



DE MECÁNICA A CUÁNTICA: UN ENFOQUE DIDÁCTICO

AUTORÍA

MARCOS FRANCISCO GUERRERO ZAMBRANO
JOSÉ LUIS SAQUINAULA BRITO

De mecánica a cuántica: un enfoque didáctico

Autores

Marcos Francisco Guerrero Zambrano

Universidad Estatal de Milagro

mguerreroz@unemi.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-1028-7477>

José Luis Saquinula Brito

Universidad Estatal de Milagro

jsaquinulab@unemi.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-2080-2548>

© Ediciones RISEI, 2025

Todos los derechos reservados.

Este libro se distribuye bajo la licencia Creative Commons Atribución CC BY 4.0 Internacional.

Las opiniones expresadas en esta obra son responsabilidad exclusiva de sus autores y no reflejan necesariamente la posición la editorial.

Editorial: *Ediciones RISEI*

Colección Educación en acción: Praxis, currículo y subjetividades

Título del libro: De mecánica a cuántica: un enfoque didáctico

Autoría: Marcos Guerrero / José Saquinaula (Docentes UNEMI)

Edición: Primera edición

Año: 2025

ISBN digital: 978-9942-596-04-8

DOI: <https://doi.org/10.63624/risei.book-978-9942-596-04-8>

Coordinación editorial: Jorge Maza-Córdova y Tomás Fontaines-Ruiz

Corrección de estilo: Unidad de Redacción y Estilo

Diagramación y diseño: Unidad de Diseño

Revisión por pares: Sistema doble ciego de revisión externa

Machala – Ecuador, diciembre de 2025

Este libro fue diagramado en InDesign.

Disponible en: <https://editorial.risei.org/>

Contacto: info@risei.org

Prólogo

En la era moderna, enseñar física es enseñar el mundo: descubrir que, tras el vaivén de un péndulo, el brillo de una bombilla o el rumor de una radio, existe un mismo lenguaje que habla de simetrías, conservaciones y límites. Este libro nace de la convicción de que ese lenguaje no debe quedar confinado a las pizarras ni a las fórmulas; por el contrario, debe ser palpable, discutible y divertido, y, sobre todo, construido por el propio estudiante en el taller de la experiencia, de modo que los estudiantes lean, analicen y elaboren sus propias conclusiones sobre la física y su didáctica.

El primer capítulo invita al lector a entrar en el laboratorio de la mecánica con los ojos abiertos como los de un niño que desarma un juguete para saber cómo funciona, allí el tiempo y el espacio se miden con cinta métrica y cronómetro, pero también con preguntas: ¿qué significa detenerse?, ¿quién se mueve respecto a quién?

El segundo capítulo desplaza la mirada del movimiento al trabajo y a la energía, esa moneda universal que se gasta y se cambia pero que, paradójicamente, nunca desaparece. Aprenderemos que un cuerpo que cae, un resorte que se comprime y una bicicleta que frena están firmando el mismo contrato de conservación.

El tercer capítulo amplía el espectro sensorial del electromagnetismo ya no se lee sólo en cargas y corrientes; se escucha en el zumbido de un altavoz y se ve en la interferencia de dos ondas que se abrazan o se anulan, se plasma las ideas y argumentos de Maxwell, Faraday y Hertz.

Finalmente, el cuarto capítulo nos lleva al estudio de la física moderna, rompe el cerco de la relatividad que funde tiempo y espacio, la cuántica que obliga a hablar en probabilidades, la física nuclear que transforma la materia en energía y viceversa.

No se trata de un viaje exótico, sino de comprender que esas ideas extrañas que están detrás de cada palabra, de cada investigación.

Cada sección combina la exposición conceptual con propuestas de aula, ancladas en la investigación didáctica más reciente y en la experiencia de quienes hemos comprobado que un estudiante que se sienta motivado a la investigación será el responsable mañana de seguir con el legado de difundir estos temas,

como el aprendió y fue motivado.

Por eso encontrarán actividades, preguntas, imágenes, dinámicas, conceptualización, episodios históricos que muestran que la ciencia no es un camino recto sino una red de tentativas, refutaciones y ocasionales destellos de genialidad de esos grandes maestros.

Este libro no pretende ser el último enunciado sobre la didáctica de la física; aspira a ser el primero de muchas conversaciones. Queremos que el docente que lo revise sienta que puede adaptar, criticar y, sobre todo, compartir lo que aquí se sugiere. Queremos que el estudiante que lo use descubra que la física no es un castillo de fórmulas inaccesibles, sino una herramienta para leer la realidad con mayor profundidad y, quizá, con mayor asombro.

Contenido

CAPÍTULO I

13

Didáctica de la mecánica

- Introducción
- Breve historia sobre el estudio del movimiento y sus retos para la enseñanza de la Cinemática
- Breve historia sobre el concepto de fuerza y sus retos para la enseñanza de la dinámica
- Estrategias para la enseñanza de conceptos fundamentales de la mecánica
- Fuerza y movimiento, diagrama de cuerpo libre y leyes de Newton
- Referencias

CAPÍTULO II

43

Trabajo y energía

- Introducción
- Trabajo, Energía Mecánica y Principio de Conservación
- Breve historia sobre el estudio del trabajo y energía
- Estrategias para la enseñanza del trabajo y energía
- Desafíos de la enseñanza de trabajo y energía
- Principales Principios de Conservación:
- ¿Por qué son importantes?
- Enfoque epistemológico y progresivo
- Secuencia de enseñanza basada en el análisis sistémico
- Uso de preguntas guía y aprendizaje activo
- Resolución de problemas contextualizados.
- Gamificación y recursos multimedia
- ¿Cómo podemos enseñar las leyes de Newton?
- Primera Ley: de lo cualitativo a lo cuantitativo
- Segunda Ley: de la observación a la modelización
- Tercera Ley: acción y reacción como interacción
- Tipos de movimiento armónico

- 2-Movimiento Armónico Amortiguado
- 3-Movimiento Armónico Forzado
- El péndulo de la nevera
- Oscilaciones en el aire: el muelle de goma
- Mide tu ritmo cardíaco. Como un M.A.S.
- Botella flotante = oscilador vertical
- Cálculo rápido: ¿dónde detiene el muelle?
- Problema tira y afloja (análisis gráfico)
- Referencias

CAPÍTULO III

65

Didáctica del electromagnetismo

- Introducción
- Breve línea del tiempo sobre el estudio del electromagnetismo y sus retos para la enseñanza.
- Importancia de las concepciones alternativas en el estudio de los circuitos eléctricos
- ¿Por qué aparece?
- ¿Cómo lo definimos?
- Estrategias para la enseñanza de conceptos fundamentales del electromagnetismo.
- Estrategia metodológica: Aprendizaje basado en contextos históricos.
- Circuito eléctrico
- Referencias

CAPÍTULO IV

87

Mecánica cuántica con enfoque didáctico

- Introducción
- Introducción a la teoría de la relatividad especial
- Contexto histórico de la Teoría de la Relatividad
- La revolución científica y la posición newtoniana
- Los desafíos de la Física en el XIX
- Las aportaciones de Poincaré y Lorentz
- Estrategias para la enseñanza de la Teoría de la Relatividad.
- Postulados de Einstein

- Transformaciones de Lorentz
- Desafíos de la enseñanza de la TER
- Aprendizaje por inmersión
- Fundamentos de física cuántica, atómica, nuclear y de partículas
- Efecto Compton
- Referencias

Didáctica de la mecánica

Introducción

Enseñar dinámica de la mecánica no es enseñar fórmulas; va más allá, es enseñar lo que parece invisible. Cuando un estudiante observa a un objeto en reposo sobre una mesa o a otro que cae libremente, lo que realmente está presenciando es un diálogo silencioso entre cuerpos, tiempos y lugares que le permitirá aprender y sacar sus propias conclusiones.

Todo adquiere sentido cuando se decide cómo y desde dónde mirar. Este capítulo invita al lector a transitar el camino que Galileo abrió hace tiempo, pasar del movimiento como simple cambio de lugar a observarlo como objeto de una descripción cuantitativa, predecible y, por tanto, comprensible.

En el recorrido de estas páginas reconstruiremos los desafíos que la experiencia cotidiana impone a la enseñanza: la intuición aristotélica que aún habita en los alumnos, cuanto más fuerte es el empujón, más rápido se mueve, la confusión entre distancia y desplazamiento, la mezcla coloquial de rapidez y velocidad, la dificultad para imaginar aceleraciones distintas de ir más rápido. Frente a ellos, presentaremos el sistema de referencia como convenio inicial y, por tanto, como primer acto de libertad del físico; la posición como coordenada negociada; la velocidad como tasa de cambio que puede ser negativa sin que el cuerpo

retroceda en el tiempo; y la aceleración como la magnitud que, paradójicamente, explica por qué un objeto puede estar frenando hacia adelante.

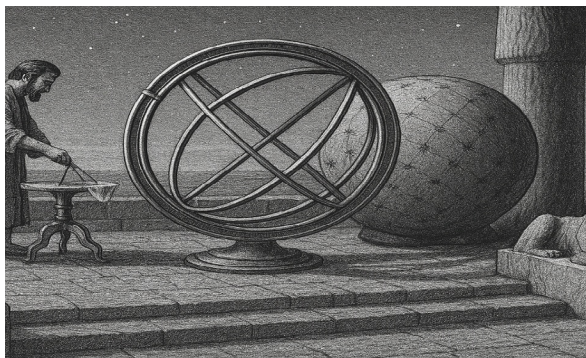
Breve historia sobre el estudio del movimiento y sus retos para la enseñanza de la Cinemática

El movimiento fue, sin duda, el primer aspecto del mundo físico que el hombre investigó. Las antiguas civilizaciones de Egipto y Mesopotamia (alrededor del 3000 a. C.) observaron el movimiento de planetas y estrellas con fines prácticos, principalmente para crear calendarios. No obstante, fueron los grandes filósofos griegos quienes empezaron a apartarse de las explicaciones mitológicas y a examinar los fenómenos naturales de manera racional.

Para Aristóteles (siglo IV a. C.), el reposo era el estado natural de un objeto. En contraste con el mundo celestial, donde el movimiento natural era circular y uniforme, en el mundo terrenal (sublunar) se diferenciaba entre el movimiento rectilíneo vertical y otros tipos de movimiento.

El movimiento vertical se consideraba natural y estaba determinado por la tendencia de un elemento a regresar a su lugar natural cuando se encontraba desplazado. Por ejemplo, al calentar un vaso de agua, el vapor asciende debido a la presencia del elemento fuego, que tiende a subir hacia la esfera del fuego. Al enfriarse, el vapor pierde el fuego y el agua, ahora el elemento dominante, busca su lugar natural abajo. Por tanto, en la caída libre de los cuerpos, la velocidad debería ser proporcional a la cantidad del elemento constituyente, haciendo que los objetos más pesados caigan más rápido que los más ligeros (López, 2009).

*Figura 1.
Instrumentos astronómicos en la antigüedad.*

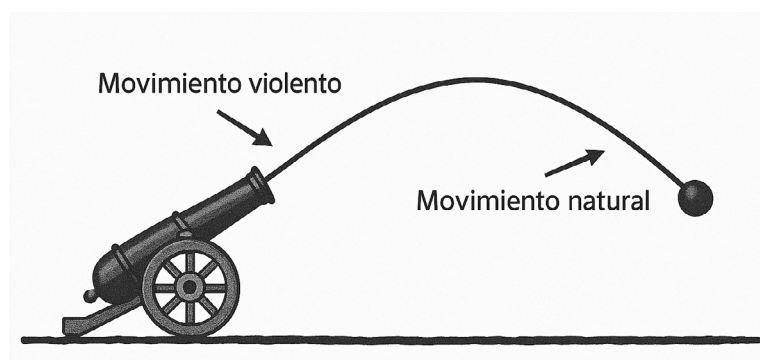


Nota: Ilustración de un astrónomo con instrumentos antiguos bajo un cielo estrellado (AstroAventura, 2022). <https://n9.cl/3ikbm>

Esta idea no surgía de experimentos mal realizados ni de errores en las mediciones, ya que los antiguos griegos no realizaban experimentos, sino que especulaban. Esta perspectiva era una consecuencia natural de su esquema global de pensamiento. Cualquier otro movimiento, ya fuera no vertical o vertical en el que un elemento se aleja de su lugar natural, se consideraba un movimiento violento que requería una fuerza externa. Sin esta fuerza, los objetos permanecerían en reposo. En otras palabras, la tendencia natural de los cuerpos es estar en reposo; cualquier movimiento necesita una fuerza motriz y, dado que para Aristóteles la inercia no se aplica al movimiento, la acción de esta fuerza debe continuar mientras dure el movimiento (Duarte, 2011).

Figura 2.

Tipo general de movimientos según Aristóteles



Nota: Movimiento violento y movimiento natural según Aristóteles (Duarte, 2011).

Según Aristóteles existen cuatro tipos de movimientos, que son:

Cambio de lugar: por ejemplo, cuando una persona decide mudarse de residencia. Esta acción se representa está representado por un desplazamiento o cambio de posición.

Cambio cuantitativo: por ejemplo, una persona hace dieta para verse mejor en la temporada de playa. Ocurre crecimiento o disminución de algún objeto.

Cambio cualitativo: por ejemplo, cuando una persona se realiza un nuevo corte de cabello o está más bronceado. Está acción sustituye una cualidad por otra.

Cambio esencial: por ejemplo, le cae una piedra en la cabeza provocando la muerte del individuo. Ocurre una generación y corrupción de la sustancia.

Aristóteles también aportó una explicación sobre el movimiento de los proyectiles (figura 2). Según él, cuando un cuerpo se separa de su motor, crea un vacío que es llenado por el aire circundante, lo que mantiene el movimiento. Además, Aristóteles distinguía dos factores en el movimiento: la acción del motor y la

resistencia del medio. Esta resistencia frena el impulso del objeto en movimiento y, si iguala la fuerza motriz, hace que el objeto regrese a su estado de reposo. Para Aristóteles, la velocidad de un cuerpo es inversamente proporcional a la resistencia del medio en el que se desplaza. Por lo tanto, en el vacío, donde no hay resistencia, la velocidad sería infinita, lo que le lleva a concluir que el vacío no puede existir (Minecan, 2018; López, 2009).

El movimiento según Galileo. Algunos maestros de la Baja Edad Media, en su rechazo a la física de Aristóteles, han sido considerados precursores de Galileo, recientemente se ha demostrado que entre 1328 y 1350, los estudiosos del Merton.

College de Oxford descubrieron y demostraron las propiedades fundamentales del movimiento uniformemente acelerado, atribuidas a Galileo. En sus investigaciones, diferenciaron entre la cinemática, la geometría del movimiento y la dinámica, que estudia las causas del movimiento. La naturaleza cualitativa de la física griega fue reemplazada, al menos en el estudio del movimiento, por magnitudes numéricas que han dominado la física occidental desde entonces (Asimov, 1984). Aunque ya se sabía antes de Galileo que los aristotélicos estaban equivocados en sus teorías sobre la caída libre, fue Galileo quien detalló la descripción correcta de este movimiento y lo integró en un sistema mecánico más amplio. En su obra “Dos Nuevas Ciencias”, Galileo analiza las matemáticas del movimiento uniformemente acelerado y luego asocia la caída libre con este tipo de movimiento. Aunque en su época no era posible demostrarlo experimentalmente, Galileo pudo demostrar analíticamente que una esfera rodando por un plano inclinado sigue las mismas leyes que el movimiento de caída libre, aunque de manera más lenta.

Los experimentos de Galileo le permitieron establecer las leyes del movimiento de caída de los cuerpos, que se resumen en:

Todos los cuerpos, independientemente de su peso, caen a la misma distancia en el vacío en el mismo tiempo.

El movimiento de un cuerpo en caída libre o rodando por un plano inclinado es uniformemente acelerado, lo que significa que la velocidad aumenta en incrementos iguales en tiempos iguales.

Figura 3.

Ilustración que muestra la hipótesis de Galileo



Nota: Caída de los cuerpos NASA (2023).

Galileo también establece que un objeto en movimiento sobre un plano horizontal sin fricción seguirá moviéndose indefinidamente a la misma velocidad, lo que conocemos como la ley de la inercia. Otro de sus grandes logros es la solución al movimiento de los proyectiles, demostrando que siguen una trayectoria parabólica, y en el caso de la caída parabólica, demuestra la existencia de dos movimientos combinados que no se alteran ni interfieren entre sí (Gamow, 2014).

Aunque estos estudios sobre el movimiento no son suficientes por sí mismos para formar una ciencia completa del movimiento, ya que no relacionan el movimiento con sus causas, fueron el punto de partida perfecto para el desarrollo de la mecánica. La gran contribución de Galileo a la ciencia fue una metodología verdaderamente científica basada en la experimentación para verificar las hipótesis iniciales.

La cinemática, el estudio del movimiento sin considerar sus causas, es una piedra angular en la educación de esta ciencia. Sin embargo, su enseñanza presenta varios retos que debemos abordar para garantizar una comprensión sólida por parte de nuestros estudiantes. Podemos agrupar estos retos en:

Conceptualización del movimiento: Uno de los mayores desafíos es lograr que los estudiantes comprendan y visualicen los conceptos abstractos de movimiento. La transición desde una comprensión intuitiva a una formal puede ser difícil. Por ejemplo, diferenciar entre desplazamiento y distancia, o entre velocidad y aceleración, no es intuitivo para muchos. Es fundamental utilizar recursos visuales, simulaciones y gráficos para ayudar a los estudiantes a construir una representación mental precisa de estos conceptos.

Matemáticas y Física: Otro reto es la integración de conceptos matemáticos en la Física. La cinemática requiere un dominio de las matemáticas, desde el álgebra básica hasta el cálculo, dependiendo del nivel de enseñanza. Los estudiantes a menudo luchan con la aplicación de fórmulas y el análisis de gráficos de movimiento. Es crucial que fomentemos una sólida base matemática y que integremos problemas físicos que refuercen estas habilidades matemáticas.

Experimentación y modelos teóricos: La cinemática se enseña mejor a través de la experimentación y la observación directa. Sin embargo, la implementación de laboratorios prácticos puede ser limitada por recursos, tiempo y espacio. Debemos ser creativos en el uso de simulaciones virtuales y demostraciones en el aula para suplir estas limitaciones. Además, es esencial que los estudiantes aprendan a conectar sus observaciones experimentales con los modelos teóricos, entendiendo cómo y por qué los modelos matemáticos describen el movimiento observado.

Evaluación del aprendizaje: Evaluar la comprensión de la cinemática puede ser complicado. Las pruebas tradicionales a menudo no capturan la profundidad de la comprensión conceptual de los estudiantes. Incorporar evaluaciones formativas, como discusiones en clase, actividades prácticas y proyectos, junto con evaluaciones sumativas, puede proporcionar una imagen más completa del progreso de los estudiantes.

Formación continua de los docentes: Como docentes, también enfrentamos el desafío de reevaluar y actualizar continuamente nuestro propio entendimiento de la cinemática. A pesar de nuestra experiencia, podemos tener concepciones alternativas o malentendidos arraigados desde nuestras primeras formaciones. Es fundamental que participemos en desarrollo profesional continuo, asistiendo a talleres, conferencias y colaborando con colegas para mantenernos al día con los avances en la enseñanza de la física. Al hacerlo, no solo mejoramos nuestras habilidades pedagógicas, sino que también corregimos posibles errores en nuestra comprensión, asegurando que transmitimos conocimientos precisos y actualizados a nuestros estudiantes.

Breve historia sobre el concepto de fuerza y sus retos para la enseñanza de la dinámica

La civilización griega fue la primera en desarrollar de manera consciente sistemas de pensamiento que ofrecían una visión global del mundo, la naturaleza humana, la vida y el propio pensamiento. Fueron pioneros en investigar de manera sistemática y en crear conceptos clave para la interpretación de los fenómenos naturales.

Concepción griega del concepto de fuerza. Aristóteles es el filósofo más emblemático de este periodo, y sus ideas dominaron el ámbito de las ciencias durante unos 18 siglos. En física, sus conceptos se han denominado “física del sentido común” porque coinciden en gran medida con los razonamientos espontáneos que muchas personas hacen, independientemente de su formación académica. En este contexto, surgió el concepto tradicional de fuerza, entendida como la causa del movimiento y la velocidad de los cuerpos. Según esta idea, las fuerzas son necesarias para mantener el movimiento; es decir, para que un cuerpo permanezca en movimiento habría que hacerle fuerza y cuando se dejara de hacer fuerza, el cuerpo se pararía.

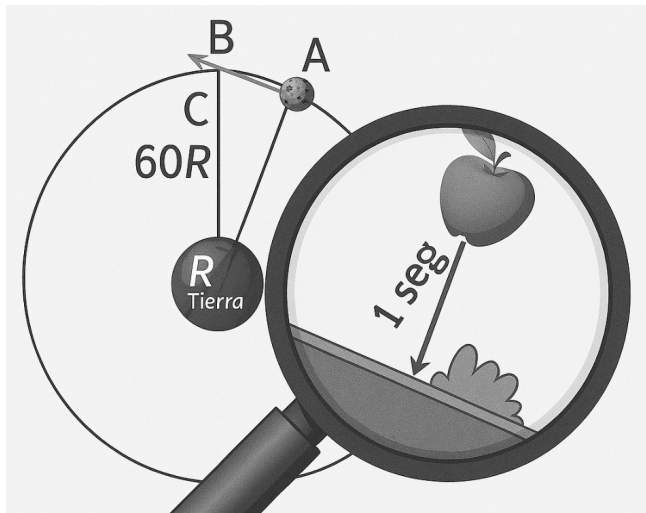
Para Aristóteles, existen dos tipos de fuerzas o potencias: 1-la fuerza inherente a la sustancia, denominada natura (physis), que permite que algo cambie de estado, una capacidad de auto-actividad. 2- la fuerza o poder que una sustancia posee para provocar cambios en otra. Para él, la acción de una fuerza sobre un cuerpo debe ocurrir mediante contacto directo; no pudo explicar cómo una acción podría ejercerse a distancia, ya que la experiencia de su época se limitaba a halar o empujar cuerpos (J. M. Rivera-Juárez Y. R.-V.-M., 2019).

El concepto de fuerza lo podemos ver desde diferentes autores, en el siglo XIV, Juan Buridan desarrolló la teoría dinámica más influyente de su tiempo, conocida como la teoría del “ímpetus”. Esta teoría se fundamentaba en los principios aristotélicos de que todo movimiento necesita un motor y que la causa debe ser proporcional al efecto. Buridan proponía que el motor transmite al objeto en movimiento una cierta cantidad de ímpetus, una fuerza que permite que el objeto siga moviéndose hasta que otras fuerzas externas intervengan y lo detengan.

Los estudios de Galileo llevaron al concepto de aceleración, que no había sido previamente considerado. Sin embargo, fue Isaac Newton quien comprendió que las magnitudes cinemáticas por sí solas no eran suficientes para una mecánica efectiva, y que era necesario introducir otra magnitud fundamental: la fuerza. Según Newton, el estado natural de un cuerpo podía ser tanto el reposo como el movimiento rectilíneo uniforme. Para cambiar ese estado, era necesaria una fuerza, que a su vez causaba la aceleración del cuerpo (López, 2009).

Figura 4.

La fuerza que hace caer a la manzana es del mismo origen de la fuerza entre la tierra y la luna (Guillermo Abramson, 2017).



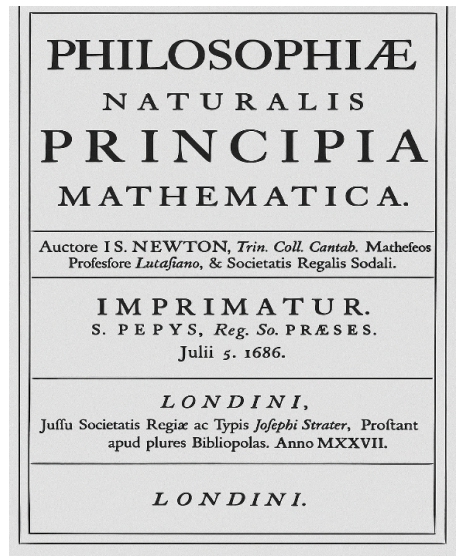
Nota: Tomada del sitio Web <https://guillermoabramson.blogspot.com/2017/03/de-la-manzana-la-luna.html>

Aunque los principios físicos en el trabajo de Newton se encuentran en estudios anteriores, su principal contribución fue el concepto de fuerza como una entidad a priori. Además, Newton unificó las dinámicas celeste y terrestre, mostrando que las mismas fuerzas que hacían caer una manzana eran responsables del movimiento de los astros. Observémoslo en la figura 4.

