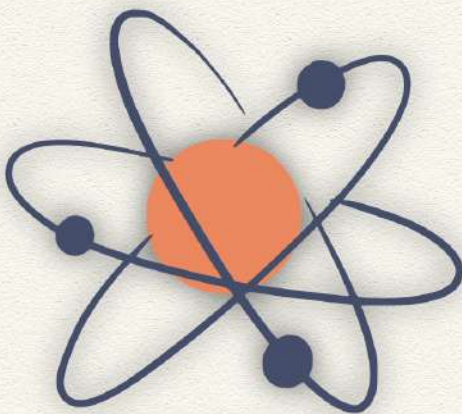


1º EDICIÓN

CONSTRUCTIVISMO FÍSICA Y FUTURO

VLADIMIRO JIJÓN SOLÓRZANO





Editorial QUEYAM Cía. Ltda

Pérez de Anda 01-180 y Castillo,
Ambato, Tungurahua, Ecuador
editorial@queyam.com

Autor: Vladimiro Jijón Solórzano

Carrera de Mecánica, Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas
jose.jijon@utelvt.edu.ec

Primera edición: 2026
ISBN: 978-9907-816-04-4

Director:	Diego Bonilla Jurado
Coordinadora editorial:	Sandra Chiluiza Siza
Corrección de Estilo:	José Ojeda Carrazco
Diseño y Maquetación:	Fernando Ortiz Betancourt

Mg. Andrés Hidalgo Velastegui
Docente e Investigador en Gestión Tecnológica

Mg. Edwin Ramos Zurita
Especialista en Tecnología, Inteligencia Artificial, Ciencia de Datos y Telecomunicaciones

CONSTRUCTIVISMO FÍSICA Y FUTURO

Vladimiro Jijón Solórzano



José Vladimiro Jijón Solórzano

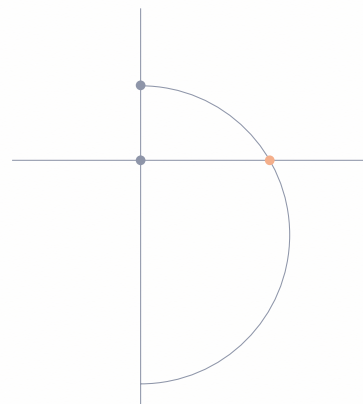
Ingeniero Mecánico | Magíster en Ciencias Técnicas | Docente universitario

Perfil profesional

Ingeniero Mecánico y Magíster en Ciencias Técnicas, con una amplia trayectoria en el ámbito de la docencia universitaria. Ha desarrollado su actividad académica principalmente en la Universidad Técnica de Esmeraldas “Luis Vargas Torres”, donde se desempeña como docente titular desde 1982.

Su experiencia académica se relaciona con la enseñanza de las ciencias físicas y la formación de profesionales de áreas técnicas, particularmente en Ingeniería Mecánica. Su trabajo integra aspectos de la Física, la formación científica, la epistemología y los enfoques constructivistas aplicados a la educación.

Es autor de obras académicas orientadas a la formación universitaria, entre ellas Máquinas de Flujo y Constructivismo, Física y Futuro, esta última enfocada en la relación entre la construcción del conocimiento científico, la enseñanza de la Física, su evolución histórica y las perspectivas tecnológicas futuras.





RESEÑA

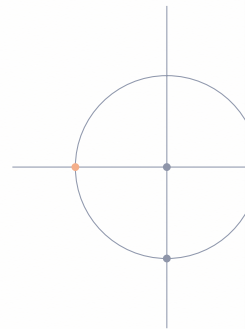
Constructivismo, Física y Futuro es una obra que propone una visión amplia e integradora de la Física, relacionando sus fundamentos científicos con la epistemología, la historia de la ciencia, la educación y las nuevas perspectivas tecnológicas. El libro parte de la idea de que aprender Física no consiste únicamente en memorizar leyes, fórmulas o procedimientos, sino en comprender los fenómenos, construir explicaciones, interpretar modelos y reconocer las condiciones en las que estos son aplicables.

A lo largo de sus capítulos, la obra presenta el conocimiento científico como una construcción histórica y dinámica, mostrando cómo las ideas sobre la naturaleza han evolucionado desde las primeras civilizaciones hasta la Física moderna. Este recorrido permite comprender que los conceptos científicos no surgieron de manera aislada, sino a través de la observación, la formulación de preguntas, la experimentación, la discusión y la transformación de modelos.

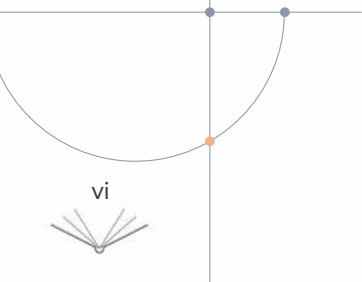
Uno de los ejes centrales del libro es el constructivismo aplicado a la enseñanza de la Física. Desde esta perspectiva, se plantea una participación más activa del estudiante en su proceso de aprendizaje, vinculando sus conocimientos previos con nuevas experiencias y situaciones problemáticas. El docente, por su parte, adquiere un papel de mediador que orienta la construcción y reorganización del conocimiento.

La obra también establece una relación entre la Física y la formación en Ingeniería Mecánica, procurando que las expresiones matemáticas mantengan su significado físico y puedan ser interpretadas en contextos reales. Finalmente, aborda las posibilidades futuras de la Física y su relación con áreas como la computación cuántica, los nuevos materiales, las energías limpias, la astrofísica, la física médica, la biofísica y la inteligencia artificial.

En conjunto, Constructivismo, Física y Futuro busca contribuir a una enseñanza científica más crítica, significativa y contextualizada, donde comprender, interpretar, cuestionar y aplicar el conocimiento sean elementos fundamentales de la formación profesional.



Constructivismo, Física y Futuro



ÍNDICE

PARTE I.

FUNDAMENTOS EPISTEMOLÓGICOS Y PEDAGÓGICOS

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación	6
1.2. Alcance	7
1.3. Objetivos	7
1.4. Metodología de desarrollo	8

2. CIENCIA, CONOCIMIENTO Y EPISTEMOLOGÍA

2.1. Ciencia, filosofía y modelo de realidad	11
2.2. El concepto de la verdad	14
2.3. Método científico	15
2.4. Modelos físicos interpretados mediante las matemáticas	17

3. CONSTRUCTIVISMO EN LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA

3.1. Historia del constructivismo	22
3.2. Constructivismo y la enseñanza tradicional	27
3.3. Filosofía de la ciencia	29
3.4. Limitaciones en la práctica	30

4. CONTEXTO EDUCATIVO CONTEMPORÁNEO

4.1. Errores conceptuales en el aprendizaje científico	35
4.2. Contexto educativo en Ecuador y América Latina	38
4.3. Factores socioculturales en el aprendizaje	41
4.4. Rol de las habilidades blandas	42
4.5. Propuesta pedagógica desde la cátedra de Física	44

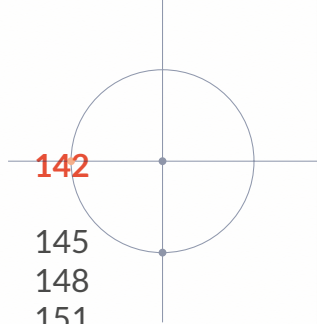
PARTE II.

EVOLUCIÓN HISTÓRICA Y CONCEPTUAL DE LA FÍSICA

5. LA FÍSICA EN LA ANTIGÜEDAD Y EDAD MEDIA

5.1. Física en otras culturas	53
5.1.1. Mesopotamia	54

5.1.2. Antiguo Egipto	55
5.1.3. China antigua	56
5.1.4. India antigua	57
5.1.5. Cultura maya	58
5.1.6. Implicaciones didácticas para la física	59
5.2. Grecia: nace el pensamiento racional	61
5.2.1. El paso al Logos	62
5.2.2. El atomismo	63
5.2.3. La física de Aristóteles	64
5.2.4. La edad de oro en Alejandría	65
5.2.5. Implicaciones didácticas para la física	66
5.3. Edad Media: entre la fe y la razón	67
5.3.1. Avances científicos	68
5.3.2. Tensiones institucionales y límites epistemológicos del conocimiento medieval	70
5.3.3. El motor del cambio: las universidades	72
5.3.4. Implicaciones didácticas para la física	73
6. REVOLUCIÓN CIENTÍFICA Y FÍSICA CLÁSICA	77
6.1. El método experimental de Galileo	78
6.2. El movimiento planetario de Kepler	79
6.3. La mecánica clásica de Newton	81
6.4. Nace el determinismo científico	85
7. DESARROLLO DE LA FÍSICA ENTRE LOS SIGLOS XVIII-XIX	91
7.1. Termodinámica	91
7.2. Electromagnetismo	97
7.3. Física de fluidos	101
7.4. Óptica	107
7.5. Impacto tecnológico	110
8. LA CRISIS DE LA FÍSICA CLÁSICA Y EL SURGIMIENTO DE LA FÍSICA MODERNA	117
8.1. Mecánica cuántica	118
8.2. Relatividad	125
8.2.1. Relatividad especial	131
8.2.2. Relatividad general	135



9. COSMOLOGÍA MODERNA

- 9.1. Modelo Estándar de Partículas
- 9.2. Teoría del Big Bang
- 9.3. Radiación de fondo
- 9.4. Materia y energía oscura

142

145
148
151
154

PARTE III.

APLICACIONES, FUTURO Y DIDÁCTICA

163

10. FUTURO DE LA FÍSICA

165

- 10.1. Computación cuántica
- 10.2. Física de los materiales y nanotecnología
- 10.3. Energías limpias y fusión nuclear
- 10.4. Astrofísica y cosmología
- 10.5. Física médica y biofísica
- 10.6. Inteligencia Artificial y física computacional
- 10.7. Retos y limitaciones

165
167
169
170
171
173
174

11. DIDÁCTICA DE LA FÍSICA DESDE EL CONSTRUCTIVISMO

180

- 11.1. Problemas de la enseñanza tradicional
- 11.2. Aprendizaje significativo
- 11.3. ¿Cómo integrar la historia, filosofía y matemática en la didáctica?
- 11.4. Estrategias didácticas
- 11.5. Evaluación del aprendizaje

180
182
184
186
192

12. CIERRE FINAL

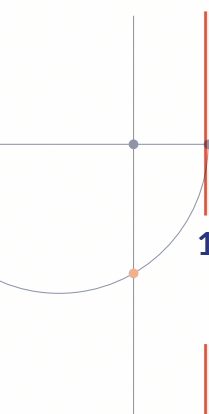
199

- 12.1. Conclusiones
- 12.2. Recomendaciones
- 12.3. Limitaciones del libro
- 12.4. Líneas de mejora
 - 12.4.1. Mejoras para estudiantes
 - 12.4.2. Mejoras para profesores

199
200
202
204
204
205

13. BIBLIOGRAFÍA

207



ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2-1: Distancia recorrida por un móvil con aceleración.	18
Ecuación 5-1: Ley de reflexión.	69
Ecuación 5-2: Distancia recorrida en función de la Velocidad Media.	70
Ecuación 6-1: Distancia recorrida por un objeto en caída libre.	79
Ecuación 6-2: Ecuación geométrica de la elipse.	80
Ecuación 6-3: Velocidad areolar.	80
Ecuación 6-4: Relación entre el periodo y el tamaño de la órbita.	81
Ecuación 6-5: Ley de la Gravitación Universal	82
Ecuación 6-6: Ley de la inercia.	83
Ecuación 6-7: Principio fundamental de la dinámica.	83
Ecuación 6-8: Ley de acción-reacción.	83
Ecuación 7-1: Equilibrio térmico entre tres cuerpos.	93
Ecuación 7-2: Energía interna de un sistema.	93
Ecuación 7-3: Formulación de la entropía.	94
Ecuación 7-4: Entropía de un sistema cuando la temperatura es cercana a cero.	94
Ecuación 7-5: Entropía según Boltzmann-Maxwell	95
Ecuación 7-6: Eficiencia de una máquina térmica.	96
Ecuación 7-7: La ley de Biot-Savart.	97
Ecuación 7-8: Ley de Faraday.	98
Ecuación 7-9: Ecuaciones de Maxwell.	99
Ecuación 7-10: Velocidad de las ondas electromagnéticas.	100
Ecuación 7-11: Ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento de un fluido.	101
Ecuación 7-12: Ecuaciones de Navier-Stokes	102
Ecuación 7-13: Principio de Pascal.	103
Ecuación 7-14: Incremento de presión en pascales	105
Ecuación 7-15: Potencia hidráulica expresada en vatios	105
Ecuación 7-16: Potencia de entrada	106
Ecuación 7-17: Condición de interferencia constructiva en el experimento de Young	107
Ecuación 7-18: Ley de Malus	109
Ecuación 8-1: Relación de Planck-Einstein.	118
Ecuación 8-2: El efecto fotoeléctrico de Einstein	119
Ecuación 8-3: Longitud de onda de Broglie.	122
Ecuación 8-4: Relación de indeterminación de Heisenberg	123
Ecuación 8-5: Ecuación de Schrödinger.	124
Ecuación 8-6: Factor de Lorentz.	127
Ecuación 8-7: Contracción de Lorentz.	127
Ecuación 8-8: Dilatación temporal.	129
Ecuación 8-9: Intervalo espaciotemporal.	130
Ecuación 8-10: Equivalencia masa-energía.	133
Ecuación 8-11: Ecuaciones de Campo de Einstein.	137
Ecuación 9-1: Ley de Hubble-Lemaître.	149

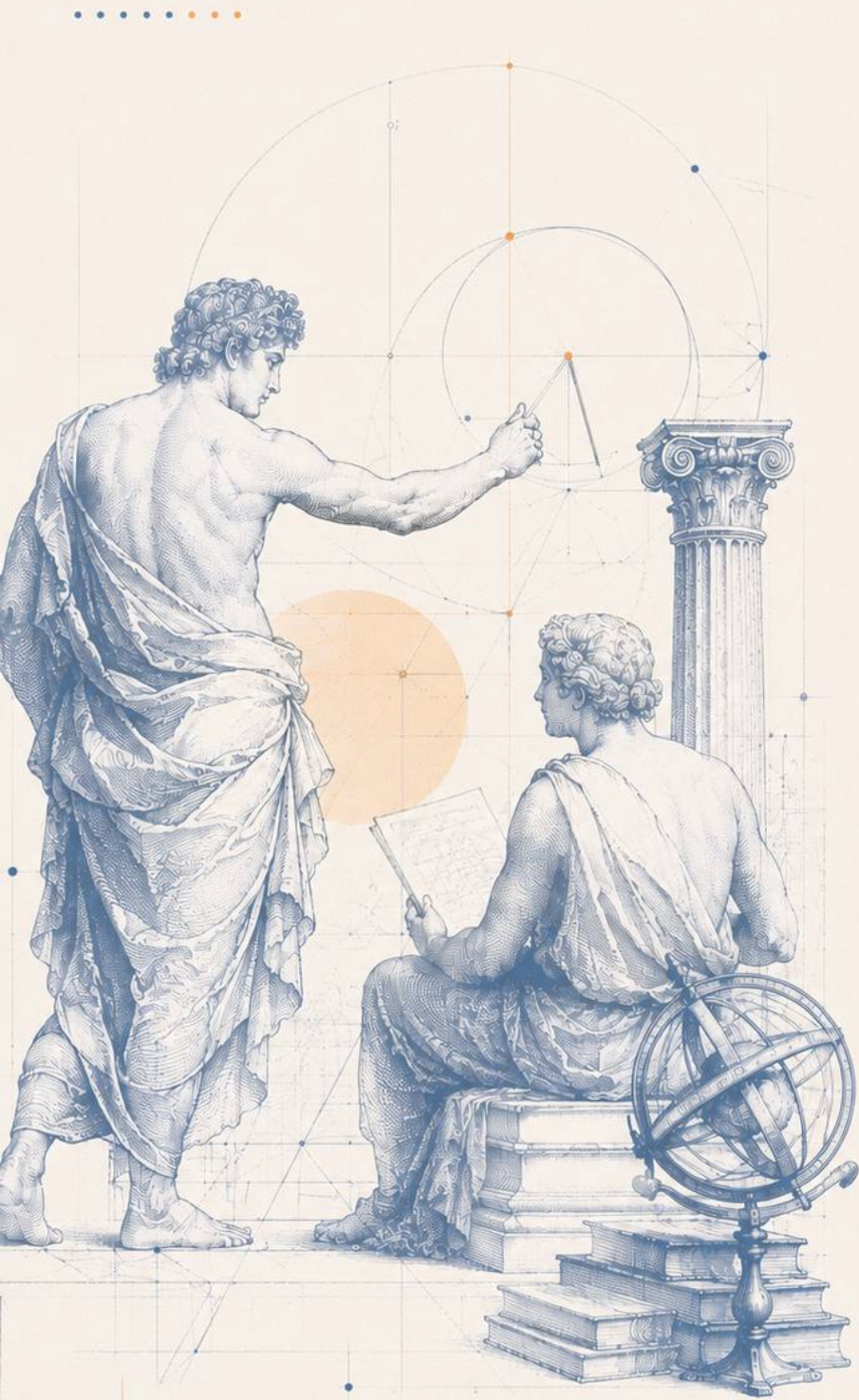
ÍNDICE DE TABLAS

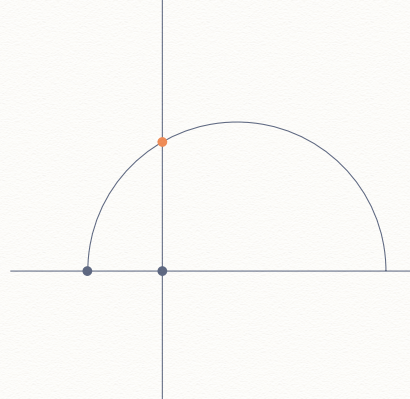
Tabla 2 1: Criterios de evaluación de las preguntas y ejercicios	20
Tabla 2-2: Nivel de desempeño de los estudiantes según su puntuación	21
Tabla 3-1: Comparación entre la enseñanza tradicional y el enfoque constructivista	28
Tabla 3-2: Matriz compacta de limitaciones del constructivismo en la física	31
Tabla 3-3: Criterios de evaluación de las preguntas y ejercicios	33
Tabla 4-1: Relación entre habilidades técnicas (hard skills) y habilidades blandas (soft skills) en la formación científica	43
Tabla 4-2: Criterios de evaluación de las preguntas y ejercicios	48
Tabla 5-1: Criterios de evaluación de las preguntas y ejercicios	75
Tabla 6-1: Aportes de Galileo, Kepler y Newton al desarrollo de la física clásica	85
Tabla 6-2: Criterios de evaluación de las preguntas y ejercicios	89
Tabla 7-1: Conceptos fundamentales para el estudio de la termodinámica	92
Tabla 7-2: Criterios de evaluación de las preguntas y ejercicios	114
Tabla 8-1: Fenómenos que evidenciaron los límites de la física clásica	117
Tabla 8-2: Conceptos fundamentales de la relatividad	131
Tabla 8-3: Criterios de evaluación de las preguntas y ejercicios	140
Tabla 9-1: Composición aproximada del universo según la misión Planck	155
Tabla 9-2: Criterios de evaluación de las preguntas y ejercicios	159
Tabla 10-1: Criterios de evaluación de las preguntas y ejercicios	178
Tabla 11-1: Integración operativa de la historia, filosofía y matemática en la didáctica de la física	185
Tabla 11-2: Secuencia didáctica constructivista para el estudio del movimiento	188
Tabla 11-3: Sistema evaluativo diversificado para la enseñanza de la física en contextos con limitaciones de infraestructura	194
Tabla 11-4: Criterios de evaluación de las preguntas y ejercicios	196

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Realidad, modelos y teoría en la construcción del conocimiento científico	13
Figura 2-2: Proceso de construcción del conocimiento científico	16
Figura 4-1: Estructura de los modelos mentales en física	36
Figura 4-2: Indicadores educativos en América Latina y el Caribe	40
Figura 4-3: Flujo operativo del ciclo de cambio conceptual y modelación matemática	45
Figura 5-1: Tablilla cuneiforme mesopotámica	54
Figura 5-2: Papiro de Rhind del Antiguo Egipto	55
Figura 5-3: Brújula primitiva china basada de piedra imán	56
Figura 5-4: Representación del cero en manuscrito indio	57
Figura 5-5: Observatorio maya "El Caracol" en Chichén Itzá	59
Figura 5-6: Pilares del pensamiento científico en la Antigua Grecia	62
Figura 5-7: El scriptorium como espacio de conservación y regulación del saber medieval	71
Figura 5-8: Universidad de Oxford	72
Figura 6-1: Representación del determinismo mecanicista	87
Figura 7-1: Ciclo de Carnot en un diagrama P-V	96
Figura 7-2: Curva característica para la bomba en estudio	104
Figura 7-3: El experimento de la doble rendija de Young	108
Figura 7-4: Hitos tecnológicos de la Revolución Industrial	112
Figura 8-1: Emisión de fotones en el modelo atómico de Bohr.	121
Figura 8-2: Deformación del espacio-tiempo por la masa terrestre	136
Figura 9-1: Diversidad de estructuras galácticas y estelares	143
Figura 9-2: Fenómenos de alta energía observados por el telescopio James Webb	144
Figura 9-3: El Modelo Estándar de Partículas elementales	147
Figura 9-4: Representación conceptual de la expansión y evolución del universo	150
Figura 9-5: Anisotropías del fondo cósmico de microondas observadas por Planck	153
Figura 9-6: Lente gravitacional como evidencia indirecta de materia oscura	156

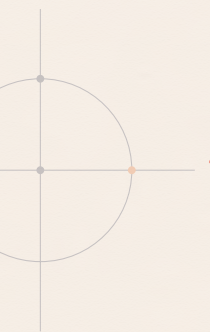






PARTE I.

