.

Tabla 5. Campos de la trama de datos.

Campo	Variable	Descripción
1	T	Temperatura (°C)
2	H	Humedad relativa (%)
3	CO	Monóxido de carbono (ppm)
4	O3	Ozono (ppm)
5	MQ135_ADC	Valor ADC bruto del MQ-135
6	NH3	Amoníaco (ppm)
7	NOx	Óxidos de nitrógeno (ppm)
8	CO2	Dióxido de carbono (ppm)
9	PM1	Partículas PM1.0 (µg/m³)
10	PM25	Partículas PM2.5 (µg/m³)
11	PM10	Partículas PM10 (µg/m³)

3.5 Módulo 4: alimentación y gestión de energía

La estación es autónoma: un panel solar carga, a través de un módulo BMS, dos bancos de baterías Li-ion 18650 que alimentan al Arduino y al NodeMCU mediante reguladores DC-DC con salida USB de 5 V (Tabla 6). El flujo de energía es: panel solar (6 V) → BMS → baterías 18650 → DC-DC → salida USB de 5 V → Arduino y NodeMCU.

Tabla 6. Componentes del sistema de alimentación.

Componente	Parámetros	Función	Conexión
Panel solar GDSUPER GD-100	8 W; 6 V máx.; 1.3 A máx.; USB-A hembra	Fuente primaria	→ BMS
Módulo BMS 2S 4 A con cargador USB-C	Entrada: panel solar	Gestión y carga de baterías	→ Baterías y DC-DC
Batería Li-ion 18650 Steren (×2)	3.7 V / 2.8 Ah	Banco A (Arduino)	→ DC-DC → Arduino
Batería Li-ion 18650 EWTTO (×2)	4.2 V / 3.5 Ah	Banco B (NodeMCU)	→ DC-DC → NodeMCU
Módulo DC-DC USB	0.9–5 V; 600 mA máx.	Regulación a 5 V	→ Arduino y NodeMCU

Consumo y dimensionamiento solar. El consumo medido con vatímetro se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7. Consumo medido.

Componente	Voltaje (V)	Corriente (A)	Potencia (W)	Energía en 10 h (Wh)
Arduino MEGA	5	0.065	0.325	3.25
NodeMCU ESP8266MOD	5	0.042	0.210	2.10
Total			0.535	5.35

Para Quetzaltenango se consideró una irradiación de $G = 4.2 \text{ kWh/m}^2/\text{día}$. Con un rendimiento del sistema $R = 0.8$, la energía total demandada, las horas pico solar (HPS) y la potencia pico requerida son:

$$E_t = E_d / R = 5.35 / 0.8 = 6.69 \text{ Wh/día} \quad (2)$$

$$\text{HPS} = G / (1 \text{ kW/m}^2) = 4.2 \text{ h} \quad (3)$$

$$P_p = E_t / \text{HPS} = 6.69 / 4.2 = 1.59 \text{ W} \quad (4)$$

Como $1.59 \text{ W} / 8 \text{ W} = 0.20$, un solo panel de 8 W es suficiente.

Autonomía con baterías. Se calculó la autonomía mínima garantizada cuando el sistema opera exclusivamente con baterías, es decir, de noche o con irradiación insuficiente. La energía de los dos bancos se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Energía almacenada en las baterías.

Banco	Tipo	Celdas	Capacidad por celda	Tensión nominal	Energía bruta
A (Arduino)	Steren 18650	2 en serie	2.8 Ah	3.7 V/celda	$2.8 \text{ Ah} \times 3.7 \text{ V} \times 2 = 20.72 \text{ Wh}$
B (NodeMCU)	EWTTTO 18650	2 en serie	3.5 Ah	3.7 V/celda	$3.5 \text{ Ah} \times 3.7 \text{ V} \times 2 = 25.90 \text{ Wh}$
Total		4			46.62 Wh

Considerando una eficiencia típica del convertidor DC-DC de 85 % y una profundidad de descarga (DoD) de 80 % para prolongar la vida útil de las baterías Li-ion:

$$E_{\text{útil}} = 46.62 \text{ Wh} \times 0.85 = 39.63 \text{ Wh} \quad (5)$$

$$E_{\text{disp}} = 39.63 \text{ Wh} \times 0.80 = 31.70 \text{ Wh} \quad (6)$$

$$\text{Autonomía} = 31.70 \text{ Wh} / 0.535 \text{ W} \approx 59.3 \text{ h} \quad (7)$$

El sistema puede operar de forma continua unas 59 horas (2 días y 11 horas) sin aporte del panel solar. En la práctica, el panel de 8 W aporta durante las horas pico solar:

$$E_{\text{solar}} = 8 \text{ W} \times 4.2 \text{ h} \times 0.80 = 26.88 \text{ Wh/día} \quad (8)$$

Como el consumo diario es de 5.35 Wh, el panel recarga cada día más de lo que el sistema consume, con un excedente de 21.53 Wh destinado a reabastecer las baterías. En condiciones normales de irradiación en Quetzaltenango, el sistema opera de forma indefinida y las baterías actúan solo como respaldo nocturno o en días nublados.

3.6 Diagrama de bloques

Todos los sensores comparten las líneas de 5 V y GND de la placa perforada. Las salidas de los sensores MQ convergen en el conector CN1 (A0–A4), el DHT11 en el conector PIN4 y el PMS5003 en el conector PIN12-13. El Arduino transmite la trama procesada al NodeMCU por TX1, y este publica los datos en Ubidots por MQTT sobre WiFi. La Fig. 2 muestra el diagrama de bloques del circuito.