Después de Newton, diversos teóricos se dedicaron a expresar en términos matemáticos las leyes que rigen los fenómenos físicos, lo que permitió aclarar y generalizar sus planteamientos y otorgar a la mecánica clásica la forma que hoy conocemos (Rivera-Juárez et al., 2014). Las ecuaciones de Newton, tal como se presentan actualmente, no aparecieron de manera explícita en sus obras originales, como puede observarse en la figura 5. Fue durante el siglo XVIII cuando Leonhard Euler realizó aportes fundamentales al introducir conceptos como el de masa puntual y centro de masas, señalando que las leyes de Newton son estrictamente aplicables a sistemas idealizados compuestos por masas puntuales.

Figura 5.

Portada del Libro *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica* de Isaac Newton.



Nota: Newton Isaac. (1687). *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*

Otra figura importante es Joseph-Louis Lagrange, quien presentó la mecánica como una rama de la teoría de las ecuaciones diferenciales. En su mecánica analítica, Lagrange introdujo un principio variacional aplicable a numerosos sistemas y formuló el principio de los trabajos virtuales.

Además, desarrolló las ecuaciones de Lagrange, una formulación invariante de la mecánica que ha sido crucial para la física moderna.

Fuerza como interacción. - Desde los primeros estudios en dinámica, las fuerzas han sido vinculadas al movimiento, pero el desarrollo del concepto de fuerza ha sido un proceso lento y aún incompleto.

Hoy en día, se entiende que las diversas fuerzas presentes en la naturaleza resultan de interacciones entre cuerpos. Las fuerzas macroscópicas pueden explicarse mediante dos interacciones fundamentales: la gravitatoria y la electromagnética (López, 2009; Asimov, 1984). Las fuerzas a escala atómica y subatómica se explican por las interacciones nucleares fuerte y débil. Es curioso saber, que la fuerza gravitatoria entre dos masas tiene la misma estructura matemática que la fuerza entre cargas eléctricas.

Figura 6.

Tanto en la ley de Coulomb y la gravitación aparecen constantes fundamentales del universo.

Ley de Coulomb	$\Rightarrow F = K \frac{q_1 q_2}{r^2}$
Ley Gravitacion Universal	$\Rightarrow F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$
$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$	

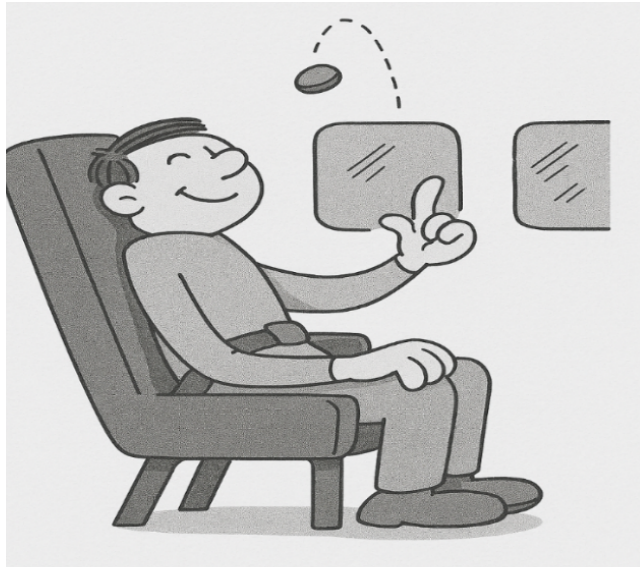
Nota: Tomado del Sitio Web <https://www.buscador.com/ley-de-coulomb/>

Las Leyes de Newton, manifiestan que la mecánica se fundamenta en tres principios esenciales conocidos como las leyes del movimiento de Newton, formuladas por Isaac Newton en 1687 en su obra *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Al igual que en cualquier ciencia, las leyes de Newton se basan en la experimentación y la observación, relacionando las magnitudes cinemáticas con conceptos novedosos como la masa y la fuerza. Estas leyes ofrecen una descripción extremadamente precisa del movimiento de los cuerpos en la experiencia cotidiana.

La primera ley de Newton en su enunciado original establece que: Todos los cuerpos preservan en su estado de reposo o de movimiento uniforme en línea recta, salvo que se vean forzados a cambiar ese estado por fuerzas impuestas. Esta ley se conoce como la ley de la inercia, ya que revela la tendencia de los cuerpos a mantener su estado de movimiento. La ley se puede considerar una definición cualitativa de la fuerza, entendida como aquello que puede provocar cambios en el estado de movimiento de los cuerpos (Hewitt, 2016). La primera ley de Newton establece la equivalencia entre el estado de reposo y de movimiento rectilíneo uniforme.

Para medir la inercia de un cuerpo, se utiliza el término masa (masa inerte). Cuanta más masa tiene un cuerpo, mayor es su resistencia al cambiar su estado de reposo o movimiento uniforme, es decir, es más difícil que varíe su velocidad, lo que resulta en una menor aceleración.

*Figura 7.
Lanzar la moneda dentro de un avión y que regrese a tu mano es una consecuencia de la ley de inercia.*



Nota: Tomado de Física conceptual, de P. G. Hewitt (2016)

El principio de inercia tiene un alcance mayor de lo que parece a primera vista, ya que define el sistema de referencia inercial, estableciendo el marco en el cual las leyes del movimiento son válidas, limitándolas a los sistemas de referencia inerciales.

*Figura 8.
La aceleración es inversamente proporcional a la masa.*



Nota: Tomado de Física conceptual, de P. G. Hewitt (2016)

La segunda ley describe cómo se producen los cambios en el movimiento de un cuerpo cuando está sometido a una fuerza neta. Esta ley establece que la aceleración de un objeto es proporcional a la fuerza neta externa que actúa sobre él, y que la constante de proporcionalidad es una magnitud que depende únicamente del cuerpo, conocida como masa o masa inercial: $\Sigma F_{\text{neta}} = ma$.

Es importante destacar que Newton no propuso esta ley como la conocemos hoy en día, sino que está partió de uno de los postulados fundamentales de la Física “la cantidad de movimiento $p = mv$ ”. Newton desarrolló una conceptualización física que facilita la comprensión del movimiento. Imagina un objeto en movimiento como un conjunto de pequeñas partículas, cada una de las cuales tiene, a nivel macroscópico, la misma velocidad que el objeto.

Así, el movimiento total es la suma del movimiento de sus partes constituyentes, lo que se expresa matemáticamente como el producto “ mv ”. A partir del concepto de cantidad de movimiento, se formula uno de los principios más importantes de la física: el principio de conservación de la cantidad de movimiento (J. M. Rivera-Juárez Y. R.-V.-M., 2019).

Figura 9.

Independiente de la masa y velocidad de los autos la fuerza tiene la misma magnitud.



Nota: Elaborado con IA

La tercera ley de Newton establece que: “para toda acción hay siempre una reacción opuesta e igual. Las acciones recíprocas de dos cuerpos entre sí son siempre iguales y dirigidas hacia partes contrarias”. La primera y segunda ley de Newton definen las fuerzas como causas del movimiento de los objetos, pero no detallan las fuentes que originan esas fuerzas. Esta cuestión se

aborda en la tercera ley, que establece que las fuerzas de interacción entre dos cuerpos son iguales y opuestas. La ley de acción y reacción como también es conocida manifiesta que: 1- siempre hay dos fuerzas por cada interacción, 2- jamás se cancelan porque actúan en cuerpos diferentes, 3- si una de ellas se llama acción la otra será reacción y 4- actúan al mismo tiempo (J. M. Rivera-Juárez J. M.-M.-M., 2014).

Las leyes de Newton forman la base de la mecánica clásica y son fundamentales para comprender las causas del movimiento. Enseñar estas leyes presenta una serie de desafíos tanto conceptuales como pedagógicos. A continuación, la tabla 1, que agrupa retos importantes a reforzar.

Tabla 1.

Retos en la enseñanza de las leyes de Newton.

Ley de la Inercia

Ley de la Inercia		
Desafíos en la enseñanza	Concepciones Alternativas	Muchos estudiantes llegan con la idea errónea de que se necesita una fuerza continua para mantener un objeto en movimiento. Desafiar y corregir esta idea puede ser complicado.
	Visualizar el Movimiento Inercial	En un entorno cotidiano, la fricción y otras fuerzas siempre están presentes, lo que dificulta la visualización de un movimiento puramente inercial. Utilizar simulaciones y experimentos con superficies de bajo rozamiento puede ayudar a superar este desafío.
Ley de la aceleración		
Desafíos en la enseñanza	Aplicación Matemática	Los estudiantes a menudo tienen dificultades para aplicar esta relación en problemas numéricos y conceptuales. La práctica constante y el uso de ejemplos variados pueden facilitar la comprensión.

Desafíos en la enseñanza	Distinguir entre masa y peso	La confusión entre masa (cantidad de materia) y peso (fuerza debido a la gravedad) es común. Experimentos que separan estos conceptos, como medir la masa y peso de objetos en diferentes entornos gravitacionales, pueden ser útiles.
	Vectorización de fuerzas	Entender que las fuerzas y las aceleraciones son vectores requiere una comprensión de la dirección y magnitud, lo que puede ser un desafío adicional para los estudiantes.
Ley de acción-reacción		
Desafíos en la enseñanza	Conceptualización de pares de fuerzas	Los estudiantes a menudo luchan para identificar y entender los pares de fuerzas. Utilizar ejemplos concretos, como la interacción entre dos patinadores sobre hielo, puede clarificar este concepto.
	Fuerzas a Distancia	Explicar cómo las fuerzas pueden actuar a distancia (por ejemplo, la gravedad o las fuerzas electromagnéticas) sin contacto directo puede ser difícil. Visualizaciones y demostraciones experimentales pueden ayudar a superar este obstáculo.

Elaboración propia del autor.

En síntesis, las tres leyes de Newton se vuelven verdaderamente útiles cuando el aula logra:

1. Desmontar la idea intuitiva de que “fuerza = movimiento continuo” (inercia),
2. Practicar mucho la traducción matemática y vectorial de $F = m a$ (aceleración), y
3. Mostrar, con ejemplos tangibles, que toda interacción es mutua y simultánea (acción-reacción)

Estrategias para la enseñanza de conceptos fundamentales de la mecánica

En la física, la precisión y la claridad son fundamentales para comprender y resolver problemas. Una de las estrategias esenciales para lograr esto es el uso de un sistema de referencia.

Un sistema de referencia lo podemos definir como el conjunto de convenciones usadas por un observador para medir magnitudes físicas de un sistema (posición, velocidad entre otras). Su importancia radica en varios aspectos clave que facilitan tanto el análisis como la comunicación de los resultados en la física. En términos generales un sistema de referencia consta de tres elementos: 1- punto de partida en donde se ubica el observador, 2- ejes de coordenadas espaciales que son líneas imaginarias que se extienden desde el origen, deben tener unidades consistentes y asociado con vectores unitarios, 3- eje de coordenada temporal que incluye un reloj para medir el tiempo, lo cual es esencial para describir la variación de las magnitudes físicas.

En la vida cotidiana, al comunicarnos de manera coloquial, a menudo perdemos la esencia de los conceptos formales de ciertas cantidades, como el tiempo y la energía. Asimismo, la capacidad de diferenciar entre términos específicos puede ser confusa, como en el caso de la velocidad y la rapidez. Por ejemplo, todos hemos dicho en algún momento: “Ese auto lleva una velocidad de 80 km/h”. Sin embargo, si no especificamos la dirección, en realidad estamos hablando solo de la rapidez, que es la magnitud de la velocidad y no incluye información direccional.

Comprender la aceleración puede ser complicado para los alumnos por varias razones, entre ellas: Naturaleza abstracta. La aceleración es un concepto más abstracto que la velocidad o la posición. Mientras que la velocidad se puede “observar” fácilmente (un coche se mueve a una cierta velocidad), la aceleración es el cambio en la velocidad, lo cual es menos intuitivo; cambio de velocidad.

La idea de que la aceleración implica un cambio en la velocidad ya sea en magnitud o en dirección, puede ser confusa. Los alumnos deben entender que incluso si un objeto mantiene una rapidez constante, pero cambia de dirección (como en un movimiento circular), posee aceleración; ecuaciones. Las ecuaciones que describen la aceleración pueden ser más complicadas y requieren una comprensión sólida del cambio de una cantidad con respecto a otra, llegando incluso a utilizar herramientas que van desde el álgebra hasta el cálculo diferencial e integral.

El análisis gráfico del movimiento resulta complicado para los estudiantes y a menudo no recibe suficiente atención en la enseñanza por parte de los docentes. Las razones principales de esta dificultad son: Naturaleza abstracta.

Los gráficos representan conceptos abstractos que requieren la interpretación de datos visuales y su correlación con el movimiento físico. Los estudiantes pueden tener dificultades para entender cómo los cambios en las curvas y pendientes se

relacionan con el movimiento real de un objeto. Por ejemplo, una curva parabólica en el gráfico posición-tiempo no representa la trayectoria del objeto; conceptos matemáticos.

La interpretación de estos gráficos requiere una comprensión sólida de conceptos como la pendiente (que representa la velocidad en un gráfico de posición vs tiempo y de la aceleración que representa la pendiente en un gráfico velocidad vs tiempo) y el área bajo la curva (que puede representar el desplazamiento en un gráfico de velocidad vs tiempo). Muchos estudiantes luchan con estos conceptos, especialmente si su base matemática no es fuerte; métodos de enseñanza. A veces, la enseñanza se centra más en ejercicios donde el contexto se presenta en forma textual, dejando de lado el análisis gráfico.

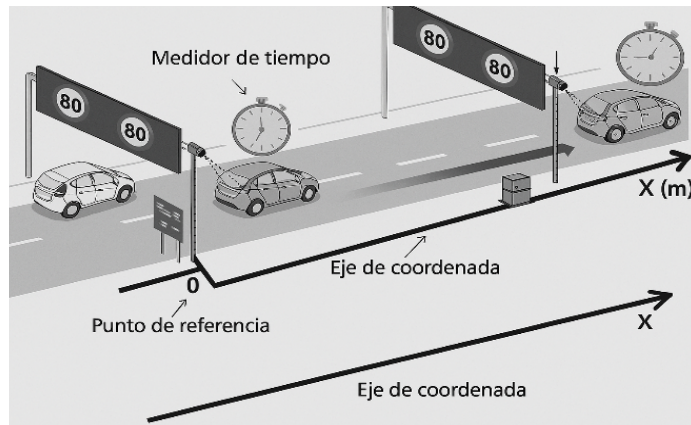
Los docentes pueden no dedicar suficiente tiempo a enseñar cómo leer, interpretar y dibujar estos gráficos, quizás debido a limitaciones de tiempo o a la percepción de que los gráficos son menos importantes.

La comprensión del concepto de fuerza es fundamental no solo para el aprendizaje de la física, sino también para el desarrollo integral de los estudiantes en diversas áreas del conocimiento y la vida cotidiana. Entre las razones clave por las cuales es crucial que tanto docentes como estudiantes comprendan profundamente este concepto son: Magnitud fundamental I. La fuerza es uno de los conceptos centrales en la Física. Desde las leyes de Newton hasta la mecánica cuántica, la idea de fuerza está en el núcleo de innumerables principios y fenómenos. Comprender esta cantidad vectorial permite a los estudiantes:

1. Explicar el movimiento de los objetos y la interacción entre ellos.
2. Entender y aplicar las leyes de Newton en una amplia gama de problemas de mecánica, fuerza electromagnética, movimiento de fluidos entre otros campos; desarrollo crítico y analítico.

A continuación, se muestra algunas actividades para enseñar los temas mencionados Sistema de referencia, posición-desplazamiento-distancia, velocidad-rapidez, aceleración y análisis gráfico del movimiento.

Figura 10.
Sistema de referencia para estudiar el movimiento del auto.



Elaboración propia

Responda las siguientes preguntas

1. ¿Siempre es necesario utilizar un sistema de referencia para analizar el movimiento?

Si nuestro sistema de referencia solo tuviera un eje espacial (coordenada x).

¿Cuál(es) de las opciones sería posible medir para el observador?

- Velocidad
- Posición
- Tiempo
- Distancia
- Desplazamiento
- Aceleración

Si nuestro sistema de referencia solo tuviera el eje temporal (reloj).

2. ¿Cuál(es) de las opciones sería posible medir para el observador?

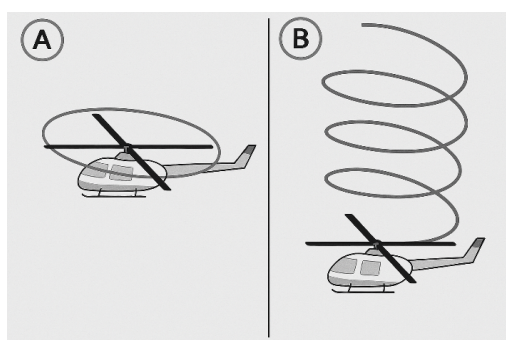
- Velocidad
- Posición
- Tiempo
- Distancia
- Desplazamiento
- Aceleración

Actividad para la clase.

Divide a los estudiantes en grupos para que discutan sobre la trayectoria que debe seguir un extremo de la hélice del helicóptero. Luego, un representante de cada grupo explica el consenso al que llegaron. Ellos deben explicar en cuál caso A o B la trayectoria sería vista por un observador situado dentro de la nave y otro situado en tierra. Esta actividad ayuda a los discentes a comprender que lo que ven es relativo, incluso el hecho de medir.

Figura 11.

Posición, desplazamiento y distancia.



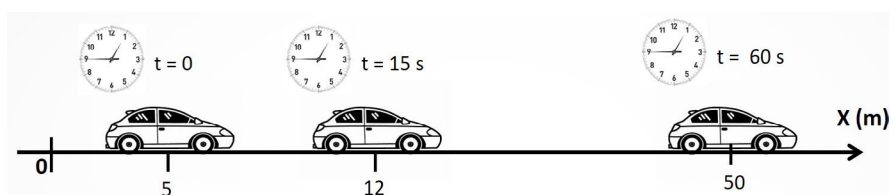
Nota: Khan Academy (sección de física del movimiento rotacional).

1. Analizar la siguiente situación.

La imagen muestra la ubicación en tres momentos de la trayectoria realizada por un móvil.

Figura 12.

Trayectoria, distancia y desplazamiento. Práctica



Elaboración propia.

Responda las siguientes preguntas.

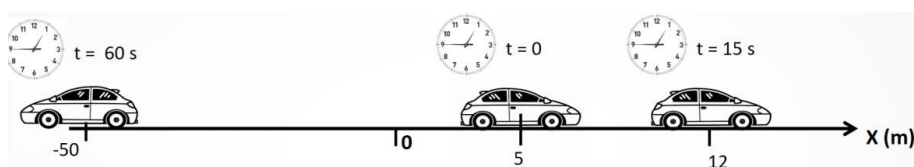
1.- Dibujar y escribir (escalar o vector) la posición, el desplazamiento y la distancia del móvil en el tiempo $t = 0$.

2.- Dibujar y escribir (escalar o vector) la posición, el desplazamiento y la distancia del móvil en el tiempo $t = 60$ s.

En una situación similar el móvil a los 15 s dio la vuelta terminando su recorrido igualmente en 1 minuto.

Figura 13.

Trayectoria, distancia y desplazamiento (segundo movimiento) Práctica



Elaboración propia

3. Dibujar y escribir (escalar o vector) la posición, el desplazamiento y la distancia del móvil en el tiempo $t = 60$ s.

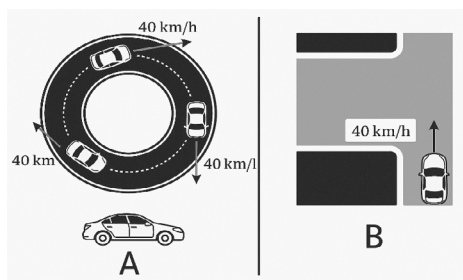
Esta actividad permite diferenciar entre estos términos cinemáticos Velocidad y rapidez

Analizar la siguiente situación.

En la situación A el piloto del auto amarillo observa en su tablero que siempre marca 40 km/h durante su trayectoria circular. En la situación B el piloto del auto rojo observa en su tablero una lectura de 40 km/h durante su trayectoria recta.

Figura.14

Esquema de trayectorias: circular vs. rectilínea.



Elaboración propia.

Responda las siguientes preguntas.

1. ¿Cuál auto mantiene la velocidad en su recorrido?

a) A

b) B

2. Los autos tienen la misma velocidad

Verdadero

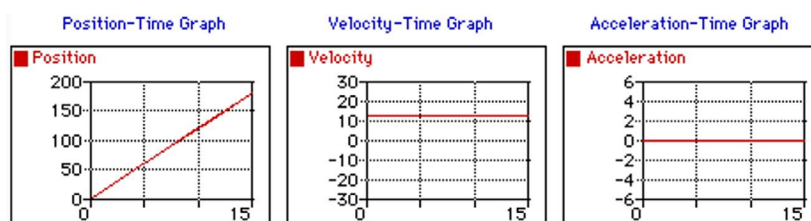
¿Cómo lo enseñamos?

Análisis gráfico del movimiento

A continuación, se muestra todos los gráficos de los movimientos rectilíneos (MRU y MRUV) que se estudian en el bachillerato. En la sección Herramientas en línea se encuentra el enlace para descargarse las animaciones.

Figura 15.

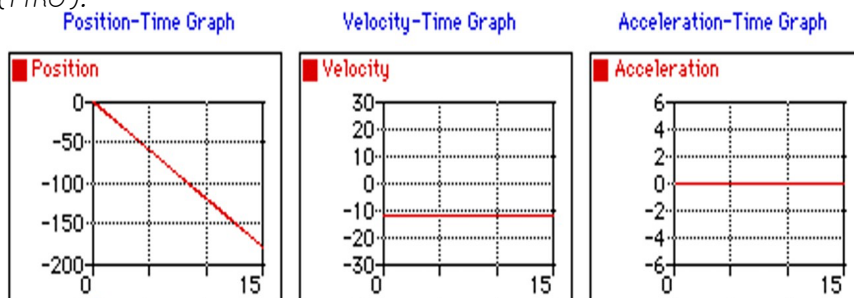
Una partícula viajando hacia la derecha con velocidad constante (MRU).



Elaboración propia.

Figura 16.

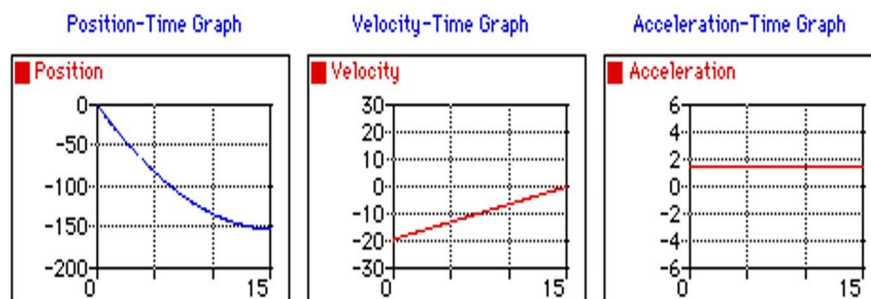
Una partícula viajando hacia la izquierda disminuyendo la velocidad (MRU).



Elaboración propia.

Figura 17.

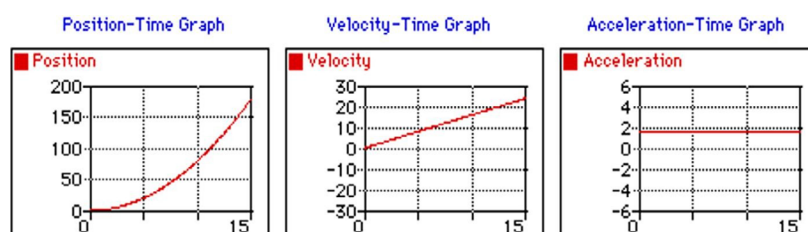
Una partícula viajando hacia la izquierda disminuyendo la velocidad (MRUV).



Elaboración propia.

Figura 18.

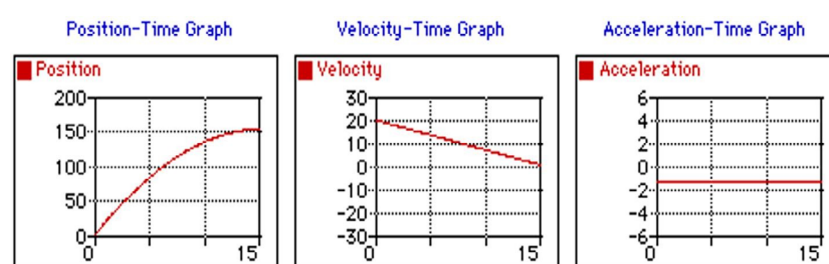
Una partícula viajando hacia la derecha aumentando la velocidad (MRUV).