FUNDAMENTOS EPISTEMOLÓGICOS Y PEDAGÓGICOS



1. INTRODUCCIÓN

La física sostiene buena parte de la formación técnica. Sus modelos permiten interpretar fenómenos, delimitar variables y anticipar el comportamiento de sistemas cuyo análisis exige algo más que destreza operativa. En carreras como Ingeniería Mecánica, ese conocimiento interviene al estudiar fuerzas, movimientos, transferencia de energía, fluidos, materiales y mecanismos que se ven normalmente en la industria. Esta obra se dirige a estudiantes universitarios de áreas técnicas, en especial, de Ingeniería Mecánica y a docentes interesados en los fundamentos históricos, epistemológicos y pedagógicos del conocimiento físico. El problema que guía la redacción de este libro se puede resumir en la siguiente pregunta: ¿cómo articular conceptos, ecuaciones y aplicaciones reales sin reducir el aprendizaje a una rutina de cálculo?

La reducción todavía ocurre. En numerosos entornos universitarios, particularmente en países en desarrollo como lo es Ecuador, la asignatura se organiza alrededor de fórmulas, ejercicios y procedimientos que deben reproducirse de manera mecánica por un libro o sílabo. Ese método puede producir respuestas correctas sin que exista una interpretación clara del fenómeno físico estudiado. Cuando se pierde el vínculo con la experiencia, el entorno y las preguntas que originaron cada modelo, aparecen vacíos conceptuales difíciles de corregir. La confusión, la desmotivación y el escaso interés no proceden necesariamente de la complejidad de la materia; con frecuencia nacen de una práctica pedagógica por parte del profesor que separa el cálculo de su significado.

La preparación profesional exige una integración distinta. El dominio técnico conserva su lugar, pero necesita coexistir con la interpretación, el cuestionamiento y el análisis contextual de los resultados. Aplicar una ecuación resuelve una parte del problema. Comprender por qué funciona, qué supuestos contiene y cuándo deja de ser válida permite tomar decisiones con mayor rigor. La formación científica adquiere consistencia cuando el futuro profesional reconoce tanto la utilidad de un modelo como sus límites.





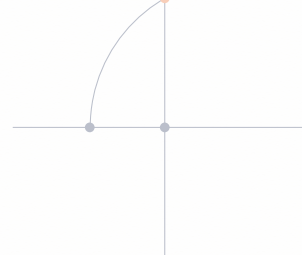
Las limitaciones de este enfoque tradicional han sido estudiadas por la investigación en educación científica. Todavía persisten modelos pedagógicos que sitúan al estudiante como receptor de explicaciones terminadas, con escaso margen para formular hipótesis, contrastar ideas o justificar resultados. El aprendizaje queda condicionado por la repetición. Bajo este marco, Mestre et al. (2011) han señalado que la enseñanza de la física continúa centrada en la resolución algorítmica de problemas, dejando de lado la interpretación conceptual que da sentido a las ecuaciones.

Entre los principales problemas identificados se encuentran:

- Predominio de metodologías tradicionales centradas en la memorización de contenidos.
- Énfasis excesivo en la resolución mecánica de ejercicios sin comprensión conceptual.
- Desarticulación entre el formalismo matemático y la interpretación física.
- Persistencia de concepciones erróneas previas en los estudiantes.
- Escasa integración del contexto histórico y filosófico de la ciencia.
- Débil desarrollo del pensamiento crítico durante el aprendizaje.

El efecto se extiende más allá del aula. Si el conocimiento solo puede utilizarse en ejercicios semejantes a los resueltos durante la clase, su transferencia hacia problemas reales queda seriamente restringida. McDermott & Redish (1999) sostienen, desde el campo de la investigación en educación en física, que muchos estudiantes terminan sus cursos con vacíos significativos en conceptos esenciales. No se trata únicamente de una dificultad cognitiva. Las prácticas pedagógicas, la organización de los contenidos y el tipo de problemas propuestos también intervienen. Una preparación sólida articula comprensión conceptual, formalismo matemático, experimentación y reflexión crítica para que el conocimiento pueda emplearse fuera del ejercicio convencional.





Matemáticas y física forman una relación inseparable. Las primeras permiten expresar leyes, construir modelos, vincular variables y calcular la respuesta de un sistema ante determinadas condiciones. El conflicto aparece cuando la manipulación simbólica reemplaza la interpretación. En Ingeniería Mecánica, por ejemplo, las ecuaciones de movimiento permiten calcular la posición, la velocidad y la aceleración de un pistón; aun así, obtener valores numéricos correctos no demuestra que se comprenda cómo la geometría del mecanismo, la fuerza aplicada y la interacción entre sus componentes determinan el movimiento real. El cálculo aislado describe poco o nada útil.

Interpretar exige algo más que solo repetir ejercicios. Cada variable posee un significado físico, una unidad y un campo de validez que condicionan el uso de la ecuación. También existen supuestos que suelen permanecer ocultos durante la resolución rutinaria: ausencia de fricción, rigidez ideal, aceleración constante o comportamiento lineal, entre otros. La literatura especializada muestra que algunos estudiantes ejecutan procedimientos matemáticos correctamente, pero no consiguen explicar el sentido físico de sus resultados (Redish, 2003). Esa ruptura entre operación e interpretación debilita la comprensión conceptual.

La historia modifica la lectura que se le da a la relación de las ecuaciones. Las leyes físicas no aparecieron de manera simultánea ni surgieron al margen de conflictos intelectuales, instrumentos disponibles y problemas concretos. Cada modelo respondió a preguntas formuladas en una época particular y bajo determinadas condiciones culturales, sociales y epistemológicas que iban variando constantemente. Presentar la ciencia como un repertorio acabado borra ese proceso. También oculta los errores, controversias y límites que obligaron a revisar explicaciones aceptadas durante siglos.

Sin perspectiva histórica, la ciencia parece inmóvil. Se dificulta reconocer cómo se valida una teoría, por qué ciertos modelos fueron sustituidos y qué aspectos permanecen abiertos a discusión. La física no constituye una suma de verdades definitivas, sino una construcción sometida a prueba, contraste y reformulación permanen-





te. Examinar su trayectoria histórica y sus fundamentos filosóficos permite comprender con mayor precisión el alcance de las teorías, las condiciones que sostienen sus resultados y las razones técnicas que justificaron sus transformaciones.

1.1. Justificación

Enseñar física en la universidad arrastra fallas severas que obligan a repensar los modelos vigentes, un panorama crítico si miramos a los países en desarrollo. Centrar el esfuerzo en memorizar datos o resolver problemas con recetas de cálculo fragmenta el aprendizaje de raíz. El alumno saca resultados válidos, pero no entiende qué pasa detrás de la ecuación. Esto lleva a que su utilidad real se desplome. Cuando la matemática se separa del concepto, las leyes físicas pierden sentido teórico y se vuelven meras listas de pasos mecánicos, imposibles de aplicar frente a los desafíos cotidianos de la vida real.

Esta desconexión deja ver un vacío innegable en los libros de texto que usan las carreras técnicas, siendo una división incómoda. Por un lado, manuales clásicos e indiscutibles para el cálculo cuantitativo (como Serway (Serway & Jewett, 2018), Resnick (Halliday et al., 2014) o Sears (Sears et al., 2018)) amontonan ejercicios operativos sin conceder espacio a la historia conceptual ni a los supuestos filosóficos. Por el otro, la literatura sobre didáctica pura bucea en estrategias de aula o teorías cognitivas, pero deja fuera el rigor formal que exige la ingeniería y obvia los problemas reales. Hay un abismo editorial: rigor analítico sin pedagogía versus propuestas didácticas que suavizan el peso matemático.

Este libro camina justo en medio de ese bache. La meta no es quitar del camino a los textos tradicionales ni a los manuales de didáctica, sino edificar un puente para amarrar el formalismo matemático, la ciencia rigurosa, la evolución histórica y el constructivismo en un solo cuerpo formativo. La física deja de ser aquí un dogma inamovible para entenderse como una herramienta viva, sujeta a límites de validez. Este cambio calza con las exigencias actuales de la educación tecnológica. Al fin y al cabo, dominar una fórmula sirve de muy poco si falta el



análisis conceptual, el criterio propio y la capacidad para transferir lo aprendido al campo laboral.

1.2. Alcance

La carrera de Ingeniería Mecánica en la Universidad Técnica “Luis Vargas Torres” de Esmeraldas (UTELVT) constituye el marco de aplicación exclusivo para este trabajo. Su desarrollo responde a una intención doble: estructurar un libro de texto guía y ofrecer un soporte real al diseño curricular de la institución. Aquí los contenidos huyen de la clásica exposición aislada de fórmulas. El enfoque metodológico adoptado prefiere amarrar cada concepto con su evolución histórica o sus condiciones de origen. Esto fuerza al estudiante a seguir de cerca el proceso intelectual detrás de las leyes físicas, atacando de frente esa fractura tan común que suele separar la teoría de la práctica en el aula.

Fuera de los límites del temario convencional, el texto abre espacio para discutir el impacto real de la física en tecnologías de punta. Temas como inteligencia artificial (IA), física médica, computación cuántica o ciencia de materiales entran en el debate de forma directa. No se intenta, bajo ningún supuesto editorial, sustituir la literatura especializada de cada una de estas disciplinas complejas. La meta es otra. Interesa construir un piso conceptual robusto que sirva al alumnado para leer y descifrar críticamente los avances modernos a partir de leyes fundamentales. En última instancia, la obra funciona como un apoyo curricular orientado a consolidar el juicio crítico en la formación de ingenieros.

1.3. Objetivos

Objetivo general:

Desarrollar un enfoque integral enfocado en la comprensión significativa de la física mediante la articulación del rigor científico, el formalismo matemático y la reflexión histórico y filosófica, buscando consolidar el pensamiento crítico junto con su aplicación en escenarios sociales contemporáneos dentro de la carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica “Luis Vargas Torres” de Esmeraldas.





Objetivos específicos:

- Articular los fundamentos epistemológicos del constructivismo dentro del proceso de enseñanza de la física, estructurando de forma sistemática la evolución histórica y filosófica de la ciencia durante el desglose de los conceptos físicos centrales.
- Operacionalizar los conceptos fundamentales de la física a través de su modelado matemático riguroso, determinando variables, límites de validez y sentido físico para erradicar el reduccionismo operativo y robustecer el análisis conceptual del alumnado.
- Evaluar el impacto de la física en los avances científico y tecnológicos actuales, examinando casos concretos en inteligencia artificial, física médica, computación cuántica, astrofísica y ciencia de materiales para demostrar su rol en la transformación social.

1.4. Metodología de desarrollo

Escribir esta obra exigió un proceso académico estricto. Era necesario amarrar la ciencia pura, el formalismo matemático y el devenir histórico dentro de las aulas. Por eso, el trabajo arrancó con un rastreo bibliográfico de fondo: se revisaron repositorios indexados, monografías de especialidad y los clásicos manuales de física general que inundan el mercado universitario. Interesaba mapear el nacimiento de cada concepto, rastrear las transformaciones de los modelos conceptuales y ubicar los cuellos de botella pedagógicos más recurrentes evitando elecciones al azar. La selección definitiva incluyó únicamente materiales con un respaldo científico incuestionable, consistencia teórica y utilidad directa para el plan de estudios de Ingeniería Mecánica en la UTELVT de Ecuador.

El filtro aplicado a los documentos fue realmente estricto. Cada texto pasó por un tamiz riguroso que evaluó la claridad de los planteamientos, la trazabilidad de los datos y el aporte real al proyecto. Para la física moderna, campo en constante cambio, se priorizaron artículos de impacto reciente y reportes de organismos científicos globales; en cambio, los textos antiguos se preservaron solo si resultaban vitales para explicar el origen de una



ley. Se limpió el camino descartando de golpe materiales sin autoría clara, datos dudosos, explicaciones flojas de sustento o literatura redundante que no añadía nada a la discusión. De esta depuración quedó una base documental sólida, idónea para sostener la carga técnica y pedagógica del manuscrito.

La distribución de los contenidos respondió a tres pilares en interacción constante. El primero es el frente epistemológico, encargado de hurgar en el origen de las ideas y en las disputas filosóficas que las moldearon, mostrando la ciencia como un saber vivo y refutable. El segundo bloque se enfoca en el rigor analítico. Aquí las ecuaciones jamás aparecen solas; se exponen junto a sus variables, unidades de medida, restricciones y significado real en el plano físico para evitar el cálculo a ciegas. Por último, el pilar tecnológico aterriza las teorías en problemas mecánicos tangibles y áreas de vanguardia como la computación, los nuevos materiales, la medicina y la energía. El cruce de estos tres frentes marcó la pauta para ordenar los capítulos de forma progresiva.

Toda la redacción del libro sigue una lógica constructivista real. Los saberes que el alumno ya posee sirven de trampolín para introducir las nociones nuevas, usando problemas prácticos que aten la matemática con la realidad del ejercicio profesional en ingeniería. Una ecuación no es un fin para sacar un número en un examen. Se desarmó cada fórmula para analizar el sistema mecánico que representa, entendiendo qué pasa si cambian sus variables. Interesa un aprendizaje útil para argumentar y resolver en el campo laboral. Para cerrar el ciclo, el manuscrito se validó mediante mesas de trabajo técnicas con los docentes de física de la UTELVT. En estas reuniones se pulió la precisión de las fórmulas, la secuencia temática y el lenguaje visual, incorporando las críticas de los profesores en versiones sucesivas hasta lograr un texto cohesionado.





2. CIENCIA, CONOCIMIENTO Y EPISTEMOLOGÍA

Objetivos de Aprendizaje del Capítulo

Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

- » Analizar la relación entre observación, teoría y modelo científico, reconociendo que el conocimiento físico se construye mediante interpretación y no solo por acumulación de datos.
- » Evaluar los límites de la verdad científica, diferenciando entre una verdad absoluta y una teoría válida bajo determinadas condiciones.
- » Crear una interpretación conceptual de un modelo físico sencillo, identificando variables, supuestos, condiciones de validez y límites de aplicación.

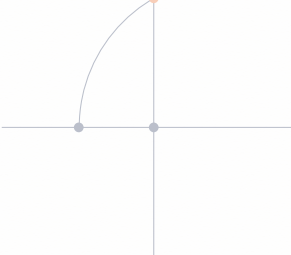
Introducción

La ciencia no posee un carácter inmutable. Su andamiaje teórico responde, más bien, a una dinámica en constante transformación. Lejos de acumular certezas, la actividad investigativa busca descifrar los fenómenos naturales formulando hipótesis preliminares, modelos matemáticos y diseños de contraste en el laboratorio. Las verdades absolutas son inexistentes en este campo. La fortaleza de la disciplina radica justamente en eso: construir explicaciones provisionales, esquemas conceptuales propensos a la revisión y al ajuste sistemático a medida que aparecen datos empíricos nuevos.

Esta práctica, estructurada y profundamente crítica, requiere observar y medir variables. Sin embargo, depende por completo de los sesgos conceptuales que maneja el investigador. Lederman (2007) al examinar la epistemología¹ de la ciencia, deja en claro que la observación no constituye un proceso neutro. Al contrario. Los marcos teóricos del observador condicionan la lectura e interpretación de los datos recogidos. Las estructuras cognitivas previas terminan moldeando el análisis de la realidad. El saber científico no brota de la simple recolección de hechos; nace del choque directo entre la teoría y la experiencia en el aula. Por ende, aprender física va más allá de memorizar contenidos acumulados, esta exige desarmar la lógica detrás de la producción de dicho conocimiento.

¹Epistemología: Rama de la filosofía que estudia la naturaleza, el origen y la validez del conocimiento científico.





Llevar este enfoque a las aulas universitarias es una tarea urgente. La enseñanza de la física no puede seguir atrapada en el adiestramiento ciego de fórmulas de memoria. El panorama cambia cuando el estudiantado comprende que las leyes físicas arrastran un devenir histórico complejo, colmado de controversias y validaciones experimentales. Es ahí donde despierta el pensamiento reflexivo. La materia pierde su rol de catálogo operativo y pasa a ser una herramienta analítica para decodificar el entorno real. Este giro metodológico encaja de forma precisa con los fundamentos pedagógicos del constructivismo.

P.1

2.1. Ciencia, filosofía y modelo de realidad

La ciencia no se desarrolla en un vacío. Está basada en suposiciones filosóficas que nos ayudan a entender el mundo. Conceptos como la causalidad, la objetividad y la realidad no son solo científicos. Forman parte de una tradición filosófica que influye en la forma en que creamos teorías físicas. La física no solo describe fenómenos con ecuaciones. También nos ayuda a interpretar la realidad. Esto significa que cada teoría científica está relacionada con una forma particular de entender el mundo.

Los modelos científicos son representaciones de la realidad, no la realidad misma. Nos permiten simplificar fenómenos complejos, encontrar relaciones entre variables y hacer predicciones bajo ciertas condiciones. Sin embargo, estos modelos tienen limitaciones debido a las suposiciones en las que se basan. Giere (2010) sostiene que la precisión de los modelos científicos depende de su capacidad para representar datos específicos. Según él, los modelos son contruidos desde una perspectiva particular y se basan en suposiciones teóricas que no pueden probarse directamente. Por lo tanto, ofrecen una visión del mundo ajustada a una perspectiva teórica específica.

Juntar ciencia y filosofía deja clara una cosa: observar la naturaleza no basta para construir conocimiento, hacen falta conceptos de fondo. Las teorías jamás brotan solas ni de golpe al mirar los datos de un experimento; exigen una guía teórica previa. Chalmers (2013, p. 38) desarma justamente ese mito común que pretende fundar el saber científico solo en hechos objetivos, cuando no es así.





Su postura es tajante y demuestra que esa idea no tolera un examen minucioso. Para este autor, las leyes de la física no brotan de los datos mediante deducciones lógicas automáticas, al contrario, demandan un armazón conceptual previo que dé sentido a la experiencia vivida en las aulas.

Esta perspectiva tumba la creencia en recetas universales para extraer leyes directamente de la realidad visible. Hacer ciencia obliga a tomar decisiones de método, cargar suposiciones y reconocer que el contexto histórico pesa. Justo ahí es donde los lazos entre física y filosofía se vuelven vitales para descifrar el entorno. El argumento de Chalmers (2013) fuerza a mirar la disciplina como una estructura en movimiento constante ya que la realidad no se copia, se interpreta y esa interpretación pasa por usar modelos conceptuales que cambian de raíz a medida que pasa el tiempo.

La omisión de este trasfondo epistemológico al momento de enseñar física acarrea el peligro de instaurar una visión reduccionista; un escenario donde las ecuaciones matemáticas terminan por concebirse como verdades de carácter absoluto, desplazando del aula el examen crítico referente a las limitaciones de los modelos representados. De tal distorsión metodológica se deriva la dificultad de los universitarios para asimilar los mecanismos reales que rigen la producción del saber científico, lo cual entorpece, simultáneamente, la delimitación de las fronteras operativas de las leyes físicas analizadas de forma cotidiana. Una tendencia que tiene un contrapeso oportuno en la inserción explícita de la dimensión filosófica, cuya utilidad se basa en exhibir los modelos como construcciones conceptuales de naturaleza dinámica: herramientas diseñadas para resolver problemas puntuales y susceptibles de experimentar mutaciones profundas (o sustituciones de raíz) ante la emergencia de marcos teóricos o evidencias empíricas renovadas.