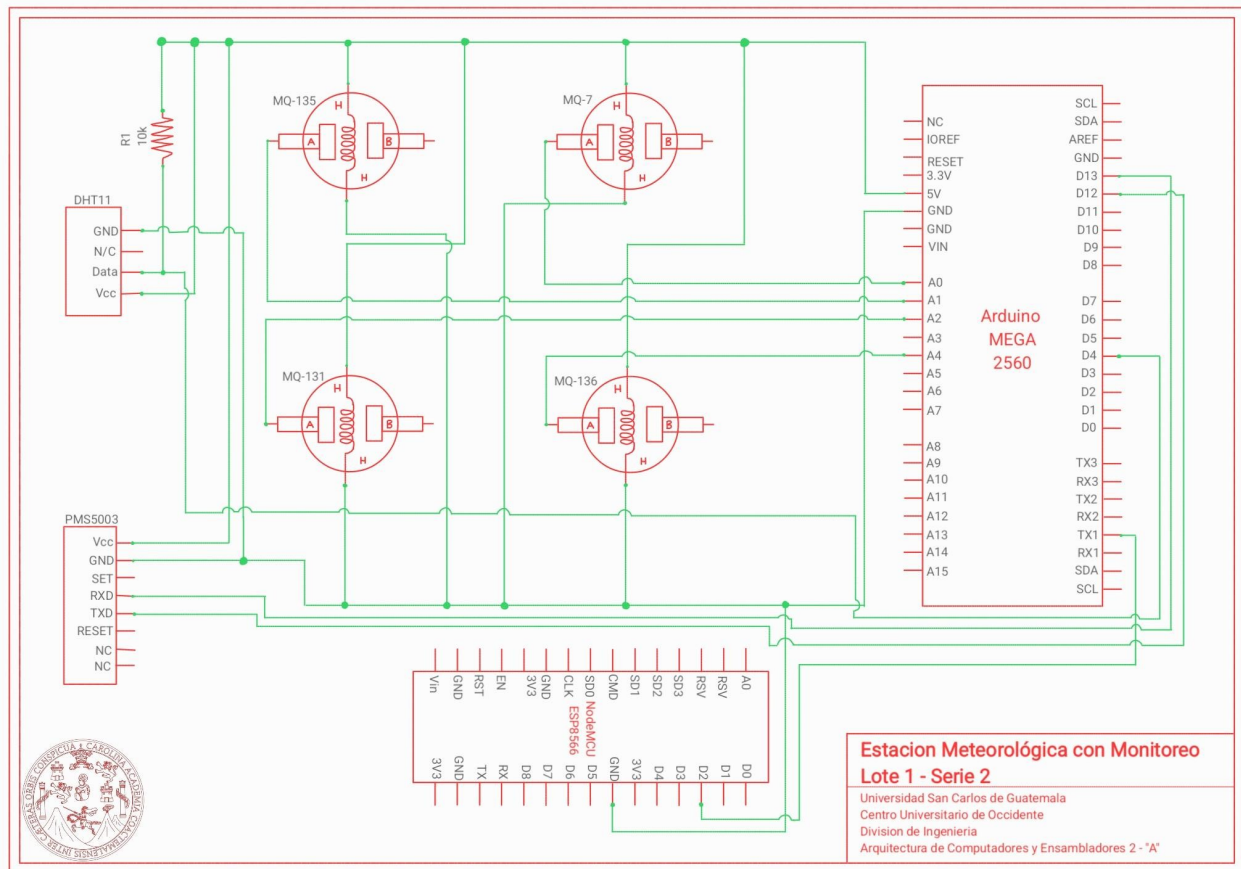


Fig. 2. Diagrama de bloques del circuito lógico de la estación.

4. LISTA DE PARTES Y COSTO

La Tabla 9 presenta la lista de partes con sus especificaciones, su referencia en el esquemático y los reemplazos aceptados.

Tabla 9. Lista de partes (BOM) y equivalencias.

#	Componente	Especificación	Ref.	Reemplazo aceptado
1	Arduino MEGA 2560	ATmega2560, 5 V, 54 E/S digitales, 16 analógicas	U1	Arduino MEGA ADK
2	NodeMCU ESP8266MOD	ESP8266, WiFi 802.11 b/g/n, 3.3 V, USB	WIFI1/WIFI2	Wemos D1 Mini, NodeMCU v2
3	Sensor DHT11	0–50 °C ± 2 °C; HR 20–90 % ± 5 %; 1-Wire	U9	DHT22 (mayor precisión)
4	Sensor MQ-7	CO 20–2000 ppm, 5 V, analógico 0–5 V	GAS-7	Sin equivalencia directa
5	Sensor MQ-135	CO ₂ /NO _x /NH ₃ /benceno, 5 V, analógico	GAS-135	MQ-2 (gases combustibles)
6	Sensor MQ-131	Ozono, 5 V, analógico	GAS-131	Sin equivalencia directa
7	Sensor MQ-136	H ₂ S y gases, 5 V, analógico	GAS-136	MQ-4 (metano, gas natural)
8	Sensor PMS5003	PM1/PM2.5/PM10, láser, UART 9600 baud, 5 V	GAS-PMS5003	PMS7003, SDS011
9	Resistencia 5 k Ω	± 5 %, 1/4 W, pull-up del DHT11	R1	4.7 k Ω ± 5 %
10	Panel solar GD-100	8 W, 6 V máx., 1.3 A máx., USB-A	—	Panel de 10 W / 6 V
11	Módulo BMS 2S 4 A	4.2 V/celda, carga hasta 4 A, USB-C	—	BMS 3S si se usan 3 celdas
12	Batería 18650 Steren	Li-ion 3.7 V / 2800 mAh ($\times 2$)	—	Sony VTC5 3.7 V / 2600 mAh
13	Batería 18650 EWTTO	Li-ion 4.2 V / 3500 mAh ($\times 2$)	—	Panasonic 3.7 V / 3400 mAh
14	Módulo DC-DC USB	0.9–5 V, 600 mA máx., USB-A	—	Módulo elevador MT3608
15	Placa perforada	Tamaño estándar, paso de 2.54 mm	—	PCB fabricada a medida