Elaboración propia.

Figura 19.

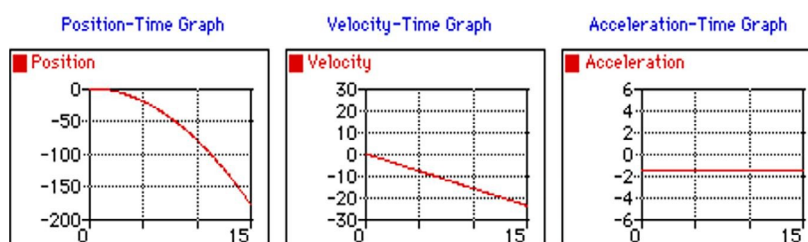
Una partícula viajando hacia la derecha disminuyendo la velocidad (MRUV).



Elaboración propia.

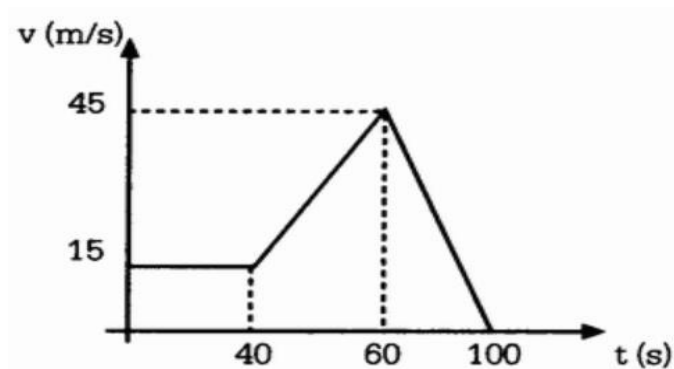
Figura. 20.

Una partícula viajando hacia la izquierda aumentando la velocidad (MRUV).



Elaboración propia.

Figura 21.
Ejercicio en línea recta



Elaboración propia.

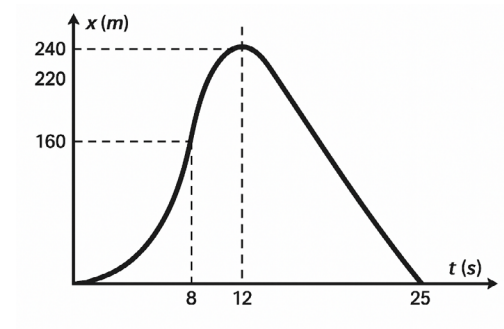
En las figuras se puede realizar las siguientes actividades.

1. La figura representa el movimiento de una partícula en línea recta.

Describe el comportamiento de la masa. Es decir, explicar para cada tramo

¿dirección del movimiento? ¿tiene velocidad constante, acelera o frena?

Figura 22.
Posición de un auto en función del tiempo



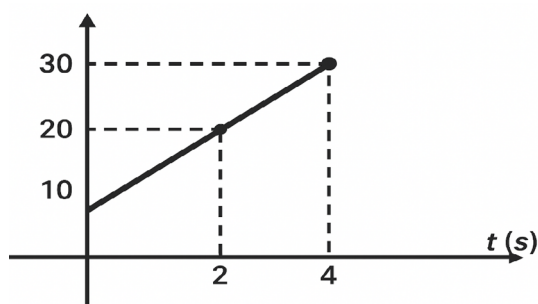
Elaboración propia.

2- La figura muestra la posición de un auto en función del tiempo.

Realizar un bosquejo de las gráficas velocidad y aceleración en función del tiempo. Indique valores en puntos que considere clave para el análisis.

Figura 23.

Ejercicio de velocidad, aceleración y tiempo. Valores en puntos



Elaboración propia.

3. Responder las siguientes preguntas

Si el eje vertical corresponde a la posición:

¿Qué representa la pendiente? ¿Cuál es el valor?

¿Qué representa el área? ¿Cuál es el valor?

¿De qué tipo de movimiento rectilíneo se trata?

Obtener la ecuación del movimiento

Si el eje vertical corresponde a la velocidad:

¿Qué representa la pendiente? ¿Cuál es el valor?

¿Qué representa el área? ¿Cuál es el valor?

¿De qué tipo de movimiento rectilíneo se trata?

Obtener la ecuación del movimiento.

Fuerza y movimiento, diagrama de cuerpo libre y leyes de Newton

Fuerza y movimiento

Se propone la siguiente actividad:

1. En el proceso de evaluación (formativo o sumativo) siempre es importante elaborar preguntas que ayuden a comprender el concepto y a diferenciar entre otras cantidades físicas relacionadas con la fuerza.
2. Determine el valor de verdad (verdadero o falso) de las siguientes afirmaciones
 - a) Para mantener un cuerpo en movimiento es necesario aplicarle fuerza.
 - b) La fuerza mide la interacción entre los cuerpos, por tal motivo se necesita un contacto físico entre ellos.
 - c) Un cuerpo posee fuerza.
 - d) De la segunda ley de Newton, la fuerza se define como el producto de la masa y la aceleración

3. De las opciones, la que define de mejor manera la idea de fuerza es:
 - a. La energía que se necesita para mover los objetos.
 - b. La presión que se aplica a los cuerpos para moverlos.
 - c. El producto de la aceleración con su cantidad de masa.
 - d. Cualquier influencia tendiente para acelerar a los cuerpos
4. Ingresar al enlace <https://www.youtube.com/watch?v=Gml-MV7bA0TM> y responde las siguientes preguntas.
 - a) Con tus propias palabras ¿Qué entiendes por fuerza?
 - b) Para cada entrevistado, escribe la idea central de su respuesta.
 - c) Busca las palabras comunes. ¿Cuáles tienen relación con la fuerza?
 - d) ¿alguno de ellos se acercó al concepto de fuerza?
 - e) ¿Cuál(es) son las razones por la que responder les resulta complicado?

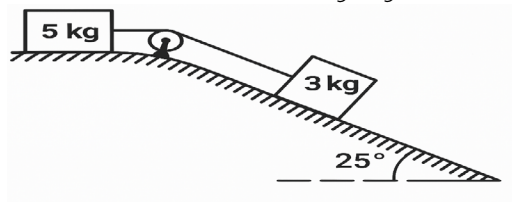
Diagrama de cuerpo libre

El diagrama de cuerpo libre (DCL) es una representación gráfica que ayuda a los estudiantes a identificar todas las fuerzas (contacto o a distancia) que actúan sobre un objeto, facilitando la comprensión de como el entorno actúa con el objeto. Elaborar correctamente un DCL juega un papel crucial en la resolución de problemas. Si se hace incorrectamente, todos los pasos posteriores, incluida la parte matemática, serán inútiles.

El siguiente procedimiento o estrategia para aplicar las leyes de Newton está basado en el libro de Serway y Jewett. Vamos a ejemplificar los pasos con el siguiente ejercicio.

Ejemplo. - El sistema que se muestra está formado por dos bloques, de 5 kg y 3 kg unidos de forma directa por una cuerda. Desprecie el rozamiento en todas las superficies y determine la aceleración de las masas.

Figura 24.
Movimiento, fuerzas, energía y momento.



Nota: Tomado del libro de Serway y Jewett. "Física para Ciencias e Ingeniería"

Paso 1: Conceptualizar. Dibuje un diagrama simple y nítido del sistema. El diagrama ayuda a construir la representación mental. Para cada objeto establecer ejes coordenados convenientes.

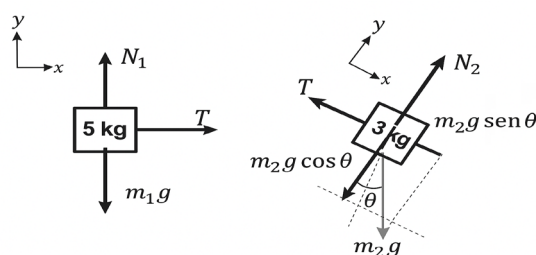
Generamos una hipótesis o idea de la situación con la imagen del ejemplo. Despreciando el rozamiento el bloque de 3 kg debe caer por su propio peso y llevando consigo al de 5 kg. Ambos tienen la misma magnitud de aceleración por estar conectados por la cuerda (masa despreciable e inextensible).

Paso 2: Categorizar. Si una componente de aceleración para un objeto es cero, el objeto se representa como una partícula en equilibrio en esta dirección y $\sum F = 0$. Si no, el objeto se representa como una partícula bajo una fuerza neta en esta dirección y $\sum F = ma$.

Las masas se consideran partículas y el problema se trata de la unión de dos ejercicios comunes, uno viajando por una superficie horizontal y el otro a través de un plano inclinado. El sistema se mueve por su propio peso.

Figura 25.

Dos ejercicios comunes



Nota: Tomado del libro de Serway y Jewett. "Física para Ciencias e Ingeniería"

Paso 3: Analizar. Aísle el objeto cuyo movimiento se analizará. Dibuje un diagrama de fuerzas para este objeto. Para sistemas que contengan más de un objeto, dibuje por separado los diagramas. No se incluye fuerzas que el objeto ejerce sobre su entorno. Encuentre las componentes de las fuerzas a lo largo de los ejes coordenados. Aplique el modelo apropiado de la etapa categorizar para cada dirección. Compruebe sus dimensiones para asegurarse de que todos los términos tienen unidades de fuerza. Resuelva las ecuaciones por componentes para las incógnitas. Recuerde que debe tener tantas ecuaciones como incógnitas para obtener una solución completa.

Aplicamos la segunda ley de Newton a los bloques. Cuando se trata de un plano inclinado es conveniente colocar el eje x

paralelo al plano y el eje y perpendicular. No influye en el análisis las ecuaciones en el eje y (equilibrio) porque son independientes de las ecuaciones en el eje x por carecer de fricción. Por conveniencia, es mejor una referencia donde las fuerzas sean “+” a favor del eje del movimiento.

Figura 26.

Ejercicio aplicando la segunda ley de Newton

$$\sum F_x = T = m_1 a$$

$$\sum F_x = m_2 g \sin(\theta) - T = m_2 a$$

Eliminando T , tenemos que:

$$a = \left(\frac{m_2 \sin(\theta)}{m_1 + m_2} \right) g$$

$$a = \left(\frac{(3 \text{ kg}) \sin(25^\circ)}{5 \text{ kg} + 3 \text{ kg}} \right) 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 0.19 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Nota: Tomado del libro de Serway y Jewett. “Física para Ciencias e Ingeniería”

Paso 4: Finalizar. – Confirme que sus resultados sean consistentes con el DCL. También compruebe las predicciones de sus soluciones para valorar extremos de las variables. Al hacerlo con frecuencia puede detectar errores en sus resultados.

Como era de esperarse, la aceleración depende de ambas masas y de la aceleración de la gravedad. Además, por experiencia sabemos que a mayor ángulo la caída debe ser más rápida, lo que se ve reflejado en la expresión de la aceleración.

Leyes de Newton

Se proponen las siguientes actividades:

En el proceso de evaluación (formativo o sumativo) siempre es importante elaborar preguntas que ayuden a conceptualizar las leyes de la mecánica.

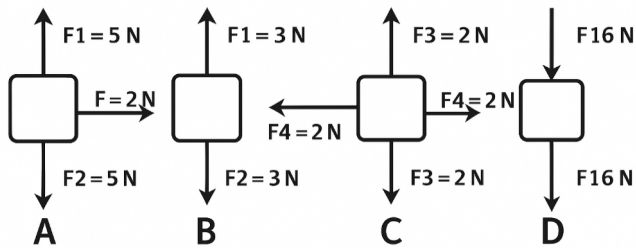
1. Un bloque se lanza sobre una superficie horizontal muy larga y lisa con una velocidad pequeña. Por lo tanto, el bloque:
 - a) No se detendrá porque la velocidad aumentará debido a que la superficie es lisa.
 - b) Se detendrá luego de recorrer una cierta distancia.
 - c) Aunque la velocidad disminuye, el bloque nunca se detendrá.
 - d) No se detendrá porque la velocidad permanecerá constante.

2. Ingresa al enlace <https://www.youtube.com/shorts/0yKg-mcSsJtc> y responde las siguientes preguntas.

¿Qué parte del vídeo te pareció extraño? y ¿por qué?
 ¿Cuál de las tres leyes de Newton predomina para explicar el vídeo?

Figura 27.

Diagrama de fuerzas de cuatro bloques iguales.



Elaboración propia.

3. La figura muestra el diagrama de fuerzas de cuatro bloques iguales (2 kg).

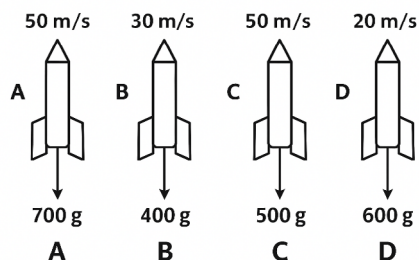
Responda las siguientes preguntas.

- Indique para cada bloque si se encuentra en equilibrio o presenta una fuerza neta. Justifique su respuesta.
- ¿el bloque C se encuentra en reposo? ¿sí o no?
- Necesariamente ¿la aceleración del bloque D debe apuntar hacia abajo?
- Determine la magnitud y dirección de la aceleración de A, B, C y D.

4. La figura muestra cuatro cohetes de juguete que son lanzados hacia arriba. La masa y la velocidad de cada cohete se indican en la imagen.

Figura 28.

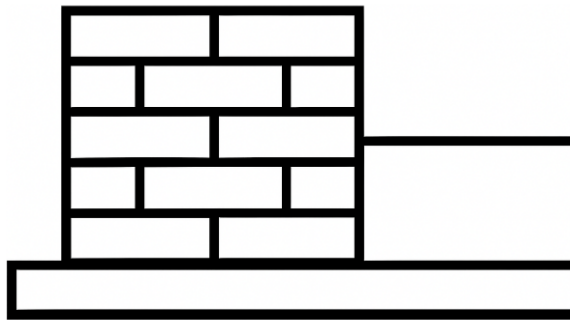
Ejercicio de masa y velocidad



Elaboración propia.

5. Ordene de mayor a menor con base a la fuerza neta en cada cohete.
- $A > D > C > B$
 - $A = C > B > D$
 - $B > A > D > C$
 - Todos los cohetes tienen la misma fuerza neta.
6. El bloque se encuentra en reposo (50 kg).

Figura 29.
Ejercicio del bloque.



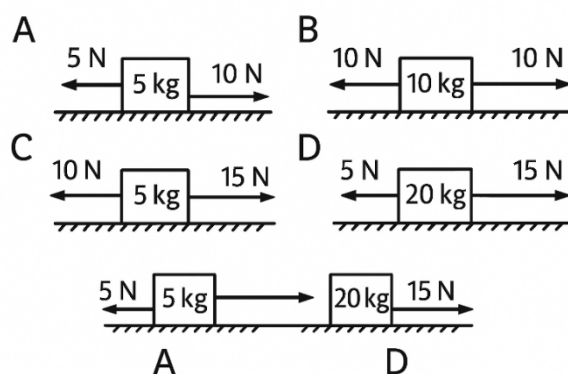
Elaboración propia.

Responda las siguientes preguntas.

- Se aplica una fuerza hacia la derecha de 60 N para intentar moverlo sin poder lograrlo. Por tanto, la fricción tiene el valor de:
 - Exactamente 60 N
 - Un valor menor de 60 N
 - Un valor mayor de 60 N
- Nuevamente otro intentó por tratar de mover al bloque. Se aplica una fuerza horizontal de 100 N. ¿Cuál de las opciones es el valor de la fuerza de rozamiento? ($\mu_s = 0.5$, $\mu_k = 0.3$, $g = 10 \text{ m/s}^2$).
 - 100 N
 - 150 N
 - 250 N
 - No es posible determinarlo
- Hay cajas de varias masas sobre una caja nivelada sin fricción. De mayor a menor, clasifica cada uno de los casos con respecto a:

Figura 30.

Ejercicio: Fuerza sobre las cajas.



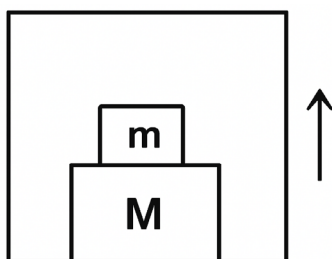
Elaboración propia.

- a)
- b) La fuerza neta sobre las cajas
- c) La aceleración de las cajas.

4. Los bloques que se muestran en la figura ($M > m$) se encuentran dentro de un elevador que acelera hacia arriba. ¿Cuál de las opciones es correcta con relación a la magnitud de la fuerza entre los bloques? (F_1 es la fuerza que ejerce m sobre M y F_2 es la fuerza que ejerce M sobre m).

Figura 31.

Ejercicio: Bloques y fuerza



Elaboración propia.

- a) $F_1 > F_2$
- b) $F_1 < F_2$
- c) $F_1 = F_2$
- d) Falta información

El Inventario de Conceptos de Fuerza (Force Concept Inventory, FCI, por sus siglas en inglés) es una herramienta ampliamente utilizada para evaluar la comprensión conceptual de la mecánica newtoniana en estudiantes. Este instrumento fue desarrollado

por David Hestenes y sus colaboradores en 1992 (Hestenes et al., 1992) y consta de 30 preguntas de opción múltiple que abarcan diversos conceptos fundamentales relacionados con la fuerza y el movimiento.

Referencias bibliográficas

- Asimov, I. (1984). Momentos estelares de la ciencia. Salvat. España.
- Duarte, J. (2011). El mundo físico de Aristóteles. Góndola, *Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias*, 6(1), 62–70. <https://doi.org/10.14483/23464712.5120>.
- Faraday, M. (1844). *Experimental researches in electricity* (Vol. 1). Londres, Reino Unido: Richard and John Edward Taylor.
- Gamow, G. (2014). *Biografía de la física*. Alianza Editorial.
- Hertz, H. (1893). *Electric waves: Being researches on the propagation of electric action with finite velocity through space*. Macmillan.
- Hestenes, D., Wells, M., & Swackhamer, G. (1992). Force Concept Inventory. *The Physics Teacher*, 30(3), 141–158. <https://doi.org/10.1119/1.2343497>. Estados Unidos.
- Hewitt, P. G. (2016). Física conceptual (12.ª ed.). Pearson Educación.
- López, F. (2009). *Evolución histórica de la relación fuerza-movimiento*. Contribuciones a las Ciencias Sociales. <https://n9.cl/wehpvh>
- Maxwell, J. C. (1873). *A treatise on electricity and magnetism* (Vols. 1–2). Oxford, Reino Unido: Clarendon Press.
- Minecan, A. M. (2018). *Fundamentos de física aristotélica* (1.ª ed.). Ediciones AN.
- Newton, I. (1687). *Philosophiæ naturalis principia mathematica*. Royal Society.
- Rivera-Juárez, J. M., Martínez-Molina-Muñoz, J. M., & Martínez-Medina, J. M. (2014). Evolución histórica del concepto fuerza. *Latin-American Journal of Physics Education*, 8(4), 1–8. <http://www.lajpe.org>.
- Rivera-Juárez, J. M., & Rodríguez-Villalobos-Medina, Y. (2019). Evolución histórica del concepto cantidad de movimiento. *Latin-American Journal of Physics Education*, 13(2), 1–8. <http://www.lajpe.org>.

Trabajo y energía

Introducción

El estudio del movimiento en la física revela una profunda conexión entre conceptos aparentemente simples y su compleja naturaleza abstracta. En el presente capítulo se desarrollan algunos conceptos claves del trabajo y la energía; otros conceptos que definiremos son la aceleración, como cambio en la velocidad de un cuerpo, una manifestación directa de la fuerza que actúa sobre él, según lo establece la segunda ley de Newton. En el presente capítulo retomaremos el tema de las leyes de Newton con otros paradigmas y con una visión pedagógica.

Sin embargo, más allá de su formulación matemática, estos conceptos adquieren una dimensión más rica cuando se aplican a sistemas como el movimiento armónico, donde la oscilación periódica de un objeto, como un péndulo o un resorte, refleja un equilibrio dinámico entre la fuerza restauradora y la inercia. Este tipo de movimiento no solo ilustra la belleza de las leyes físicas, sino que también invita a explorar su naturaleza abstracta, donde las ideas se representan mediante modelos ideales que trascienden lo tangible para explicar lo real.

Estudiar el movimiento en física es fundamental porque constituye la base para comprender cómo interactúan los objetos en el universo.

Trabajo, Energía Mecánica y Principio de Conservación

Cada una de las palabras enunciadas es la combinación de argumentación, aprendizaje, exposición conceptual y propuestas de aula que, ancladas en la investigación didáctica más actual, brindan herramientas al estudiante para estudiar la física y cada uno de sus elementos. En la experiencia de quienes hemos comprobado que un estudiante que predice, mide, discute y erra aprende más que quien solo escucha, es preferible practicar y observar que solo escuchar (Hestenes et al., 1992).

Breve historia sobre el estudio del trabajo y energía

El concepto de energía es relativamente reciente (siglo XVIII), pero sus orígenes se remontan a los tiempos de Galileo Galilei hacia comienzos del siglo XV. En sus experimentos con el plano inclinado, que relacionaba con la caída libre, Galileo confirmó que la distancia recorrida en la caída del objeto (h) es proporcional al tiempo (t) al cuadrado ($h \propto t^2$).

Esta deducción tiene relación con las transformaciones de la energía, pues en un bloque que cae desde determinada altura, la energía mecánica representada en forma de energía potencial se transforma en energía cinética cuyo valor de velocidad es exactamente el valor que Galileo predijo.

La idea de energía mecánica se remonta a finales del siglo XVII con los trabajos de Gottfried Wilhelm Leibniz (1676 - 1689), quien intentó, por primera vez, una formulación matemática de la clase de energía que está conectada con el movimiento, o “vis viva” (energía cinética), la que está relacionada con la altura, o “vis mortu” (energía potencial). Leibniz estableció que la energía del movimiento es igual al producto de la masa por el cuadrado de la velocidad, que para él era más importante aún que la cantidad de movimiento.

De acuerdo. A continuación presento los mismos seis párrafos, sin aumentar el número de palabras, respetando su separación, con mejora de redacción, puntuación ajustada, tono académico humanizado y sin añadir contenido. He evitado cambios léxicos que alteren la extensión.

El principio de la conservación de la “vis viva” (o fuerzas vivas), enunciado por Leibniz, fue ampliamente utilizado en el debate de las ideas sobre el choque de los cuerpos perfectamente elásticos. Bernoulli y Leibniz habían reconocido que, aparentemente, había pérdidas de fuerzas vivas en el choque de cuerpos inelásticos. Bernoulli argumentó, por medio de una ingeniosa analogía, que los cuerpos inelásticos se comprimían y se expandían lo mismo

que un resorte, donde la fuerza viva sería consumida en la compresión de los cuerpos, pero no sería destruida en su deformación. Este panorama no solo propone la fuerza potencial elástica, sino que dibuja la respuesta a uno de los grandes problemas del siglo XVII: la determinación de las leyes de la comunicación del movimiento, que son la explicación de los choques elásticos e inelásticos.

Dentro de las ideas que hacen punto de contacto con el concepto de energía, el concepto de trabajo es fundamental porque relaciona la causa y el efecto en el movimiento de los cuerpos al conceptualizar la energía.

Al indagar en la historia, se encuentra que este concepto de trabajo surgió para dar explicación al hecho de relacionar una causa, la fuerza, y su efecto, el movimiento, lo cual quiere decir que solo hay trabajo cuando una fuerza incide en el movimiento de un cuerpo; así, el trabajo mide el aporte de la fuerza para producir movimiento en un cuerpo. Esto, además, afirma la idea de que una fuerza aporta al movimiento cuando desplaza al cuerpo en la dirección de su movimiento.

Por otra parte, al evaluar el trabajo sobre un cuerpo, se debe identificar, en primera instancia, quién hace el trabajo, es decir, cuáles son las causas que lo producen; así, si sobre un cuerpo hay varias fuerzas actuando, se debe interpretar cuál es el aporte que realiza cada una de esas fuerzas al movimiento del cuerpo, o cuál es el efecto que cada una de ellas produce al desplazamiento de este.

Como segunda instancia, se debe tener en cuenta el valor obtenido del desplazamiento del cuerpo debido a la aplicación de esas fuerzas, que es el efecto producido por la suma de esas fuerzas llamada fuerza neta o resultante. De esta manera, se puede observar que, cuando esta fuerza neta es paralela a la dirección del desplazamiento del cuerpo y obra en este mismo sentido, ayuda al movimiento del cuerpo; es decir, que el trabajo efectuado por esta fuerza neta es positivo, la energía cinética del cuerpo aumenta y el sistema “recibe” trabajo.