La conversión de una percepción sensorial en un concepto abstracto de la física define la secuencia metodológica expuesta en la Figura 2-1. Mediante dicho esquema queda descartada la asimilación pasiva de la realidad, entendiéndose la labor científica como una



Figura 2-1: Realidad, modelos y teoría en la construcción del conocimiento científico



Fuente: Elaboración propia

formulación de modelos y teorías bajo el influjo directo de corrientes filosóficas. El gráfico, visto desde las bases de la enseñanza constructivista, actúa como un soporte conceptual que enlaza las vivencias empíricas del universitario con el formalismo matemático de las leyes físicas. La desarticulación temática disminuye drásticamente al mostrar las conexiones existentes entre experimento, abstracción e interpretación. Este diseño didáctico da paso a una situación idónea para una reorganización estructural en los esquemas mentales del alumnado, quien tiene el deber de entender el concepto físico para poder explicar los problemas cotidianos de su vida.

Entender la relación entre la ciencia, la filosofía y cómo vemos el mundo es importante. Nos ayuda a entender mejor lo que sabemos sobre el mundo físico. También hace que los estudiantes piensen de manera más crítica. Cuando reconocemos que las teorías científicas dependen del contexto en el que se crearon, nos volvemos más reflexivos. Aprender Física no es solo aplicar fórmulas, sino también entender qué significan, cuáles son sus límites y cómo ayudan a entender el mundo científico.





2.2. El concepto de la verdad

La definición de verdad científica constituye un problema central y un eje de debate recurrente a lo largo del desarrollo histórico de las disciplinas académicas. Fuera del ejercicio de la investigación queda, de este modo, cualquier postura que pretenda otorgar a dicho concepto un carácter estático (o absoluto); la validez del saber opera más bien como una construcción teórica cimentada en la evidencia empírica, la coherencia interna de sus postulados y la respuesta predictiva ante los fenómenos naturales. Las teorías de la física, lejos de actuar como dogmas inamovibles, configuran simples aproximaciones conceptuales útiles para describir entornos específicos de la realidad bajo condiciones coherentemente delimitadas.

En la actualidad, la filosofía de la ciencia considera que la verdad científica se relaciona más con la capacidad de los modelos para explicar los hechos y ser útiles que con una representación exacta del mundo. En este sentido, bajo una traducción textual, van Fraassen (1980) presentó una idea influyente al decir:

“La ciencia aspira a darnos teorías que sean empíricamente adecuadas; y aceptar una teoría implica creer únicamente que es empíricamente adecuada, es decir, que lo que dice acerca de los fenómenos observables es verdadero” (van Fraassen, 1980, p. 12).

La forma en que entendemos el valor de una teoría científica es muy importante. No se trata de si es absolutamente cierta o no, sino de si puede describir correctamente los fenómenos que observamos en ciertas situaciones. De esta manera, la verdad en la ciencia se entiende como una relación entre la teoría y las pruebas, en lugar de una afirmación definitiva sobre la realidad.

En Física, esto se ve claro cuando se analizan teorías que han cambiado o sido reemplazadas con el tiempo. La mecánica clásica, por ejemplo, es muy precisa en algunos contextos, pero no funciona bien en escalas muy



grandes o muy pequeñas. Esto no significa que sea completamente incorrecta, sino que solo es válida en ciertas condiciones. Los expertos en filosofía de la ciencia han dicho que las teorías deben verse como modelos que representan la realidad de diferentes maneras. Esto muestra que la verdad depende del contexto y del marco teórico que se use (Psillos, 2011).

En la educación, entender mal la idea de verdad puede hacer que sea muy difícil aprender Física. Si se presentan las leyes científicas como verdades absolutas, los estudiantes no pueden cuestionar, analizar y comprender los límites del conocimiento. Reconocer que la verdad científica puede cambiar ayuda a desarrollar el pensamiento crítico. Los estudiantes entienden que la ciencia es un proceso que está en constante evolución. Esto se alinea con la idea de que el aprendizaje es una construcción activa del conocimiento basada en la interpretación, las pruebas y el análisis.

Por lo tanto, debemos tener cuidado al hablar sobre la verdad en la ciencia. La física y las matemáticas no buscan establecer verdades absolutas, sino desarrollar modelos que expliquen mejor la realidad. Esto permite a los estudiantes desarrollar una visión más crítica y reflexiva del conocimiento científico, reconociendo tanto su poder explicativo como sus limitaciones.

2.3. Método científico

En los colegios, el método científico se presenta casi siempre como una secuencia de pasos definidas: observar un hecho, armar una hipótesis, hacer el experimento y obtener una conclusión de los resultados. La investigación universitaria real dista mucho de esa secuencia lineal. Lejos de seguir un camino único, la construcción de la ciencia opera como un proceso iterativo, un circuito de ida y vuelta donde los investigadores corrigen y pulen sus ideas de forma constante. Las hipótesis, en este escenario real, no brotan simplemente de mirar la naturaleza con ojos neutrales, al contrario: se construyen usando los modelos teóricos que el científico ya tiene en mente, dejando en claro que la teoría y la práctica en el laboratorio dependen por completo la una de la otra.

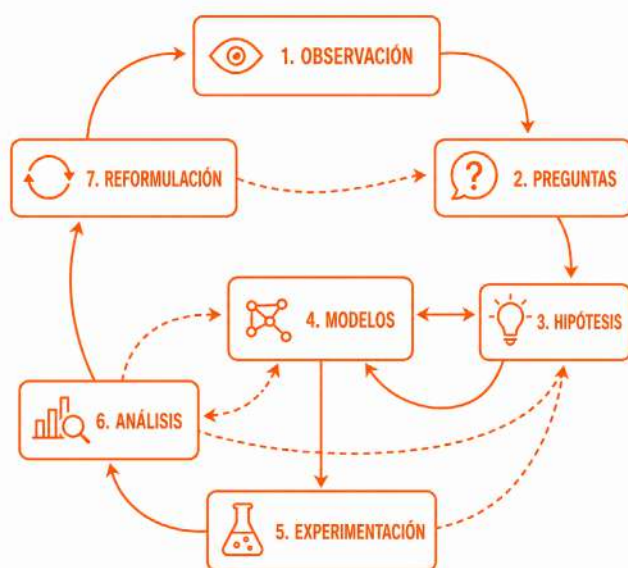




El método científico es un proceso que se repite una y otra vez. Se crean modelos, se experimenta y se revisa críticamente. Todo esto se hace de manera continua. Un libro de Lederman, publicado en el año 2007, explica que entender el método científico de esta manera nos permite ver la ciencia de una forma más realista. Esto nos ayuda a superar la idea simplificada que a menudo se enseña en las aulas. La ciencia no sigue un solo procedimiento fijo, sino que se adapta a cada problema, contexto y recurso disponible. Esto se muestra en la Figura 2-2. La ciencia es creativa y se construye poco a poco.

Nota metodológica: El diseño del diagrama traduce la producción del conocimiento físico como un flujo dinámico estructurado en pasos correlativos, donde el avance lineal del bloque 1 hacia el 2, y así sucesivamente, queda señalado por las flechas de dirección única. No obstante, las conexiones bidireccionales introducen un matiz interactivo al permitir el intercambio simultáneo de información entre bloques específicos (bloque 3 y 4 o bloque 4 y 6). Las líneas continuas trazan la ruta principal del proceso, mientras que las líneas entrecortadas habilitan caminos alternativos secundarios que pueden existir en el proceso. Esta distinción gráfica demuestra que la construcción de la ciencia no arranca forzosamente de la observación; es perfectamente viable iniciar el ciclo desde modelos, hipótesis o experimentaciones previas orientadas a la formulación de teorías nuevas o a la ejecución de reformas conceptuales.

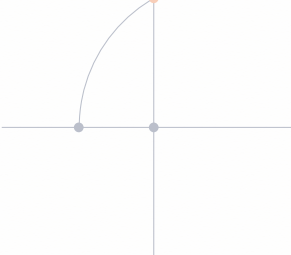
Figura 2-2: Proceso de construcción del conocimiento científico



Fuente: Elaboración propia.

Este ciclo empieza con la observación y luego se formulan preguntas que cuestionan lo que ya se conoce. Esto lleva a crear hipótesis que son bases para desarrollar modelos conceptuales y matemáticos. Estos modelos son clave, ya que guían la experimentación y se perfeccionan con ella. El análisis de los resultados es un momento importante, pero no es el final. A menudo, el científico se siente motivado para revisar sus modelos o hipótesis iniciales. La reformulación de teorías cierra un ciclo o inicia otro, mostrando que cada conclusión lleva a nuevas observaciones.





La enseñanza de la Física requiere comprender el método científico como un proceso dinámico. Esto ayuda a desarrollar el pensamiento crítico. Cuando los estudiantes entienden que el conocimiento se construye mediante prueba, error, ajuste y reinterpretación, se fomenta una actitud más reflexiva hacia el aprendizaje. De esta manera, las ciencias dejan de verse como procedimientos fijos y se vuelven actividades intelectuales en constante evolución.

2.4. Modelos físicos interpretados mediante las matemáticas

La construcción de modelos físicos con matemáticas es algo muy importante en Física. Esto se debe a que permite representar fenómenos naturales de manera cuantitativa, es decir, mediante relaciones entre variables. Un modelo físico no intenta reproducir la realidad en todos sus detalles, sino que selecciona los elementos más importantes de un fenómeno para describirlo, explicarlo y predecir cómo se comportará en ciertas situaciones.

En este sentido, cuando se crea un modelo científico, se deben abstraer, idealizar y establecer relaciones entre magnitudes que se pueden observar. Giere mencionó en el año 2010 que el uso de modelos permite conectar la teoría con la experiencia, siempre y cuando el estudiante entienda que estos modelos son aproximaciones y no copias exactas de la realidad.

Un ejemplo claro y sencillo para poder entender este proceso es el Movimiento Rectilíneo Uniformemente Acelerado (MRUA); en este ejemplo y el resto del libro, las unidades se definirán en el Sistema Internacional de Unidades (SI). Primero se **observa un fenómeno**: un cuerpo que se desplaza en línea recta y cuya velocidad cambia de manera constante con el tiempo. Luego se **identifican las variables relevantes**: la posición final x_f (m), la posición inicial x_0 (m), la velocidad inicial v_0 (m/s), la aceleración constante a (m/s²) y el tiempo t (s). A partir de la definición de aceleración como variación de la velocidad en el tiempo, se obtiene que la velocidad cambia según $v_f = v_0 + at$. Si además se reconoce que la **posición depende de cómo varía la velocidad** durante el movimiento, se llega a la expresión:





Ecuación 2-1: Distancia recorrida por un móvil con aceleración.

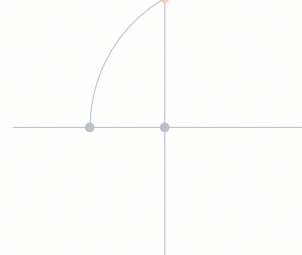
$$x_f = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2$$

Esta ecuación describe la posición de un cuerpo en cualquier instante cuando se mueve con aceleración constante. El término x_0 indica desde dónde inicia el movimiento; $v_0 t$ representa el desplazamiento que tendría si conservara su velocidad inicial; $y \frac{1}{2} a t^2$ incorpora el efecto acumulado de la aceleración sobre el desplazamiento. Sin embargo, **este modelo es válido solo bajo condiciones determinadas:** trayectoria rectilínea, aceleración constante y ausencia de efectos externos significativos, como resistencia del aire o variaciones de fuerza. Por ello, el valor del modelo no está únicamente en calcular, sino en comprender qué fenómeno representa y cuáles son sus límites.

El estudio de la desaceleración de un vehículo de carga mediante frenos de disco (o el frenado en el cigüeñal de un motor) ejemplifica estas restricciones dentro de la ingeniería mecánica. Al iniciar un diseño, el uso de las ecuaciones del MRUA se acepta como una aproximación útil, una condición sujeta a que el intervalo de tiempo sea lo bastante breve para asumir que la fuerza de fricción entre pastillas y disco permanece constante, ignorando las alteraciones térmicas que modifican el rozamiento. No obstante, si el proceso de frenado se prolonga o la velocidad operativa resulta muy elevada, la resistencia aerodinámica de la estructura (cuya magnitud crece de forma cuadrática respecto a la velocidad) destruye el escenario de aceleración constante. Ante tal escenario, el diseñador se ve obligado a descartar este modelo simplificado para introducir ecuaciones diferenciales capaces de integrar las fuerzas dinámicas verdaderas que actúan en el entorno real.

Es importante que los que estudien o trabajen en el ámbito de las ciencias Físicas tengan bien claro cómo se produce el modelo físico (como en el ejemplo anterior), aunque este conocimiento no asegure que se haga una correcta interpretación o construcción del modelo, es por esto que el autor recomienda:





- Observar primero el fenómeno físico, antes de buscar una ecuación aplicable.
- Identificar las variables relevantes, diferenciando entre magnitudes conocidas, desconocidas y constantes.
- Definir las unidades de cada variable, para evitar errores dimensionales.
- Reconocer los supuestos del modelo, como ausencia de fricción, aceleración constante o sistema idealizado.
- Verificar la coherencia dimensional de la ecuación obtenida.
- Interpretar físicamente cada término matemático, evitando resolver de forma mecánica.
- Comparar el resultado con la realidad, preguntándose si el valor obtenido tiene sentido físico.
- Reconocer los límites del modelo, pues toda ecuación describe un fenómeno dentro de condiciones específicas.

P.1

FUNDAMENTOS EPISTEMOLÓGICOS Y PEDAGÓGICOS

Sección pedagógica

Preguntas de Reflexión Crítica

1. Cuando observas un fenómeno físico, ¿lo interpretas tal como es o lo haces desde ideas previas, experiencias y modelos que ya tienes incorporados?
2. Si una teoría física deja de funcionar en ciertos contextos, ¿eso significa que era falsa o que tenía un campo de validez limitado?
3. ¿Qué podría ocurrir en una decisión de ingeniería si se aplica una ecuación correcta, pero se ignoran los supuestos que permiten usarla?

Ejercicios Prácticos o de Aplicación Conceptual

Ejercicio 1. El modelo antes de la fórmula

Selecciona un fenómeno cercano a la Ingeniería Mecánica: el movimiento de un pistón, la caída de una pieza metálica, el flujo de agua en una tubería o la vibración de una estructura. Antes de escribir una ecuación, describe qué observarías, qué variables considerarías y qué aspectos dejarías fuera para construir un primer modelo.

Ejercicio 2. La ecuación y sus límites

Trabaja con una ecuación física básica, como la del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado. No realices cálculos. Explica qué representa cada término, qué condiciones deben cumplirse para que el modelo sea válido y en qué situación real de ingeniería dejaría de funcionar tal como está planteado.



Criterios de evaluación

Tabla 2 1: Criterios de evaluación de las preguntas y ejercicios

Criterio de evaluación	Excelente (4 puntos)	Satisfactorio (3 puntos)	En proceso (2 puntos)	Inicial (1 punto)
Comprensión de la construcción del conocimiento científico	Explica con claridad que la interpretación de un fenómeno está mediada por conocimientos previos, experiencias, observaciones y modelos científicos.	Reconoce la influencia de las ideas previas y los modelos, aunque desarrolla parcialmente su explicación.	Menciona algún elemento relacionado con la interpretación científica, pero sin establecer relaciones claras.	Considera que el fenómeno se interpreta de forma completamente objetiva y no explica la función de los conocimientos previos.
Comprensión del carácter provisional de las teorías	Distingue entre falsedad y campo de validez limitado; explica que una teoría puede seguir siendo útil dentro de determinadas condiciones.	Reconoce que una teoría posee límites de aplicación, pero ofrece una justificación incompleta.	Señala que la teoría puede fallar en algunos casos, sin explicar sus condiciones de validez.	Afirma que una teoría es necesariamente falsa cuando no funciona en un contexto específico.
Interpretación de modelos y ecuaciones físicas	Explica que una ecuación representa un modelo físico sujeto a variables, unidades, supuestos y condiciones de aplicación.	Reconoce que la ecuación depende de ciertas condiciones, aunque no identifica todos sus componentes.	Relaciona la ecuación con el fenómeno de manera superficial y omite sus principales supuestos.	Trata la ecuación como una fórmula universal que puede aplicarse sin examinar sus condiciones.
Aplicación del razonamiento a decisiones de ingeniería	Analiza consecuencias técnicas concretas de ignorar los supuestos de un modelo, como errores de diseño, fallas de seguridad o resultados inválidos.	Identifica posibles errores técnicos, pero desarrolla poco sus consecuencias.	Menciona que podría producirse un error, sin vincularlo claramente con una decisión de ingeniería.	No reconoce riesgos ni consecuencias derivados del uso inadecuado de una ecuación.
Argumentación y pensamiento crítico	Presenta una respuesta coherente, fundamentada y capaz de relacionar teoría, evidencia, modelo y contexto.	Expone una postura comprensible y parcialmente fundamentada.	Presenta ideas pertinentes, pero desorganizadas o con escasa justificación.	Responde mediante afirmaciones aisladas, sin explicación ni fundamento conceptual.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez el estudiante ha terminado de responder tanto las preguntas como los ejercicios, el profesor deberá evaluar las respuestas según la Tabla 2-1. La calificación máxima que se puede obtener en todas las secciones pedagógicas será 20 puntos y la calificación obtenida será clasificada para medir cuánto ha aprendido el estudiante según la Tabla 2-2:



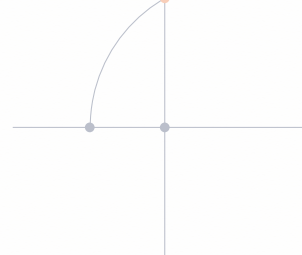


Tabla 2-2: Nivel de desempeño de los estudiantes según su puntuación

Puntuación	Nivel de desempeño
20 - 18 puntos	Dominio excelente de los contenidos
17 - 14 puntos	Dominio satisfactorio
13 - 10 puntos	Aprendizaje en proceso
9 - 5 puntos	Nivel inicial; requiere refuerzo

Fuente: Elaboración propia.

Lecturas Recomendadas



Lederman, N. G. (2007). Nature of Science: Past, Present, and Future.

Ayuda a comprender que la ciencia no es solo acumulación de datos, sino una forma de construir explicaciones desde observaciones, teorías y modelos.



Chalmers, A. F. (2013). What Is This Thing Called Science?

Es una lectura pertinente porque cuestiona la idea ingenua de que la ciencia surge simplemente de observar hechos. Permite entender por qué toda teoría física necesita interpretación.





3. CONSTRUCTIVISMO EN LA ENSEÑANZA DE LA FÍSICA

Objetivos de Aprendizaje del Capítulo

Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

- » Analizar las diferencias entre la enseñanza tradicional y el enfoque constructivista, considerando el rol del estudiante, del docente y del conocimiento físico.
- » Evaluar las posibilidades y limitaciones del constructivismo en la enseñanza universitaria de la Física.
- » Crear una propuesta breve de aprendizaje activo para un tema de Física, integrando experiencia previa, discusión guiada y aplicación conceptual.

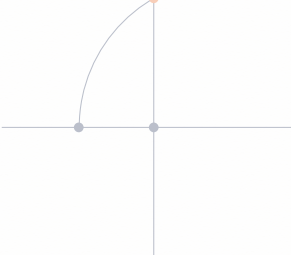
Introducción

En la naturaleza en constante evolución de la física arraiga, justamente, la urgencia de reestructurar los modelos empleados al enseñar ciencias en las aulas universitarias. Lejos de la pasividad propia de la escucha receptiva tradicional, el constructivismo se abre paso como una opción didáctica donde se prioriza la implicación directa del alumnado en la gestión de su aprendizaje. Semejante giro metodológico cobra un valor central en las cátedras de física; un terreno cuyo estudio rebasa el mero adiestramiento operativo en fórmulas de memoria para centrarse en desmenuzar nociones esenciales de la disciplina. Bajo este prisma pedagógico, el espacio de clase opera a modo de escenario para la reestructuración cognitiva (dinámica en la que el estudiante da forma al saber cruzando sus ideas previas con el ensayo práctico y las demandas de su futuro campo laboral). La asimilación de temas planteados en sílabos escapa así de la acumulación de datos sueltos, dándole un peso preferencial al juicio crítico y a la dotación de sentido ante problemas del entorno real.

3.1. Historia del constructivismo

Durante la primera mitad del siglo XX, las directrices del sistema educativo hallaron un sustento epistemológico firme en el conductismo, una corriente que lejos de reducirse a un esquema simple, instauró un riguroso marco experimental enfocado en la cuantificación de la





conducta manifestada a partir de estímulos controlados. Dentro de este paradigma, cuya consolidación académica debe gran parte de su andamiaje a los trabajos de Watson (1913), los procesos de aprendizaje tendieron a explicarse de manera externa, asumiendo al estudiante como un receptor de influencias ambientales y moldeamientos operativos. Esta visión metodológica, orientada a la replicación de respuestas observables, dejó fuera del examen pedagógico los mecanismos internos de procesamiento mental, asumiendo implícitamente que el saber podía transferirse de forma directa y lineal desde el entorno hacia el sujeto.