La Tabla 10 presenta la cotización de los componentes principales, con precios consultados en mayo de 2026 en proveedores locales y sujetos a cambio según disponibilidad.

Tabla 10. Cotización de componentes (precios en quetzales).

#	Componente	Precio unit. (Q)	Cant.	Subtotal (Q)	Proveedor
1	Arduino MEGA 2560	225.00	1	225.00	Electrónica Alpha Xela
2	NodeMCU ESP8266MOD	80.00	1	80.00	Electrónica Alpha Xela
3	Sensor DHT11	26.00	1	26.00	Electrónica Alpha Xela
4	Sensor MQ-7	40.00	1	40.00	Unitronic Xela
5	Sensor MQ-135	40.00	1	40.00	Unitronic Xela
6	Sensor MQ-131	300.00	1	300.00	Unitronic Xela
7	Sensor MQ-136	289.00	1	289.00	Guatemala Digital
8	Sensor PMS5003	319.00	1	319.00	Guatemala Digital
9	Módulo BMS 3S 10 A	40.00	2	80.00	Electrónica Alpha Xela
10	Par de baterías 18650 EWTTO	55.00	6	330.00	Electrónica Alpha Xela
11	Módulo DC-DC USB	20.00	2	40.00	Unitronic Xela
12	Panel solar GD-100	99.00	2	198.00	Yupi Solar
13	Portabaterías para dos 18650	12.00	6	72.00	Electrónica Alpha Xela
14	Módulo elevador DC-DC	20.00	2	40.00	Unitronic Xela
15	Metro de cable para protoboard	2.00	4	8.00	Electrónica Alpha Xela
16	Tira de header hembra de 40 pines	4.00	1	4.00	Electrónica Alpha Xela
17	Metro de termoencogible de 1 mm	2.00	1	2.00	Electrónica Alpha Xela
Total general				2,093.00	

5. CALIBRACIÓN Y PRUEBAS

5.1 Calibración de los sensores MQ

R_0 es la resistencia del sensor en aire limpio y es necesaria para calcular las concentraciones en ppm con exactitud. El procedimiento es el siguiente:

1. Energizar el sensor y esperar 5 minutos de calentamiento en aire limpio.
2. Leer el valor ADC (0–1023) del pin analógico: `int sensorValue = analogRead(A0);`
3. Calcular el voltaje de salida: `float voltage = sensorValue * (5.0 / 1023.0);`
4. Calcular R_s (con $R_L = 10 \text{ k}\Omega$): `float Rs = ((5.0 * 10.0) / voltage) - 10.0;`
5. Registrar $R_0 = R_s$ y sustituirlo como constante en el firmware.

5.2 Validación de datos en el servidor

- Verificar en el monitor serial del Arduino que la trama CSV tenga exactamente 11 campos separados por comas.
- Confirmar en el monitor serial del NodeMCU que la conexión WiFi reporta una IP asignada y que MQTT responde con código 0 (éxito).

- Confirmar en el panel de Ubidots que las 11 variables se actualizan cada pocos segundos con valores coherentes.
- Comparar las lecturas de temperatura con un termómetro de referencia; la tolerancia aceptable para el DHT11 es de ± 3 °C.

5.3 Solución de problemas

La Tabla 11 resume los problemas más frecuentes identificados durante las pruebas y su solución.

Tabla 11. Solución de problemas.

Síntoma	Causa probable	Solución
Sensores MQ con valores muy altos al inicio	Calentamiento incompleto	Esperar 3–5 min tras encender
DHT11 retorna NaN o -999	Cable DATA sin pull-up o roto	Verificar la resistencia de 5 k Ω entre DATA y VCC
PMS5003 no envía datos	Pines RX/TX invertidos	Intercambiar D12 y D13 en el código
NodeMCU no se conecta a WiFi	Credenciales incorrectas o señal débil	Revisar credenciales en <code>wifi_gateway.ino</code>
MQTT no se conecta a Ubidots	Token inválido o sin internet	Verificar el token y la conectividad
Arduino se sobrecalienta	Voltaje de entrada superior a 9 V	Reducir a 7.5 V con fuente regulada
Los datos no llegan a Ubidots	Trama CSV malformada o con menos de 11 campos	Verificar la velocidad de Serial1 y el formato de la trama

6. TRABAJO FUTURO

Se identificaron las siguientes mejoras para versiones futuras del sistema:

- **Hardware:** carcasa con sellado IP65/IP67 para exteriores; sustitución del DHT11 por un BME280 (± 0.5 °C, ± 3 % HR y presión barométrica); sensores UV (VEML6075) y de luz (BH1750); pantalla OLED de 128×64 para visualización local; migración a ESP32 para eliminar el módulo WiFi externo y reducir el consumo; y paneles de más de 25 W para acortar el tiempo de carga.
- **Software y firmware:** actualizaciones remotas (OTA) en el NodeMCU; almacenamiento local en tarjeta microSD como respaldo ante pérdida de conexión; calibración automática periódica de los sensores MQ con valores de referencia en la nube; y detección de anomalías (z-score) para alertas locales.
- **Conectividad y plataforma:** uso de HTTPS/REST con TLS si se requiere mayor seguridad; integración con ThingSpeak o InfluxDB + Grafana para análisis histórico; notificaciones en tiempo real (Telegram, correo) al superar umbrales; y un panel web propio con Node-RED.
- **Escalabilidad:** red de estaciones con LoRaWAN para zonas sin WiFi; integración con sistemas GIS (QGIS, ArcGIS) para mapear la calidad del aire por zonas; y una API REST pública con los datos para uso académico y ciudadano.

7. CONCLUSIONES

- Se diseñó e implementó un sistema funcional de monitoreo ambiental con componentes de bajo costo (Arduino MEGA, DHT11, sensores MQ y PMS5003), que demuestra la viabilidad de soluciones IoT locales para diagnosticar la calidad del aire de la ciudad de Quetzaltenango.
- La integración de sensores analógicos, digitales y seriales en un mismo microcontrolador valida la capacidad del Arduino MEGA para aplicaciones de adquisición de datos multisensor.
- Los sensores MQ proporcionan mediciones estimativas útiles para detectar tendencias, pero requieren una calibración avanzada, con R_0 medido en campo, para obtener valores exactos en ppm.
- La correcta regulación de voltaje es crítica: alimentar el Arduino a 7.5 V en lugar de 12 V previene el sobrecalentamiento y prolonga la vida útil del sistema.
- El ensamblaje en placa perforada con diseño modular, con conectores hembra en lugar de sensores soldados directamente, mejora la mantenibilidad y permite reemplazar componentes sin modificar el circuito base.
- La carcasa impresa en 3D, con ventilación por gradiente térmico vertical, resuelve el control de temperatura de manera pasiva, sin mecanismos adicionales.

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Mauricio López, gran colaborador del proyecto, así como a los auxiliares y estudiantes de los cursos de Arquitectura de Computadoras 1 y 2 de la carrera de Ingeniería en Sistemas del CUNOC.

REFERENCIAS

- [1] NASA Ciencia. (s. f.). <https://ciencia.nasa.gov/ciencias-terrestres/que-es-la-calidad-del-aire/>
- [2] Appropedia. (s. f.). https://www.appropedia.org/Air_quality/es
- [3] Kunak. (s. f.). <https://kunakair.com/es/calidad-del-aire/>
- [4] Organización Panamericana de la Salud. (s. f.). <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>
- [5] Ecoquimsa. (s. f.). <https://www.ecoquimsa.com.gt/temas-tnicos/calidad-del-aire-ambiental-como-mejorarla-y-que-impacto-tiene-en-nuestra-salud>
- [6] Holcim España. (s. f.). <https://www.holcim.es/que-es-la-calidad-del-aire-importancia-y-medicion>
- [7] SafetyCulture. (s. f.). <https://safetyculture.com/es/temas/monitoreo-de-la-calidad-del-aire/indice-de-calidad-de-l-aire>
- [8] Ayuntamiento de Castelló. (s. f.). https://www.castello.es/documents/35637/3683124/20250801_002_ANEXO+1+CASTELLANO_20250730_084105.pdf
- [9] Prana Air. (s. f.). <https://www.pranaair.com/blog/es/check-air-quality-index/>
- [10] Eurofins Environment. (s. f.). <https://www.eurofins-environment.es/es/indice-de-calidad-del-aire/>
- [11] Soler & Palau. (s. f.). <https://www.solerpalau.com/blog/es-es/indice-calidad-aire/>
- [12] Fundación Aquae. (s. f.). <https://www.fundacionaquae.org/wiki/como-se-mide-calidad-aire/>

Diseño y fabricación de prototipo de bicicleta estática de rehabilitación de extremidades superiores e inferiores para fisioterapia en el Hospital Nacional de San Marcos, San Marcos

Daniel Arturo Orozco Leal

Estudiante de Ingeniería Mecánica Industrial, División de Ciencias de la Ingeniería, Centro Universitario de Occidente (CUNOC), Universidad de San Carlos de Guatemala
danielorozco202030551@cunoc.edu.gt

*Asesor: Eddie Omar Flores Aceituno · Revisor: Bruno Israel Coyoy Lucas
Septiembre de 2026*

RESUMEN

El área de fisioterapia de Consulta Externa del Hospital Nacional de San Marcos carecía de equipo adecuado para la rehabilitación de extremidades superiores e inferiores. Este artículo documenta el diseño, la fabricación y la validación de un prototipo funcional de bicicleta estática de rehabilitación para ambas extremidades, con un sistema inferior y un sistema superior operables de forma independiente en tres modos: libre, asistencia y resistencia. El diseño estructural del prototipo se validó mediante análisis por elementos finitos, y su desarrollo incluyó la fabricación de la estructura mecánica y la integración del sistema eléctrico de control. El prototipo se entregó al área de fisioterapia y el personal del hospital recibió capacitación sobre su operación y mantenimiento.

Palabras clave: análisis por elementos finitos; automatización del diseño; biomecánica; dispositivos de asistencia; equipos biomédicos; modulación por ancho de pulsos; prototipos; tecnología adecuada.