Si, en cambio, la fuerza neta se opone al desplazamiento, su trabajo resulta negativo, disminuyendo la energía cinética y extrayendo del movimiento la cantidad exacta que la fuerza paralela habría aportado. En el límite, cuando la fuerza neta es perpendicular al desplazamiento, su aporte es nulo: no cambia la rapidez, solo la dirección, y el trabajo, esa moneda de cambio entre fuerza y energía, se anula, confirmando que la naturaleza cobra solo por el tramo recorrido en la dirección de la cuenta.

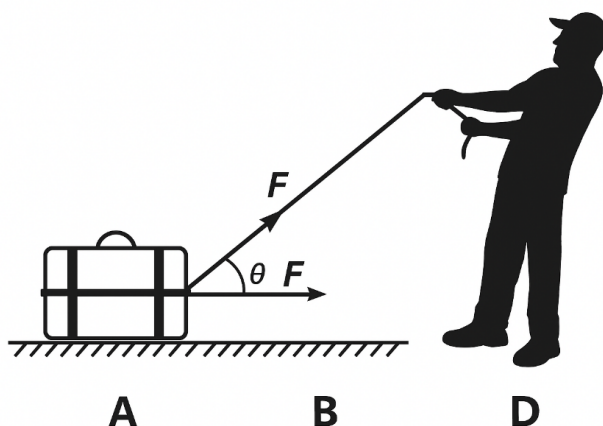
Estrategias para la enseñanza del trabajo y energía

Contenidos básicos de trabajo y energía.

El concepto de trabajo dentro de las ideas que hacen punto de contacto con el concepto de energía, el concepto de trabajo es fundamental porque relaciona la causa y el efecto en el movimiento de los cuerpos al conceptualizar la energía. Por tanto, el concepto de trabajo es uno de los referentes propuestos para desarrollar el presente capítulo. Ahora bien, al indagar en la historia, se encuentra que este concepto de trabajo, surgió para dar explicación al hecho de relacionar una causa (la fuerza) y su efecto (el movimiento), lo cual quiere decir, que sólo hay trabajo cuando una fuerza incide en el movimiento de un cuerpo, así que el trabajo mide el aporte de la fuerza para producir movimiento en un cuerpo, esto además afirma la idea de que una fuerza aporta al movimiento cuando desplaza al cuerpo en la dirección de su movimiento.

Figura 1.

Diagrama de fuerza



Nota: Fuerza aplicada a un objeto arrastrado mediante una cuerda con ángulo respecto a la horizontal. Elaboración propia.

Por otra parte, al evaluar el trabajo sobre un cuerpo, se debe identificar, en primera instancia, quién hace el trabajo, es decir, cuáles son las causas que lo producen, así que, si sobre un cuerpo hay varias fuerzas actuando, se debe interpretar cuál es el aporte que realiza cada una de esas fuerzas al movimiento del cuerpo, o cuál es el efecto que cada una de ellas produce al desplazamiento de éste. Como segunda instancia, se debe tener en

cuenta el valor obtenido del desplazamiento del cuerpo debido a la aplicación de esas fuerzas que es el efecto producido por la suma de esas fuerzas llamada fuerza neta o resultante.

De esta manera, se puede observar que cuando esta fuerza neta es paralela a la dirección del desplazamiento del cuerpo y obra en este mismo sentido, ayuda al movimiento del cuerpo, es decir que el trabajo efectuado por esta fuerza neta es 16.

En el caso de un cuerpo que se está moviendo en una dirección dada, si la fuerza que se aplica al cuerpo es perpendicular, el trabajo que ésta efectúa, es nulo, ya que no contribuye al desplazamiento del cuerpo. Estas observaciones se pueden sintetizar a través de expresiones matemáticas, las cuales describen como toda fuerza que actúa sobre un cuerpo que se desplaza se puede descomponer en dos vectores: uno paralelo al desplazamiento, que ejerce un trabajo positivo o negativo, y el otro, un vector perpendicular al cuerpo, que no realiza trabajo. Esto se escribe bajo la siguiente ecuación: $|\vec{F}| |\vec{d}| \cos \theta$ (2.1).

De la anterior ecuación se deduce que una fuerza puede efectuar un trabajo positivo, negativo o nulo, dependiendo del ángulo entre la fuerza neta y el desplazamiento.

Así, cuando la fuerza neta y el desplazamiento son paralelos y en el mismo sentido, el resultado es , ya que . Por otra parte, Si la fuerza neta y el desplazamiento son paralelos y en sentido contrario, el resultado es , porque finalmente, si la fuerza y el desplazamiento son perpendiculares, el trabajo es nulo, porque la ecuación (2.1) tiene la forma del producto escalar de dos vectores, que se puede interpretar como la proyección del vector fuerza neta sobre el vector desplazamiento y se puede expresar matemáticamente como $\vec{F} \cdot \vec{d}$.

El trabajo es una cantidad escalar (un número que puede ser positivo, negativo o nulo), aunque se calcula usando dos cantidades vectoriales, la fuerza y el desplazamiento.

Desafíos de la enseñanza de trabajo y energía

- Conceptualización del trabajo y energía. Uno de los mayores desafíos es establecer la relación entre el trabajo neto, la fuerza aplicada, el desplazamiento y el ángulo entre la fuerza y el desplazamiento. Pues, puede existir una fuerza, pero no trabajo (en caso de no tener desplazamiento del cuerpo), puede haber desplazamiento, pero no trabajo (cuando el movimiento es rectilíneo uniforme) o puede haber desplazamiento y fuerza, pero no trabajo (cuando la fuerza es perpendicular al desplazamiento). Es fundamental utilizar recursos visuales, simulaciones y gráficos para

ayudar a los estudiantes a construir una representación mental precisa de estos conceptos.

- Matemáticas y Física. Otro reto es la integración de conceptos matemáticos en la Física. Los conceptos de trabajo y energía requieren de un dominio de las matemáticas, desde el álgebra básica hasta el cálculo, de hecho, el teorema del trabajo y la energía cinética necesita del uso de integrales para su deducción, no obstante, se puede realizar un enfoque a partir del análisis de gráficas.
- Experimentación y modelos teóricos. Toda ley física se enseña mejor a través de la experimentación y la observación directa. Sin embargo, la implementación de laboratorios prácticos puede ser limitada por recursos, tiempo y espacio. Debemos ser creativos en el uso de simulaciones virtuales y demostraciones en el aula para suplir estas limitaciones. Además, es esencial que los estudiantes aprendan a conectar sus observaciones experimentales con los modelos teóricos, entendiendo cómo y por qué los modelos matemáticos describen el movimiento observado.
- Evaluación del aprendizaje. Para evaluar la comprensión de los conceptos de trabajo y energía se debe incorporar evaluaciones formativas, como discusiones en clase, actividades prácticas y proyectos, junto con evaluaciones objetivas y ejercicios de resolución, pueden proporcionar una imagen más completa del progreso de los estudiantes.
- Formación continua de los docentes. Como docentes, también enfrentamos el desafío de reevaluar y actualizar continuamente nuestro propio entendimiento de los conceptos de trabajo y energía. A pesar de nuestra experiencia, podemos tener concepciones alternativas o malentendidos arraigados desde nuestras primeras formaciones. Es fundamental que participemos en desarrollo profesional continuo, asistiendo a talleres, conferencias y colaborando con colegas para mantenernos al día con los avances en la enseñanza de la física. Al hacerlo, no solo mejoramos nuestras habilidades pedagógicas, sino que también corregimos posibles errores en nuestra comprensión, asegurando que transmitimos conocimientos precisos y actualizados a nuestros estudiantes.

Para concluir el presente capítulo hablaremos de los Principios de Conservación en física, que son leyes fundamentales que establecen que ciertas propiedades físicas de un sistema se mantienen constantes a lo largo del tiempo, siempre que no haya influencias externas que las alteren. Estos principios son esenciales porque permiten predecir y entender el comportamiento de los sistemas físicos sin necesidad de conocer todos los detalles del proceso.

Principales Principios de Conservación:

- Conservación de la energía.

La energía no se crea ni se destruye, solo se transforma de una forma a otra (cinética, potencial, térmica, etc.). La energía total de un sistema aislado permanece constante.

- Conservación de la cantidad de movimiento (momentum).

En ausencia de fuerzas externas, la cantidad de movimiento lineal de un sistema (producto de la masa y la velocidad) se conserva.

- Conservación del momento angular.

Si no hay torques externos, el momento angular (relacionado con la rotación de un cuerpo) se mantiene constante.

- Conservación de la carga eléctrica.

La cantidad total de carga eléctrica en un sistema cerrado permanece constante, sin importar las transformaciones que ocurran dentro del sistema.

¿Por qué son importantes?

Estos principios son importantes porque permiten resolver problemas complejos de forma más sencilla. Son válidos en todos los niveles de la física, desde la mecánica clásica hasta la física cuántica; ayudan a verificar la validez de teorías y modelos físicos y son fundamentales en el diseño de tecnologías como motores, satélites y reactores nucleares.

Existen diferentes tipos de estrategias que podemos utilizar para desarrollar el aprendizaje significativo y establecerlo en la memoria a largo plazo; algunas de ellas son:

Enfoque epistemológico y progresivo

Evita definiciones simplistas de energía. En su lugar, construye el concepto de manera progresiva, comenzando con cambios observables en los sistemas y relacionándolos con transformaciones y transferencias de energía. Esto permite una comprensión más profunda y contextualizada del trabajo y la energía como medidas de esos cambios.

Secuencia de enseñanza basada en el análisis sistémico

Existen etapas claves que articule análisis cualitativo, cuantitativo y aplicado mejora significativamente la comprensión del principio de conservación de la energía.

Propone tres etapas clave:

- Cualitativa: Identificar formas de energía y sus transformaciones.
- Cuantitativa: Introducir cálculos de trabajo, energía cinética y potencial.
- Aplicación: Usar el principio de conservación de la energía en diferentes contextos

Uso de preguntas guía y aprendizaje activo

Utiliza preguntas como:

- ¿En qué formas se presenta la energía?
- ¿Puede haber transferencia de energía entre el sistema y su entorno?
- ¿Qué cantidad se conserva en las transferencias?

Acompaña estas preguntas con actividades prácticas, simulaciones y análisis de situaciones reales, para que los estudiantes construyan sus propios modelos energéticos.

Las preguntas guía promueven la reflexión metaconceptual y facilitan la reconstrucción del modelo energético.

Resolución de problemas contextualizados.

Contextualizar los problemas mejora la transferencia del conocimiento y reduce el uso mecánico de fórmulas (Rodríguez, 2019, p. 201).

Implementa estrategias de resolución de problemas que integren el principio de trabajo y energía en situaciones reales o significativas. Esto mejora la comprensión conceptual y la capacidad de transferencia del conocimiento.

Gamificación y recursos multimedia

La gamificación incrementa la motivación y la retención de conceptos energéticos en estudiantes de secundaria” (Hernández & Delgado, 2021, p. 95). Incorpora juegos didácticos, videos, simulaciones interactivas y lecturas cortas para motivar a los estudiantes y facilitar la comprensión de conceptos abstractos. Esto es especialmente útil en contextos donde los estudiantes están desmotivados o tienen dificultades previas

Actividades experimentales (pre-, durante y pos-laboratorio)

Diseña experiencias que incluyan:

- Pre-laboratorio: Activación de conocimientos previos.
- Laboratorio: Experimentación guiada con enfoque activo.
- Pos-laboratorio: Reflexión y aplicación en nuevos contextos.

La metodología pre-durante-pos-laboratorio desarrolla

habilidades de pensamiento crítico y reduce la visión corta de los aprendizajes y de la práctica” (Méndez et al., 2020, p. 134).

Una enseñanza integrada y progresiva del trabajo y la energía reduce los esquemas alternativos y fortalece la coherencia conceptual” (González & Martínez, 2021, p. 52).

Es importante que, en las estrategias a utilizar, apliques lo siguiente:

- Evita enseñar la energía como “sustancia” o “capacidad de hacer trabajo” sin matizar.
- Promueve la idea de la energía como medida del cambio en un sistema.
- Integra los conceptos de trabajo y energía con otros temas de la física para una visión más holística.

¿Cómo podemos enseñar las leyes de Newton?

La ley de Newton es el nombre que recibe el conjunto de tres principios (tres leyes) formulados por Isaac Newton en 1687 en su obra *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*. Estas leyes describen cómo y por qué se mueven los objetos y constituyen la base de la mecánica clásica. Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o de movimiento uniforme y rectilíneo, a no ser que sea obligado a cambiar ese estado por fuerzas impresas sobre él (Newton, 1687/1999).

Para enseñar las leyes de Newton de forma efectiva requiere ir más allá de la memorización, se trata de ayudar a los estudiantes a reconstruir el significado físico de cada ley, conectarlas con su experiencia cotidiana y superar sus preconcepciones (Hestenes, 1992; Halloun & Hestenes, 1985).

Enseñar estas leyes es un desafío intelectual y estratégico con nuestros estudiantes. A continuación, veamos cual es la estrategia que podemos relacionar para aprender cada ley.

Primera Ley: de lo cualitativo a lo cuantitativo

Estrategia:

- Demo: Usa un carrito con superficies de diferente fricción (alfombra, mesa, aire comprimido o mesa de aire si está disponible).
- Pregunta guía: ¿Qué pasa si reducimos la fricción cada vez más?
- Conclusión construida: “Si no hay fricción, el objeto no se detiene”. Esto lleva a la idea de inercia.

Segunda Ley: de la observación a la modelización

Estrategia:

“El carrito y las masas”

Usa un carrito con un dinamómetro o sensores de movimiento. Aplica fuerzas conocidas (con pesas o resortes) y mide aceleraciones.

Pregunta guía:

¿Cómo cambia la aceleración si duplico la fuerza? ¿Y si duplico la masa?.

Tercera Ley: acción y reacción como interacción

Estrategia:

Los patinadores sobre hielo” (o carritos con resortes)

Dos estudiantes sobre patines (o carritos) se empujan mutuamente. Miden sus aceleraciones con sensores o smartphones

Pregunta guía:

¿Quién ejerce más fuerza? ¿Cómo se comparan las aceleraciones si las masas son diferentes?

Movimiento armónico.

El movimiento armónico es un tipo de movimiento oscilatorio que ocurre cuando un objeto se mueve de un lado a otro alrededor de una posición de equilibrio, bajo la acción de una fuerza restauradora proporcional a su desplazamiento. Este tipo de movimiento es fundamental en física y se encuentra en muchos sistemas naturales y artificiales.

Figura 2.

Movimiento armónico



Elaboración propia.

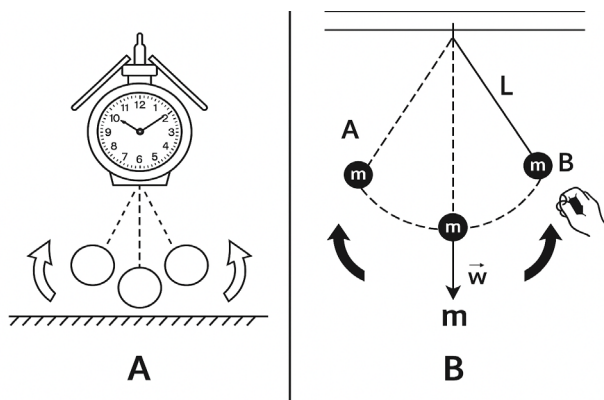
Tipos de movimiento armónico

1-Movimiento Armónico Simple (MAS):

- Es el caso más básico.
 - La fuerza que actúa sobre el objeto es directamente proporcional a su desplazamiento y está dirigida hacia el punto de equilibrio.
 - Se describe con funciones seno o coseno.
- Ejemplo: el movimiento de un péndulo pequeño o un resorte ideal.

Figura 3.

Movimiento armónico simple.



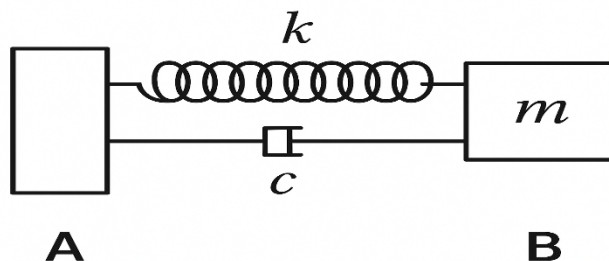
Nota: Tomado de <https://es.scribd.com/presentation/374845225/>

2-Movimiento Armónico Amortiguado:

- Incluye una fuerza de fricción o resistencia (como el aire).
- La amplitud disminuye con el tiempo.

Figura 4.

Movimiento armónico amortiguado (MAA).



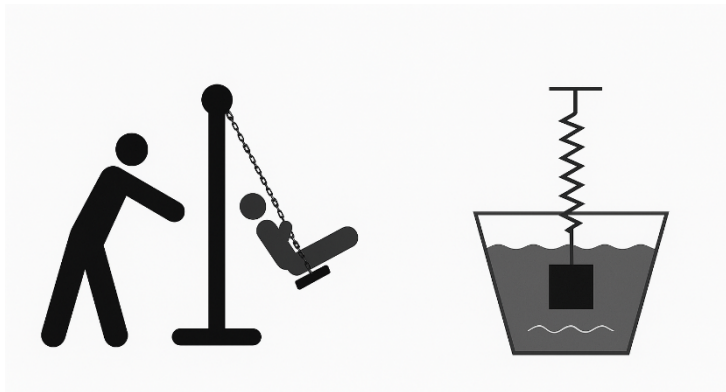
Nota: tomado de <https://short.do/TtIFwh>

3-Movimiento Armónico Forzado:

- Se aplica una fuerza externa periódica.
- Puede producir resonancia si la frecuencia de la fuerza coincide con la frecuencia natural del sistema.

Figura 5.

Movimiento armónico forzado.



Nota: elaboración propia.

En la física, la precisión y la claridad son fundamentales para comprender y resolver problemas. Una de las herramientas esenciales para lograr esto es el uso de un sistema de referencia. Un sistema de referencia lo podemos definir como el conjunto de convenciones usadas por un observador para medir magnitudes físicas de un sistema (posición, velocidad entre otras). Su importancia radica en varios aspectos clave que facilitan tanto el análisis como la comunicación de los resultados en la física.

En términos generales un sistema de referencia consta de tres elementos: (1) punto de partida en donde se ubica el observador, (2) ejes de coordenadas espaciales que son líneas imaginarias que se extienden desde el origen, deben tener unidades consistentes y asociado con vectores unitarios, (3) eje de coordenada temporal que incluye un reloj para medir el tiempo, lo cual es esencial para describir la variación de las magnitudes física.

En la vida cotidiana, al comunicarnos de manera coloquial, a menudo perdemos la esencia de los conceptos formales de ciertas cantidades, como el tiempo y la energía. Asimismo, la capacidad de diferenciar entre términos específicos puede ser confusa, como en el caso de la velocidad y la rapidez. Por ejemplo, todos hemos dicho en algún momento: “Ese auto lleva una velocidad de 80 km/h”. Sin embargo, si no especificamos la dirección, en realidad estamos hablando solo de la rapidez, que es la magnitud de la velocidad y no incluye información direccional.

Ejercicios para la práctica del Movimiento Armónico

Están pensadas para que haga, mida, grafique y concluya; las primeras cuatro se resuelven con materiales que pueden estar en la cocina de tu casa y las dos últimas usan simplemente calculadora/móvil. Incluye hojas de registro y preguntas de cierre para cada actividad.

El péndulo de la nevera

Objetivo: comprobar experimentalmente que $T \propto \sqrt{L}$ (para ángulos $< 15^\circ$).

Materiales: hilo de cocina, pesas (tuercas, monedas, etc.), cinta métrica, cronómetro del móvil, clip para fijar.

Pasos:

- Cuelga el hilo de un soporte (barra de cortinas, marco de pizarra).
- Mide 5 longitudes crecientes (20, 40, 60, 80, 100 cm).
- Para cada L, deja oscilar 10 ciclos completos y anota el tiempo total.
- Calcula $T = \text{tiempo}/10$.
- Grafica T vs $\sqrt{L}$; ajuste lineal y obtenga la pendiente experimental.

Preguntas: ¿Coincide la pendiente con $2\pi/\sqrt{g}$? ¿Qué ocurre si aumentas la masa? ¿Y si abres el ángulo a 45° ?

Oscilaciones en el aire: el muelle de goma

Objetivo: verificar que T no depende de la amplitud (pequeña) y que $T^2 \propto m$.

Materiales: banda de goma ancha (tipo “resistencia”), vasos de yogurt de distintas masas, cinta adhesiva, metro, cronómetro.

Pasos:

- Suspende la banda del techo; adhiere un vaso vacío.
- Añade arena o agua hasta lograr 5 masas crecientes (50, 100, 150, 200, 250 g).
- Para cada m, desplaza 5 cm y mide 10 periodos.
- Grafica T vs m ; pendiente = $4\pi/k \Rightarrow$ calcula k de la “banda-muelle”.

Preguntas: ¿Cambia k cuando la banda se calienta? ¿Por qué no es perfectamente lineal la gráfica?

Mide tu ritmo cardíaco. Como un M.A.S.

Objetivo: modelar la onda de pulso como aproximación armónica.

Materiales: sensor de pulso de celular (apps tipo “Heart Rate” o Phyphox), hoja de cálculo.

Pasos:

- El estudiante permanece en reposo; graba 20 s de señal.
- Exporta datos de intensidad vs tiempo.
- Ajusta una senoide: $y = A \sin(\omega t + \varphi) + C$.
- Extrae frecuencia cardiaca $= \omega/2\pi$ y compara con el valor que da la app.

Preguntas: ¿Qué representa A? ¿Qué le pasa a ω justo después de 20 flexiones?

Botella flotante = oscilador vertical

Objetivo: demostrar que un cuerpo parcialmente sumergido ejecuta M.A.S.

Materiales: botella PET de $\frac{1}{2}$ L, arena para ajustar masa, recipiente grande con agua, regla.

Pasos:

- Llena la botella hasta que flote verticalmente con $\sim \frac{1}{3}$ fuera del agua.
- Empuja 2 cm hacia abajo y suelta.
- Mide 10 T con cronómetro.
- Cambia masa añadiendo arena y repite; verifica que $T \propto \sqrt{m}$ (ley empírica de masa efectiva).

Preguntas: ¿Cómo se relaciona la constante de restitución con el empuje de Arquímedes?

Cálculo rápido: ¿dónde detiene el muelle?

Enunciado: Un bloque de 0,40 kg sujeto a un muelle $k = 160$ N/m se desplaza 12 cm y se suelta.

- Ecuación horaria $x(t)$.
- Velocidad máxima.
- Energía cinética cuando $x = 6$ cm.
- Punto donde $|a| = 8$ m/s².

Soluciones:

- $x = 0,12 \cos(20 t)$ (m)
- $v_{\max} = 2,4$ m/s
- $E_c = 0,36$ J
- $|x| = 0,02$ m

Problema tira y afloja (análisis gráfico)

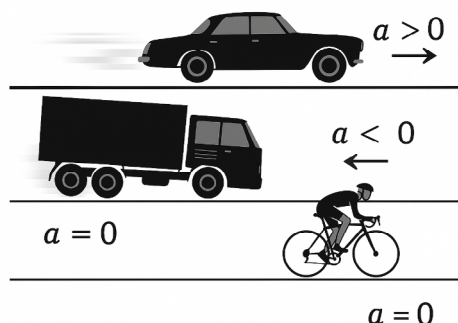
Se da la gráfica $v(t)$ de un oscilador armónico amortiguado. Pide:

- Periodo, frecuencia angular y amplitud inicial.
- Ecuación $v(t)$ suponiendo $x(0) = 0$.
- Posición en $t = T/8$.
- Fracción de energía perdida en 5 ciclos si la amplitud decae un 10 %.

Nota: útil para trabajar interpretación de gráficas con Excel/GeoGebra.

Figura 6.

Aceleración es el cambio en la velocidad.



Nota: Elaboración propia.

Comprender la aceleración puede ser complicado para los alumnos por varias razones, entre ellas: Naturaleza abstracta, la aceleración es un concepto más abstracto que la velocidad o la posición. Mientras que la velocidad se puede “observar” fácilmente (un coche se mueve a una cierta velocidad), la aceleración es el cambio en la velocidad, lo cual es menos intuitivo; cambio de velocidad.

La idea de que la aceleración implica un cambio en la velocidad, ya sea en magnitud o en dirección, puede ser confusa. Los alumnos deben entender que incluso si un objeto mantiene una rapidez constante, pero cambia de dirección (como en un movimiento circular), posee aceleración; ecuaciones.