El agotamiento de este modelo predictivo en las aulas forzó un giro radical a mediados de siglo, un periodo de transición donde la investigación psicológica empezó a cuestionar la viabilidad de una instrucción desvinculada de la actividad mental interna. Es justamente en este bache conceptual donde se gestan las bases del constructivismo, un enfoque que de la mano de aportes como los de Piaget (1952) reconfiguró la relación entre el sujeto y el objeto de conocimiento. La atención didáctica abandonó la fijación exclusiva en los contenidos curriculares terminados para volcarse sobre los esquemas cognitivos del estudiante, quien deja de operar como un agente pasivo. Bajo esta nueva óptica, la asimilación del saber se entiende como un proceso endógeno y dinámico de reestructuración; un escenario donde el alumno interpreta, altera y otorga un significado propio a los datos de la realidad.

Hubo varios referentes importantes de esta transformación en el que destaca Jean Piaget² quien desarrolló el constructivismo genético, que se centra en cómo las personas desarrollan su capacidad de pensar. Para Piaget, el conocimiento no es solo copiar lo que sucede en el mundo. Es el resultado de cómo nos adaptamos a las cosas que nos rodean. Hay dos formas en que hacemos esto: asimilación y acomodación. La asimilación es cuando incorporamos nueva información en lo que ya sabemos. La acomodación es cuando cambiamos lo que sabemos para ajustarnos a nuevas experiencias. Así, el aprendizaje es un proceso interno y activo. Cada persona construye su propio conocimiento al interactuar con el mundo que los rodea. En palabras del propio Piaget (1981):

²Jean Piaget (1896-1980): Psicólogo, biólogo y epistemólogo suizo, considerado el padre de la epistemología genética.



“Conocer no consiste en copiar lo real, sino en actuar sobre ello y transformarlo” (1969/1981, p. 27).

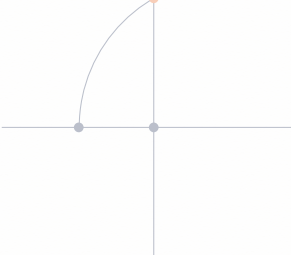
La enseñanza de la física debe partir de una idea importante: el estudiante no debe recibir el conocimiento de manera ya elaborada. En su lugar, debe construirlo por sí mismo, a partir de su propia experiencia y forma de entender las cosas.

Por otro lado, Lev Vygotsky³ tiene una visión que amplía esta idea. Él cree que el entorno social es fundamental para el aprendizaje. Desde su punto de vista, el conocimiento no se crea solo en la mente de cada persona, sino que se desarrolla cuando interactuamos con los demás, utilizando el lenguaje y las herramientas que nos proporciona nuestra cultura. Uno de los conceptos más importantes que propone es la Zona de Desarrollo Próximo (ZDP). Esto se refiere a la diferencia entre lo que un estudiante puede hacer solo y lo que puede lograr con la ayuda de un profesor o trabajando con otros. Así, el aprendizaje no es algo que se haga en soledad, sino que es una actividad que se lleva a cabo en comunidad. Lev Vygotsky lo expresa de esta manera:

“Lo que el niño puede hacer hoy con ayuda, será capaz de hacerlo por sí mismo mañana” (Vygotsky, 1978, p. 87)

La idea es muy importante en la enseñanza de la física. El profesor debe ayudar a los estudiantes a aprender, en lugar de solo darles información con el fin de reducir la brecha educativa. La intervención por parte del docente se traduce de forma práctica en el diseño de dinámicas capaces de quebrar la pasividad escolar clásica. La ejecución de **laboratorios guiados**, donde queda descartado el uso de mecanismos predecibles, ejemplifica dicho soporte, prefiriéndose la introducción de interrogantes estratégicas destinadas a guiar al alumnado en el enlace entre datos experimentales y modelos teóricos de conservación. El impacto de esta asistencia metodológica

³Lev Vygotsky (1896-1934): Psicólogo y epistemólogo ruso, pionero del constructivismo social.



aumenta de manera notable al entrelazarse con tareas de **resolución de problemas en parejas**. Dentro de estos entornos de intercambio cooperativo, el choque de hipótesis divergentes y el examen conjunto referente a las restricciones de una ley matemática fuerzan (de forma inevitable) una construcción de significados. Es a través de esta forma analítica y del empleo de herramientas conceptuales compartidas como los estudiantes logran descifrar y resolver sistemas analíticos de alta complejidad que, bajo un régimen de estudio autónomo, les resultarían inalcanzables.

Finalmente, David Ausubel⁴ es fundamental en el constructivismo porque se centra en el aprendizaje significativo. Ausubel dice que el aprendizaje es efectivo cuando el nuevo conocimiento se relaciona con lo que el estudiante ya sabe. Para esto, Ausubel usa "organizadores previos". Estas herramientas ayudan a conectar lo que el estudiante ya conoce con lo que va a aprender. Como dice David Ausubel mismo:

“El factor más importante que influye en el aprendizaje es lo que el alumno ya sabe. Averígüese esto y enséñese en consecuencia” (Ausubel, 1968, p. 6)

El constructivismo es una forma de entender cómo aprendemos. La idea principal es que no podemos aprender solo porque alguien nos diga algo, sino que tenemos que construir nuestro propio conocimiento. Esto se hace a partir del conocimiento previo. Llevar a la práctica este principio dentro de las aulas de física exige valerse de los organizadores previos ausubelianos. Estos funcionan como un andamiaje indispensable para que el alumno asimile la abstracción formal a nivel cognitivo.

Pensemos en la dinámica: mucho antes de plasmar en la pizarra el aparato matemático de las leyes de Newton, conviene realizar un diagnóstico conceptual apoyado en vivencias del día a día, tales como percibir la inercia al frenar bruscamente en un vehículo o medir el esfuerzo que demanda mover un bloque pesado. Así, las nociones intuitivas sobre fuerza preparan el terreno receptivo

⁴David Ausubel (1918-2008): Psicólogo y pedagogo estadounidense, figura central del constructivismo.



para el nuevo contenido teórico. Algo muy similar ocurre al revisar la conservación de la energía; analizar de forma cualitativa el recorrido de una montaña rusa termina por tender puentes conceptuales sólidos, garantizando que las ecuaciones de energía cinética y potencial no sean meros números, sino que logren codificar una realidad cuya lógica física el estudiante ya ha integrado de manera significativa.

Hablar de constructivismo obliga a cruzar las propuestas de Piaget, Vygotsky y Ausubel, pilares que cambiaron por completo la vieja pasividad escolar. Desde la óptica piagetiana, centrada en lo genético, el aula cambió al entenderse que todo conocimiento pasa por asimilar y acomodar las ideas de forma interna. A esto se acopla el enfoque sociocultural: aquí Vygotsky sitúa al lenguaje y al entorno social como los motores que disparan las funciones cognitivas superiores. El ciclo didáctico cae finalmente en las aulas con el aprendizaje significativo de Ausubel; esta tesis nos advierte que resulta casi inútil incorporar conceptos científicos si la instrucción no se asocia directamente en las nociones previas que el alumno ya posee.

Con el tiempo, el constructivismo ha ido evolucionando. Ahora incluye ideas de la psicología y la educación científica. No es solo una teoría, sino una forma de enseñar que se centra en el estudiante. Algunas de estas formas de enseñar son el Aprendizaje Basado en Problemas (ABP), el aprendizaje por indagación y el aprendizaje colaborativo. Un estudio de Freeman et al. (2014) mostró que estos métodos funcionan bien cuando se hacen de manera estructurada y con la ayuda de los profesores.

El constructivismo también ha demostrado ser útil en países que están desarrollándose. Sin embargo, para que funcione bien, los profesores necesitan saber cómo enseñar de esta manera y tener los recursos necesarios. Un estudio de Lombardi et al. (2021) mostró que, incluso en lugares con pocos recursos, se puede mejorar la comprensión de la ciencia si se usa este enfoque. Es importante recordar que el constructivismo debe adaptarse a cada situación y no se puede aplicar de manera superficial. Si se hace bien, puede ser muy efectivo.



3.2. Constructivismo y la enseñanza tradicional

La enseñanza tradicional se basa en un profesor que da clases y los estudiantes escuchan. Esto funciona bien cuando hay mucho que aprender y todos necesitan saber lo mismo. Pero no es tan bueno para que los estudiantes entiendan realmente las cosas, para que puedan aplicar lo que saben en diferentes situaciones o para que puedan pensar de manera crítica.

El constructivismo es diferente. Pone al estudiante en el centro del aprendizaje. Los estudiantes no solo escuchan, sino que también participan activamente. Aprenden combinando lo que ya saben con lo nuevo que están descubriendo y con lo que les pasa en su vida diaria. Esto es especialmente útil cuando se trata de aprender ciencias, como la física. En lugar de solo hacer ecuaciones, los estudiantes pueden entender realmente lo que estas ecuaciones significan. Algunos investigadores, como Freeman et al. (2014), afirman que cuando los estudiantes participan activamente en el aprendizaje, aprenden mucho mejor y entienden mejor los conceptos científicos.

Asumir que el constructivismo es un método infalible es un error: este enfoque también acarrea severas críticas cuando su implementación en el aula resulta deficiente. Dejar al alumno a la deriva con una guía docente mínima suele detonar frustración y vacíos conceptuales, un escenario crítico si los estudiantes no han madurado las estructuras cognitivas necesarias para resolver problemas complejos de forma autónoma. Por ello, la investigación actual, lejos de centrarse en el extremismo pedagógico, rescata el valor de la instrucción guiada para consolidar aprendizajes verdaderamente efectivos. Esta metodología educativa requiere, por lo tanto, un despliegue planificado y sistemático; la libertad cognitiva no es sinónimo de abandonar la dirección didáctica (Kirschner et al., 2006).

El verdadero desafío de la docencia moderna se traduce en articular un sano equilibrio: coordinar la instrucción dirigida, la modelación explícita del profesor y el rol activo de quien aprende. El docente no pasa a ser un espectador pasivo, sino que opera como una plataforma estratégica que modela el pensamiento científico y va





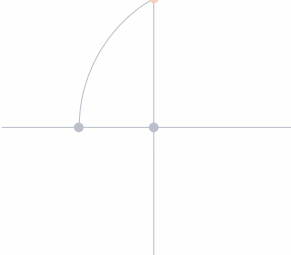
soltando las riendas a medida que el alumno demuestra autonomía teórica. Al fusionar la guía estructurada con la indagación propia del estudiante, se disparan las habilidades analíticas esenciales en disciplinas científicas. Para examinar a fondo cómo se relacionan estos enfoques sin caer en rivalidades teóricas que excluyan algún punto, la Tabla 3-1 detalla una breve comparación entre ambas metodologías.

Tabla 3-1: Comparación entre la enseñanza tradicional y el enfoque constructivista

Aspecto	Enseñanza tradicional	Constructivismo	Implicaciones para la cátedra de física
Rol del estudiante	Receptor pasivo; memoriza fórmulas y reproduce algoritmos expuestos en la pizarra.	Agente activo; construye modelos mentales al confrontar sus ideas previas.	Deja de aplicar fórmulas sin interpretación y comienza a predecir comportamientos mecánicos.
Rol del docente	Transmisor principal del contenido y de las explicaciones sobre los fenómenos físicos.	Mediador del aprendizaje; diseña apoyos para orientar la construcción del conocimiento.	Modela el razonamiento experimental en lugar de limitarse a resolver problemas de manera mecánica.
Enfoque del aprendizaje	Mecánico y acumulativo; supone que la exposición reiterada de contenidos produce comprensión.	Conceptual y reflexivo; busca reorganizar los esquemas cognitivos del estudiante.	Facilita el tránsito desde nociones intuitivas erróneas hacia modelos y leyes físicas formales.
Uso de las matemáticas	Instrumental; el procedimiento algebraico suele presentarse separado del fenómeno físico.	Interpretativo; las matemáticas representan relaciones, condiciones y comportamientos de los sistemas.	Las ecuaciones cinemáticas dejan de ser operaciones numéricas y adquieren significado físico y espacial.
Relación con la realidad	Predominan ejercicios abstractos e idealizados con escasa conexión con el entorno.	Los fenómenos cotidianos sirven como punto de partida para comprender abstracciones complejas.	Conceptos como inercia, fuerza o energía se analizan mediante situaciones reconocibles.
Pensamiento crítico	Limitado; se concentra en reproducir procedimientos previamente establecidos.	Se promueve mediante la formulación de hipótesis y su contraste con datos empíricos.	El estudiante compara sus predicciones teóricas con mediciones y resultados experimentales.
Ventajas	Permite cubrir temarios extensos en un tiempo reducido y organizar la exposición teórica.	Favorece la retención, la comprensión conceptual y la transferencia a situaciones nuevas.	Facilita la comprensión de fenómenos complejos o contrarios a la intuición cotidiana.
Desventajas	Puede generar aprendizaje superficial y rápida pérdida de lo memorizado después de la evaluación.	Exige planificación didáctica rigurosa, orientación docente y mayor tiempo de ejecución.	Una actividad mal estructurada puede provocar sobrecarga cognitiva, confusión y frustración.
Evidencia empírica	La sobrecarga cognitiva dificulta el aprendizaje cuando las tareas exceden la capacidad de procesamiento del estudiante (Sweller, 1988).	La enseñanza interactiva alcanza ganancias conceptuales superiores a las obtenidas mediante clases tradicionales (Hake, 1998).	La orientación explícita y los apoyos docentes ofrecen mejores resultados que el descubrimiento con guía mínima (Kirschner et al., 2006)

Fuente: Elaboración propia a partir de Sweller (1988), Hake (1998) y Kirschner et al. (2006).





El análisis comparativo presentado permite evidenciar que ambos enfoques responden a concepciones distintas sobre el aprendizaje y el conocimiento. Mientras la enseñanza tradicional prioriza la organización, la secuencialidad y el control del contenido, el constructivismo enfatiza la comprensión, la participación activa y la construcción significativa del conocimiento. Sin embargo, la evidencia sugiere que ninguno de los enfoques es suficiente por sí solo. En la práctica educativa, especialmente en la enseñanza de la Física, resulta necesario integrar elementos de ambos modelos, combinando la estructura y claridad de la enseñanza tradicional con la profundidad conceptual y el enfoque crítico del constructivismo.

En consecuencia, el desafío no radica en sustituir un modelo por otro, sino en diseñar estrategias pedagógicas que aprovechen las fortalezas de cada enfoque. Esta integración permite no solo mejorar la comprensión de los conceptos físicos, sino también formar estudiantes capaces de analizar, interpretar y aplicar el conocimiento en contextos reales. De esta manera, se avanza hacia una enseñanza más equilibrada, coherente con los objetivos de este libro y con las demandas actuales de la educación científica.

3.3. Filosofía de la ciencia

A partir del análisis del constructivismo y su contraste con la enseñanza tradicional, resulta necesario profundizar en el papel de la filosofía de la ciencia como fundamento para comprender cómo se construye el conocimiento científico. La filosofía de la ciencia no se limita a reflexionar sobre los resultados de la ciencia, sino que analiza sus métodos, sus supuestos y los criterios mediante los cuales se validan las teorías. En este sentido, permite entender que la Física no es únicamente un conjunto de ecuaciones matemáticas que representan un fenómeno natural, sino un sistema de pensamiento que evoluciona a partir de preguntas, problemas y contextos históricos específicos que se verán a partir de la Sección 5. Esta perspectiva resulta fundamental para evitar una visión reduccionista del conocimiento científico, en la cual las teorías se presentan como verdades definitivas sin cuestionar su origen o sus límites.





Entrar en la ciencia desde una visión filosófica exige, como bien demuestran los libros de Chalmers (2013) y Giere (2010), admitir que los modelos científicos son representaciones construidas, atadas siempre a revisión y dependientes de marcos conceptuales específicos. La filosofía de la ciencia no busca adornar el discurso; su papel es aclarar la enrevesada relación entre teoría, evidencia y realidad. Cabe recalcar que los constructos teóricos no son copias exactas del mundo real, sino aproximaciones útiles para explicar fenómenos bajo condiciones determinadas. Además de esto, se ha argumentado que el conocimiento científico está influido por factores históricos y conceptuales que determinan cómo se interpretan los datos y se construyen las explicaciones.

Desde la perspectiva de la enseñanza de la Física, la incorporación de la filosofía de la ciencia permite desarrollar una comprensión más profunda y crítica del conocimiento. Cuando el estudiante entiende que las leyes físicas tienen un contexto de desarrollo, que responden a problemas específicos y que poseen límites de validez, se favorece una interpretación más consciente de los modelos matemáticos y de su aplicación. Esto resulta coherente con el enfoque constructivista, ya que promueve un aprendizaje en el que el estudiante no solo aplica fórmulas, sino que reflexiona sobre su significado, su origen y su alcance.

3.4. Limitaciones en la práctica

El éxito al desplegar el constructivismo dentro del aula de física queda supeditado a las condiciones de la institución, la capacitación del profesorado y el nivel real de orientación que recibe el alumnado. Las problemas pedagógicos, por ende, no nacen del enfoque en sí mismo, sino de interpretaciones sesgadas o de planificaciones desvinculadas del contexto educativo real. En la Tabla 3-2 se esquematizan, bajo una matriz sintética, las limitaciones críticas, sus detonantes, las repercusiones en la enseñanza de la disciplina y las vías viables para amortiguar su impacto.



Tabla 3-2: Matriz compacta de limitaciones del constructivismo en la física

Limitación	Causa	Efecto en la enseñanza de la física	Estrategia de mitigación
Ausencia de dirección didáctica	Confundir el rol activo del alumno con dejarlo a la deriva en un descubrimiento autónomo sin guía Kirschner et al. (2006).	Vacíos teóricos, arrastre de errores conceptuales y nula comprensión de leyes abstractas.	Implementar instrucción guiada con andamios, preguntas orientadoras y ejemplos resueltos.
Brechas en saberes previos	Iniciar la asignatura sin dominar bases conceptuales ni herramientas matemáticas clave.	Incapacidad para interpretar ecuaciones, operar vectores o analizar gráficas cinemáticas.	Aplicar diagnósticos iniciales obligatorios y nivelación previa antes de avanzar el temario.
Abstracción ⁵ matemática ciega	Separación entre la manipulación algebraica y el fenómeno real que se modela.	Resolver algoritmos mecánicamente sin entender los límites de validez de las fórmulas.	Conectar cada ecuación con demostraciones visuales y problemas aplicados a la Ingeniería Mecánica.
Saturación en aulas de la UTELVT	Aulas masivas combinadas con severas restricciones en equipos debido a la crisis de infraestructura (Angulo Guerrero et al., 2024).	Pérdida de la experimentación y desconexión entre modelos teóricos y física empírica de laboratorio.	Organizar subgrupos pequeños usando simuladores digitales y análisis de procesos químicos a nivel macro.
Brecha en didáctica docente	Especialistas con dominio de la materia pura, pero sin actualización en pedagogía de las ciencias	Actividades desarticuladas, sin secuencia lógica ni evaluación conceptual adaptada a Ingeniería Mecánica	Impulsar talleres de planificación compartida y rediseño curricular adaptado a la realidad de la UTELVT.

Fuente: Elaboración propia a partir de Kirschner et al. (2006) y Angulo Guerrero et al. (2024).

Esta matriz deja en claro un punto central: una didáctica constructivista de nivel profesional jamás debe confundirse con replegar la intervención del profesor. Al contrario, exige una mediación quirúrgica y estructurada, paso indispensable cuando se manejan contenidos de alta densidad conceptual y analítica. Una guía oportuna apoya la autonomía estudiantil hacia modelos físicos formalmente válidos; en paralelo, el diagnóstico continuo y los experimentos de cátedra frenan la fijación de nociones intuitivas erróneas. Para el entorno particular de la UTELVT, aterrizar este enfoque obliga a amoldar los diseños instruccionales a la realidad técnica disponible y a las demandas de perfil de la Ingeniería Mecánica, entendiendo que el equilibrio entre guía docente y rigor científico dicta la viabilidad del proyecto.

⁵**Abstracción:** Proceso mental que consiste en aislar conceptualmente una propiedad o función de un objeto para analizarla fuera de su contexto inmediato.



Sección pedagógica

Preguntas de Reflexión Crítica

1. ¿Por qué un estudiante puede resolver correctamente muchos ejercicios de Física y, aun así, no comprender el fenómeno que está estudiando?
2. ¿Qué puede ocurrir si el constructivismo se aplica como “dejar solo al estudiante” y no como una mediación docente bien planificada?
3. ¿Cómo se podría enseñar un concepto como fuerza, energía o presión partiendo de una experiencia cotidiana antes de introducir la ecuación formal?