ABSTRACT

The Outpatient Physical Therapy Department of San Marcos National Hospital lacked adequate equipment for the rehabilitation of the upper and lower extremities. This article documents the design, fabrication, and validation of a functional prototype of a stationary rehabilitation bicycle for both extremities, featuring independently operable lower and upper systems with three operating modes: free, assisted, and resistance. The prototype's structural design was validated using finite element analysis, and its development included the fabrication of the mechanical structure and the integration of the electrical control system. The prototype was delivered to the physical therapy department, and hospital staff received training on its operation and maintenance.

Keywords: *finite element analysis; design automation; biomechanics; assistive devices; biomedical equipment; pulse-width modulation; prototypes; appropriate technology.*

1. INTRODUCCIÓN

El área de fisioterapia de la Consulta Externa del Hospital Nacional de San Marcos (HNSM) presentaba deficiencias significativas en su infraestructura tecnológica, específicamente en lo que respecta a equipo para la rehabilitación motriz de las extremidades superiores e inferiores. En el caso de los miembros inferiores, el servicio operaba con bicicletas convencionales provistas de adaptaciones rudimentarias sobre soportes fijos, una solución precaria que limitaba la eficacia de las intervenciones terapéuticas. Respecto a los miembros superiores, la unidad carecía por completo de dispositivos específicos para su abordaje kinésico. Esta situación se veía agravada por las limitaciones financieras de la institución pública, dado que la adquisición de tecnología comercial equivalente excedía el presupuesto asignado a corto plazo.

El presente artículo documenta el diseño y desarrollo de un prototipo funcional de bicicleta estática de rehabilitación kinésica, concebido para la intervención terapéutica de extremidades superiores e inferiores. El dispositivo integra un sistema motriz dual —superior e inferior— operable de manera independiente bajo tres modalidades de funcionamiento: libre, asistida y de resistencia. El proceso metodológico abarcó la sistematización del diseño ingenieril, la fabricación de la estructura mecánica, la integración del sistema electromecánico y la elaboración de los manuales de operación y mantenimiento, y culminó con la capacitación del personal operativo del hospital. En las secciones siguientes se detallan los fundamentos teóricos, la fase de diseño y manufactura, y los resultados de la validación funcional del equipo entregado.

2. ANTECEDENTES

2.1 Contexto institucional

El HNSM es un hospital público que presta servicios de salud. El área de fisioterapia de consulta externa cuenta con dos clínicas de atención, atendidas por profesionales en fisioterapia. Esta área atiende a pacientes con fracturas de extremidades, secuelas de accidente cerebrovascular, hemiplejía o hemiparesia y estados postoperatorios ortopédicos, en sesiones de 10 a 15 minutos, con una capacidad diaria estimada de diez pacientes.

2.2 Diagnóstico de necesidades

El diagnóstico situacional permitió identificar tres categorías de limitaciones operativas: mecánicas, de seguridad y de instrumentación. En el plano mecánico y ergonómico, los dispositivos disponibles carecían de ajustes de altura y posicionamiento; en el aspecto de seguridad, carecían de sistemas de sujeción adecuados para extremidades superiores e inferiores; y, finalmente, no contaban con mecanismos para cuantificar parámetros esenciales como tiempo, velocidad o distancia recorrida.

Por otro lado, el análisis comparativo de las alternativas comerciales con capacidad de rehabilitación integral reveló un rango de costos de USD 499.99 a USD 2,658.99, equivalentes aproximadamente a Q3,849.92 a Q20,474.22, calculados a una tasa de cambio de Q7.70 por dólar, montos que rebasan la capacidad de inversión inmediata de una institución pública. Ante este escenario, el diseño y la fabricación de un prototipo propio se configuró como una alternativa técnica y económicamente viable para solventar las necesidades del servicio.

3. INVESTIGACIÓN Y FUNDAMENTOS

3.1 *Requerimientos funcionales*

Los requerimientos del prototipo se definieron mediante una entrevista estructurada con la profesional responsable del servicio de fisioterapia, realizada el 24 de octubre de 2025. El perfil de pacientes reportado abarca edades de 8 a 99 años, pesos de 25 a 90.7 kg y estaturas de 1.20 a 1.80 m. Se estableció un rango de velocidad terapéutica de 10 a 60 revoluciones por minuto (rpm), un sistema de resistencia con al menos tres niveles de intensidad y sujeciones ajustables para pies y manos. El equipo debía ser compatible con las sillas plásticas del hospital y con sillas de ruedas, sin asiento propio.

3.2 *Fundamentos biomecánicos y ergonómicos*

El diseño se fundamentó en los principios del ejercicio terapéutico activo, pasivo y resistido [1], y en el análisis cinemático del pedaleo como movimiento angular de cadena cinemática cerrada [2]. El pedaleo combina los tres tipos de contracción muscular: concéntrica en la fase de empuje, excéntrica en el retorno del pedal e isométrica en los estabilizadores del tronco [2]. A cadencia moderada y resistencia constante se reclutan principalmente fibras musculares tipo I y tipo IIa, lo que favorece la resistencia muscular y la eficiencia metabólica [2].

Los criterios ergonómicos de área de trabajo normal, rangos articulares y diseño centrado en el usuario orientaron el dimensionamiento de los ajustes telescópicos [3]. Las dimensiones antropométricas de referencia, en particular la altura de hombro sentado y el alcance frontal, se tomaron de percentiles de población latinoamericana adulta [4], complementados con percentiles de crecimiento de los Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC, por sus siglas en inglés) y de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para el rango pediátrico de la población atendida. El diseño consideró los percentiles 5 y 95 de cada dimensión, criterio que garantiza que aproximadamente el 90 % de la población pueda utilizar el equipo dentro de los rangos de ajuste disponibles [4].