Las ecuaciones que describen la aceleración pueden ser más complicadas y requieren una comprensión sólida del cambio de una cantidad con respecto a otra, llegando incluso a utilizar herramientas que van desde el álgebra hasta el cálculo diferencial e integral. El análisis gráfico del movimiento resulta complicado para los estudiantes y a menudo no recibe suficiente atención en la enseñanza por parte de los docentes.

Las razones principales de esta dificultad son: naturaleza abstracta, los gráficos representan conceptos abstractos que requieren la interpretación de datos visuales y su correlación con el movimiento físico. Los estudiantes pueden tener dificultades para entender cómo los cambios en las curvas y pendientes se relacionan con el movimiento real de un objeto.

Por ejemplo, una curva parabólica en el gráfico posición-tiempo no representa la trayectoria del objeto; conceptos matemáticos. La interpretación de estos gráficos requiere una comprensión sólida de conceptos como la pendiente (que representa la velocidad en un gráfico de posición vs. Tiempo y de la aceleración que representa la pendiente en un gráfico velocidad vs tiempo) y el área bajo la curva (que puede representar el desplazamiento en un gráfico de velocidad vs. tiempo).

Muchos estudiantes luchan con estos conceptos, especialmente si sus conocimientos en matemática no son suficientes.

A veces, la enseñanza se centra más en ejercicios donde el contexto se presenta en forma textual, dejando de lado el análisis gráfico. Los docentes pueden no dedicar suficiente tiempo a enseñar cómo leer, interpretar y dibujar estos gráficos, quizás debido a limitaciones de tiempo o a la percepción de que los gráficos son menos importantes.

Ejercicios para trabajar la aceleración en tres tiempos con los estudiantes

Tiempo 1:

¿Aceleración sin velocidad?

Objetivo: Deshacer el preconcepto aceleración = velocidad alta.

a). Mini-demo

Suelta simultáneamente una pelota de tenis (m) y una de ping-pong (m/3) desde 1 m de altura.

Pregunta: ¿Cuál llega antes? ¿Cuál tiene mayor aceleración media? .

b). Discusión guiada (pizarra)

Dibuja v-t para ambas.

Pregunta: ¿Dónde está la aceleración cuando la velocidad es cero (instante de soltar)?

Tiempo 2:

Acelerómetro casero.

Objetivo: Medir a_x con el móvil y verificar $a = \Delta v / \Delta t$.

Materiales: Smartphone con Phyphox (acelerómetro), carrito de dinámica, cinta adhesiva, rampa de 1 m ángulo variable (libros).

Procedimiento

- Calibra el eje x del móvil paralelo a la rampa.
- Graba 5 s de acelerómetro mientras el carrito baja.
- Exporta csv; con Excel/Calc:
 - calcula a media = pendiente de $v(t)$ obtenido por integración.
 - compara con $g \cdot \sin\theta$ (mide θ con el móvil como inclinómetro).

Preguntas: ¿Coincide a experimental con $g \cdot \sin\theta$ dentro del error?
¿Qué pasa si duplicas la masa del carrito? (Predice → prueba).

Tiempo 3:

Frenado de emergencia.

Objetivo: Aplicar signos de aceleración y relacionar con seguridad.

Situación

Un coche a 72 km h^{-1} (20 m s^{-1}) frena en seco y Phyphox registra -5 m s^{-2} .

Cuestiones

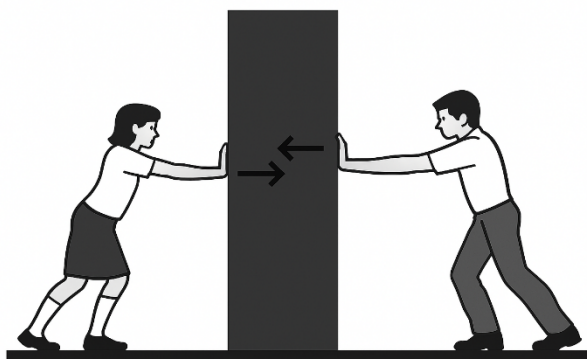
- Calcula el tiempo de frenado y la distancia.
- ¿Qué distancia necesitaría si llevara 108 km h^{-1} ? (Factor 2.25).
- Debate: ¿por qué la publicidad de coches da “distancia 0-100-0” en vez de sólo “0-100”?

La comprensión del concepto de fuerza es fundamental no solo para el aprendizaje de la física, sino también para el desarrollo integral de los estudiantes en diversas áreas del conocimiento y la vida cotidiana.

Como conclusión podemos decir, que estudiar la fuerza no es solo aprender una definición, es adquirir una herramienta clave para comprender, describir y transformar el mundo real de forma rigurosa y segura.

Díaz-Delgado y Maringer-Duran (2021), sintetizan así el concepto: La fuerza no es una propiedad que posea un cuerpo, sino la manifestación de la acción que un sistema ejerce sobre otro. Su efecto inmediato puede ser la variación de la velocidad (aceleración), la deformación o ambos fenómenos simultáneamente, lo que convierte a la fuerza en el puente entre la interacción y el cambio observable en la naturaleza.

Figura 7.
La fuerza.



Elaboración propia.

Comprender a fondo el concepto de fuerza resulta esencial para docentes y estudiantes por tres razones decisivas. En primer lugar, la fuerza es una magnitud vectorial fundamental que atraviesa toda la física: desde las leyes de Newton hasta la mecánica cuántica y el estudio de fluidos, constituye el eje sobre el que giran innumerables fenómenos y principios. En segundo lugar, dominarla permite explicar y predecir el movimiento de cualquier objeto, así como resolver problemas de mecánica, electromagnetismo y dinámica de fluidos con solvencia.

En tercer lugar, el análisis sistemático de las fuerzas desarrolla el pensamiento crítico y la capacidad de razonamiento que caracteriza al estudiante de ciencias.

Ejercicios para trabajar la Fuerza en el aula

Ejercicios para desarrollar las competencias en el tema de la Fuerza, con 6 ejercicios, todos ellos se pueden realizar en el aula de clases, no requiere laboratorio, cada ejercicio fue diseñado con objetivo, montaje, pasos, hoja de registro y con preguntas de cierre que apuntan a los conceptos clave: fuerza como interacción, fuerza resultante, equilibrio, tercera ley de Newton y fricción.

Estación 1. La guerra de las cuerdas.

Objetivo: medir la fuerza resultante de dos fuerzas concurrentes.
Material: 3 dinamómetros de mano (0-5 N), cuerda ligera de 1 m, anillo metálico o llave grande.

Pasos:

Dos estudiantes tiran de los dinamómetros a 90° ; el tercero sujeta el tercer dinamómetro en dirección opuesta para equilibrar. Anotan F_1 , F_2 y F_{eq} .

Repiten para ángulos de 60° y 120° .

Registro: tabla con ángulo, F_1 , F_2 , F_{eq} , $|F_1+F_2|$ (vectorial) vs F_{eq} .
Cierre: ¿Coincide la suma vectorial con F_{eq} ? ¿Qué errores aparecen?

Estación 2. Zapatos contra patines.

Objetivo: comparar coeficientes de fricción estática μ_e entre distintas suelas.

Material: zapato escolar, patín de juguete (o tabla con ruedas), dinamómetro, pesas de 100 g.

Pasos:

Coloca el zapato sobre el patín; va añadiendo masas hasta que al tirar horizontalmente con el dinamómetro empiece a deslizarse. $F_{\text{fricción máxima}}$ = lectura justo en el arranque.

Calcula $\mu_e = F_{\text{fricción}} / (m \cdot g)$.

Repite con suela de goma, cuero, goma de borrar pegada, etc.

Cierre: ¿Qué suela tiene mayor μ_e ? ¿Qué implicaciones tiene para el diseño de calzado deportivo?

Estación 3. Tercera ley con globos.

Objetivo: evidenciar la pareja acción-reacción.

Material: 2 globos redondos, cinta, pajillas flexibles, cuerda ligera, cinta métrica.

Pasos:

Infla un globo; sujétalo a una pajita atravesada por el hilo (móvil de globo).

Al soltarlo, mide la distancia que recorre el globo y la que retrocede el aire (con una t_a <https://ensciencias.uab.cat/issue/view/v38-nrjeta> liviana colocada detrás).

Cambia la masa añadiendo clips y anota aceleraciones aproximadas ($a = 2d/t^2$).

Cierre: ¿Por qué el globo y el aire tienen aceleraciones distintas aun siendo la fuerza igual?

Estación 4. Equilibrio en la regla.

Objetivo: comprobar la condición de equilibrio rotacional $\Sigma \tau = 0$.

Material: regla de madera (o metro), soporte tipo “pie de rey” o lápiz adhesivo, 4 masas de 50 g, cinta.

Pasos:

Marca el centro de masa (50 cm).

Cuelga masas a distintos lados; ajusta hasta que la regla quede horizontal.

Anota m_1 , d_1 , m_2 , d_2 .

Verifica $m_1d_1 = m_2d_2$.

Cierre: ¿Qué pasa si desplazas una masa 1 cm? ¿Cuál es el sentido del nuevo par de fuerzas?

Estación 5. Fuerza con el móvil: acelerómetro gratis.

Objetivo: medir la fuerza neta que actúa sobre un libro al empujarlo.

Material: app “Physics Toolbox Accelerometer”, libro de 1 kg, superficie de mesa, trozo de fieltro (cambia μ).

Pasos:

Coloca el móvil encima del libro; graba a_x mientras un compañero empuja con fuerza constante.

Del valor medio de a , calcula $F = m a$.

Repite con fieltro bajo el libro (menor μ).

Cierre: ¿La fuerza medida coincide con la que marca un dinamómetro atado al libro? ¿Por qué puede diferir?

Estación 6. Caja de arena: peso vs masa.

Objetivo: diferenciar peso (fuerza gravitacional) y masa.

Material: 3 bolsas de arena de 1 kg, dinamómetro de 50 N, balanza de cocina, mochila.

Pasos:

Pesa una bolsa con la balanza (masa).

Cuelga la misma bolsa del dinamómetro: lectura = peso.

Coloca las tres bolsas dentro de la mochila y cuelga: anota nueva fuerza.

Calcula $g_{\text{local}} = F/m$.

Cierre: ¿Varía la masa si llevamos la mochila a la Luna? ¿Y el peso?

Referencias bibliográficas

- Díaz-Delgado, R. A., & Maringer-Duran, D. A. (2021). La enseñanza del concepto de fuerza: algunas reflexiones. *Latin American Journal of Science Education*, 8, 12018. <https://www.lajse.org>
- González, A., & Martínez, P. (2021). Enseñanza del concepto de energía en educación secundaria: una mirada epistemológica. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 18(3), 38-55.
- Hestenes, D., Wells, M., & Swackhamer, G. (1992). Force Concept Inventory. *The Physics Teacher*, 30(3), 141-158. <https://doi.org/10.1119/1.2343497>
- Hernández, R., & Delgado, M. (2021). Gamificación y recursos multimedia para la enseñanza del trabajo y la energía. *Latin American Journal of Physics Education*, 15(2), 91-98.
- Méndez, D., Ríos, L., & Castillo, H. (2020). Metodología pre-durante-pos en prácticas de laboratorio sobre trabajo y energía. *Enseñanza de las Ciencias*, 38(3), 125-140. <https://ensciencias.uab.cat/issue/view/v38-n3>
- Newton, I. (1999). *Principia mathematica: Principios matemáticos de la filosofía natural* (A. Escotado, Trad.). Altaya.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2015). *Física para ciencias e ingeniería* (Vol. 1, 9ª ed.). Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.
- Rodríguez, M. (2019). *Las metodologías activas en el desarrollo del aprendizaje de la matemática: un estudio desde el aprendizaje situado* (Tesis de Maestría, Universidad Andina Simón Bolívar). Repositorio UASB. <https://repositorio.uasb.edu.ec/handle/10644/9912>
- Thornton, R. K., & Sokoloff, D. R. (1998). Assessing student learning of Newton's laws. *American Journal of Physics*, 66(4), 338-352. <https://doi.org/10.1119/1.18863>

Didáctica del electromagnetismo

Introducción

En el capítulo dedicado al estudio, conceptualización y análisis del electromagnetismo, las ondas y los laboratorios, se tratarán las definiciones de diferentes maneras. Actualmente, en las aulas el tema del electromagnetismo se presenta como un cuerpo de leyes y fórmulas que los estudiantes deben repetir y aprender utilizando su memoria a corto plazo; sin embargo, cuando se les pide predecir si una bombilla brillará después de reorganizar un circuito simple, surgen explicaciones basadas en corriente que se consume, baterías que dan fuerza e hilos que se llenan. Estas concepciones, coherentes con la experiencia cotidiana y profundamente arraigadas, no desaparecen con más explicaciones formales; al contrario, se vuelven invisibles bajo el discurso académico y bloquean cualquier aplicación significativa del saber científico. Este capítulo parte de la concepción de que enseñar electromagnetismo es, ante todo, un problema didáctico de cambio conceptual; se trata de diseñar situaciones que hagan surgir el desacuerdo cognitivo, como decía Piaget. Por último, desarrollaremos conceptos, estrategias y ejercicios que se pueden plantear.

Breve línea del tiempo sobre el estudio del electromagnetismo y sus retos para la enseñanza.

Los antiguos griegos, alrededor del año 800 a.C., descubrieron que el ámbar tenía propiedades eléctricas, permitiéndole atraer pequeños objetos después de ser frotado. Además, conocieron las propiedades magnéticas de ciertas rocas ígneas, conocidas como *μαγνήζ* (magnes), capaces de atraer trozos de hierro.

Según la leyenda, el nombre proviene de un pastor llamado Magnes, quien notó que sus zapatos, con clavos de hierro, se adherían al caminar sobre estas rocas.

El primer hito sobre los inicios del descubrimiento de las fuerzas a distancia (electromagnetismo) se le atribuye al filósofo Tales de Mileto (siglo VI A.C) que observó que ciertos minerales, como la magnetita [figura 1] (una forma de óxido de hierro, *Fe₃O₄*), tenían la capacidad de atraer trozos de hierro (Moledo, 2014).

Figura 1.

Fenómeno electrostático: Ambar atrae pedazos de papel.



Nota: Tomada de Ruiz-Martínez (2016), Gilbert: el campo y lo eléctrico.

También es conocido por sus observaciones sobre las propiedades eléctricas del ámbar. Cuando el ámbar (origen de la palabra *elektron*) se frota, adquiere la capacidad de atraer pequeños objetos como pajas o plumas, un fenómeno que hoy conocemos como electricidad estática.

William Gilbert un médico y científico inglés del siglo XVI, hizo contribuciones significativas al estudio de los fenómenos

eléctricos y magnéticos. Es conocido por su obra “De Magnete” (1600), que se considera uno de los primeros grandes tratados científicos en estos campos. Algunas de sus contribuciones más destacadas incluyen:

1. Distinción entre Magnetismo y Electricidad Estática. Gilbert fue uno de los primeros en distinguir claramente entre las fuerzas magnéticas y las eléctricas. Identificó que el ámbar y otros materiales podían atraer objetos después de ser frotados debido a lo que él denominó efecto eléctrico, diferenciándolo del magnetismo que se observa en la magnetita.
2. Término “Electricus”. Introdujo este término para describir los materiales que, cuando se frotan, atraen objetos pequeños. Este término es la raíz de la palabra moderna “electricidad”.
3. Estudio Sistemático del Magnetismo. También realizó experimentos detallados y sistemáticos sobre las propiedades del magnetismo. Describió la tierra como un gran imán y propuso que su campo magnético era responsable de la orientación de las brújulas. Este concepto fue crucial para el desarrollo del geomagnetismo.
4. Materiales Eléctricos y No Eléctricos. Clasificó los materiales en eléctricos y no eléctricos, identificando aquellos que podían ser electrificados por fricción y aquellos que no podían (Gilbert, 1958).

Figura 2.
La botella de Leiden (1746).

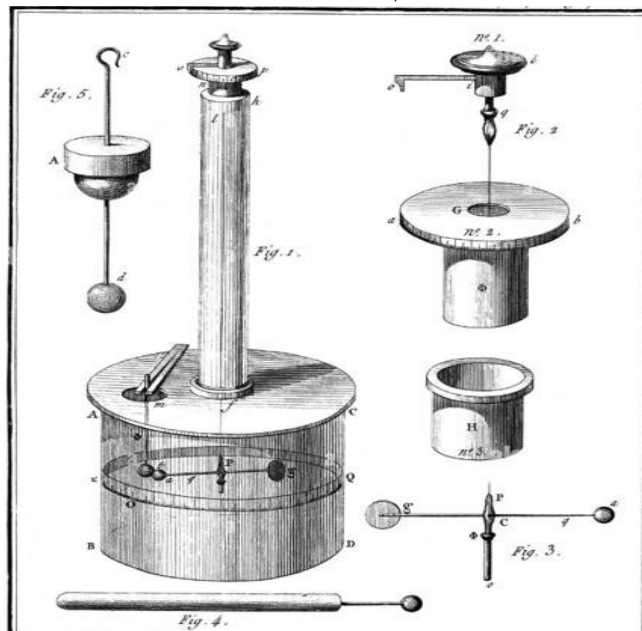


Nota: El primer condensador de la historia (*Leiden, 1746*) .

Durante la primera mitad del siglo XVIII, Dufay en Francia identificó la existencia de dos tipos de electricidad, que más tarde Franklin denominó como positiva (asociada al vidrio) y negativa (asociada al ámbar). Simultáneamente, en Inglaterra, Gray descubrió que la electricidad podía transferirse entre cuerpos a través de hilos metálicos. En Holanda, von Kleist y Musschenbroeck encontraron que era posible acumular electricidad en una botella especial, conocida como botella de Leiden. En esa misma época, se desarrollaron las primeras máquinas de electrización por fricción, que se usaron tanto en la medicina como en actividades recreativas, convirtiéndose en una moda en los elegantes salones aristocráticos de la época (Bernal, 1975).

Figura 4.

Balanza de torsión elaborado por Charles Coulomb.



Nota: Tomado de sitioWeb (2007) <https://short.do/wmVwmw>

En la segunda mitad del siglo XVIII, se realizaron las primeras mediciones cuantitativas de los fenómenos eléctricos y magnéticos. En 1750, John Michell empleó una balanza de torsión para demostrar que las fuerzas entre polos magnéticos disminuyen inversamente con el cuadrado de la distancia que los separa. Pocos años más tarde, en 1785, Charles Coulomb, usando una balanza de torsión de su propia invención (figura 3), formuló la ley que lleva su nombre, aplicable a cargas eléctricas puntuales en reposo. La ley fundamental descubierta por Coulomb confirmaba el mismo principio: la interacción entre dos cargas depende

del inverso del cuadrado de su distancia. Así, las primeras leyes cuantitativas de la electricidad y el magnetismo parecían seguir la idea newtoniana de atracción entre cuerpos celestes: las fuerzas eléctricas y magnéticas entre dos cuerpos separados actúan a distancia, es decir, de manera instantánea y sin necesidad de un medio material. Los cartesianos de la época se preguntaban cómo era esto posible (Cazenobe, 1985).

Figura 4.

Pila voltaica. La primera batería química.

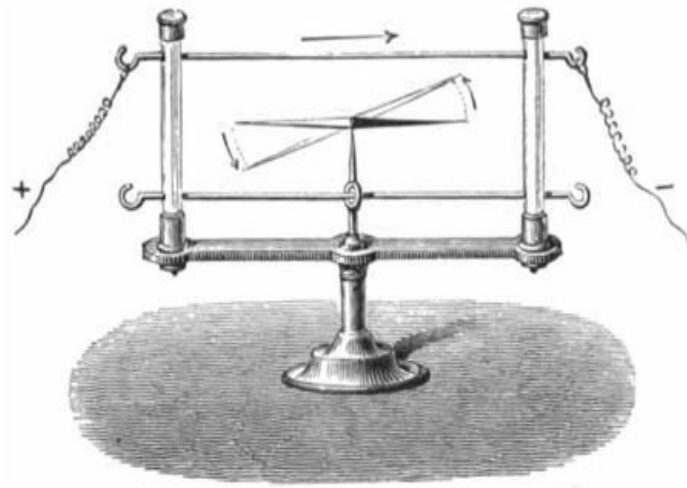


Nota: Batería construida por Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta, de quien toma su nombre la batería de Volta o pila voltaica.

El descubrimiento de la electricidad, en su verdadero sentido, no se produjo hasta principios del siglo XIX. En una carta fechada el 20 de marzo de 1800 y dirigida al presidente de la Royal Society de Londres, Volta presentó el primer generador eléctrico conocido como la pila de Volta [figura 4]. Este acontecimiento desencadenó una competencia intensa por construir pilas con más elementos y explorar sus posibles aplicaciones. Entre los logros derivados de estos esfuerzos, se incluye el descubrimiento de los primeros metales alcalinos mediante la electrólisis de sus sales fundidas, llevado a cabo por Davy (Education, 2022).

En general, los expertos coinciden en que el nacimiento del electromagnetismo moderno se data el 21 de julio de 1820, cuando en Copenhague se publicó en latín el famoso experimento de Oersted: la desviación de una aguja magnética cercana a un conductor eléctrico.

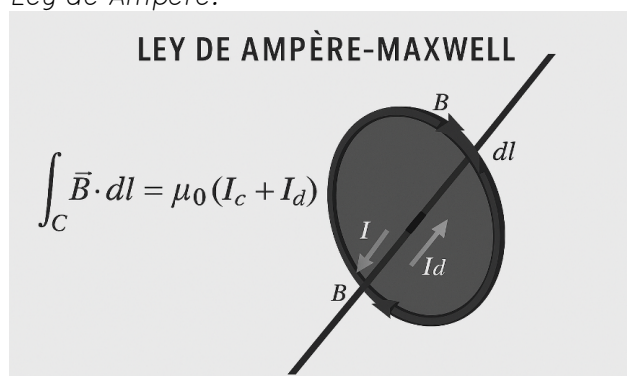
Figura 5.
Experimento de Oersted que mostró la existencia de una relación entre la electricidad y magnetismo.



Nota: Tomado de sitio Web (2016) <https://short.do/IOLnBb>

Aunque el descubrimiento se realizó unos meses antes, no parece haber sido tan fortuito como se suele contar, ya que se acepta comúnmente que ocurrió durante una conferencia. H. C. Oersted (1777-1851) había estado realizando experimentos desde 1807 para encontrar una conexión entre la electricidad y el magnetismo (Dibner, 1961). Esta idea no era completamente nueva, ya que desde el primer tercio del siglo XVIII se buscaba dicha relación, pues se conocía bien la magnetización del hierro por un rayo.

Figura 6.
Ley de Ampère.



Nota: Tomado del sitio Web <https://www.youtube.com/watch?v=qzh8DP191gw>

André-Marie Ampère (1775-1836) basó sus contribuciones en el trabajo de otros investigadores y en sus propios experimentos innovadores. El catalizador principal para su trabajo fue el descubrimiento de Hans Christian Oersted en 1820. Formuló lo

que se conoce como la Ley de Ampère. Esta ley describe matemáticamente la relación entre la corriente eléctrica y el campo magnético que genera [figura 6].

Establece que la fuerza magnética entre dos conductores paralelos es proporcional al producto de sus corrientes y disminuye con la distancia entre ellos (Fernández, 2013).

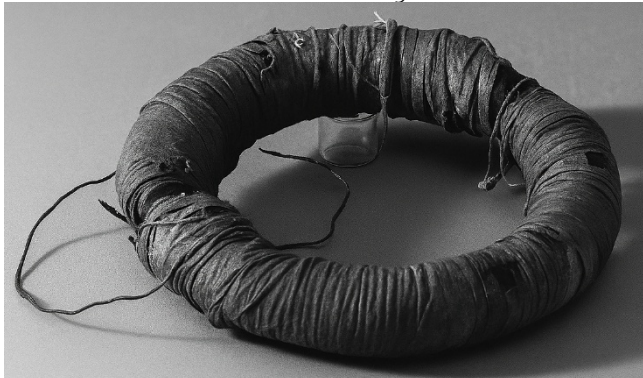
El 3 de septiembre de 1821, Michael Faraday (1791-1867) llevó a cabo su primera investigación experimental en electricidad. En este experimento, observó cómo un polo magnético giraba alrededor de una corriente eléctrica y, de manera inversa, cómo un conductor recto rotaba alrededor de un polo magnético sumergido en mercurio.

El 29 de agosto de 1831, Michael Faraday descubrió las corrientes inducidas. Observó que, al abrir y cerrar un circuito conectado a una batería, se generaban corrientes inducidas en un circuito cercano que incluía un galvanómetro, ambos compartiendo un núcleo de hierro dulce.

Posteriormente, el 17 de octubre de 1831, Faraday descubrió que al mover un imán hacia una bobina o alejándolo de ella, también se generaba una corriente inducida (Fernández, 2013; Al-Khalili, 2015).