Ejercicios Prácticos o de Aplicación Conceptual

Ejercicio 1. De la clase pasiva a la clase constructivista

Toma un tema típico de Física, por ejemplo, leyes de Newton, conservación de energía o presión en fluidos. Describe cómo se enseñaría desde una clase tradicional centrada en explicación y ejercicios. Luego rediseña esa misma clase desde un enfoque constructivista: pregunta inicial, actividad de exploración, discusión guiada y cierre conceptual.

Ejercicio 2. El error como punto de partida

Plantea una idea equivocada común, como “si un objeto se mueve, necesariamente hay una fuerza empujándolo”. Diseña una actividad corta para que el estudiante confronte esa idea mediante observación, diálogo o experimento mental. Explica cómo intervendría el docente sin dar la respuesta de inmediato.

Criterios de evaluación

Tabla 3-3: Criterios de evaluación de las preguntas y ejercicios

Criterio de evaluación	Excelente (4 puntos)	Satisfactorio (3 puntos)	En proceso (2 puntos)	Inicial (1 punto)
Comprensión del enfoque constructivista y su diferenciación de la enseñanza tradicional	Distingue con claridad roles y dinámicas de ambos enfoques, explica la construcción activa del conocimiento y contrasta con la pasividad del modelo tradicional usando ejemplos concretos.	Reconoce las diferencias principales y el rol activo del estudiante, aunque la explicación carece de algunos matices o no profundiza en implicaciones didácticas.	Identifica algunas características del constructivismo, pero las confunde parcialmente con el enfoque tradicional o no logra una comparación clara.	Describe el constructivismo de manera superficial o lo equipara erróneamente con la enseñanza tradicional, sin distinguir roles ni implicaciones pedagógicas.
Identificación de las limitaciones del constructivismo en la práctica educativa	Analiza críticamente dificultades de implementación (guía docente estructurada, preparación del profesor, condiciones institucionales) y las relaciona con situaciones concretas del aula universitaria.	Menciona algunas limitaciones relevantes (ej. exigencia de planificación o posible confusión sin orientación) y las vincula de manera general con el contexto educativo.	Reconoce que el constructivismo puede presentar dificultades, pero no especifica cuáles o las describe de forma vaga, sin conexión con la práctica.	No identifica limitaciones o considera que el constructivismo es infalible, omitiendo cualquier análisis crítico sobre su aplicación real.
Capacidad para diseñar una actividad constructivista a partir de un tema de física (Ejercicio 1)	Propone secuencia completa: pregunta inicial movilizadora, actividad exploratoria/experimental de bajo costo, discusión guiada que confronta intuiciones erróneas y cierre conceptual que formaliza el modelo; coherente y contextualizada.	Diseña actividad con la mayoría de los elementos, aunque alguna fase está poco desarrollada o no está claramente articulada con las ideas previas.	Presenta bosquejo de actividad, pero omite fases importantes o la secuencia es confusa; la relación con el constructivismo es débil o se asemeja más a un ejercicio tradicional.	No logra diseñar una actividad constructivista o propone una secuencia que reproduce el modelo tradicional sin indagación ni discusión guiada.
Capacidad para abordar errores conceptuales como punto de partida del aprendizaje (Ejercicio 2)	Selecciona una idea errónea común y relevante, explica su origen intuitivo y persistencia, y diseña actividad (observación, diálogo o experimento mental) que confronta la creencia; describe el rol docente como facilitador sin dar respuestas inmediatas.	Identifica una idea errónea y propone actividad para trabajarla, aunque la descripción del rol docente o la estrategia de confrontación podría ser más detallada o más ajustada al enfoque constructivista.	Menciona una idea equivocada, pero la actividad es genérica o no está orientada a generar conflicto cognitivo; el rol docente se describe de forma imprecisa.	No logra identificar un error conceptual relevante o la actividad propuesta no aborda el error, limitándose a exponer la respuesta correcta sin confrontación.
Argumentación y pensamiento crítico en las respuestas a las preguntas de reflexión	Presenta respuestas coherentes, bien fundamentadas y capaces de relacionar la teoría constructivista con situaciones concretas de enseñanza-aprendizaje; establece conexiones entre conceptos y la práctica real con análisis y síntesis.	Expone posturas comprensibles y parcialmente fundamentadas, aunque algunas ideas no están completamente desarrolladas o las conexiones con la práctica son poco explícitas.	Ofrece ideas pertinentes, pero desorganizadas o con escasa justificación teórica; la argumentación es débil y no logra articular los conceptos del capítulo.	Responde con afirmaciones aisladas o vagas, sin fundamento conceptual, o reproduce mecánicamente definiciones sin mostrar comprensión crítica.

Fuente: Elaboración propia

P.1

FUNDAMENTOS EPISTEMOLÓGICOS Y PEDAGÓGICOS



Lecturas Recomendadas



Ausubel, D. P. (1968). Educational Psychology: A Cognitive View.

Aporta una base clara para comprender el aprendizaje significativo. Su idea de partir de lo que el estudiante ya sabe resulta muy útil para enseñar Física con sentido.



Freeman, S., et al. (2014). "Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics". Proceedings of the National Academy of Sciences.

Es valiosa porque muestra evidencia sobre el impacto del aprendizaje activo en ciencias e ingeniería. Esta referencia también aparece en la bibliografía del libro.



4. CONTEXTO EDUCATIVO CONTEMPORÁNEO

Objetivos de Aprendizaje del Capítulo

Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

- » Analizar cómo los errores conceptuales en Física se forman desde experiencias cotidianas y por qué suelen resistirse a desaparecer.
- » Evaluar la influencia de factores sociales, culturales, institucionales y emocionales en el aprendizaje de la Física.
- » Crear una propuesta pedagógica contextualizada para enseñar un concepto físico con recursos disponibles y características reales de los estudiantes.

Introducción

El análisis del constructivismo y su aplicación en la enseñanza de la física ha permitido identificar un marco teórico sólido para la comprensión del aprendizaje científico. No obstante, la existencia de fundamentos pedagógicos bien estructurados no garantiza por sí misma una mejora en los procesos educativos. La dificultad radica en trasladar estos principios a contextos reales, donde intervienen factores institucionales, sociales y culturales que condicionan la forma en que se enseña y se aprende. Este capítulo se orienta a examinar esa brecha entre teoría y práctica, situando la enseñanza de la física en un escenario contemporáneo caracterizado por desafíos estructurales y cognitivos que no pueden ser abordados únicamente desde la perspectiva teórica.

4.1. Errores conceptuales en el aprendizaje científico

Uno de los problemas más persistentes en la enseñanza de las ciencias a nivel global es la presencia de errores conceptuales profundamente arraigados en los estudiantes, conocidos como misconceptions. Estas ideas no corresponden a simples equivocaciones, sino a estructuras cognitivas organizadas que se construyen a partir de la experiencia cotidiana. En el caso de la rama de Física, estas interpretaciones surgen de la interacción directa con fenómenos naturales, donde el estudiante genera explicaciones intuitivas que resultan funcionales en contextos inmediatos, pero que entran en conflicto con los



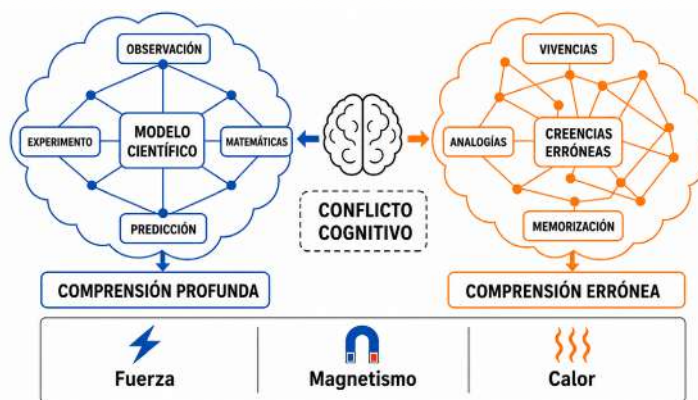


modelos científicos formales. El aprendizaje científico, en este sentido, implica una transformación estructural del conocimiento más que una simple incorporación de información nueva.

Esta diferencia entre conocimiento intuitivo y conocimiento científico puede analizarse con mayor claridad a partir de la Figura 4-1, donde se representan dos configuraciones cognitivas contrastantes en el proceso de aprendizaje. En el lado izquierdo se observa una red conceptual organizada, propia del conocimiento científico, en la que elementos como la observación, el formalismo matemático, la experimentación y las leyes físicas se encuentran articulados de manera coherente, permitiendo generar predicciones y una comprensión profunda del fenómeno. En contraste, el lado derecho muestra una red densa pero desestructurada, correspondiente a los errores conceptuales, donde predominan ideas intuitivas incompletas, analogías inadecuadas y generalizaciones incorrectas. Esta organización no es caótica en el sentido estricto, sino que posee coherencia interna para el estudiante, lo que explica su persistencia en el tiempo.

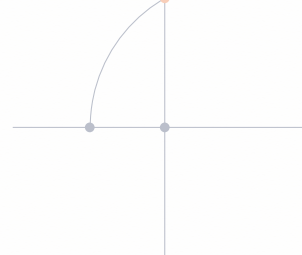
Nota metodológica: El diagrama esquematiza la dinámica del cambio conceptual en la física. A la izquierda, el modelo científico formaliza la realidad mediante redes lógicas interconectadas de observación y matemáticas. A la derecha, se agrupan las concepciones intuitivas o ideas previas erróneas, nacidas de analogías débiles y la memorización mecánica. El núcleo central representa el conflicto cognitivo, detonante indispensable para que el alumno quiebre su estructura superficial y transite hacia una comprensión profunda. En la franja inferior se ejemplifican áreas críticas (mecánica, electromagnetismo y termodinámica) donde persisten estas malas interpretaciones.

Figura 4-1: Estructura de los modelos mentales en física



Fuente: Elaboración propia a partir de Vosniadou (2013)





La dinámica representada en la figura se explica a partir del proceso de interpretación cognitiva que realiza el estudiante al enfrentarse al conocimiento científico. En este contexto, Vosniadou (2013) afirma que:

“Los estudiantes no abandonan sus concepciones iniciales simplemente porque se les presente información científica correcta. En lugar de ello, tienden a interpretar la nueva información a través de sus modelos mentales existentes, lo que da lugar a formas híbridas de comprensión que combinan elementos científicos con creencias intuitivas previas. Este proceso explica por qué muchos estudiantes pueden reproducir respuestas correctas en contextos formales, pero continúan utilizando explicaciones alternativas en situaciones cotidianas” (Vosniadou, 2013).

P.1

FUNDAMENTOS EPISTEMOLÓGICOS Y PEDAGÓGICOS

Esta afirmación permite comprender el papel del conflicto cognitivo, también representado en la Figura 4-1, como un punto de transición en el aprendizaje. Cuando las ideas previas entran en contradicción con el conocimiento científico, el estudiante puede optar por memorizar sin comprender o, en un proceso más complejo, reorganizar sus estructuras cognitivas. La dificultad radica en que los modelos erróneos no desaparecen fácilmente, ya que están reforzados por la experiencia cotidiana y por prácticas educativas que no abordan explícitamente estas inconsistencias.

En el ámbito de la Física, este fenómeno se manifiesta en múltiples conceptos fundamentales. Es frecuente encontrar interpretaciones como la asociación de la fuerza con la causa del movimiento continuo, la idea de que el calor es una sustancia que fluye o la creencia de que un imán “consume” su fuerza. Estos ejemplos, incluidos en la figura, evidencian que los errores conceptuales no son aleatorios, sino que responden a estructuras cognitivas consistentes que deben ser abordadas de manera sistemática en el proceso educativo.





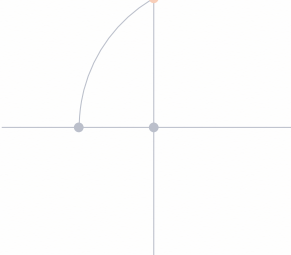
El análisis de estos errores obliga a replantear la enseñanza de las carreras científicas desde una perspectiva que considere explícitamente la estructura cognitiva del estudiante. Se debe tener en cuenta que el objetivo del aprendizaje no es únicamente transmitir conocimiento, sino facilitar la transición desde redes conceptuales desorganizadas hacia estructuras coherentes y fundamentadas. Este proceso requiere una mediación pedagógica que promueva la confrontación de ideas, la reflexión crítica y la reconstrucción conceptual progresiva, elementos fundamentales para una comprensión profunda del conocimiento científico.

4.2. Contexto educativo en Ecuador y América Latina

El aprendizaje científico en América Latina no puede analizarse únicamente desde el aula, porque responde a condiciones estructurales que atraviesan a los sistemas educativos de la región. En países en desarrollo, la enseñanza de las ciencias bases se enfrenta a desigualdades acumuladas: diferencias en infraestructura, acceso limitado a laboratorios, brechas digitales, formación docente desigual y currículos que muchas veces no logran conectar la ciencia con la realidad social del estudiante. Esta situación afecta de manera directa la comprensión de asignaturas como Física, donde el aprendizaje requiere no solo exposición teórica, sino también experimentación, modelación matemática y acompañamiento pedagógico sostenido.

La crisis educativa latinoamericana se hizo más visible después de la pandemia. UNESCO (2024) señala que América Latina y el Caribe fue la segunda región con mayor número de semanas de cierre escolar entre 2020 y 2022: 62 semanas en total, de las cuales 29 correspondieron a educación completamente remota y 33 a escuelas parcialmente abiertas. Además, hacia mayo de 2020, el 99 % de los estudiantes de primaria y secundaria de la región no tenía acceso a clases presenciales, frente al 53 % a nivel mundial. Este dato permite dimensionar el impacto que tuvo la interrupción educativa en una región donde ya existían desigualdades previas de acceso, permanencia y aprendizaje.





Mirar de cerca el aprendizaje práctico en nuestra región obliga a chocar con una realidad cruda: las aulas arrastran un estancamiento estructural que ya acumula una década de parálisis (UNESCO, 2024). Las evaluaciones PISA 2022, donde se midió el desempeño de jóvenes en Chile, Uruguay, México, Perú, Colombia, Brasil, Argentina y Paraguay, arrojaron cifras que la OECD (2023) califica de alarmantes si se analiza el llamado Nivel 2, que es el umbral mínimo indispensable para desenvolverse en la sociedad actual. El desplome es evidente en el área matemática, donde un aplastante 74 % de los estudiantes latinoamericanos ni siquiera roza ese estándar básico. El panorama no mejora al revisar otras áreas esenciales: la lectura arrastra un 45 % de alumnos con vacíos severos de comprensión, mientras que las ciencias cierran este preocupante balance con la mitad de la población evaluada (un 50 %) en situación de rezago. Sostener sobre estoscimientos una cátedra universitaria como física es un reto casi utópico; la falta de fluidez en la lectura frena en seco cualquier intento de interpretar el enunciado conceptual de un problema y, en paralelo, la debilidad matemática anula por completo la capacidad del estudiante para modelar algebraicamente las leyes del universo físico.

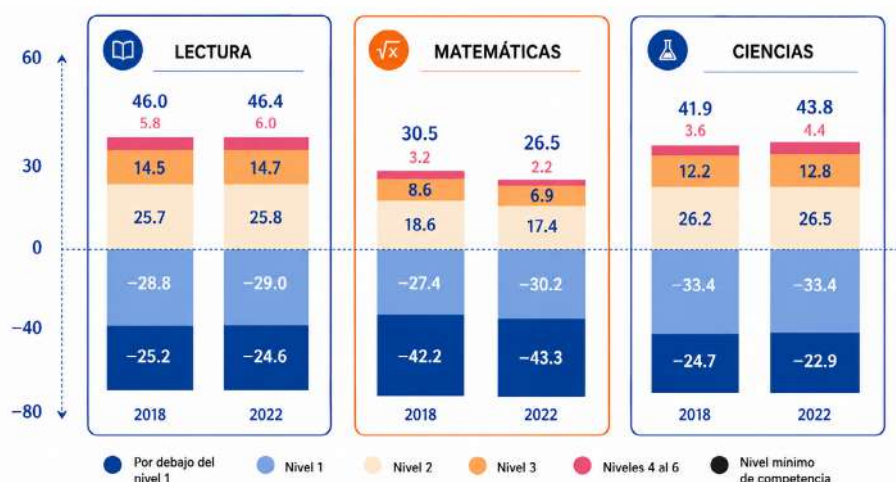
Por su parte, el Banco Mundial ha alertado sobre la severa crisis educativa que experimenta América Latina y el Caribe, documentando que antes de la pandemia el 52 % de los niños del entorno regional padecía de pobreza de aprendizaje, entendida como la incapacidad de leer y comprender un texto simple a los diez años, una tasa que tras el cierre prolongado de las escuelas podría superar el 70 % (The World Bank, 2024). Este rezago de la infancia lejos de quedarse incrustado en la escuela básica, opera en realidad como el detonante de un efecto dominó que golpeará más tarde las aulas universitarias. Al ingresar a la educación superior, el estudiante arrastra las secuelas de esa privación cognitiva temprana, viéndose limitado para decodificar textos técnicos de alta complejidad o asimilar la abstracción de los modelos matemáticos. Como consecuencia directa de este vacío formativo, la docencia universitaria en áreas como la física tropieza con un alumnado desprovisto del andamiaje lingüístico y mental mínimo indispensable, entorpeciendo la asimilación de la teoría física y la resolución autónoma de problemas de ingeniería.





En el caso de Ecuador, esta problemática regional adquiere una expresión concreta: las universidades reciben estudiantes que han atravesado trayectorias educativas marcadas por desigualdades territoriales, diferencias entre zonas urbanas y rurales, limitaciones tecnológicas y brechas en la formación matemática previa. Para la Carrera de Mecánica de la UTELVT, este contexto exige reconocer que la enseñanza de la Física no puede partir del supuesto de que todos los estudiantes poseen las mismas bases conceptuales. La tarea docente debe considerar estas diferencias como punto de partida para diseñar estrategias más claras, progresivas y contextualizadas.

Figura 4-2: Indicadores educativos en América Latina y el Caribe



Fuente: UNESCO (2024).

La Figura 4-2 muestra la distribución del rendimiento de los estudiantes en lectura, matemáticas y ciencias en América Latina, comparando los resultados de 2018 y 2022. En los tres casos se observa una alta concentración de estudiantes en los niveles más bajos de desempeño (por debajo del nivel 2), especialmente en matemáticas, donde los valores negativos indican que una gran proporción no alcanza las competencias mínimas esperadas. En lectura, aunque existe una ligera estabilidad entre ambos años, los niveles siguen siendo insuficientes para garantizar una comprensión adecuada de textos científicos. En ciencias, área directamente relacionada con la Física, los resultados muestran una mejora marginal, pero aún con una distribución que evidencia



dificultades en la interpretación de fenómenos, análisis de evidencia y razonamiento científico. En conjunto, esta gráfica no refleja una recuperación significativa del aprendizaje tras la pandemia, sino una persistencia de brechas estructurales en la región.

Estos resultados analizados permiten establecer una relación directa con los errores conceptuales analizados previamente. Cuando los estudiantes no desarrollan competencias básicas en lectura, matemáticas y ciencias, se ven limitados en su capacidad para interpretar modelos físicos, comprender ecuaciones y analizar fenómenos, recurriendo con mayor frecuencia a explicaciones intuitivas construidas desde su experiencia cotidiana. Estas interpretaciones, al no ser confrontadas de manera adecuada, se consolidan como modelos mentales erróneos que dificultan el aprendizaje científico. De esta manera, la desigualdad educativa no solo afecta el acceso al conocimiento, sino que influye en la forma en que este se construye, reforzando estructuras cognitivas que se alejan del rigor científico y complican la enseñanza.

4.3. Factores socioculturales en el aprendizaje

El aprendizaje no depende exclusivamente de las condiciones institucionales o del acceso a recursos, sino también de factores socioculturales que influyen en la forma en que el estudiante interpreta el conocimiento. En América Latina, la cultura científica no se encuentra plenamente integrada en la vida cotidiana, lo que genera una distancia entre el conocimiento académico y la experiencia del estudiante. La física suele percibirse como una disciplina abstracta, compleja y alejada de la realidad, lo que condiciona la motivación y la disposición hacia el aprendizaje. A esto se suma la influencia del entorno familiar y social, donde en muchos casos no existen referentes que vinculen la ciencia con oportunidades reales de desarrollo, reforzando la idea de que estas áreas son inaccesibles o poco relevantes, tanto que si a una persona corriente le preguntas “¿Qué es la física?” seguramente no te dé una respuesta concisa.