3.3 *Normas técnicas aplicadas*

Los componentes de transmisión reciclados de bicicleta, como cadena, piñones, bielas y pedalier, cumplen originalmente con la norma ISO 4210 sobre requisitos de seguridad para bicicletas [5]. La norma IEC 60601-1, sobre requisitos generales de seguridad de equipos eléctricos médicos, se aplicó como referencia de principios de diseño, sin certificación formal por tratarse de un prototipo experimental [6]. Ante la ausencia de una norma guatemalteca específica para equipo de rehabilitación, la norma ISO 10535 se aplicó por analogía para definir un factor de carga conservador en el análisis estructural [7]. La norma AWS D1.1, código de soldadura estructural, se tomó como referencia para definir el proceso de soldadura SMAW y los criterios de calidad de los cordones de unión aplicados durante la fabricación.

4. DISEÑO DEL PROTOTIPO

4.1 Metodología y diseño estructural

El chasis se modeló en Autodesk Fusion 360 mediante un proceso iterativo; consta de base inferior, columnas de ajuste telescópico, soportes de motor y columnas de pedalier, como se observa en la Fig. 1. La base está formada por dos tubos redondos de 1.5 pulgadas, de 50 y 40 cm de longitud, unidos por conectores longitudinales de tubo rectangular de 2×1 pulgadas que fijan una separación transversal de 70 cm. La columna vertical exterior es de 1.5 pulgadas y 70 cm, se inclina 75° respecto a los conectores longitudinales y aloja una columna interior deslizante de 1.25 pulgadas con nueve posiciones de ajuste en altura, bloqueadas con tornillo M8. El brazo horizontal telescópico, de 1.5 y 1 pulgada, añade ± 20 cm de ajuste de profundidad al sistema de extremidades superiores.

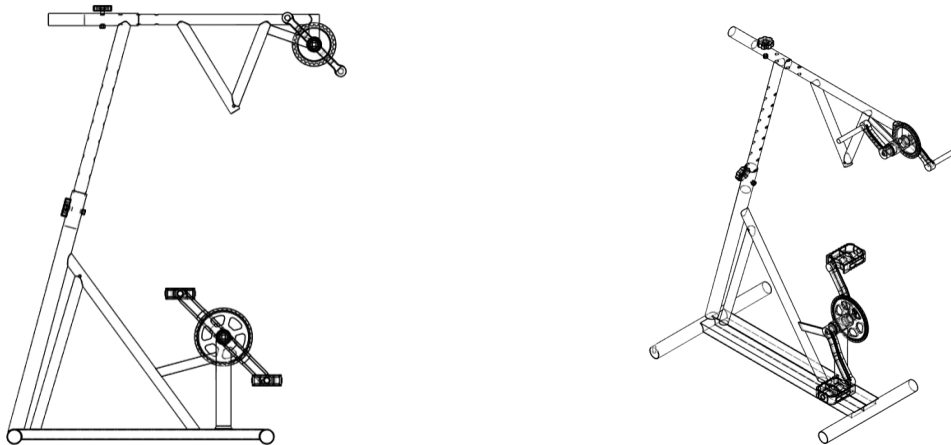


Fig. 1. Vistas lateral e isométrica del modelo CAD del chasis del prototipo.

4.2 Análisis por elementos finitos

El diseño estructural se validó mediante análisis por elementos finitos (FEA, *Finite Element Analysis*) en Autodesk Fusion 360. Las cargas se derivaron de la literatura biomecánica del ciclismo terapéutico: aproximadamente 600 N en el sistema de extremidades inferiores y 150 N en el sistema de extremidades superiores, estimadas como fracción de las cargas de ciclismo deportivo reportadas para bielas [8]. El proceso iterativo de optimización incorporó triangulaciones de refuerzo en las columnas de pedalier y ajustes en los soportes de motor. Como se aprecia en la Fig. 2, la iteración final del análisis arrojó un factor de seguridad mínimo de 2.619 en todos los componentes estructurales.

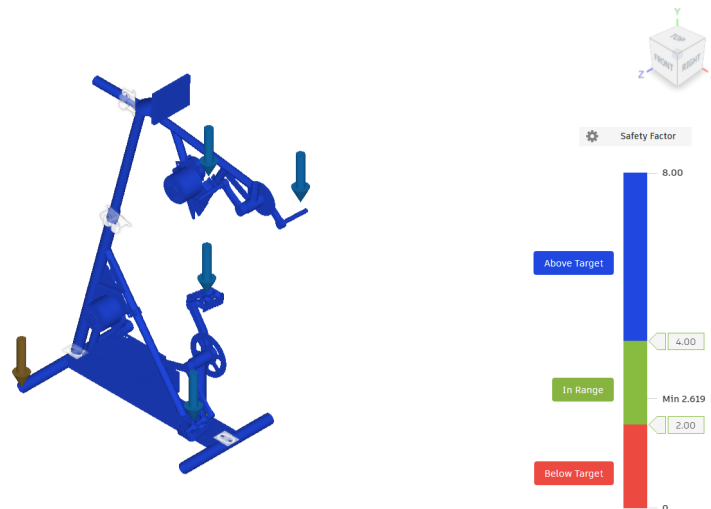


Fig. 2. Mapa de distribución del factor de seguridad en la iteración final del análisis estructural.