Figura 7.

Anillo de inducción de Faraday 1831.



Nota: Tomado del sitio Web <https://www.sectorelectricidad.com/33650/el-padre-de-la-ingenieria-electrica-2/>

Faraday en 1821 inventó su primer motor primitivo, se observa en la figura 7. En 1832, Pixii construyó su motor- generador de corriente alterna, en el cual un imán en forma de herradura gira frente a una bobina también en forma de herradura. Poco después, en 1834, Lenz formuló la ley que establece que las corrientes inducidas se generan en un sentido que se opone a la causa que las produce. Entre 1845 y 1848, Franz Neumann (1798-1895) desarrolló la primera teoría matemática de la inducción,

estudiando la interacción entre dos circuitos basándose en la ley de Lenz. De este período proviene su conocida fórmula para calcular los coeficientes de inducción mutua entre dos circuitos (Al-Khalili, 2015).

La contribución más significativa de Faraday a la ciencia radica en sus publicaciones y libros de laboratorio. Estos textos fueron fundamentales para que James Clerk Maxwell (1831-1879) se inspirara y realizara su labor de síntesis y compilación, culminada en cuatro famosas publicaciones. En ellas, Maxwell rechazó la idea newtoniana de acción a distancia, proponiendo en su lugar la existencia de un éter elástico que facilitaba la propagación de los campos de fuerza y de las ondas electromagnéticas.

Figura 8.

Ecuaciones de Maxwell en 1837.

$e + \frac{df}{dx} + \frac{dg}{dy} + \frac{dh}{dz} = 0$	(1) Gauss' Law
$\mu\alpha = \frac{dH}{dy} - \frac{dG}{dz}$ $\mu\beta = \frac{dF}{dz} - \frac{dH}{dx}$ $\mu\gamma = \frac{dG}{dx} - \frac{dF}{dy}$	(2) Equivalent to Gauss' Law for magnetism
$P = \mu \left(\gamma \frac{dy}{dt} - \beta \frac{dz}{dt} \right) - \frac{dF}{dt} - \frac{d\Psi}{dx}$ $Q = \mu \left(\alpha \frac{dz}{dt} - \gamma \frac{dx}{dt} \right) - \frac{dG}{dt} - \frac{d\Psi}{dy}$ $R = \mu \left(\beta \frac{dx}{dt} - \alpha \frac{dy}{dt} \right) - \frac{dH}{dt} - \frac{d\Psi}{dz}$	(3) Faraday's Law (with the Lorentz Force and Poisson's Law)
$\frac{d\gamma}{dy} - \frac{d\beta}{dz} = 4\pi p'$ $\frac{d\alpha}{dz} - \frac{d\gamma}{dx} = 4\pi q'$ $\frac{d\beta}{dx} - \frac{d\alpha}{dy} = 4\pi r'$ $p' = p + \frac{df}{dt}$ $q' = q + \frac{dg}{dt}$ $r' = r + \frac{dh}{dt}$	(4) Ampère-Maxwell Law
$P = -\xi p \quad Q = -\xi q \quad R = -\xi r$	Ohm's Law
$P = kf \quad Q = kg \quad R = kh$	The electric elasticity equation ($\mathbf{E} = \mathbf{D}/\epsilon$)
$\frac{de}{dt} + \frac{dp}{dx} + \frac{dq}{dy} + \frac{dr}{dz} = 0$	Continuity of charge

Nota: Tomado del sitio Web <https://materias.df.uba.ar/rgo2019c2/las-20-ecuaciones-de-maxwell/>

Basándose en los estudios de Fourier sobre la propagación del calor, en la óptica ondulatoria de Fresnel, y en las ideas de campo y líneas de campo de Faraday (introducidas por él en 1845), Maxwell desarrolló en su obra cumbre "A Treatise on Electricity and Magnetism" (1873) las conocidas cuatro leyes de Maxwell en derivadas parciales. Estas leyes sintetizan el conocimiento sobre electricidad y magnetismo, logrando la segunda gran unificación de fenómenos físicos aparentemente distintos en la historia

de la ciencia: los fenómenos eléctricos y magnéticos tienen el mismo origen, y la luz es una perturbación electromagnética propagándose en el vacío. En esencia, las cargas eléctricas generan fenómenos eléctricos, y su movimiento genera fenómenos magnéticos.

Figura 9.

Ecuaciones de Maxwell. Ilustración del motor de Faraday.

Maxwell's Equations	Maxwell's Equations
Differential form	Integral form
$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{a} = \frac{Q_{enc}}{\epsilon_0}$
$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{a}$
$\nabla \cdot \vec{B} = 0$	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{a} = 0$
$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_{enc} + \mu_0 \epsilon_0 \int \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \cdot d\vec{a}$

Nota: Tomado del sitio Web <https://short.do/2Qsvw7>

Las célebres ecuaciones de Maxwell, que hoy conocemos en su forma sintetizada de cuatro ecuaciones, no siempre fueron así. Originalmente, cuando James Clerk Maxwell publicó su trabajo presentó un conjunto mucho más extenso de ecuaciones. Fueron un total de veinte ecuaciones, se observan en la figura 8. Estas ecuaciones describían de manera detallada los fenómenos eléctricos y magnéticos y su interrelación. En su tratado, Maxwell desarrolló estas ecuaciones para explicar cómo los campos eléctricos y magnéticos se generan y se afectan mutuamente, así como su propagación en el espacio (Sarkar, 2015).

El trabajo de simplificación y síntesis de las ecuaciones de Maxwell fue realizado posteriormente por Oliver Heaviside y Josiah Willard Gibbs. Estos dos científicos lograron reformular las veinte ecuaciones originales de Maxwell en un conjunto más compacto y manejable [figura 9], utilizando el formalismo del cálculo vectorial que hoy es estándar (Longair, 2015).

El estudio de la electrostática y el magnetismo es uno de los pilares de la física clásica cuya finalidad es comprender los fenómenos electromagnéticos. Enseñar estas leyes presenta una serie de retos tanto conceptuales, matemáticos como pedagógicos. A continuación, la tabla 1 agrupa retos importantes a reforzar en la enseñanza de las cargas eléctricas.

Tabla 1.
Retos en la enseñanza del electromagnetismo.

Reto	Descripción
Conceptos Abstractos	La electricidad y el magnetismo involucran muchos conceptos teóricos y matemáticos abstractos, como líneas de campo, flujo del campo y fuerzas “invisibles” requieren una buena imaginación espacial y conceptual. Además, complejo de enseñar para el docente.
Aplicación matemática	Estos temas requieren el uso de operaciones vectoriales tanto en 2D como en 3D (producto escalar y vectorial) llegando incluso al cálculo vectorial y ecuaciones diferenciales. Los estudiantes que no tienen una fuerte formación en matemáticas pueden encontrar estos aspectos particularmente desafiantes.
Fenómenos no Intuitivos	Muchos fenómenos en electricidad y magnetismo no son intuitivos. Por ejemplo, la interacción entre campos eléctricos y magnéticos, la inducción electromagnética, y la propagación de ondas electromagnéticas pueden contradecir la experiencia cotidiana.
Complejidad en los Experimentos	Los experimentos en electricidad y magnetismo pueden ser complejos y requieren equipos especializados, lo que provoca un desafío la interacción entre teoría y práctica. Configurar e interpretar estos experimentos puede ser difícil y peligrosa para los estudiantes sin una orientación adecuada.
Interdisciplinariedad	La electricidad y el magnetismo se interceptan con muchas otras áreas de la ciencia y la ingeniería, como la electrónica, la óptica, y la teoría de la información. Entender estas intersecciones puede ser desafiante pero es esencial para una
comprensión completa.	

Nota: Elaboración propia.

Importancia de las concepciones alternativas en el estudio de los circuitos eléctricos

A través de los años, el proceso de enseñanza aprendizaje en los cursos de física han sido ofrecidos mediante el modelo tradicional, donde el docente se preocupa por las clases magistrales, exponiendo conceptos, resolviendo ejercicios de manera mecánica, priorizando la matemática y dejando de lado la parte del razonamiento conceptual de la física.

Todos estos factores, incluyendo la falta de experimentación conlleva a que el estudiante se desmotive por aprender la disciplina (Saquinaula-Brito, 2019). En la elaboración de las clases no se deben apartar las concepciones alternativas o ideas previas que suelen tener los estudiantes, pues sirven como preámbulo para el aprendizaje mutuo entre los participantes, considerándose como conocimientos empíricos que ayudan a fomentar la investigación y el interés por despejar cualquier duda presentada en el proceso de enseñanza. La tarea del docente se debe enfocar en conocer las concepciones alternativas para elaborar su plan de actividades académicas (clase, tarea y evaluación) con la finalidad de que los conceptos básicos se conviertan en concepciones científicas (Carrascosa, 2005).

¿Por qué aparece?

Desde su nacimiento, las personas elaboran construcciones mentales con el propósito de dar respuesta a las experiencias del día a día. Estas representaciones por lo general no son consonantes con las respuestas de rigor científico y conllevan a errores que con el pasar del tiempo son más difíciles de corregir. Por lo tanto, las concepciones alternativas son el conjunto de conocimientos previos que poseen los alumnos sobre los fenómenos naturales que difieren del conocimiento científico (Raduta, 2005; Saquinaula-Brito, 2019).

¿Cómo lo definimos?

Las “concepciones alternativas” hacen referencia a las ideas de los estudiantes sobre fenómenos científicos específicos que les permiten comprenderlos y darles sentido. Ideas que son alternas a los núcleos conceptuales de las diferentes disciplinas de las ciencias naturales (Cuéllar, 2009).

A continuación, presentamos un listado de afirmaciones o creencias de los estudiantes acerca de la electricidad, magnetismo y su aplicación en circuitos eléctricos resistivos.

Tabla 2.
Afirmaciones y creencias de los estudiantes acerca de la electricidad y el magnetismo.

Concepciones alternativas	
Carga eléctrica	Una manera de cargar positiva o negativamente un objeto es agregándole o quitándole protones.
	La carga eléctrica puede ser creada o destruida.
	La carga eléctrica no se crea ni se destruye solo se transforma.
	Un cuerpo cargado eléctricamente no puede atraer ni repeler a un material aislante.
	La magnitud de la carga eléctrica depende del tamaño del objeto.
	Solo los materiales metálicos pueden ser cargados.
Fuerza eléctrica	Al colocar cerca dos objetos, el de mayor magnitud de carga eléctrica ejerce una fuerza eléctrica más grande sobre el de menor carga.
	La ley de Coulomb solo se aplica a objetos considerados partículas.
	Los campos eléctricos se pueden ver.
	En una región con campo eléctrico. Si al colocar una partícula este no toca una línea de campo, la fuerza eléctrica es cero.
	En un punto del espacio donde no existe una carga, su campo eléctrico es cero.
	La fuerza eléctrica solo aparece cuando las cargas están estáticas.
Fuerza magnética	Los campos magnéticos se ven.
	El magnetismo solo existe en los imanes.
	Las líneas de campo magnético son reales.
	Si en una región existen tanto el campo eléctrico y el magnético, el campo total es la suma vectorial entre ellos.
	La fuerza magnética actúa a lo largo de las líneas de campo magnético.

Circuitos eléctricos	La corriente eléctrica se disipa espontáneamente en el circuito.
	La corriente se debe al movimiento de todos los electrones del objeto.
	La electricidad viaja instantáneamente.
	El potencial eléctrico “fluye” a través del espacio.
	El potencial eléctrico está asociado a un campo vectorial.
	Los cables conductores no tienen resistencia.
	Dos resistencias colocadas en paralelo (mis- mo voltaje) tendrán la misma corriente.
Resistencia	Siempre al colocar una resistencia a un circui- to, la corriente eléctrica debe disminuir.
	Dos resistencias colocadas en serie, brillaran con la misma intensidad.

Nota: Elaboración propia.

Estrategias para la enseñanza de conceptos fundamentales del electromagnetismo.

En el ámbito educativo, especialmente en la enseñanza de ciencias como la física y las matemáticas, existen diversas metodologías y estrategias de enseñanza diseñadas para fomentar el aprendizaje activo. Estas metodologías buscan involucrar a los estudiantes de manera más profunda, promoviendo no solo la adquisición de conocimientos, sino también el desarrollo de habilidades críticas y analíticas. En este compendio describiremos la estructura de una metodología menos convencional basada en la historia (MBH).

Las estrategias involucradas utilizan relatos y contextos históricos para enseñar principalmente conceptos en diversas áreas disciplinas. La estructura se basa en contextualizar el contenido académico dentro de narrativas históricas que aporten relevancia y significancia a los conceptos que se desean enseñar. En clases sincrónicas, discutiremos otras propuestas metodológicas utilizadas en la enseñanza de la Física, como la Instrucción por Pares del Dr. Eric Mazur.

Estrategia metodológica: Aprendizaje basado en contextos históricos.

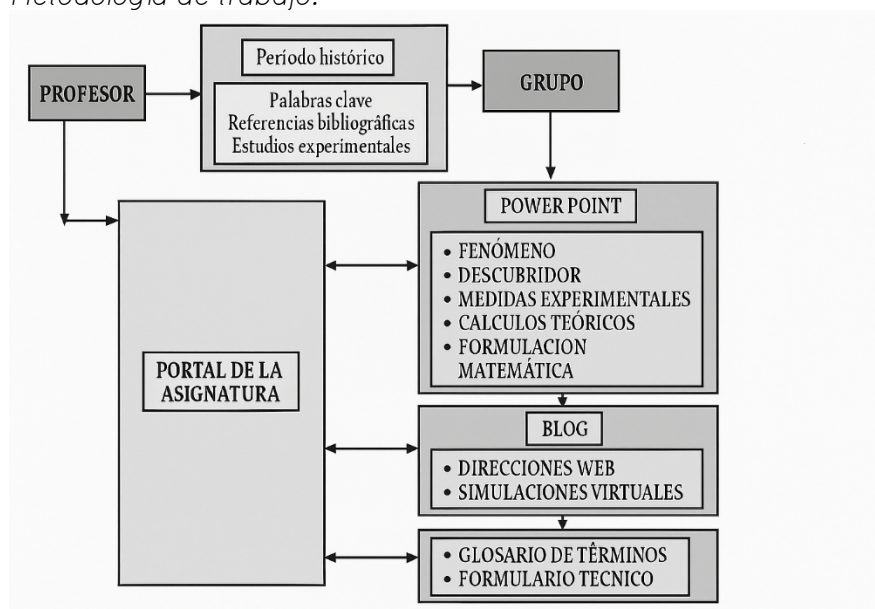
Diseño de propuesta de enseñanza

La propuesta está fundamentada en el trabajo de (Laura Abad Toribio, 2009).

El artículo muestra la aplicación del diseño al campo del electromagnetismo, con la finalidad de comprender los conceptos. El esquema de este proceso y la metodología de trabajo se presentan en la Figura 10.

Figura 10.

Metodología de trabajo.



Nota: Metodología de trabajo (Laura Abad Toribio, 2009).

Paso 1: El profesor forma grupos de estudiantes y asigna a cada grupo un periodo histórico específico. Para cada periodo, se proporciona una lista de palabras clave en forma de nombres propios. Además, se adjunta una serie de referencias bibliográficas que incluyen libros de texto, sitios web, artículos y ponencias.

Dado que cada grupo debe realizar al menos un experimento relacionado con el periodo estudiado, también se proporciona una lista de referencias sobre guiones de laboratorio, construcción de montajes sencillos y experimentos básicos.

Paso 2: Los experimentos elegidos por el grupo de estudiantes deben ser simples y factibles de realizar en el aula o el laboratorio. El grupo debe solicitar al profesor los materiales necesarios o en su defecto conseguirlos para llevar a cabo el experimento con éxito. El docente tiene la opción de sustituir el experimento por otro similar o más adecuado para alcanzar el objetivo relacionado al periodo histórico.

Paso 3: Para la presentación del trabajo, el grupo de estudiantes deberá realizar una exposición oral utilizando una presentación en PowerPoint. En esta, deberán incluir la línea de investigación seguida, el fenómeno estudiado, el descubridor, el experimento histórico y su reproducción actual, la ecuación matemática que mejor describa el fenómeno físico.

Paso 4: Todas las presentaciones, una vez revisadas, se incorporarán a un blog sobre electromagnetismo que formará parte de la página web de la asignatura. En este enlace, también se incluirán una serie de enlaces a sitios web con simulaciones virtuales que permitan visualizar los fenómenos estudiados.

Paso 5: Se propone también la elaboración de un glosario de términos y un formulario técnico de electromagnetismo para su inclusión en el mismo portal.

Componentes de un circuito eléctrico, ley de Ohm (voltaje-corriente-resistencia), circuito serie y paralelo.

En cualquier campo de la Física, es esencial que los estudiantes desarrollen una comprensión profunda y sólida de los conceptos fundamentales antes de abordar problemas más complejos. Un aspecto crucial de este proceso educativo es la utilización de ejercicios que inviten a los estudiantes a pensar y categorizar situaciones. Con relación a circuitos, la ley de Ohm es una piedra angular para el estudio de la electricidad y la electrónica. Sin una comprensión clara de cómo se relaciona la corriente, el voltaje y la resistencia, cualquier intento de resolver circuitos complejos se basará en una base débil y puede llevar a malentendidos y errores conceptuales.

Como docentes, una de nuestras tareas es hacer que nuestros jóvenes se cuestionen sobre ciertas situaciones o fenómenos físicos. Una cosa son sus creencias y otra muy diferente una explicación científica basada en la experimentación.

Una manera de hacerlo es presentarle ejercicios que le ayuden a categorizar situaciones similares y que respondan cuáles son sus diferencias respecto a algo en concreto.

La idea de clasificar tareas surgió de la investigación sobre las concepciones de los estudiantes utilizando una técnica llamada evaluación de reglas, desarrollada por Robert S. Siegler (1976).

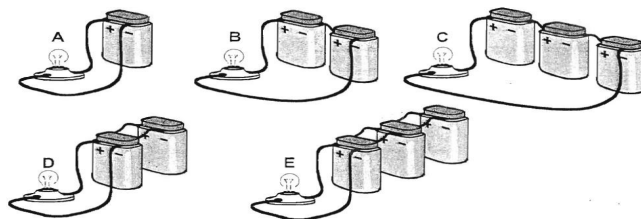
La técnica de evaluación de reglas consistía en que los sujetos hicieran un juicio comparativo sobre una gran variedad de arreglos de una situación específica. Las tareas de clasificación se concibieron como un formato más breve para obtener tales juicios comparativos. Los estudiantes deben clasificar las variaciones en función de un criterio especificado. Después de escribir explícitamente su secuencia de clasificación o elegir la opción de que todas las variaciones son equivalentes, se les pide a los estudiantes que escriban una explicación de su razonamiento. Finalmente, se les da la oportunidad de identificar cuán seguros estaban del razonamiento que utilizaron en la tarea.

A continuación, ejemplo de ejercicios que ayudan a categorizar y profundizar el aspecto conceptual.

Circuito eléctrico

Baterías idénticas son conectadas en diferentes arreglos conectados a un foco (todos iguales). Categorizar de mayor a menor con base al brillo de los focos.

Figura 11.
Circuito eléctrico



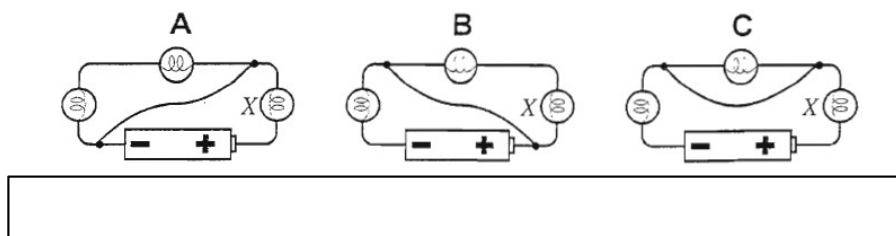
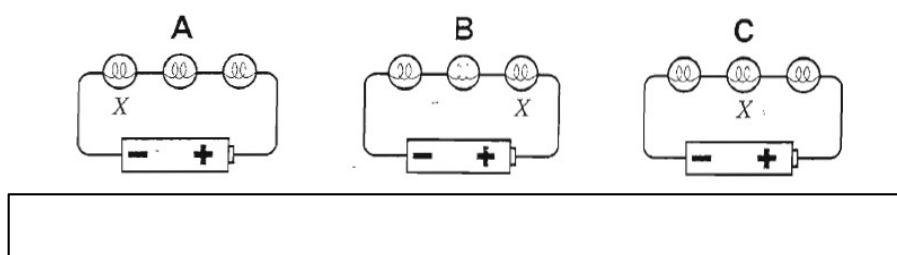
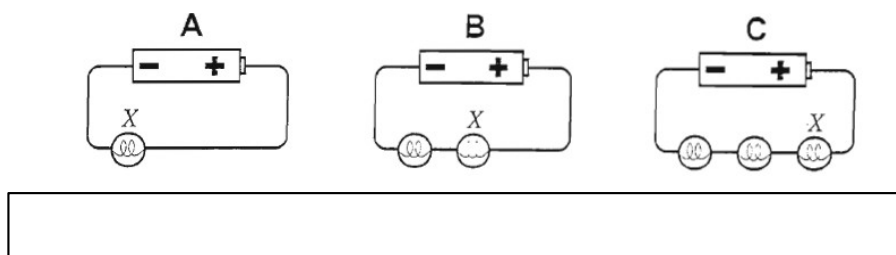
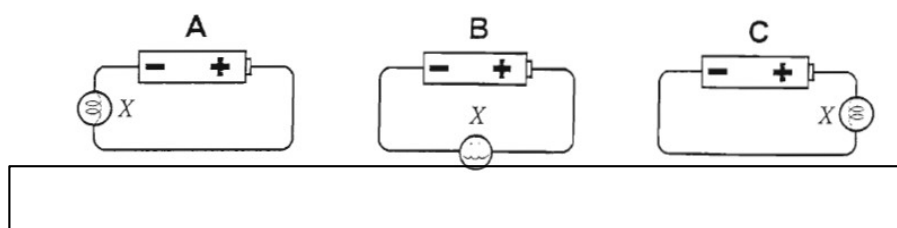
Nota: Tomado del sitio Web https://ricuti.com.ar/no_me_salen/ELECTRICIDAD/elec26.html

Justifique su respuesta

Clasifica lo siguiente según el brillo de la bombilla etiquetada como X, de la más brillante a la más tenue. Todas las bombillas son idénticas y debes tratarlas como resistores óhmicos. Las baterías son ideales (sin resistencia interna) y debes tratar los cables como conectores sin resistencia.

Figura 12.

Secuencia de ejercicios sobre brillo de las bombillas

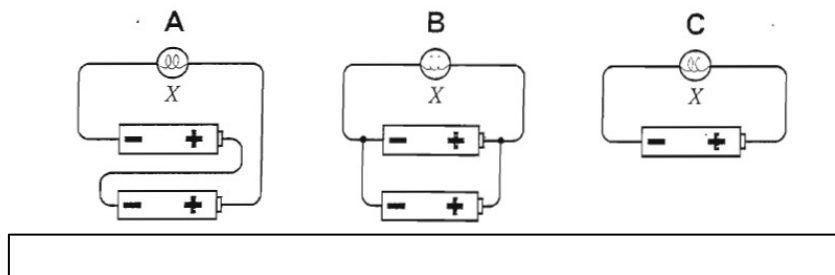


Elaboración propia.

Al aumentar el número de resistores en un circuito, ¿la corriente debe disminuir? Vamos a averiguarlo.

Se conecta una bombilla en el circuito que se ilustra en la figura. Si se cierra el interruptor S, ¿la luminosidad de la bombilla aumenta, disminuye o permanece igual? Explique por qué.

Figura 13.
Ejercicio Cierre de interruptor

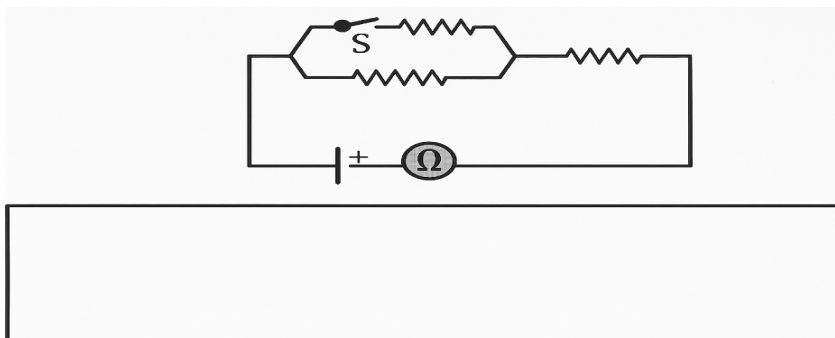


Elaboración propia.