El lenguaje también desempeña un papel fundamental en este proceso. La comprensión de conceptos físicos requiere no solo habilidades matemáticas, sino también





la capacidad de interpretar términos técnicos y construir significados a partir de ellos. En contextos donde existen limitaciones en la comprensión lectora o donde el lenguaje científico no forma parte del entorno cotidiano, el estudiante enfrenta una doble dificultad: aprender el concepto y el lenguaje que lo expresa. Desde la perspectiva sociocultural del aprendizaje, este proceso no puede entenderse de forma aislada, ya que, como plantea Vygotsky (1978), el desarrollo cognitivo está mediado por la interacción social y el uso del lenguaje como herramienta de construcción del conocimiento. El estudio actual de Lemke (2012) en educación científica ha confirmado que estas condiciones culturales influyen directamente en la forma en que los estudiantes interpretan y reorganizan sus ideas, afectando la transición desde modelos intuitivos hacia modelos científicos.

Estas condiciones permiten comprender por qué los errores conceptuales no solo persisten, sino que se refuerzan en determinados contextos. Cuando el estudiante no encuentra conexión entre la Física y su realidad, o cuando el lenguaje utilizado en el aula no logra traducirse en significado, tiende a recurrir a interpretaciones previas que resultan más accesibles desde su experiencia cotidiana. En este sentido, los factores socioculturales actúan como un filtro a través del cual se construye el conocimiento, influyendo tanto en la comprensión como en la motivación para aprender. Reconocer este escenario resulta fundamental para diseñar estrategias pedagógicas que no solo transmitan contenido, sino que logren conectar la ciencia con el contexto del estudiante, facilitando una comprensión más significativa y coherente del conocimiento físico.

4.4. Rol de las habilidades blandas

La formación en Física dentro de carreras técnicas como la Ingeniería Mecánica no puede limitarse al dominio de contenidos conceptuales y matemáticos, sino que debe integrar habilidades que permitan al estudiante interpretar, comunicar y aplicar el conocimiento en contextos reales. Las denominadas habilidades blandas (como el pensamiento crítico, la comunicación científica, la resolución de problemas complejos y el trabajo colaborativo) cumplen un papel fundamental en este proceso, ya que



permiten transformar el conocimiento teórico en herramientas útiles para la toma de decisiones.

En el ámbito profesional, la capacidad de analizar una situación, cuestionar resultados, justificar modelos y comunicar soluciones resulta tan relevante como la correcta aplicación de ecuaciones físicas. El World Economic Forum (2020) destaca que el pensamiento analítico, la resolución de problemas complejos y la capacidad de aprendizaje continuo se encuentran entre las competencias más demandadas en contextos laborales actuales, lo que refuerza la necesidad de integrarlas en la formación científica.

En este aspecto, la enseñanza de la Física debe articular habilidades técnicas y habilidades blandas de manera complementaria, evitando una formación fragmentada donde el estudiante domina procedimientos sin comprender su aplicación. En la Tabla 4-1 sintetiza esta relación, mostrando cómo ambas dimensiones contribuyen al desarrollo profesional del estudiante:

Tabla 4-1: Relación entre habilidades técnicas (hard skills) y habilidades blandas (soft skills) en la formación científica

Dimensión	Habilidades técnicas	Habilidades blandas	Aplicación en Física e Ingeniería
Naturaleza	Conocimiento formal y específico	Capacidades cognitivas y sociales	Integración teoría-práctica
Ejemplo en Física	Resolución de ecuaciones diferenciales	Pensamiento crítico	Evaluar si un modelo físico es válido
Matemáticas	Manipulación algebraica y cálculo	Interpretación conceptual	Comprender el significado físico de una ecuación
Experimentación	Uso de instrumentos y medición	Trabajo en equipo	Desarrollo de prácticas de laboratorio
Modelación	Construcción de modelos matemáticos	Resolución de problemas	Aplicación a sistemas reales
Comunicación	Uso de lenguaje técnico	Comunicación científica	Explicar resultados y justificar conclusiones
Toma de decisiones	Aplicación de métodos numéricos	Pensamiento analítico	Selección del modelo adecuado

Fuente: Elaboración propia





La integración de estas habilidades permite comprender que el aprendizaje de la Física no se reduce a la obtención de resultados correctos, sino a la capacidad de interpretar, cuestionar y aplicar el conocimiento en contextos complejos. En escenarios como el de la UTELVT, donde existen brechas en la formación previa, el desarrollo de habilidades blandas se convierte en un elemento clave para fortalecer el aprendizaje, ya que facilita la reconstrucción conceptual, mejora la comprensión y promueve una formación más integral del futuro ingeniero.

Aterrizar este enfoque en la Ingeniería Mecánica exige, lejos de acumular teoría innecesaria, que el alumno lidie con la resolución de problemas reales en diseño estructural o térmico. Es ahí donde la comunicación técnica se vuelve vital; no basta con operar ecuaciones si luego el futuro profesional no puede traducir variables físicas complejas en informes claros para grupos multidisciplinarios. Asimismo, los proyectos de fabricación y simulación demandan un trabajo en equipo real, forzando a coordinar esfuerzos y consensuar métodos de análisis tal como ocurre en la industria. Este ejercicio cierra con la ética profesional: un pilar que añade responsabilidad social al obligar al diseñador a evaluar el impacto ambiental, los márgenes de seguridad y la viabilidad de los materiales, garantizando que las leyes de la física resguarden el bienestar colectivo y promuevan tecnologías sostenibles.

4.5. Propuesta pedagógica desde la cátedra de Física

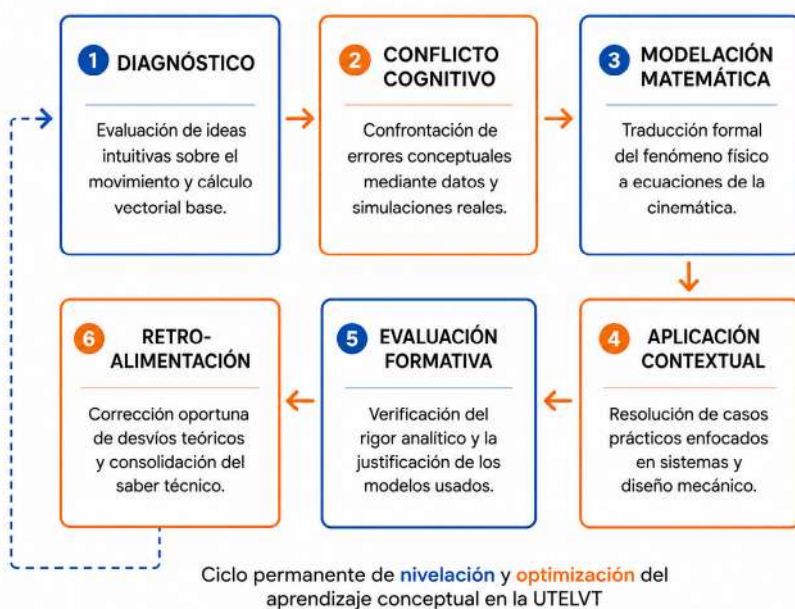
Superar las barreras analíticas y los defectos memorísticos que entorpecen históricamente el aprendizaje de las ciencias exactas en la UTELVT exige un cambio drástico hacia una metodología que se centre en el aprendizaje activo por parte del estudiante. La instrucción en ciencias básicas dentro de la Ingeniería Mecánica no puede centrarse en la transmisión de fórmulas mecánicas; por el contrario, requiere un diseño instruccional estructurado que parta de las condiciones cognitivas reales de los estudiantes y dialogue con las demandas de su futuro ejercicio profesional. Bajo esta premisa, la propuesta abandona la improvisación didáctica para organizarse en un ciclo secuencial de intervención. Este flujo articula



la reconstrucción conceptual y la precisión del lenguaje algebraico con las realidades prácticas del entorno industrial, logrando que cada ley física adquiriera un sentido tangible, utilitario y transformador.

Para materializar este enfoque con rigor pedagógico, el conjunto de pasos se muestra mediante una secuencia lineal continua integrada por seis fases críticas, tal como se ilustra en la Figura 4-2. Este engranaje metodológico no opera como un conjunto de pasos estáticos, sino como un sistema dinámico donde cada etapa prepara el terreno cognitivo para la siguiente, asegurando una transición fluida desde la intuición básica hasta la competencia ingenieril.

Figura 4-3: Flujo operativo del ciclo de cambio conceptual y modelación matemática



Fuente: Elaboración propia

El desarrollo operativo de las fases del ciclo didáctico está seccionado de la siguiente forma:

1.-Diagnóstico conceptual y matemático: El proceso arranca con un rastreo profundo diseñado para mapear los vacíos en herramientas de cálculo y las



preconcepciones intuitivas del grupo. Mediante reactivos cualitativos, se explora cómo interpreta el alumno los fenómenos del movimiento antes de la instrucción formal, identificando si arrastra la noción errónea de que la fuerza es proporcional a la velocidad o si posee dificultades operativas para descomponer un vector espacial.

2.-Activación del conflicto cognitivo: Una vez detectadas estas teorías intuitivas, la estrategia se enfoca en desestabilizarlas confrontando al estudiante con datos empíricos, experimentos de cátedra o simulaciones virtuales donde sus predicciones basadas en el sentido común fallan de forma sistemática. Observar que dos cuerpos de masas distintas caen de forma simultánea en el vacío quiebra la rigidez mental del alumno, despertando una necesidad cognitiva real por encontrar un modelo explicativo metodológicamente válido.

3.-Modelación matemática y formalización: Con la estructura cognitiva dispuesta al cambio, el docente introduce formalmente las leyes de la física, transitando de la descripción cualitativa a la codificación algebraica de la cinemática. En esta etapa, las ecuaciones dejan de percibirse como meras combinaciones numéricas abstractas y pasan a entenderse como el lenguaje formal que describe la geometría del espacio y las regularidades de los sistemas mecánicos.

4.-Aplicación contextual en Ingeniería Mecánica: El conocimiento formalizado se somete de inmediato a prueba vinculando la teoría física con problemas auténticos del perfil profesional. Los estudiantes se enfrentan al análisis de mecanismos reales, al cálculo de esfuerzos en estructuras estáticas o a la evaluación de variables termodinámicas en sistemas de transferencia de calor, demostrando que el dominio de estas leyes es medular para diseñar maquinaria segura y resolver contingencias técnicas en el campo laboral.

5.-Evaluación formativa y argumentación: Rompiendo con la evaluación centrada de manera exclusiva en el resultado numérico, esta fase prioriza la fiscalización del proceso de razonamiento. Las actividades exigen



que el alumno justifique la selección de sus modelos, interprete los límites de validez de las ecuaciones empleadas y defienda sus conclusiones basándose en principios físicos, detectando si comprendió verdaderamente la lógica interna del fenómeno o si replicó un algoritmo mecánicamente.

6.-Retroalimentación y cierre de brechas: El ciclo didáctico culmina con una intervención oportuna orientada a corregir desvíos teóricos y consolidar el saber técnico en tiempo real. Como se observa en la línea discontinua de la Figura 4-2, esta etapa se conecta de forma directa con el inicio del proceso, consolidando un ciclo permanente de nivelación que asegura que ningún alumno avance con vacíos estructurales que pongan en riesgo su desempeño en las asignaturas avanzadas del plan de estudios.

Sección pedagógica

Preguntas de Reflexión Crítica

1. ¿Por qué una explicación científica correcta no siempre logra cambiar una idea intuitiva equivocada que el estudiante ha construido durante años?
2. ¿De qué manera las condiciones económicas, la falta de laboratorios o la inseguridad académica pueden afectar la forma en que un estudiante aprende Física?
3. ¿Cómo se puede enseñar Física de manera rigurosa en un contexto donde no existen todos los recursos tecnológicos ideales?

Ejercicios Prácticos o de Aplicación Conceptual

Ejercicio 1. Detectar una idea previa equivocada

Elige una idea frecuente: “los objetos pesados caen más rápido”, “el calor es una sustancia”, “la corriente se consume” o “la fuerza mantiene el movimiento”. Explica de dónde podría venir esa idea, por qué parece lógica para el estudiante y cómo se podría trabajar en clase sin ridiculizarla.

Ejercicio 2. Física con recursos locales

Diseña una actividad experimental de bajo costo usando materiales disponibles: botellas, agua, madera, cartón, mangueras, piedras, resortes o teléfonos móviles. La actividad debe permitir analizar un concepto físico útil para Ingeniería Mecánica. Describe el fenómeno, el procedimiento y la reflexión conceptual que deberían realizar los estudiantes.



Criterios de evaluación

Tabla 4-2: Criterios de evaluación de las preguntas y ejercicios

Criterio de evaluación	Excelente (4 puntos)	Satisfactorio (3 puntos)	En proceso (2 puntos)	Inicial (1 punto)
Comprensión de los errores conceptuales y su origen en la experiencia cotidiana	Explica origen y persistencia de errores conceptuales; propone estrategias de conflicto cognitivo para abordarlos.	Reconoce origen de errores y menciona estrategias generales para trabajarlos, sin profundizar.	Identifica algunos errores conceptuales, pero no explica su origen ni su persistencia.	No reconoce errores conceptuales o los considera simples equivocaciones sin importancia.
Análisis del contexto educativo en Ecuador y América Latina y su impacto en el aprendizaje de la física	Analiza factores estructurales (infraestructura, brechas, formación docente) y los vincula con dificultades concretas en el aprendizaje.	Identifica factores contextuales relevantes y los relaciona de manera general con el aprendizaje de la física.	Menciona algunos factores del contexto, pero sin establecer relaciones claras con el aprendizaje.	Ignora el contexto educativo o lo considera irrelevante para el aprendizaje de la física.
Identificación de factores socioculturales que influyen en la motivación y comprensión de la física	Reconoce factores socioculturales (lenguaje, entorno familiar, percepción social) y explica su influencia en la motivación y comprensión.	Identifica factores socioculturales y los relaciona superficialmente con la motivación o comprensión.	Menciona algún factor sociocultural, pero sin explicar su influencia en el aprendizaje.	No reconoce factores socioculturales o los considera irrelevantes para el aprendizaje.
Capacidad para diseñar una actividad de bajo costo con recursos locales (Ejercicio 2)	Diseña actividad experimental con materiales locales, describe fenómeno, procedimiento y reflexión conceptual vinculada a Ingeniería Mecánica.	Diseña actividad con recursos locales, pero la reflexión conceptual o la vinculación con Ingeniería Mecánica es parcial.	Propone actividad genérica sin especificar materiales o procedimiento; la reflexión conceptual es débil.	No logra diseñar una actividad o propone una que no utiliza recursos locales ni aborda conceptos físicos.
Argumentación y pensamiento crítico en las respuestas a las preguntas de reflexión	Responde con coherencia, fundamentación y relaciona teoría constructivista con situaciones concretas de enseñanza.	Expone posturas comprensibles y parcialmente fundamentadas; algunas conexiones con la práctica son poco explícitas.	Presenta ideas pertinentes pero desorganizadas o con escasa justificación teórica; argumentación débil.	Responde con afirmaciones aisladas o vagas, sin fundamento conceptual o reproduciendo definiciones mecánicamente.

Fuente: Elaboración propia

Lecturas Recomendadas



Vosniadou, S. (2013). International Handbook of Research on Conceptual Change.

Ayuda a entender por qué los estudiantes no abandonan fácilmente sus ideas previas. Es especialmente útil para trabajar errores conceptuales en Física.



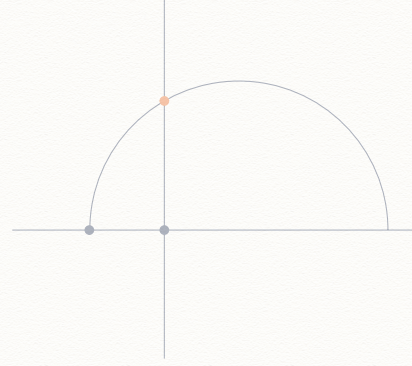
Cedeño, J., & Zambrano, P. (2021). "Estrategias didácticas activas para la enseñanza de ciencias en contextos"

Es pertinente porque acerca la discusión pedagógica al contexto latinoamericano y a realidades educativas con recursos limitados.

P.1

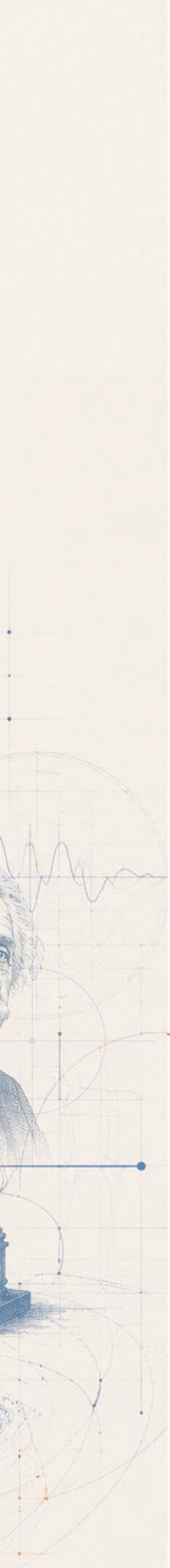


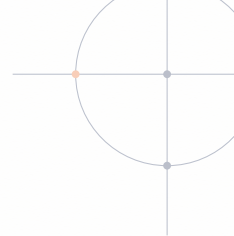




PARTE II.

EVOLUCIÓN HISTÓRICA Y CONCEPTUAL DE LA FÍSICA





5. LA FÍSICA EN LA ANTIGÜEDAD Y EDAD MEDIA

Objetivos de Aprendizaje del Capítulo

Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

- » Analizar los aportes de distintas culturas antiguas al desarrollo de formas tempranas de observación, medición y explicación de fenómenos naturales.
- » Evaluar la transición del pensamiento mítico al pensamiento racional, reconociendo el papel de Grecia, Alejandría y la Edad Media en la formación del pensamiento científico.
- » Crear una comparación crítica entre una explicación antigua de la naturaleza y una interpretación física moderna vinculada con problemas de ingeniería.

P.2

EVOLUCIÓN HISTÓRICA Y CONCEPTUAL DE LA FÍSICA

Introducción

Entender cómo nació la física obliga a mirar hacia la antigüedad y el medievo, tiempos donde arrancaron los primeros intentos reales por darle un orden sistemático a la naturaleza. Esta evolución, que no debe verse como un archivo de ideas muertas, se fue tejiendo de forma gradual y discontinua: arrancó con el registro empírico de los astros en Mesopotamia, maduró gracias al debate racional de los filósofos en Grecia y sumó nuevas miradas dinámicas durante la época medieval. En esos siglos, a nadie se le ocurría separar la física como una materia independiente; al contrario, todo se diluía en la filosofía natural, un campo mucho más amplio enfocado en descifrar el movimiento o el universo sin enredarse en matemáticas pesadas. Pese a sus obvios vacíos, estos modelos primigenios terminaron siendo los pilares indispensables para que, siglos después, pudiera levantarse la ciencia moderna.

5.1. Física en otras culturas

El conocimiento científico no pertenece solo a una cultura en particular. Muchas culturas lo han construido a lo largo del tiempo. Antes de que surgiera la forma de pensar de los griegos, otras civilizaciones ya estaban encontrando formas de entender y cambiar el mundo que los rodeaba. Lo hacían porque necesitaban resolver problemas prácticos como cultivar la tierra, navegar, construir





y observar el cielo. Estas culturas no veían la Física como una materia especial, pero sí tenían sus propias formas de explicar el mundo. Se basaban en lo que veían, en lo que experimentaban y en lo que les contaban sus antepasados. En cierto sentido, la humanidad siempre ha hecho ciencia, incluso antes de darle un nombre. La gente encontraba formas de explicar su entorno, y aunque no eran como las explicaciones científicas de hoy en día, tenían sentido según su cultura y sus necesidades.

5.1.1. Mesopotamia

Figura 5-1: Tablilla cuneiforme mesopotámica

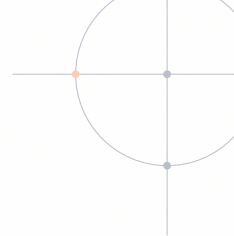


Fuente: The J. Paul Getty Museum (2024).

La necesidad de organizar los ciclos agrícolas, medir la tierra y sistematizar observaciones astronómicas llevó a que en Mesopotamia (civilización asentada entre los ríos Tigris y Éufrates) se desarrollaran los primeros modelos estructurales para entender el entorno (Institute for the Study of Ancient Cultures, 2026). Si bien este esfuerzo no constituía ciencia en el sentido contemporáneo, las personas aplicaron métodos sistemáticos de medición a problemas prácticos como la edificación, la irrigación y el comercio. De ahí nació el sistema sexagesimal apoyado en el número 60; un esquema de cálculo cuya vigencia heredamos hoy al medir el tiempo o fraccionar geométricamente los ángulos. Esta matemática sirvió de puente para atar el movimiento de los astros con la gestión del día a día, logrando un avance tecnológico y administrativo que, de acuerdo con registros históricos, sentó sus bases fundacionales en las ciudades mesopotámicas entre los años 3400 y 3000 a. C. (The J. Paul Getty Museum, 2024).