4.3 Sistema eléctrico

El prototipo cuenta con un sistema inferior y otro superior; cada uno dispone de un motor de corriente directa MY1025Z2 (12 V, 250 W) con tres modos de operación: libre, asistencia y resistencia. Un relé de doble polo doble tiro (DPDT) conecta el motor de cada sistema al *driver* de potencia BTS7960 en modo asistencia, o a un circuito de resistencia en los modos libre y resistencia; ambos circuitos nunca se activan de forma simultánea.

En modo asistencia, el *driver* BTS7960 recibe una señal PWM (*Pulse Width Modulation*, modulación por ancho de pulso) del microcontrolador y entrega corriente al motor para impulsar el pedalier según el nivel configurado. En modo resistencia, el motor gira por acción del paciente y actúa como generador. La corriente producida se disipa como calor en una resistencia cerámica de potencia, regulada mediante una señal PWM aplicada a un transistor MOSFET (*Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor*) que controla la fracción de tiempo en que el circuito conduce y, con ella, la carga percibida por el paciente [9]. En modo libre, el *driver* y el MOSFET permanecen apagados y el motor queda desconectado del circuito de potencia.

Un microcontrolador Arduino Mega 2560 gobierna ambos sistemas de forma independiente y muestra los parámetros de sesión en una pantalla táctil TFT (*Thin Film Transistor*, transistor de película delgada) de 4 pulgadas. La Tabla 1 resume los componentes principales del sistema eléctrico, y la Fig. 3 muestra el diagrama de conexiones completo.

Tabla 1. Componentes principales del sistema eléctrico.

Componente	Función
Arduino Mega 2560	Microcontrolador de control central
Pantalla táctil TFT 4"	Interfaz de usuario y visualización de parámetros
Motor MY1025Z2 (×2)	Actuador en modo asistencia y generador en modo resistencia
Driver BTS7960 (×2)	Control de potencia del motor en modo asistencia
Relé DPDT 30 A (×2)	Conmutación entre modo asistencia y modo resistencia
MOSFET IRLZ44N (×2)	Regulación de carga en modo resistencia
Resistencia cerámica 1 Ω , 100 W (×2)	Disipación de energía en modo resistencia
Sensor TCRT5000 (×2)	Medición de velocidad de pedaleo
Fuente 12 V, 50 A, 600 W	Alimentación general del sistema
Fusible ATC 15 A (×2)	Protección contra sobrecorriente

5. FABRICACIÓN E INTEGRACIÓN

5.1 Fabricación de la estructura

Según los resultados del análisis por elementos finitos, se seleccionó tubería de acero de proceso negro chapa #16, con propiedades mecánicas equivalentes al acero AISI 1020 [10], por su disponibilidad local y soldabilidad. El chasis se fabricó mediante soldadura SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*, soldadura por arco con electrodo revestido) con electrodo E6013, en tres subconjuntos desmontables que facilitan el transporte, la pintura y el mantenimiento: la base inferior con la columna vertical exterior; la columna vertical interior con el brazo horizontal exterior; y el brazo horizontal interior con los soportes del motor superior. Los componentes de transmisión —cadena, piñones, bielas, pedalier y pedales— se obtuvieron de bicicletas convencionales, lo que redujo el costo de fabricación y permitió aprovechar componentes certificados para cargas superiores a las del uso terapéutico.

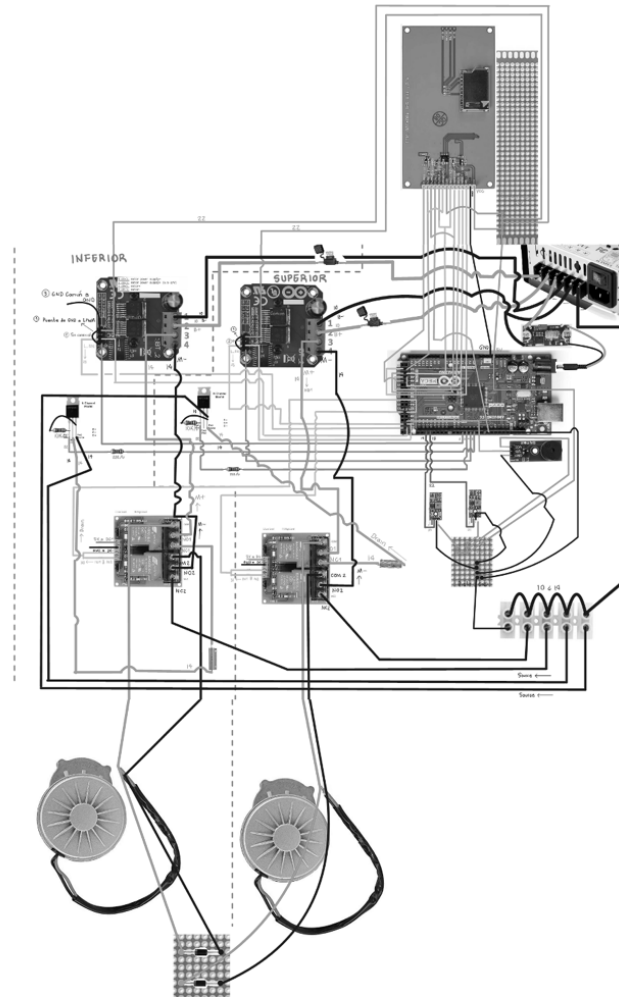


Fig. 3. Diagrama de conexiones del sistema eléctrico del prototipo.