Al aumentar el número de resistores en un circuito, ¿la corriente debe disminuir? Vamos a averiguarlo.

Se conecta una bombilla en el circuito que se ilustra en la figura. Si se cierra el interruptor S , ¿la luminosidad de la bombilla aumenta, disminuye o permanece igual? Explique por qué.

Figura 14.
La luminosidad

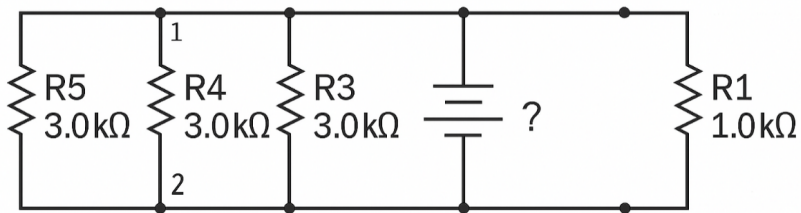


Nota: práctica donde se estudia cómo la resistencia afecta la corriente y, por ende, la luminosidad de una lámpara. Elaboración propia.

Otro tipo de ejercicios para ver la capacidad de análisis de los discentes son los que a simple vista pueda causar impresión por su aparente complejidad. En el circuito mostrado, debemos determinar el valor del voltaje de la fuente. Se conoce que la corriente que pasa por el resistor R_4 es de 2 mA .

Figura 15.

Ejercicio. Circuito valor del voltaje.



Nota: Circuito eléctrico con resistencias conectadas en paralelo. Elaboración propia.

Elaborar preguntas relacionados a la situación cotidiana y que tengan la necesidad de investigarlas y exponerlas la siguiente clase, por ejemplo: Comenta sobre la señal de advertencia que se muestra en el dibujo.

Figura 16.

Señal de advertencia.



Nota: Resistencia eléctrica muy alta, probablemente usado en un contexto educativo para ilustrar el valor extremo de resistencia en ohmios (Ω) y advertir sobre su efecto en circuitos eléctricos. Elaboración propia.

¿Qué provocará menos daño: ¿conectar una secadora de cabello de 100 V en un circuito de 220 V, o conectar una secadora de cabello de 220 V en un circuito de 110 V? Defiende tu respuesta.

Si los electrones fluyen con mucha lentitud por un circuito, ¿por qué no transcurre un tiempo considerablemente largo para que una lámpara brille cuando enciendes un interruptor distante?

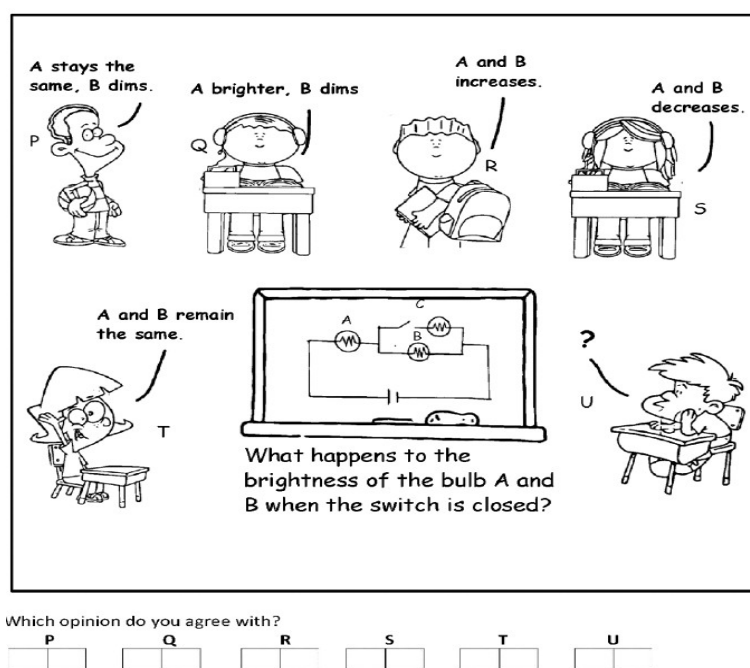
¿Qué es lo que se “agota” en un circuito eléctrico: la corriente o la energía?

Podemos ayudarnos de los cómics para presentar la pregunta. Los cómics ofrecen una manera divertida y visualmente atractiva

de presentar información, lo que facilita la comprensión y retención de conceptos complejos. Además, promueven la colaboración entre los alumnos al permitirles crear y compartir sus propias historietas como herramienta educativa.”

Figura 17.

Cómics sobre la luminosidad de dos bombillos.



Nota: Este cómic plantea una pregunta conceptual sobre circuitos eléctricos y el efecto de cerrar un interruptor en la luminosidad de dos bombillas (A y B).

Referencias bibliográficas

- Abad Toribio, L. (2009). *Diseño de una propuesta para el proceso de enseñanza-aprendizaje del electromagnetismo*. Tecnología y Desarrollo.
- Abad Toribio, L., García Martín, T., & Magro Andrade, R. (2009). Metodología de trabajo. Reflexiones sobre introducción a la investigación (pp. 22-28). *Tecnología y desarrollo*, 7(1). https://revistas.uax.es/index.php/tec_des/article/download/553/509.
- Al-Khalili, J. (2015). The birth of the electric machines: A commentary on Faraday (1832) "Experimental researches in electricity". *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 373(2039), Article 20140208. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0208>
- Bernal, J. D. (1975). *La proyección del hombre: Historia de la física clásica*. Siglo XXI de España Editores.
- Carrascosa, J. (2005). El problema de las concepciones alternativas en la actualidad (Parte I): Análisis sobre las causas que las originan y/o mantienen. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 2(2), 184-204. <https://revistas.uca.es/index.php/eureka/article/view/3918>
- Cazenobe, J. (1985). ¿Fue Maxwell precursor de Hertz? *Revue d'Histoire des Sciences*, 37(3-4), 974-980. https://www.persee.fr/doc/helec_0758-7171_1985_num_5_1_936
- Cuéllar López, Z. (2009). Las concepciones alternativas de los estudiantes sobre la naturaleza de la materia. *Archivos*, 50(2), Número especial: Didáctica de las Ciencias y la Matemática. <https://doi.org/10.35362/rie502185>
- Dibner, B. (1961). *Oersted and the discovery of electromagnetism*. Burndy Library.
- Education, R. W. (2022). *Make batteries with Alessandro Volta*. Breakthrough Science.
- Fernández, E. M. (2013). *Ampère, la electrodinámica clásica: Objetos eléctricos aún no identificados*. RBA.
- Gilbert, W. (1958). *De magnete* (Dover reprint ed.). Courier Corporation.
- Longair, M. (2015). "A paper ... I hold to be great guns": A commentary on Maxwell (1865) "A dynamical theory of the electromagnetic field". *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 373(2039), Article 20140229. <https://doi.org/10.1098/rsta.2014.0229>
- Moledo, P. L. (2014). *Historia de las ideas científicas: De Tales de Mileto a la máquina de Dios*. Planeta.

- Raduta, C. (2005). *General students' misconceptions related to electricity and magnetism*. arXiv preprint physics/0503132. <https://arxiv.org/abs/physics/0503132>
- Saquinaula-Brito, J. L., & Hernández, E. (2019). Concepciones alternativas en el estudio de las leyes de Newton mediante cuestionario a estudiantes de ingeniería. *Revista Cubana de Física*, 36(2), 110-118.
- Sarkar, T. K., Mailloux, R., Oliner, A. A., Salazar-Palma, M., & Sengupta, D. L. (2015). Maxwell's original presentation of electromagnetic theory and its evolution. En T. K. Sarkar et al. (Eds.), *Handbook of antenna technologies* (pp. 3-36). Springer.

CAPÍTULO IV

Mecánica cuántica con enfoque didáctico

Introducción

En el capítulo IV se versa sobre los fundamentos de la física moderna; muchos desafíos se nos plantean a la hora de estudiarla. Para el tema se necesitan mentes abiertas y estratégicas, ya que imagina que despiertas un día y descubres que tu reloj va más lento que el de tu vecino, que puedes estar en dos lugares al mismo tiempo o que una partícula puede cruzar una pared sin romperla. Suena a ciencia ficción, ¿verdad? Pues bien, esto es exactamente lo que sucede en el mundo de la física moderna.

Durante siglos, creímos entender cómo funcionaba el universo. Las leyes de Newton nos decían que una manzana caía al suelo por la gravedad, que los planetas giraban alrededor del Sol como bolas en una ruleta gigante y que, si conocíamos la posición y la velocidad de algo, podíamos predecir exactamente dónde estaría en el futuro; todo parecía ordenado y predecible.

A principios del siglo XX, un joven empleado de patentes llamado Albert Einstein se atrevió a preguntar: ¿y si el tiempo no fuera lo que creemos? Con esta simple pregunta, derribó el castillo de naipes de la física clásica. Descubrió que el tiempo es como un

elástico que se estira y encoge, que la materia puede convertirse en energía y que el espacio mismo es como una colchoneta donde se hunden las estrellas. Otros científicos estaban explorando un mundo aún más extraño: el interior del átomo. Allí descubrieron que las partículas que forman todo lo que nos rodea, incluidos tú y yo, se comportan como si tuvieran personalidad propia. A veces actúan como minúsculas bolas de billar y otras como ondas de radio; pueden estar conectadas de forma misteriosa, de modo que lo que le pasa a una instantáneamente afecta a la otra, aunque estén en lados opuestos del universo.

Este capítulo, con hojas sencillas, es una invitación a asomarte a este mundo maravilloso sin miedo.

Exploraremos las estrategias para la enseñanza de la física cuántica, atómica, nuclear y de partículas.

Introducción a la teoría de la relatividad especial.

La teoría de la relatividad especial, propuesta por Albert Einstein en 1905, revolucionó nuestra comprensión del espacio, el tiempo y el movimiento. Es una teoría física que describe cómo se comportan los objetos en movimiento a velocidades cercanas a la de la luz, y cómo el espacio y el tiempo se relacionan entre sí desde diferentes marcos de referencia .

Einstein basó la teoría en dos postulados:

1. Principio de relatividad: Las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas de referencia inerciales (es decir, que no están acelerando).
2. Constancia de la velocidad de la luz: La velocidad de la luz en el vacío es la misma para todos los observadores, sin importar el movimiento relativo entre la fuente y el observador.

A partir de estos postulados, se derivan varios efectos que dieron paso a la evolución de teoría, tales como:

- Dilación del tiempo: Un reloj en movimiento se percibe más lento desde un sistema de referencia en reposo.
- Contracción de la longitud: Un objeto en movimiento se mide más corto en la dirección del movimiento.
- Relatividad de la simultaneidad: Dos eventos que son simultáneos en un sistema pueden no serlo en otro.

Equivalencia masa-energía: Expresada en la famosa fórmula: $E=mc^2$ Esto implica que la masa puede convertirse en energía y viceversa.

Contexto histórico de la Teoría de la Relatividad

A finales del siglo XIX la física clásica (Newton-Maxwell) no lograba armonizar la invariabilidad de la velocidad de la luz evidenciada por el fracaso del experimento Michelson-Morley (1886), con las transformaciones galileanas; Einstein, en 1905, resolvió la contradicción con la relatividad especial (postulados de constante y equivalencia entre inerciales) y, al extender el principio de relatividad a sistemas acelerados e incorporar la equivalencia entre masa y energía, culminó en 1915 la relatividad general, reemplazando la gravitación newtoniana por la curvatura del espacio-tiempo (Gamow, 2014).

Las concepciones anteriores a la revolución científica

Fue la civilización griega la primera que dio el paso hacia la creación consciente de sistemas de pensamiento estructurados; fueron los primeros en indagar sistemáticamente los conceptos que nos competen: continuidad y discontinuidad, la materia y su estructura, el tiempo, la configuración del mundo y sus límites, el infinito.

La geometría euclidiana, que describe con gran precisión nuestra percepción del mundo, tuvo vigencia hasta el siglo XIX.

El cosmos aristotélico se concebía como una amplia esfera, pero finita, con su centro en la Tierra y con un sistema de esferas, envolturas concéntricas donde se ubicaban de forma natural los cuerpos celestes conocidos en ese entonces, limitada por la esfera de las estrellas fijas. El movimiento circular uniforme era la máxima aspiración de un cuerpo físico a ese estado.

En cuanto al tiempo, la posición aristotélica se corresponde con la que se puede atribuir al “sentido común”: un tiempo orgánico, progresivo e irreversible, de carácter universal y absoluto.

Es durante la Edad Media que el tiempo y el espacio se convierten en conceptos abstractos. Los relojes antiguos estaban basados en fenómenos astronómicos o en el desplazamiento de fluidos o granos, y no fue hasta finales del siglo XIII cuando se inventó el reloj mecánico, donde las manecillas traducían el tiempo a unidades de espacio sobre la esfera; con ello se iniciaba el camino hacia un tiempo abstracto, matemático, de unidades sobre una escala, propio del mundo de la ciencia.

El espacio también hizo su transformación: de los mapas simbólicos y jerárquicos se pasó a la perspectiva y, en los mapas cartográficos, a la posición en sistemas abstractos de coordenadas de latitud y longitud.

Santo Tomás de Aquino (1225-1274) fijó la imagen del mundo cristiano en términos muy próximos a los aristotélicos,

reinterpretando y ajustando a las Escrituras las obras antiguas que se iban incorporando al acervo occidental.

En el siglo XIV, Nicolás de Oresme, criticó la existencia de un centro único natural del espacio, la Tierra, pues: “el movimiento natural de un cuerpo se halla gobernado, no por la posición que ocupa en un espacio aristotélico absoluto, sino por su posición relativa a otros fragmentos de materia”. (Kuhn, 1978), en tal sentido, argumenta sólidamente la posibilidad de movimiento de la Tierra.

La revolución científica y la posición newtoniana

Tras el inicio de la revolución copernicana (1543) y los pasos de hombres como Galileo se abrió el camino hacia la superación de las concepciones antiguas.

René Descartes (1596, 1649) juega un papel clave en la construcción del concepto físico de espacio. Para los griegos existían los cuerpos, los entes matemáticos o físicos, y su posición o relación entre ellos, pero no la noción de espacio como tal, el espacio asume tan sólo un papel cualitativo, asignando la correspondencia entre los elementos geométricos y los números reales, el espacio se convierte en sujeto del pensamiento físico. “La ciencia ha sido capaz de avanzar sin disponer del concepto de espacio como tal: fueron suficientes para sus necesidades las formas corpóreas ideales (...) Por otra parte, el espacio como conjunto, tal como fuera concebido por Descartes constituía una necesidad absoluta para la física newtoniana”. (Einstein 1986).

Descartes identifica espacio y materia, pero prescinde del concepto de fuerza, prescinde por tanto del concepto de vacío y reduce la causalidad física a la conservación del movimiento. Leibniz introdujo el concepto de fuerza para explicar la impenetrabilidad de la materia y las distribuciones de fuerzas, estableciendo una corriente de pensamiento alimentada por Bernouilli, Euler, Kant.

Las diversas concepciones del espacio y tiempo se pueden resumir en tres modelos: Modelo de materia prima (considera la materia como vórtices, puntos especiales del espacio, Descartes), modelo relacional (relaciones y ordenaciones de las posiciones relativas entre objetos y sucesos, Leibniz) y modelo de recipiente (el mundo está constituido por corpúsculos sólidos, extensos y espacio vacío, donde cada partícula es capaz de actuar “a distancia” y ejercer fuerzas directamente sobre otros cuerpos, Newton). (Bunge, 1983).

Para Newton (1687), el universo es infinito, ilimitado. En el corolario quinto a los axiomas o leyes del movimiento, se recoge la

relatividad cinemática: Al espacio se le atribuyen las propiedades de: homogeneidad (todos los puntos presentan las mismas propiedades geométricas), isotropía (todas las direcciones son equivalentes), universalidad (desde cualquier sistema de referencia se maneja una misma métrica), el tiempo aparece como continuo, homogéneo, universal (el tiempo transcurre igual en cualquier sistema de referencia, o sea los relojes una vez sincronizados marcan siempre el mismo tiempo).

En el escolio de los Principia (1687) es especialmente claro:

I.- El tiempo absoluto, verdadero y matemático, en sí mismo y por su propia naturaleza, fluye de una manera ecuable y sin relación alguna con nada externo.

II.- El espacio absoluto, por su propia naturaleza y sin relación alguna con nada externo, permanece siempre similar e inmóvil. (William, P. 1968).

La presentación axiomática del espacio y el tiempo esconde los problemas lógicos, que pondrán de manifiesto más adelante, de forma clara, Mach, Poincaré y finalmente Einstein.

Las aportaciones del barroco

A lo largo del XVIII el edificio conceptual de la mecánica fue clarificándose, extendiéndose y formalizándose, gracias a los aportes de Daniel Bernouilli, Euler (primero en usar del lenguaje algebraico y diferencial para presentar la mecánica) y Clairaut. El descubrimiento de las propiedades de invarianza de la mecánica nació del estudio de problemas concretos más que de formulaciones generales. “En 1745 Clairault expuso con gran claridad lo que hoy conocemos como el principio del movimiento relativo, según el cual un cuerpo observado desde un sistema de referencia no Inercial experimenta una fuerza “aparente”, que es igual a la aceleración cambiada de signo” (Truesdell, 1975).

El filósofo Kant (1724-1804) consideraba al espacio y al tiempo como “categorías” de la mente humana en lugar de realidades físicas. En ese sentido los atributos clásicos del espacio, con su naturaleza euclídea, y el tiempo se consideran las únicas concepciones naturales evidentes. Tales ideas dominaron el final de este periodo y gran parte del XIX. La investigación matemática desarrollaría el próximo siglo las geometrías no euclídeas, pero en sus creadores alentaba el espíritu de la creación teórica sin vinculación con la realidad física.

Los desafíos de la Física en el XIX.

Dos grandes desafíos, con visiones muy diferentes de la naturaleza física, orientaron el desarrollo de la física en este siglo. Uno era la continuación clara del estudio de la electricidad y el magnetismo. El otro, impulsado por Faraday y continuado principalmente por Maxwell, introdujo y desarrolló el concepto de campo.

Los seguidores del esquema newtoniano trabajaron arduamente en su extensión a la electricidad y el magnetismo. Realizaron importantes aportaciones en la estructuración matemática de las leyes, aunque en el camino tuvieron que alterar supuestos relevantes, tales como la inclusión de acciones no centrales, entre otros. Sin embargo, la quiebra del concepto de acción a distancia, derivada de la existencia de un tiempo de propagación de las perturbaciones, supuso un importantísimo punto de contradicción con la cosmovisión newtoniana.

Por otra parte, el desarrollo de la óptica había refundado esta disciplina sobre la base de ondas transversales que precisaban de un medio de propagación: el éter. Conforme a las nuevas necesidades del desarrollo del electromagnetismo, se intentó interpretar el campo como un estado tensional mecánico del éter.

El problema del estado dinámico del éter se situaba en el centro de la explicación de los fenómenos ópticos: desde la aberración estelar —la Tierra no arrastra el éter (Young, 1804)—, el coeficiente de arrastre parcial de Fizeau para los medios en movimiento (1851), o los experimentos de detección del movimiento de la Tierra en el éter (experimentos de Michelson, 1881, y con Morley, 1887).

Las aportaciones de Poincaré y Lorentz

Es relevante destacar quienes fueron Poincaré y Lorentz, dos científicos fundamentales en el desarrollo de las ideas que llevaron a la formulación de la teoría de la relatividad especial, incluso antes de que Einstein la consolidara en 1905.

Sus aportes fueron:

Henri Poincaré (1854-1912)

- Fue uno de los primeros en hablar de la relatividad del tiempo y en cuestionar la noción de simultaneidad.
- Introdujo el concepto de grupo de Lorentz como una estructura matemática que conserva las leyes del electromagnetismo.

- Propuso que las leyes físicas deberían ser invariantes bajo las transformaciones de Lorentz.
- Aunque no formuló la relatividad especial como Einstein, sus ideas fueron precursoras y muy cercanas.

Hendrik Lorentz (1853–1928)

- Desarrolló las transformaciones de Lorentz, que describen cómo cambian las coordenadas espacio-temporales entre dos observadores en movimiento relativo.
- Su trabajo buscaba explicar los resultados del experimento de Michelson-Morley, que no detectó el “éter” como medio de propagación de la luz.
- Introdujo el concepto de contracción de la longitud como una hipótesis para explicar ese resultado.

Lorentz modifica sustancialmente el concepto de éter, le libera de cualquier referencia mecánica y afirma la participación de la materia en los fenómenos electromagnéticos mediante la existencia de partículas elementales cargadas. El trabajo de Lorentz da al campo y a las partículas eléctricas el estatus de elementos de la realidad física.

En 1900 Poincaré señala que si la Teoría de Lorentz es correcta habría que abandonar probablemente algunos principios de la mecánica newtoniana. Y advierte que la teoría del electrón no sólo viola el principio de acción y reacción sino la conservación del momento (Berkson 1985).

En 1904 presentó la modificación de la Teoría del electrón, que presentaba la construcción de las ecuaciones que hoy llamamos de transformación de Lorentz. Las ecuaciones de transformación, las mismas que serán obtenidas en el trabajo de Einstein de 1905 sobre bases diferentes (Holton 1979).

A Poincaré puede atribuirse, sin duda, un papel importante en la creación de conceptos básicos de la relatividad especial. En sus textos de comienzos de siglo, 1905, y sobre todo el famoso de 1906 (Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo) reafirmó la importancia del principio de relatividad, reafirmando su compatibilidad con la Teoría electromagnética y las propiedades matemáticas de la transformación de Lorentz.

La publicación en 1905 de la Teoría especial de la relatividad de Einstein.

El artículo de Einstein se fundamenta en dos postulados: el principio de relatividad y el principio de invarianza de la velocidad de la luz. La teoría conduce al rechazo de la noción de éter, como innecesario para explicar los fenómenos electromagnéticos.

Este artículo apareció después de un prolongado período de reflexión sobre algunos aspectos de la teoría electromagnética de Maxwell, más que de cualquier referencia especial por su parte a los resultados del experimento de Michelson Morley (Holton 1979).

La concepción de tiempo y espacio cambia. El tiempo pierde su carácter absoluto, y su universalidad. El concepto de simultaneidad se modifica radicalmente y se establece el carácter invariable de todas las ecuaciones que expresan leyes fundamentales de la física. Se resuelve la incongruencia de que los sistemas Inerciales son indistinguibles por experimentos mecánicos internos pero sí parecían serlo mediante experimentos electromagnéticos. El ajuste se ha realizado asumiendo como válida tanto la teoría electromagnética como el principio de relatividad. La mecánica clásica permanece en el caso límite ordinario, de gran importancia práctica y teórica.

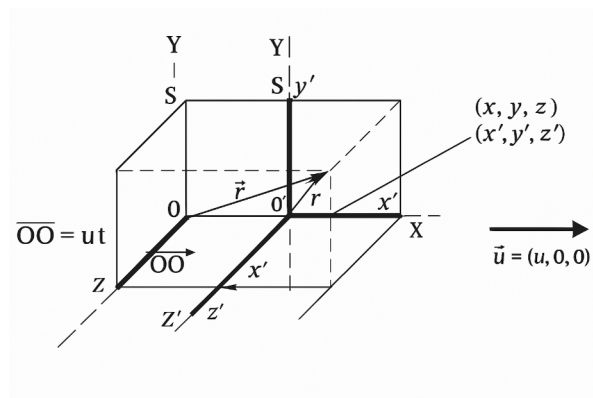
Estrategias para la enseñanza de la Teoría de la Relatividad. Contenidos básicos

Principio de relatividad de Galileo

Cualquier experimento mecánico realizado en un sistema en reposo se desarrollará exactamente igual en un sistema que se mueva a velocidad constante con relación al primero.

Figura 1.

Diagrama de referencia espacial en física.



Nota: Sistemas de coordenadas y movimiento relativo. Elaboración propia.

Si el observador O' se aleja con velocidad $\vec{u}$ respecto del observador O, considerando que el transcurso del tiempo es igual para todos los sistemas, que al tiempo $t = 0$ ambos sistemas coinciden y que el movimiento se da a lo largo del eje XX' , se tiene que:

$$x' = x - ut; y' = y; z' = z; t' = t$$

Postulados de Einstein

Einstein elaboró esta nueva concepción de la física en su teoría especial de la relatividad, publicada en 1905. Esta teoría, aplicable a todos los fenómenos físicos, tanto mecánicos como electromagnéticos, estaba basada en dos postulados:

Postulado 1. Las leyes de la física son las mismas en todos los sistemas de referencia inerciales.