Más allá de su naturaleza material, el valor histórico de los soportes cuneiformes, cuyas características se aprecian en la Figura 5-1, radica en su papel como los primeros sistemas estructurados para la preserva-





ción y medición de datos organizados. Su utilidad excedió por mucho el simple control de transacciones comerciales: estas herramientas sirvieron para fijar cálculos avanzados y tabular observaciones celestes metódicas. En sus caracteres se albergan desde listas numéricas y tablas de multiplicación hasta registros del movimiento de los astros; una acumulación documental que demuestra cómo estas sociedades identificaban regularidades numéricas y patrones cíclicos en su entorno. De este modo, la tablilla cuneiforme operó como un puente cognitivo fundamental para fijar la tríada metodológica de observar, registrar y analizar, un ejercicio de sistematización empírica que sentó las bases primitivas del pensamiento científico en la historia humana.

5.1.2. Antiguo Egipto

A diferencia del enfoque cuantitativo de Mesopotamia, el aprendizaje sobre el mundo físico en el Antiguo Egipto floreció en estrecha respuesta a necesidades netamente pragmáticas, tales como la ingeniería de canales de regadío, la agrimensura y la edificación a gran escala. Esta vertiente práctica se apoyó en métodos matemáticos sistemáticos orientados a resolver problemas del entorno real mediante el cálculo de áreas, proporciones y volúmenes geométricos, una sistematización procedimental que encuentra su máxima evidencia histórica en el Papiro de Rhind (hacia 1650 a. C.), cuyas instrucciones operativas se enlazan con el contenido visual de la Figura 5-2. Lejos de depender de formalismos algebraicos avanzados, este desarrollo técnico demuestra cómo el dominio empírico de las fuerzas mecánicas y el transporte de bloques de piedra respon-

Figura 5-2: Papiro de Rhind del Antiguo Egipto



Fuente: British Museum (2026).





dían a una planificación rigurosa de las obras civiles. De este modo, tal como argumenta Clagett (1999), las matemáticas egipcias operaron como una herramienta de ingeniería fundamental que forjó un vínculo directo e inseparable entre el acto de medir, la edificación arquitectónica y el control del entorno físico.

5.1.3. China antigua

Figura 5-3: Brújula primitiva china basada de piedra imán



Fuente: Silverman (2026).

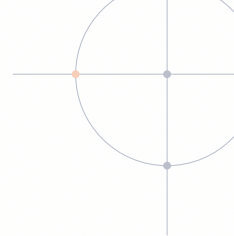
En la China antigua, la gente se enfocó en observar y experimentar para entender el mundo físico. A diferencia de otras civilizaciones donde predominó la abstracción o la cuantificación, la tradición China integró la comprensión de la naturaleza con una visión filosófica basada en el equilibrio y la interacción de fuerzas, como el yin y el yang⁶. Esto les permitió desarrollar conocimientos prácticos en áreas como la mecánica, la astronomía y la ingeniería hidráulica. Estos conocimientos se usaban para resolver problemas reales, como la agricultura, la navegación y la organización del territorio. La Física no se consideraba una ciencia aparte, sino parte de una forma de entender el mundo que se basaba en la observación y la experiencia.

Uno de los aportes más significativos fue el estudio del magnetismo, que llevó al desarrollo de las primeras brújulas basadas en piedra imán (lodestone) como se ve en la Figura 5-3, utilizadas inicialmente con fines geománticos y posteriormente en navegación. De igual forma, los textos asociados a Mozi⁷ describen principios ópticos como la propagación rectilínea de la luz y la formación de imágenes, evidenciando una comprensión experimental de fenómenos que más adelante serían formalizados en la física moderna. Según Cullen (2017), la ciencia china se caracterizaba por

⁶**Yin y Yang:** Concepto fundamental de la filosofía china que describe la existencia de dos fuerzas opuestas pero complementarias e interdependientes que se encuentran en todas las cosas del universo.

⁷**Mozi (aprox. 470-391 a. C.):** Filósofo chino y fundador del moísmo, cuyas investigaciones en el Canon Moista contienen algunas de las primeras observaciones sistemáticas sobre la física en la historia.





una tradición técnica muy desarrollada. La gente generaba conocimiento a partir de la práctica y la experimentación, y priorizaba la utilidad sobre la formalización matemática. Esto no solo permitió avances tecnológicos importantes, sino que también estableció una forma particular de construir conocimiento. La observación sistemática y la experiencia eran la base para entender el mundo físico.

Este invento fue sumamente importante en la historia de esta cultura al pasar de usarse como un simple amuleto ritual a consolidarse como la herramienta principal para no perder el rumbo en alta mar durante viajes largos. Se convirtió así en el primer uso práctico que la humanidad les dio a los campos magnéticos, abriendo la puerta a tecnologías de orientación que terminaron por cambiar la evolución del pensamiento científico.

5.1.4. India antigua

En la antigua India, la gente pensaba mucho sobre la materia y el universo. Querían saber de qué estaba hecho todo. A diferencia de otras civilizaciones, que se enfocaban en hacer cosas prácticas o en observar la naturaleza, en la India se desarrollaron ideas muy abstractas. Uno de los aportes más relevantes fue la formulación temprana de una teoría atómica por parte del filósofo Kanada⁸, quien propuso que toda la materia está compuesta por partículas indivisibles denominadas anu (Chakrabarti, 2019). Esto fue una forma temprana de pensar en la materia de manera sistemática, mucho antes de que se desarrollara la física moderna.

La civilización india también hizo contribuciones clave al sistema numérico decimal y al uso del cero. Estos avances permitieron una representación más efi-

Figura 5-4: Representación del cero en manuscrito indio



Fuente: Bodleian Libraries (2017).

⁸Kanada (aprox. siglo VI a. C.): Filósofo y sabio de la antigua India, fundador de la escuela de pensamiento Vaisheshika.





ciente de cantidades, facilitando cálculos complejos y el desarrollo posterior del álgebra y la física matemática. Según Plofker (2009), la matemática india no solo tuvo un carácter abstracto, sino que también estuvo orientada a resolver problemas astronómicos y geométricos, estableciendo una relación directa entre cálculo y observación del mundo natural. De este modo, la tradición india sentó bases fundamentales para el lenguaje matemático de la física, mostrando que la comprensión de la naturaleza no solo depende de la observación, sino también de la capacidad de representarla mediante sistemas simbólicos coherentes.

La Figura 5-4 muestra una de las primeras veces que se usó el símbolo del cero en esta cultura. El cero introduce la idea de que puede haber ausencia de valor en un número. Esto ayudó a crear sistemas de numeración más eficientes. Con este desarrollo, se pudieron hacer cálculos más complejos. Se sentaron las bases para la aritmética avanzada y el álgebra. Luego, se creó un formalismo matemático para la física y se incorporaron conceptos abstractos que no vienen directamente de la observación, sino que vienen de la necesidad de tener sistemas simbólicos coherentes que describan el mundo de manera más precisa.

5.1.5. Cultura maya

Atar la arquitectura monumental con el conteo cíclico de los días es, precisamente, lo que define el estudio del entorno físico dentro de la cultura maya. Lejos de tratar la ciencia como algo abstracto, este pueblo logró que el minucioso rastreo del Sol, la Luna y Venus sirviera para levantar calendarios de asombrosa exactitud (como el Tzolk'in y el Haab'), herramientas



que no solo ordenaban rituales o siembras, sino que materializaban una modelación empírica apoyada en regularidades del firmamento. Esta asimilación conceptual se plasmó de forma directa en su ingeniería urbana: el observatorio de Chichén Itzá (El Caracol), visible en la Figura 5-5, destaca como un ejemplo clave donde los muros muestran alineaciones geométricas milimétricas con eventos celestes. Todo este engranaje técnico técnico coincide con lo expuesto por Aveni (2001) en su obra “Sky-watchers”, demostrando que el saber maya rompió los límites del mito para consolidar predicciones astronómicas precisas, forjando un vínculo directo entre geometría, tiempo y organización del espacio.

5.1.6. Implicaciones didácticas para la física

De Mesopotamia heredamos una lección didáctica importante: tabular y registrar datos numéricos va siempre antes que cualquier fórmula abstracta. Llevar esto a la cinemática enseña al alumno que las leyes físicas no nacen de la nada, sino de medir variables de forma metódica hasta dar con patrones en el tiempo y el espacio. Desarmar allí el sistema sexagesimal demuestra que la matemática no es un castigo algebraico, sino un código relacional útil para atar los astros con la rutina diaria.

Por otro lado, el pragmatismo del Antiguo Egipto es ideal para erradicar el cálculo a ciegas mediante problemas auténticos de ingeniería. Utilizar el Papiro de Rhind faculta al profesor para lanzar retos prácticos (como calcular el arrastre de bloques o equilibrar cargas pesadas) mucho antes de escribir ecuaciones de fricción. Así, el estudiante nota que calcular áreas o volú-

Figura 5-5: Observatorio maya “El Caracol” en Chichén Itzá



Fuente: Laudij (2026).

P.2





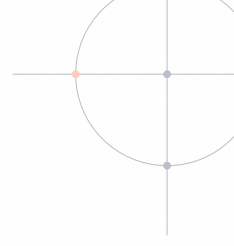
menes responde a necesidades reales de la construcción, entendiendo que el dominio empírico de las fuerzas sostiene los principios de conservación actuales.

Asimismo, la tradición experimental de la China antigua refresca las clases al rescatar la observación directa como el detonante del conflicto cognitivo. Analizar los espejos o los primeros imanes atribuidos a Mozi permite montar laboratorios de bajo costo donde el fin no es repetir fórmulas, sino desmenuzar cualitativamente el fenómeno. Obligar al universitario a lidiar con la luz sin usar álgebra de entrada prepara su mente para que la teoría final adquiera un significado real y vivido.

En cuanto a la India antigua, su peso filosófico y la invención del cero nos dejan una enseñanza profunda sobre el valor de la abstracción en ciencias. Revisar los átomos primitivos de Kanada demuestra al futuro ingeniero que la física también se construye representando mundos microscópicos invisibles mediante sistemas simbólicos coherentes. Esta mirada despierta el juicio crítico al probar que conceptos abstractos (como campos probabilísticos) son herramientas intelectuales legítimas para modelar la naturaleza íntima.

Finalmente, la orientación arquitectónica de los mayas cierra este ciclo uniendo geometría, medición del tiempo y entorno sociocultural. Estudiar monumentos como El Caracol abre la puerta a tareas donde el alumno cruza la trigonometría con ciclos naturales que puede ver en su realidad. Desde el enfoque constructivista, esta ciencia humaniza la materia y transforma el aula en un taller de indagación colectiva, forjando el pensamiento crítico necesario para intervenir con responsabilidad en el territorio.





5.2. Grecia: nace el pensamiento racional

El inicio de la transición conceptual desde los mitos hacia el razonamiento sistemático es el gran quiebre epistemológico que marcó la antigua Grecia. Las civilizaciones previas acumulaban saberes empíricos muy atados a necesidades del día a día; en contraste, los pensadores griegos introdujeron la exigencia de descifrar la naturaleza mediante argumentación lógica y principios generales. La naturaleza, lejos de explicarse por fuerzas mágicas, pasó a concebirse como un cosmos ordenado, dando origen a la filosofía natural. Al respecto, Quintanilla (2022) analiza que esta trayectoria científica arrancó en el siglo VI a. C. con la escuela jónica y su búsqueda de un elemento primordial, un hilo conductor que abarcó luego las tesis de Empédocles de Agrigento⁹ o el atomismo de Leucipo¹⁰ y Demócrito, extendiendo su influencia hasta el año 415 a. C. con la muerte de Hipatia de Alejandría¹¹.

Este cambio no fue solo teórico, sino que cambió la forma en que entendemos el conocimiento. Ahora se basa en la reflexión crítica y en buscar patrones en la naturaleza. Estos elementos siguen siendo fundamentales en la enseñanza de la física hoy en día. La Figura 5-6 muestra los pilares básicos del pensamiento científico en la Antigua Grecia. Describe cómo la observación racional del mundo llevó a crear modelos que explican la naturaleza. Esto sucedió en cuatro momentos importantes: el surgimiento del logos con Tales de Mileto¹², la concepción atomista de Demócrito¹³, la sistematización de la physis¹⁴ en Aristóteles¹⁵ y el desarrollo de la mecánica en Arquímedes¹⁶.

⁹**Empédocles de Agrigento (aprox. 495-435 a. C.):** Filósofo y político griego presocrático, conocido por formular la teoría de los cuatro elementos (tierra, agua, aire y fuego), los cuales consideraba las "raíces" imperecederas de todo lo existente.

¹⁰**Leucipo (siglo V a. C.):** Filósofo griego presocrático a quien se le atribuye la fundación del atomismo.

¹¹**Hipatia de Alejandría (aprox. 360-415 d. C.):** Matemática, astrónoma y filósofa neoplatónica, reconocida como la primera mujer científica de cuya vida y obra se tiene un registro detallado.

¹²**Tales de Mileto (aprox. 624-546 a. C.):** Filósofo, matemático y astrónomo griego, considerado el primer filósofo de la naturaleza de la tradición occidental.

¹³**Demócrito (aprox. 460-370 a. C.):** Filósofo griego presocrático y principal desarrollador de la teoría atómica iniciada por su maestro Leucipo.

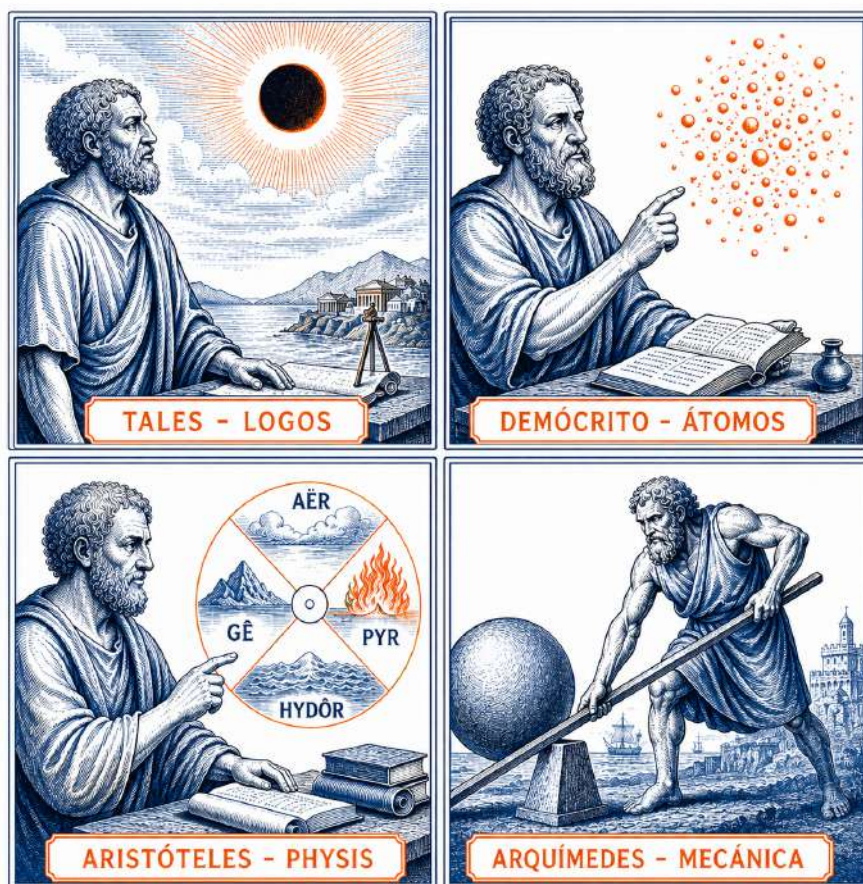
¹⁴**Physis:** Término griego del que deriva la palabra «física» y que originalmente designaba la fuerza interna que hace que las cosas broten, crezcan y se desarrollen por sí mismas.

¹⁵**Aristóteles (384-322 a. C.):** Filósofo y polímata griego cuyas ideas dominaron el pensamiento científico durante casi dos milenios.

¹⁶**Arquímedes de Siracusa (aprox. 287-212 a. C.):** Físico, matemático e ingeniero griego, considerado el mayor científico de la Antigüedad.



Figura 5-6: Pilares del pensamiento científico en la Antigua Grecia



Fuente: Elaboración propia mediante DALL-E 3.

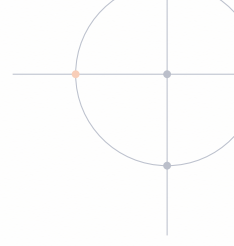
5.2.1. El paso al Logos

Romper con las historias de deidades antropomórficas y fuerzas mágicas es el gran salto conceptual que instauro la antigua Grecia para transformar las estructuras de la mente humana, dando paso a una observación guiada por la razón pura. El *mythos*¹⁷ asumía ciegamente que los fenómenos de la naturaleza respondían al capricho o voluntad de seres celestiales; en contraposición, el *logos*¹⁸ introdujo la idea revolucionaria de que la physis posee un orden intrínseco regido por leyes estables. Esta cruzada intelectual de los primeros filósofos presocráticos se concentró en desentrañar el origen primigenio del universo material. El agua sirvió de base explicativa para Tales de Mileto, mientras que Anaximandro¹⁹ dio un paso hacia la abstracción al plantear su conocida no-

¹⁷**Mythos:** Término griego que designa el pensamiento mítico o narrativo, utilizado en la Antigüedad para explicar el origen del universo y los fenómenos naturales a través de relatos sobre dioses y fuerzas sobrenaturales.

¹⁸**Logos:** Término griego que representa la razón, el discurso racional y la ley universal.

¹⁹**Anaximandro (aprox. 610-545 a. C.):** Filósofo, astrónomo y geógrafo griego de la escuela de Mileto, discípulo de Tales.



ción del ápeiron como una sustancia indefinida e ilimitada de donde todo emerge. Este esfuerzo por hallar regularidades conceptuales se describe con precisión en la literatura especializada:

“El arché no es simplemente el primer elemento en un sentido temporal, sino el principio constitutivo y explicativo de la realidad, aquello que permanece a través del cambio y que permite comprender la multiplicidad del mundo como una manifestación de una unidad subyacente” (Kirk et al., 2010, p. 118).

P.2

Lejos de quedar estancado en una mera especulación, este quiebre epistémico funcionó como el motor principal de un cambio de paradigma²⁰ total. El universo físico dejó de verse como un escenario caótico o aleatorio para transformarse en un objeto de estudio racionalizable que la inteligencia puede analizar, medir e investigar de forma metódica. Al entender los fenómenos celestes ya no como presagios divinos sino como regularidades predecibles, un hito histórico que se asocia fuertemente con la observación que hizo Tales del eclipse, la filosofía de la naturaleza plantó los cimientos analíticos sobre los que más tarde se edificaría la estructura conceptual de la física actual.

5.2.2. El atomismo

La propuesta fundacional del atomismo, cuya representación teórica se sintetiza en la Figura 5-7, postula que la materia, lejos de constituir un continuo infinito, se encuentra estructurada por unidades indivisibles denominadas átomos. Así, la diversidad del cosmos observable deja de ser un misterio para explicarse mediante la constante combinación, choque y disposición geométrica de estas entidades elementales. Esta interpretación de la physis se alinea con la tradición recogida por Kirk et al. (2010), quienes atribuyen a Demócrito una afirmación que redefine las bases de la ontología material:

²⁰**Paradigma:** Término popularizado por el filósofo Thomas Kuhn para definir el conjunto de conceptos, valores, técnicas y creencias compartidos por una comunidad científica en un momento dado.





“Por convención existen el color, lo dulce y lo amargo; en realidad, solo existen los átomos y el vacío” (Kirk et al., 2010, p. 410).

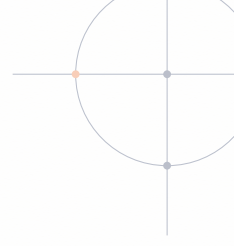
Semejante enunciado representa una ruptura conceptual profunda: la realidad deja de entenderse como algo continuo y pasa a concebirse como una arquitectura discreta, un modelo mecánico donde la existencia del vacío opera como la condición *sine qua non* (sin la cual no) para el movimiento. El vacío no es la simple nada, sino el escenario tridimensional indispensable para que los átomos se dispersen y se agrupen de forma dinámica; una tesis de tal peso epistémico que obligó incluso a filosofías opuestas a examinarla a fondo.