Antes del pintado se verificó el funcionamiento mecánico completo del prototipo con todos sus sistemas montados. El chasis y las piezas mecánicas recibieron tres capas de tratamiento superficial —fondo anticorrosivo, fondo sellador y pintura de acabado—, aplicadas con compresor de aire y pistola de gravedad. El resultado del ensamble mecánico se muestra en la Fig. 4.

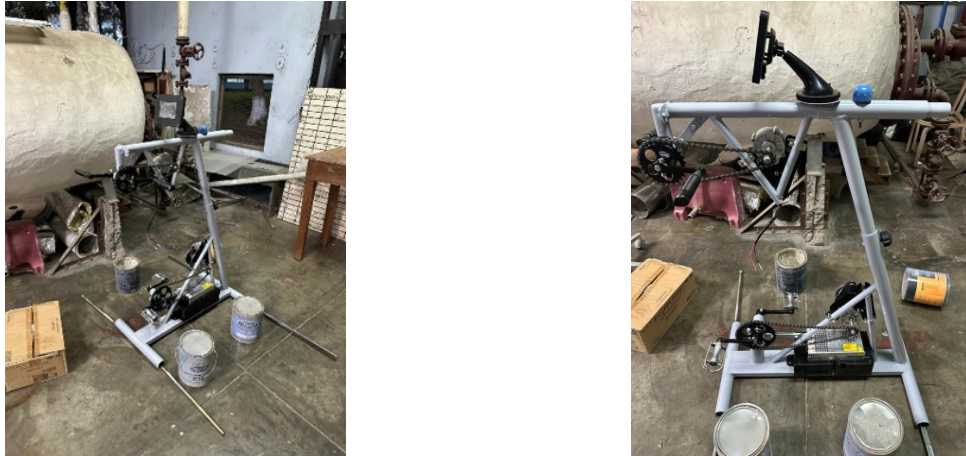


Fig. 4. Prototipo con ensamble mecánico y pintura terminados.

5.2 Integración electrónica y programación

Los componentes electrónicos de potencia y de control se distribuyeron en una caja electrónica, separando el área de potencia (*drivers*, relés, MOSFET y resistencias cerámicas) del área de lógica (Arduino y resistencias de señal), con el propósito de minimizar la interferencia eléctrica sobre las señales de control. El programa de control se desarrolló en Arduino IDE (*Integrated Development Environment*, entorno de desarrollo integrado) como una máquina de estados con tres modos por sistema —libre, asistencia y resistencia—, en siete versiones incrementales validadas con retroalimentación del personal de fisioterapia.

6. RESULTADOS Y VALIDACIÓN

6.1 Pruebas de integración

Las pruebas eléctricas se ejecutaron de forma escalonada: primero los componentes individuales, como la fuente de alimentación, el motor y la pantalla táctil, y después la integración completa del sistema. La prueba final verificó todas las combinaciones de modos por sistema, sin fallas registradas.

6.2 Validación funcional y entrega

El prototipo se evaluó con el personal responsable del servicio de fisioterapia mediante un protocolo de evaluación funcional que cubrió seguridad eléctrica percibida, ergonomía de la interfaz táctil, legibilidad de los parámetros en pantalla y facilidad de operación. El equipo se entregó formalmente al área de fisioterapia de consulta externa del HNSM el 15 de junio de 2026, como se aprecia en la Fig. 5.



Fig. 5. Prototipo en el área de fisioterapia de Consulta Externa del HNSM al momento de la entrega.

6.3 Capacitación al personal

El personal de fisioterapia recibió capacitación expositiva y práctica sobre los modos de operación, el posicionamiento del paciente y los criterios de seguridad, con demostración de los tres modos terapéuticos, como se ilustra en la Fig. 6. El personal de mantenimiento recibió capacitación sobre el cronograma de mantenimiento y la gestión documental del equipo. Ambos grupos recibieron copias impresas del manual de usuario y del manual de mantenimiento preventivo.



Fig. 6. Capacitación y demostración práctica del uso del equipo al personal de fisioterapia.

REFERENCIAS

- [1] C. Kisner y L. A. Colby, *Ejercicio terapéutico: fundamentos y técnicas*, 5.^a ed. Barcelona: Paidotribo, 2005.
- [2] J. Hamill, K. M. Knutzen y T. R. Derrick, *Biomechanical Basis of Human Movement*, 4.^a ed. Philadelphia: Wolters Kluwer, 2015.
- [3] S. Pheasant y C. M. Haslegrave, *Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and the Design of Work*, 3.^a ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2006.
- [4] R. Ávila Chaurand, L. R. Prado León y E. L. González Muñoz, *Dimensiones antropométricas de la población latinoamericana*, 2.^a ed. Guadalajara: Universidad de Guadalajara, 2007.
- [5] *Cycles — Safety requirements for bicycles*, ISO 4210, International Organization for Standardization, 2015.
- [6] *Medical electrical equipment — Part 1: General requirements for basic safety and essential performance*, IEC 60601-1:2005+A1:2012, International Electrotechnical Commission, 2012.
- [7] *Assistive products — Hoists for the transfer of persons — Requirements and test methods*, ISO 10535, 3.^a ed., International Organization for Standardization, 2021.
- [8] A. Gesé Bordils, «Análisis biomecánico de las fuerzas sobre bielas en ciclismo», Trabajo de fin de grado, Universidad Carlos III de Madrid, 2013.
- [9] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 5.^a ed. New York: McGraw-Hill, 2012.
- [10] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, 8.^a ed. México: McGraw-Hill, 2011.