Este postulado es una generalización del principio de relatividad de Galileo, aplicable sólo a la mecánica. De él se desprende que no existe ningún sistema de referencia especial (sistema del éter) para los fenómenos electromagnéticos y que todos los sistemas de referencia inerciales son equivalentes en la descripción de cualquier fenómeno físico. Además, las leyes de la física deben ser invariantes al pasar de un sistema inercial a otro, es decir, deben tener la misma expresión matemática en todos los sistemas inerciales.

Postulado 2. La velocidad de la luz es la misma en todos los sistemas de referencia inerciales, cualquiera que sea la velocidad de la fuente.

Transformaciones de Lorentz

Las transformaciones de Galileo debían ser reemplazadas teniendo en cuenta que la velocidad de la luz era la misma para todos los observadores inerciales. Einstein observó que las transformaciones válidas eran las transformaciones de Lorentz, propuestas en 1892 por el físico holandés H. A. Lorentz (1853-1928). Estas ecuaciones permiten a un observador inercial O' (sistema S') interpretar la información procedente de un observador inercial O (sistema S), y viceversa. Para simplificarlas se definen las siguientes constantes auxiliares:

$$\beta = \frac{u}{c}$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Así, las transformaciones de Lorentz para un sistema S' que se aleja a velocidad u de un sistema S son:

$$x = \gamma(x - ut); y = y; z = z; t = \gamma \left(t - \frac{\beta}{c}x \right)$$

De ellas se interpreta que:

El tiempo que mide cada observador es diferente ($t' \neq t$), por lo que el tiempo pierde el carácter absoluto que tenía en la mecánica clásica ($t' = t$). No es posible superar la velocidad de la luz, c . Si la velocidad u fuera igual o superior a la velocidad de la luz c , la constante γ sería infinita o imaginaria, algo sin ningún sentido físico. Las transformaciones de Lorentz se reducen a las de Galileo en el límite de velocidades pequeñas respecto a la de la luz. Si u es mucho menor que c , la constante β se hace cero, de modo que $\gamma = 1$ y recuperamos las transformaciones de Galileo.

Desafíos de la enseñanza de la TER

La metodología de enseñanza que se propone se basa en muchas de las ideas de Arnold Arons, Lillian McDermott, siguiendo la tradición de la Universidad de Washington, Seattle. Entre estos referentes existen fuertes puntos de contacto: el aprendizaje centrado en el estudiante el diálogo socrático, relaciones estudiante-docente que fomentan la coordinación antes que la subordinación, énfasis en el trabajo experimental, énfasis en los métodos de adquisición del conocimiento, más que en su mera transmisión concentrarse en pocos tópicos fundamentales, abordados con profundidad (menos es más) elaboración de guías para fomentar el trabajo autónomo del estudiante y apoyo a los docentes.

Su metodología de enseñanza está orientada a la concreción de dos grandes objetivos (Calderón, Núñez, Di Laccio, Iannelli L. y Gil, 2015): lograr una mejor y creciente alfabetización científica en los ciudadanos, atraer, educar mejor y más eficientemente a futuros tecnólogos y científicos Su propuesta metodológica propone las siguientes dimensiones:

Enseñanza centrada en el alumno:

Considera a los estudiantes como constructores activos del conocimiento y a los docentes como guías y facilitadores de los procesos de enseñanza y de aprendizaje.

Aprendizaje por inmersión:

Incorpora en los cursos la realización de proyectos de investigación que recrean a escala reducida de tiempo, las diferentes facetas de la investigación científica. Estos proyectos procuran

que los estudiantes “aprendan ciencias haciendo ciencias”, discutiendo con sus pares y con el docente, desarrollando muchas habilidades que pueden ser usadas en otros ámbitos. Dosificando el esfuerzo que debe realizar el estudiante de acuerdo con el curso y nivel.

Aulas-laboratorios de bajo costo con TIC.

Utiliza las potencialidades de las TIC en sus propuestas experimentales para hacerlas posibles para todos los estudiantes, atractivas y que no requieran estar en un laboratorio tradicional. El concepto de TIC es muy amplio y lo delimita a la convergencia de computadoras, sistemas audiovisuales, Internet, teléfonos inteligentes, y diversos equipos que se integran con algunos de ellos. Desde luego, la lista que integran las TIC, es una lista abierta que se va modificando con el tiempo y en la medida que van surgiendo pueden ser incorporadas las nuevas tecnologías.

¿Cómo lo enseñamos?

Un artículo más reciente, pero muy destacado, es el de Irene Arriasecq (2017), propone: Analizar textos relacionados con la TER, donde se tome en cuenta el diseño curricular vigente en el país, textos de divulgación y textos específicos orientados al nivel secundario. De su análisis surgen las siguientes recomendaciones:

Explorar primero y deducir después:

Las soluciones físicas más relevantes de la ecuación de Einstein se presentan primero y sin deducción. Por ejemplo, la noción de espacio-tiempo cuyas consecuencias observacionales serán exploradas por el estudio de lo que ocurre con los rayos de luz en él. Esto permite a los alumnos “zambullirse” dentro de los fenómenos físicos tan rápido como sea posible. Posteriormente, y dependiendo del nivel educativo que en el que se esté trabajando, se introduce la ecuación de Einstein y se resuelve para mostrar de donde se originan esas geometrías. Aquellos docentes y alumnos que tengan el tiempo suficiente para trabajar todo el texto, tendrían la posibilidad de comprender tanto la importancia de las soluciones como el camino que lleva a ellas. Sin embargo, aquellos que no tienen el tiempo suficiente, habrán comprendido, al menos, algunos de los fenómenos básicos para los cuales es importante la noción de espacio-tiempo curvo.

Abordar solo los ejemplos más simples:

Las soluciones más simples de la ecuación de Einstein son las más relevantes desde el punto de vista físico. Por ejemplo, se discuten los agujeros negros con masa y momento angular pero no se considera su carga; se analizan las cosmologías homogéneas e isotrópicas pero no las anisotrópicas; se describen estrellas esféricas pero sin considerar la rotación.

Introducir conceptos matemáticos nuevos solo cuando sean necesarios:

solamente son necesarias unas pocas herramientas matemáticas para entender la geometría del espacio tiempo y el movimiento de los rayos de luz. Nociones básicas de métricas, de cuadvectores y de superficies geodésicas suelen ser suficientes para la mayoría de los conceptos que se desarrollan en todos los capítulos del texto. Por ejemplo, las nociones de tensor y derivada covariante se introducen en el capítulo 20, uno de los últimos del texto.

Enfatizar los fenómenos físicos y sus conexiones con la experimentación y la observación: El GPS, las estrellas de neutrones, las ondas gravitatorias, la estructura a gran escala del universo son solo algunos de los fenómenos del universo para los cuales la TGR son importantes. En este texto, se enfatiza la estrecha conexión entre la TGR con la experimentación y la observación.

La astrofísica y la cosmología permiten encontrar muchos ejemplos de relatividad general, sin embargo, el autor del texto tiene muy claro que no se trata de un libro de astrofísica o cosmología. La conexión entre la teoría y la observación se realizan a través de la ejemplificación de los modelos más simples y de una forma cualitativa.

Analizar los experimentos clásicos realizados para contrastar la teoría:

El autor asume que las contrastaciones experimentales se van acumulando a lo largo del tiempo y que requieren de una tecnología muy específica. Si bien considera necesario analizar algunas contrastaciones empíricas, prefiere analizar unos pocos ejemplos clásicos que muestren los métodos que se utilizan para realizarlas.

Fundamentos de física cuántica, atómica, nuclear y de partículas

Reseña histórica de la física cuántica, atómica, nuclear y de partículas

La mecánica cuántica es la última de las grandes ramas de la física. Comienza a principios del siglo XX, en el momento en que dos de las teorías que intentaban explicar lo que nos rodea, la ley de gravitación universal y la teoría electromagnética clásica, se volvían insuficientes para explicar ciertos fenómenos. La teoría electromagnética generaba un problema cuando intentaba explicar la emisión de radiación de cualquier objeto en equilibrio, llamada radiación térmica, que es la que proviene de la vibración microscópica de las partículas que lo componen. Pues bien, usando las ecuaciones de la electrodinámica clásica, la energía que emitía esta radiación térmica daba infinito si se suman todas las frecuencias que emitía el objeto, con ilógico resultado para los físicos.

Es en el seno de la mecánica estadística donde nacen las ideas cuánticas en 1900. Al físico alemán Max Planck se le ocurrió un truco matemático: que si en el proceso aritmético se sustituía la integral de esas frecuencias por una suma no continua se dejaba de obtener un infinito como resultado, con lo que eliminaba el problema y, además, el resultado obtenido concordaba con lo que después era medido. Fue Max Planck quien entonces enunció la hipótesis de que la radiación electromagnética es absorbida y emitida por la materia en forma de «cuantos» de luz o fotones de energía mediante una constante estadística, que se denominó constante de Planck.

Su historia es inherente al siglo XX, ya que la primera formulación cuántica de un fenómeno fue dada a conocer por el mismo Planck el 14 de diciembre de 1900 en una sesión de la Sociedad

Física de la Academia de Ciencias de Berlín

La idea de Planck habría quedado muchos años sólo como hipótesis si Albert Einstein no la hubiera retomado, proponiendo que la luz, en ciertas circunstancias, se comporta como partículas de energía independientes (los cuantos de luz o fotones). Fue Albert Einstein quien completó en 1905 las correspondientes leyes de movimiento con lo que se conoce como teoría especial de la relatividad, demostrando que el electromagnetismo es una teoría esencialmente no mecánica. Culminaba así lo que se ha dado en llamar física clásica, es decir, la física no-cuántica.

Usó este punto de vista llamado por él «heurístico», para desarrollar su teoría del efecto fotoeléctrico, publicando esta hipótesis

en 1905, lo que le valió el Premio Nobel de Física de 1921. Esta hipótesis fue aplicada también para proponer una teoría sobre el calor específico, es decir, la que resuelve cuál es la cantidad de calor necesaria para aumentar en una unidad la temperatura de la unidad de masa de un cuerpo.

El siguiente paso importante se dio hacia 1925, cuando Louis de Broglie propuso que cada partícula material tiene una longitud de onda asociada, inversamente proporcional a su masa, (a la que llamó momentum), y dada por su velocidad. Poco tiempo después Erwin Schrödinger formuló una ecuación de movimiento para las «ondas de materia», cuya existencia había propuesto de Broglie y varios experimentos sugerían que eran reales.

La mecánica cuántica introduce una serie de hechos contraintuitivos que no aparecían en los paradigmas físicos anteriores; con ella se descubre que el mundo atómico no se comporta como esperaríamos. Los conceptos de incertidumbre o cuantización son introducidos por primera vez aquí. Además la mecánica cuántica es la teoría científica que ha proporcionado las predicciones experimentales más exactas hasta el momento, a pesar de estar sujeta a las probabilidades.

La teoría cuántica fue desarrollada en su forma básica a lo largo de la primera mitad del siglo XX. El hecho de que la energía se intercambie de forma discreta se puso de relieve por hechos experimentales como los siguientes, inexplicables con las herramientas teóricas anteriores de la mecánica clásica o la electrodinámica: Espectro de la radiación del cuerpo negro.

Resuelto por Max Planck con la cuantización de la energía. La energía total del cuerpo negro resultó que tomaba valores discretos más que continuos. Este fenómeno se llamó cuantización, y los intervalos posibles más pequeños entre los valores discretos son llamados quanta (singular: quantum, de la palabra latina para «cantidad», de ahí el nombre de mecánica cuántica). El tamaño de un cuanto es un valor fijo llamado constante de Planck, y que vale: 6.626×10^{-34} julios por segundo.

Bajo ciertas condiciones experimentales, los objetos microscópicos como los átomos o los electrones exhiben un comportamiento ondulatorio, como en la interferencia. Bajo otras condiciones, las mismas especies de objetos exhiben un comportamiento corpuscular, de partícula, («partícula» quiere decir un objeto que puede ser localizado en una región concreta del espacio), como en la dispersión de partículas.

Este fenómeno se conoce como dualidad onda-partícula. Las propiedades físicas de objetos con historias asociadas pueden ser correlacionadas, en una amplitud prohibida para cualquier teoría clásica, sólo pueden ser descritos con precisión si se hace referencia a ambos a la vez.

Este fenómeno es llamado entrelazamiento cuántico y la desigualdad de Bell describe su diferencia con la correlación ordinaria. Las medidas de las violaciones de la desigualdad de Bell fueron algunas de las mayores comprobaciones de la mecánica cuántica.

Explicación del efecto fotoeléctrico, dada por Albert Einstein, en que volvió a aparecer esa “misteriosa” necesidad de cuantizar la energía.

Efecto Compton

El desarrollo formal de la mecánica cuántica fue el resultado de los esfuerzos conjuntos de numerosos físicos y matemáticos, entre ellos Schrödinger, Heisenberg, Einstein, Dirac, Bohr y von Neumann, entre otros (Einstein, 1905; Heisenberg, 1925; Schrödinger, 1926). Diversos experimentos clave contribuyeron a cuestionar la física clásica y a consolidar este nuevo marco teórico, como el experimento de Michelson y Morley (1881), que puso en evidencia la inexistencia del éter luminífero, y el efecto Compton, demostrado experimentalmente por Arthur H. Compton en 1923, el cual evidenció el carácter corpuscular de la radiación electromagnética (Compton, 1923). Aunque la teoría cuántica se consolidó en el primer tercio del siglo XX, varios de sus aspectos fundamentales continúan siendo objeto de estudio. Actualmente, la mecánica cuántica constituye la base teórica de numerosos campos de la física y la química, como la física de la materia condensada, la química cuántica y la física de partículas, y tuvo su principal origen geográfico en Europa Central, especialmente en Alemania y Austria, en un contexto histórico marcado por profundas transformaciones científicas y culturales.

Descripción de la teoría bajo la interpretación de Copenhague

Para describir la teoría de forma general es necesario un tratamiento matemático riguroso, pero aceptando una de las tres interpretaciones de la mecánica cuántica (a partir de ahora la Interpretación de Copenhague), el marco se relaja. La mecánica cuántica describe el estado instantáneo de un sistema (estado cuántico) con una función de onda que codifica la distribución de probabilidad de todas las propiedades medibles, u observables. Algunos observables posibles sobre un sistema dado son la energía, posición, momento y momento angular. La mecánica cuántica no asigna valores definidos a los observables, sino que hace predicciones sobre sus distribuciones de probabilidad. Las

propiedades ondulatorias de la materia son explicadas por la interferencia de las funciones de onda.

Estas funciones de onda pueden variar con el transcurso del tiempo. Esta evolución es determinística si sobre el sistema no se realiza ninguna medida aunque esta evolución es estocástica y se produce mediante colapso de la función de onda cuando se realiza una medida sobre el sistema (Postulado IV de la MC). Por ejemplo, una partícula moviéndose sin interferencia en el espacio vacío puede ser descrita mediante una función de onda que es un paquete de ondas centrado alrededor de alguna posición media. Según pasa el tiempo, el centro del paquete puede trasladarse, cambiar, de modo que la partícula parece estar localizada más precisamente en otro lugar. La evolución temporal determinista de las funciones de onda es descrita por la Ecuación de Schrödinger.

Algunas funciones de onda describen estados físicos con distribuciones de probabilidad que son constantes en el tiempo, estos estados se llaman estacionarios, son estados propios del operador hamiltoniano y tienen energía bien definida. Muchos sistemas que eran tratados dinámicamente en mecánica clásica son descritos mediante tales funciones de onda estáticas. Por ejemplo, un electrón en un átomo sin excitar se dibuja clásicamente como una partícula que rodea el núcleo, mientras que en mecánica cuántica es descrito por una nube de probabilidad estática que rodea al núcleo.

Cuando se realiza una medición en un observable del sistema, la función de ondas se convierte en una del conjunto de las funciones llamadas funciones propias o estados propios del observable en cuestión. Este proceso es conocido como colapso de la función de onda. Las probabilidades relativas de ese colapso sobre alguno de los estados propios posibles son descritas por la función de onda instantánea justo antes de la reducción. Considerando el ejemplo anterior sobre la partícula en el vacío, si se mide la posición de la misma, se obtendrá un valor impredecible x . En general, es imposible predecir con precisión qué valor de x se obtendrá, aunque es probable que se obtenga uno cercano al centro del paquete de ondas, donde la amplitud de la función de onda es grande.

Después de que se ha hecho la medida, la función de onda de la partícula colapsa y se reduce a una que esté muy concentrada en torno a la posición observada x .

La ecuación de Schrödinger es en parte determinista en el sentido de que, dada una función de onda a un tiempo inicial dado, la ecuación suministra una predicción concreta de qué función tendremos en cualquier tiempo posterior. Durante una medida, el

eigen-estado al cual colapsa la función es probabilista y en este aspecto es no determinista. Así que la naturaleza probabilista de la mecánica cuántica nace del acto de la medida.

Formulación matemática

En la formulación matemática rigurosa, desarrollada por Dirac y von Neumann, los estados posibles de un sistema cuántico están representados por vectores unitarios (llamados estados) que pertenecen a un Espacio de Hilbert complejo separable (llamado el espacio de estados). Qué tipo de espacio de Hilbert es necesario en cada caso depende del sistema; por ejemplo, el espacio de estados para los estados de posición y momento es el espacio de funciones de cuadrado integrable, mientras que la descripción de un sistema sin traslación pero con un espín es el espacio L^2 .

La evolución temporal de un estado cuántico queda descrita por la ecuación de Schrödinger, en la que el hamiltoniano, el operador correspondiente a la energía total del sistema, tiene un papel central.

Cada magnitud observable queda representada por un operador lineal hermítico definido sobre un dominio denso del espacio de estados. Cada estado propio de un observable corresponde a un eigenvector del operador, y el valor propio o eigenvalor asociado corresponde al valor del observable en aquel estado propio.

El espectro de un operador puede ser continuo o discreto. La medida de un observable representado por un operador con espectro discreto sólo puede tomar un conjunto numerable de posibles valores, mientras que los operadores con espectro continuo presentan medidas posibles en intervalos reales completos. Durante una medida, la probabilidad de que un sistema colapse a uno de los eigenestados viene dada por el cuadrado del valor absoluto del producto interior entre el estado propio o auto-estado (que podemos conocer teóricamente antes de medir) y el vector estado del sistema antes de la medida. Podemos así encontrar la distribución de probabilidad de un observable en un estado dado computando la descomposición espectral del operador correspondiente. El principio de incertidumbre de Heisenberg se representa por la aseveración de que los operadores correspondientes a ciertos observables no conmutan.

El mundo moderno de la física se funda notablemente en dos teorías principales, la relatividad general y la mecánica cuántica, aunque ambas teorías parecen contradecirse mutuamente. Los postulados que definen la teoría de la relatividad de Einstein y la teoría del cuántum están incuestionablemente apoyados

por rigurosa y repetida evidencia empírica. Sin embargo, ambas se resisten a ser incorporadas dentro de un mismo modelo coherente.

El mismo Einstein es conocido por haber rechazado algunas de las demandas de la mecánica cuántica. A pesar de ser claramente inventivo en su campo, Einstein no aceptó la interpretación ortodoxa de la mecánica cuántica tales como la aserción de que una sola partícula subatómica puede ocupar numerosos espacios al mismo tiempo. Einstein tampoco aceptó las consecuencias de entrelazamiento cuántico aún más exóticas de la paradoja de Einstein-Podolsky-Rosen (o EPR), la cual demuestra que medir el estado de una partícula puede instantáneamente cambiar el estado de su socio enlazado, aunque las dos partículas pueden estar a una distancia arbitraria. Sin embargo, este efecto no viola la causalidad, puesto que no hay transferencia posible de información. De hecho, existen teorías cuánticas que incorporan a la relatividad especial, por ejemplo, la electrodinámica cuántica, la cual es actualmente la teoría física más comprobada y éstas se encuentran en el mismo corazón de la física moderna de partículas.

Estrategias para la enseñanza de la física cuántica, atómica, nuclear y de partículas. La enseñanza de la MC introductoria es todavía un campo en formación [1-9]; no obstante, cabe reconocer en las propuestas cuatro rasgos generales conectados, a saber, (1) la elección epistemológica o interpretación que dan a la MC, (2) una perspectiva o acercamiento para abordarla, (3) cierto uso de la historia y la filosofía de las ciencias (HFC) para contextualizar la MC, y (4) la relaciones que establecen entre física cuántica y física clásica.

En lo que respecta a la MCF, es una propuesta que:

Interpreta las entidades cuánticas como sistemas físicos reales plenamente descritos por vectores de estado. La realidad de los sistemas es el conjunto de representaciones que establecen los estados cuánticos con sus cantidades físicas observables, tanto a nivel formal como experimental.

Estos estados cuánticos, así mismo, proveen toda la información física relevante de su sistema asociado.

Ofrece una perspectiva para la MC, basada en conceptos fundamentales (superposición y entrelazamiento cuántico), que provee los términos para plantear sus problemas (por ejemplo, el de la medición), así como para comprender sus realizaciones básicas, como las experimentales (experimento de la doble rendija y de Stern-Gerlach, por ejemplo) y algunas aplicaciones de

interés moderno (en información cuántica). Todo esto enunciando el significado físico de los objetos matemáticos principales de la MC, a saber, los espacios vectoriales complejos y los operadores lineales.

En cuanto al uso de la HFC, abandona el estilo histórico dominante, que inaugura la MC con la radiación de cuerpo negro de Planck, pasa por el efecto fotoeléctrico de Einstein, el modelo atómico de Bohr, y finaliza en la ecuación de Schrödinger; en provecho de una historia crítica [4, 12], que toma como lecciones históricas los trabajos de físicos inconformes con la interpretación estándar de la MC, y que puede ordenarse desde el famoso artículo EPR, pasando por los comentarios que le hizo Bohm, y que encuentra en el teorema de Bell, y en los experimentos que le siguieron, una nueva agenda para los fundamentos de la mecánica cuántica.

Por último, relaciona los dominios cuántico y clásico de fenómenos, como coexistentes aunque irreductibles. Esta postura tiene la intención didáctica de enfatizar la nueva física que exhibe el dominio cuántico, que no puede ser descrita en términos clásicos; pero sin olvidar la autonomía del mundo clásico: entre los dominios hay pues una frontera y no tanto una barrera. En la práctica, y siguiendo las recomendaciones de la propuesta evita lo más posible referencias a conceptos clásicos, como hablar de las propiedades posición (q) y momento (p), es decir, de la idea de trayectoria; o de los modelos de onda o partícula, que no obstante su eficacia descriptiva de fenómenos clásicos, al día de hoy no hay claridad en cuanto a su estatus en el mundo cuántico.

Referencias bibliográficas

- Arriassecq, I. (2017). *Teoría especial de la relatividad para la escuela secundaria*. Editorial Académica Española.
- Bunge, M. (1983). *La investigación científica: su estrategia y su filosofía*. Editorial Ariel.
- Calderón, S., Núñez, P. A., Di Laccio, J., Iannelli, L. M., & Gil, S. (2015). Aulas-laboratorios de bajo costo, usando TIC. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 12(1), 212-226.
- Einstein, A. (1986). *Mi visión del mundo*. Tusquets Editores. España.
- Galilei, G. (1632). *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*. Diálogo sobre los dos máximos sistemas del mundo. G. B. Landini.
- Gamow, G. (2014). *El país de las maravillas*. Fondo de Cultura Económica.
- Holton, G. (1979). *La imaginación científica*. Fondo de Cultura Económica.
- Jaffe, B. (1961). *Michelson y la velocidad de la luz*. Editorial Universitaria de Buenos Aires (EUDEBA).
- Lorentz, H. A. (1909). *Theory of Electrons*. Leipzig, B. G. Teubner.
- Maxwell, J. C. (1998). *A treatise on electricity and magnetism*. Oxford University Press.
- Michelson, A. A., & Morley, E. W. (1886). Influencia del movimiento del medio en la velocidad de la luz. *American Journal of Science*, s3-31 (185), 377-385. <https://doi.org/10.2475/ajs.s3-31.185.377>.
- Newton, I. (1867). *Principios matemáticos de la filosofía natural*.
- Poincaré, H. (1944). *El legado de Henri Poincaré al siglo XX*. Editorial Losada.
- Kant, I. (1781/2005). *Crítica de la razón pura*. Editorial Taurus.
- Kuhn, T. S. (1978). *Segundos pensamientos sobre paradigmas*.: Editorial Tecnos.
- Tomás de Aquino, S. (1225-1274). *Suma teológica*. Biblioteca de Autores Cristianos (BAC).
- Truesdell, C. (1975). *Ensayos de historia de la mecánica*. Editorial Tecnos.