El propio Aristóteles, en su crítica a los atomistas, termina por reconocer la relevancia de este concepto al señalar que “el vacío existe y es aquello en lo cual se mueven los cuerpos” (Aristóteles, 1995, p. 231), probando cómo esta noción cambió la comprensión del espacio al dejar de verlo como un pleno absoluto. De este modo, la teoría atómica configuró uno de los primeros intentos históricos por explicar el universo de manera mecánica, sentando un precedente metodológico clave sobre cómo los seres humanos creamos modelos abstractos para tratar de entender la naturaleza íntima del mundo real.

5.2.3. La física de Aristóteles

En clara oposición al atomismo de Demócrito, la física de Aristóteles edifica una visión de la naturaleza apoyada en una concepción teleológica donde cualquier mutación o cambio material responde a una finalidad interna. Bajo este prisma, la *physis* opera como el motor intrínseco de los seres en su búsqueda por alcanzar su máximo potencial o entelequia²¹, transformando el movimiento de un simple traslado de partículas en el vacío a un tránsito formal que el filósofo define al señalar que “la naturaleza es un principio y causa del movimiento y del reposo en aquello en lo que se encuentra primariamente por sí mismo” (Aristóteles, 1995, 127).

²¹Entelequia: Significa “tener el fin en sí mismo”, refiriéndose a la fuerza interna que impulsa a un ser hacia su desarrollo completo.



Esta arquitectura teórica halla su encaje práctico en la hipótesis del “lugar natural”, un orden cósmico donde los elementos (tierra, agua, aire y fuego) buscan su posición correcta según su propia esencia, justificando de forma observacional por qué los cuerpos pesados caen y los ligeros ascienden sin requerir un empuje externo constante. Semejante física cualitativa choca drásticamente con los cimientos de la mecánica actual: mientras el modelo aristotélico exigía una causa activa constante para justificar el desplazamiento de los objetos en el espacio, la inercia moderna de Galileo y Newton postula de modo contraintuitiva que un cuerpo persevera en su estado de movimiento rectilíneo uniforme indefinidamente a menos que una fuerza neta externa actúe sobre él.

P.2

EVOLUCIÓN HISTÓRICA Y CONCEPTUAL DE LA FÍSICA

5.2.4. La edad de oro en Alejandría

El florecimiento intelectual de Alejandría representó un hito excepcional para la ciencia de la Antigüedad, caracterizado por la transición de la mera observación cualitativa hacia la modelación matemática y la experimentación geométrica aplicada a la mecánica. En este escenario destaca la figura de Arquímedes, cuyo dominio de la *mēchanikē* permitió traducir complejos problemas prácticos en rigurosos principios físicos. Su célebre afirmación, recogida históricamente por Pappus de Alejandría²², sintetiza esta sobresaliente capacidad de abstracción:

**“Dadme un punto de apoyo y moveré la Tierra”
(Heath, 1897, p. 19)**

Lejos de constituir una simple declaración retórica, este postulado reflejaba una comprensión matemática profunda de la estática y de la ventaja mecánica, demostrando cómo la magnitud de una fuerza motriz puede multiplicarse de forma inversamente proporcional a la longitud del brazo de palanca empleado. Este rigor metodológico se extendió con igual lucidez al plano astronómico de la escuela alejandrina. Por un lado, Aristarco

²²Pappus de Alejandría (aprox. 290-350 d. C.): Fue uno de los últimos grandes matemáticos griegos de la Antigüedad.





de Samos formuló una hipótesis heliocéntrica audaz al proponer que la Tierra orbita alrededor del Sol, un quiebre paradigmático adelantado casi dos milenios a la revolución copernicana que, como señala Heath (1913), lo consolidó como el primero en concebir un sistema donde el Sol ocupa el centro del universo conocido.

Por otro lado, Eratóstenes de Cirene²³ logró determinar la circunferencia terrestre con un margen mínimo de error mediante observaciones geométricas abstractas; un logro metodológico donde, tal como describe Cleomedes²⁴, se midió la Tierra mediante la observación de las sombras y la proporción de los ángulos de incidencia solar durante el solsticio. Semejante periodo de esplendor conceptual, sin embargo, sufrió una interrupción irreversible con la decadencia y paulatina desaparición de la Biblioteca de Alejandría. Como destaca Canfora (1989), este espacio no operaba como un simple depósito pasivo de textos, sino como un centro activo de investigación y enseñanza cuya pérdida clausuró una rica tradición intelectual que había permitido cimentar los avances fundacionales de la física.

5.2.5. Implicaciones didácticas para la física

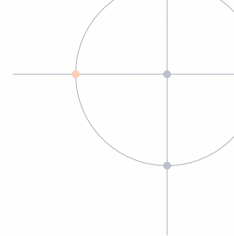
Provocar un verdadero cambio conceptual en el aula universitaria exige (emulando el histórico quiebre del *mythos* al logos) desestabilizar las explicaciones que el alumno trae basadas en el simple sentido común. La física no debe enseñarse como un catálogo de verdades estáticas que se dictan de forma pasiva; el reto didáctico radica en guiar al estudiante para que rastree regularidades internas en los fenómenos mecánicos. Al buscar principios estables y repetibles, en lugar de achacarle los cambios al azar o a nociones intuitivas erróneas, el estudiante edifica un pensamiento crítico riguroso. Así, el aula pasa a ser un foro de debate racional donde cualquier hipótesis científica tiene que sostenerse bajo el filtro de la lógica y la coherencia empírica.

²³Eratóstenes de Cirene (aprox. 276-194 a. C.): Polímata, astrónomo y geógrafo griego, director de la Biblioteca de Alejandría.

²⁴Cleomedes (siglo I d. C.): Astrónomo y filósofo griego, perteneciente a la escuela estoica, cuya obra Sobre los movimientos circulares de los cuerpos celestes es una de las fuentes primordiales para conocer la astronomía antigua.

Construir modelos abstractos que descifren el mundo microscópico invisible es, precisamente, la gran lección didáctica que nos hereda el atomismo de Demócrito. Introducir variables discretas como partícula y vacío dentro de las cátedras de termodinámica o mecánica de





materiales sirve para promover el conflicto cognitivo en el grupo. Este enfoque obliga a ir más allá del empirismo ingenuo, esa tendencia a creer solo en lo que el ojo humano percibe a simple vista, y enseña al futuro ingeniero que propiedades macroscópicas como la presión o la temperatura no brotan de la nada, sino que expresan estadísticamente los choques moleculares en un espacio libre, agudizando su destreza técnica.

Por otro lado, la física cualitativa de Aristóteles nos regala una mina de oro metodológica para salirle al paso a los errores conceptuales que se aferran en la mente del alumnado. El pensamiento intuitivo de los jóvenes opera de modo marcadamente aristotélico al asumir, por ejemplo, que se requiere un empuje constante para que un objeto no se frene. Discutir en clase las ideas de teleología o "lugar natural" mediante experimentos de cátedra es el puente perfecto para introducir, de manera contraintuitiva, la inercia de Galileo y Newton. Este análisis histórico ayuda a palpar los límites de la observación simple, logrando que el formalismo algebraico adquiera un sentido real.

Finalmente, el ABP de ingeniería aplicada encuentra su mejor base histórica en la edad de oro de Alejandría. Los trabajos de Arquímedes, Aristarco y Eratóstenes demuestran en la práctica cómo las matemáticas, la modelación espacial y la ventaja mecánica se amalgaman para resolver desafíos reales a gran escala, desde el equilibrio de una palanca industrial hasta la medición de dimensiones planetarias. Desde la mirada constructivista, esta escuela humaniza la materia al transformar la resolución mecánica de ecuaciones en un taller de indagación activa, dotando al profesional de la UTELVT de la capacidad técnica necesaria para optimizar sistemas reales con un sólido criterio científico.

5.3. Edad Media: entre la fe y la razón

El colapso de los conceptos intelectuales de la Antigüedad y la paulatina pérdida de la sistematización metodológica alejandrina no provocaron una extinción total del saber, sino una compleja reorganización en las dinámicas de transmisión y conservación del conocimiento. Durante el periodo medieval, la interpretación de la





naturaleza experimentó una profunda metamorfosis bajo el tamiz de las corrientes teológicas dominantes; un proceso donde el análisis racional no se eliminó, sino que coexistió en una constante tensión dialéctica con los dogmas de la fe. Lejos de constituir una etapa de oscurantismo o un vacío epistémico lineal en la historia de la ciencia, tesis que se alinea con las revisiones historiográficas de Le Goff (2016), el medievo funcionó como un escenario crucial de transición donde el legado científico clásico de la filosofía natural fue activamente rescatado, traducido y reformulado en las primeras universidades. Esta reestructuración del pensamiento físico y lógico, apoyada en el equilibrio entre revelación y argumentación, impidió la dispersión definitiva de los saberes previos y sentó las bases conceptuales indispensables para la posterior eclosión metodológica de la Revolución Científica.

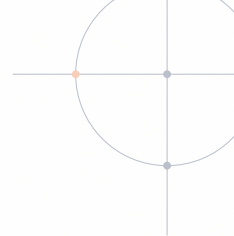
5.3.1. Avances científicos

El periodo medieval fue una época muy importante. No fue una etapa en la que todo se detuvo. En realidad, fue un tiempo en el que se conservó, tradujo y transformó el conocimiento de la antigüedad. En el mundo islámico y en las primeras universidades de Europa, la gente empezó a estudiar la naturaleza de manera más sistemática. Utilizaron la observación, la lógica y el análisis numérico para entender mejor el mundo. En ese momento, la Física no era una disciplina independiente. Sin embargo, se estaban sentando las bases para su desarrollo futuro. Por ejemplo, la gente empezó a experimentar con la óptica y a cuestionar las ideas de Aristóteles sobre el movimiento. También comenzaron a utilizar las matemáticas para entender los cambios en el mundo. Todo esto fue muy importante para el desarrollo de la Física en el futuro.

Uno de los aportes más importantes corresponde a Al-Haytham, conocido en Occidente como Alhacén, cuya obra *Kitāb al-Manāẓir* o Libro de Óptica transformó la comprensión de la visión. Frente a la idea antigua de que el ojo emitía rayos visuales, Al-Haytham²⁵ sostuvo que la visión ocurre porque la luz procedente de los objetos entra en el ojo, argumento desarrollado mediante observaciones geométricas y experimentos con luz, sombras

²⁵Ibn Al-Haytham (Alhacén) (aprox. 965-1040): Polímata árabe nacido en Basora, considerado por historiadores el "padre de la óptica moderna" y un pionero del método científico.





y cámara oscura (Al-Haytham, 2001). Esta interpretación puede representarse mediante la ley de reflexión:

Ecuación 5-1: Ley de reflexión.

$$\theta_i = \theta_r$$

Donde:

- θ_i representa el ángulo de incidencia de la luz sobre una superficie y
- θ_r el ángulo de reflexión.

Esta relación permite comprender que los rayos luminosos siguen trayectorias geométricas definidas desde el objeto hacia el observador. El método de Al-Haytham puede resumirse en cuatro momentos principales: observación, hipótesis, experimentación y verificación geométrica.

En el estudio del movimiento, Juan Filopón²⁶ y, posteriormente, Jean Buridan²⁷ introdujeron una crítica decisiva a la Física aristotélica. Para Aristóteles, el movimiento violento requería una causa externa continua; Filopón cuestionó esta idea al proponer que el proyectil recibía una capacidad motriz interna al ser lanzado. Buridan desarrolló más tarde esta noción bajo el concepto de ímpetu, entendido como una cualidad transferida al cuerpo que permite mantener su movimiento hasta ser debilitada por la resistencia del medio y la gravedad (Grant, 1996). Esta idea no equivale todavía a la inercia newtoniana, pero constituye un antecedente conceptual importante, porque desplaza la explicación del movimiento desde una causa externa permanente hacia una propiedad adquirida por el cuerpo.

Otro avance esencial surgió en el Merton College de Oxford, donde los llamados ‘Calculadores’ desarrollaron una descripción matemática del movimiento uniformemente acelerado. Su Teorema de la Velocidad Media establece que un cuerpo con aceleración uniforme recorre la misma distancia que otro cuerpo que se mueve con velocidad constante igual al promedio entre la velocidad inicial y la velocidad final (Clagett, 1959). La formulación puede expresarse como:

²⁶Juan Filopón (aprox. 490-570): Filósofo y teólogo bizantino, conocido también como Juan el Gramático.

²⁷Jean Buridan (aprox. 1295-1363): Filósofo y lógico francés, rector de la Universidad de París y figura clave de la escolástica tardía.





Ecuación 5-2: Distancia recorrida en función de la Velocidad Media.

$$d = v_{med} \cdot t = \frac{v_i + v_f}{2} t$$

Donde:

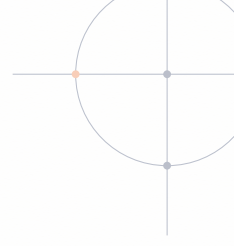
- ▶ v_{med} (m/s) representa la velocidad media,
- ▶ t (s) es el tiempo transcurrido,
- ▶ v_i (m/s) es la velocidad inicial y
- ▶ v_f (m/s) es la velocidad final.

La ecuación muestra que el movimiento se podía describir con relaciones matemáticas antes de que Galileo lo hiciera. Esto prueba que la transición a la Física moderna fue algo que se fue desarrollando con el tiempo y no cambió de repente. La Física moderna se basa en la Física que ya existía, y se fue perfeccionando poco a poco. Esto indica que la Física moderna y la Física anterior no son completamente diferentes, sino que la Física moderna es una continuación de la Física que ya existía.

5.3.2. Tensiones institucionales y límites epistemológicos del conocimiento medieval

Lejos de brotar en un espacio neutral, el saber científico en el medievo quedó atrapado en una encrucijada socio-religiosa donde la Iglesia ejercía un doble rol: organizaba la educación y, en paralelo, vigilaba con fuerza el control ideológico. Semejante escenario forzó a que cualquier avance en filosofía natural tuviera que amoldarse a los dogmas teóricos de la fe, desatando choques académicos severos si los datos de la experiencia contradecían la lectura tradicional de las escrituras. No obstante, y aquí radica el núcleo de lo que analiza Le Goff (2016), esta innegable presión institucional y doctrinaria no extinguió el debate intelectual, sino que delineó el marco rígido dentro del cual la herencia clásica terminó siendo rescatada, traducida y digerida.





Las barreras que se colocaban en el avance científico medieval no se limitaban a la censura directa, sino que radicaban en la propia estructura del pensamiento de la época, fuertemente condicionada por el peso dogmático de la escolástica²⁸. Bajo este marco intelectual, las tesis aristotélicas gozaban de una autoridad casi inquestionable, levantando barreras epistemológicas que frenaban cualquier intento de refutar los principios establecidos, tal como se esquematiza en la Figura 5-7. Asimismo, el confinamiento del saber en monasterios restringió severamente su difusión. De este modo, los progresos en óptica o dinámica quedaron atrapados en límites rígidos, demostrando que la evolución de la física depende críticamente de los entornos sociales que permiten debatir y esparcir las ideas.

Figura 5-7: El *scriptorium* como espacio de conservación y regulación del saber medieval



²⁸**Escolástica:** La escolástica fue una corriente filosófico-teológica de la Edad Media que buscó conciliar la fe cristiana con la razón y la filosofía grecolatina, especialmente la de Aristóteles.

Fuente: Elaboración propia mediante DALL-E 3.





5.3.3. El motor del cambio: las universidades

El conocimiento en la Edad Media estaba disperso y no muy accesible, esto provocó el surgimiento de las universidades. En el siglo XII, universidades como la de Bolonia, París y Oxford (Figura 5-8) empezaron a ser importantes, consolidando comunidades de profesores y estudiantes llamados *universitas* evitando que el aprendizaje fuera solo para monjes. En estas universidades, la forma de enseñar se convirtió en algo académico y estructurado, siendo la Iglesia uno de sus principales pilares que se involucraron en su creación. Sin embargo, estas instituciones desarrollaron sus propias formas de enseñanza, esto incluía enseñar, discutir e interpretar textos clásicos. Como señala Rashdall (1936):

“La universidad medieval fue una corporación organizada para la enseñanza superior, donde el conocimiento se transmitía y se debatía dentro de una comunidad intelectual” (p. 5).

Lo que marca el inicio de una nueva forma de producir saber.

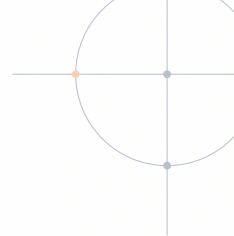
Figura 5-8: Universidad de Oxford



Fuente: University of Oxford (2026).

Las universidades empezaron a hacer que la educación superior fuera como la conocemos hoy. Crearon cosas como planes de estudio, formas de enseñar y evaluar a los estudiantes, y comunidades de personas que se dedicaban a aprender. Pero las universidades no solo enseñaban a los estudiantes. También enseñaban a pensar de manera lógica y a analizar las cosas de manera sistemática. Esto fue importante para que la ciencia avanzara. Las universidades ayudaron a que la gente aprendiera más en su época y también crearon las condiciones necesarias para que la ciencia moderna existiera. Fue un cambio importante que pasó de la Edad Media a la forma en que pensamos hoy, las universidades fueron clave para que esto sucediera.





5.3.4. Implicaciones didácticas para la física

Aprender de la traducción y reforma de ideas en el medievo deja una lección didáctica contundente: todo modelo científico madura mediante el debate y la reinterpretación. Llevar esto a las aulas de física desmonta de golpe esa noción absurda de que las teorías actuales brotaron de genialidades aisladas o de golpes de suerte. Si forzamos al universitario a rastrear la tortuosa evolución que sufrió el concepto de movimiento, la materia se humaniza de inmediato. El alumno rompe así con la inercia mental de ver a la ciencia como un bloque de verdades dogmáticas e inmutables que solo sirven para memorizarse antes del examen.

Por otro lado, esa tensa dualidad entre preservar el saber y vigilar el pensamiento que caracterizó a las instituciones medievales nos regala el escenario perfecto para forjar juicio crítico. El profesor puede aprovechar este choque histórico para abrir debates descarnados sobre cómo los dogmas y los hilos del poder moldean la investigación en ciencias exactas. Esta disección sociológica de la física despierta en el futuro ingeniero la urgencia de cuestionar cualquier límite impuesto a la innovación, entendiendo que la libertad de experimentar y validar hipótesis frente a datos crudos de la realidad constituye una conquista metodológica que defenderá en su ejercicio profesional.

Por último, el yugo intelectual de la escolástica y el aislamiento del conocimiento en abadías es la analogía exacta para combatir la repetición ciega de fórmulas en los cursos modernos. El docente debe usar este paralelismo histórico como un detonante del conflicto cognitivo: aceptar un formalismo algebraico simplemente porque "lo dice el texto" es clonar el dogmatismo aristotélico que estancó la dinámica por siglos. Montar talleres de indagación activa donde cada ecuación deba ponerse a prueba mediante laboratorios o simulaciones digitales dinamita esa pasividad intelectual, garantizando que el estudiante de la UTELVT construya saberes significativos basados en la verificación empírica.





Sección pedagógica

Preguntas de Reflexión Crítica

1. ¿Por qué sería un error pensar que la Física nació únicamente en Europa o únicamente con la ciencia moderna?
2. ¿Qué se gana y qué se pierde cuando una cultura empieza a explicar la naturaleza desde la razón y no solo desde la tradición o el mito?
3. Si una explicación antigua era incorrecta desde la Física actual, ¿significa que no tuvo valor para el desarrollo del conocimiento científico?

Ejercicios Prácticos o de Aplicación Conceptual

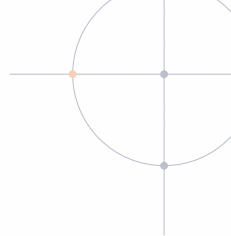
Ejercicio 1. Ingeniería antes de las ecuaciones

Analiza una obra o práctica antigua: pirámides egipcias, sistemas de irrigación mesopotámicos, brújula china, observatorios mayas o arquitectura medieval. Explica qué conocimientos físicos estaban implícitos allí, aunque no estuvieran expresados mediante ecuaciones modernas.

Ejercicio 2. Aristóteles frente a Newton

Compara dos formas de explicar el movimiento: la visión aristotélica, donde el movimiento requiere una causa constante, y la visión moderna basada en la inercia. Luego plantea un ejemplo de Ingeniería Mecánica donde esta diferencia sea importante, como el movimiento de una pieza en una banda transportadora o el desplazamiento de un vehículo.





Criterios de evaluación

Tabla 5-1: Criterios de evaluación de las preguntas y ejercicios

Criterio de evaluación	Excelente (4 puntos)	Satisfactorio (3 puntos)	En proceso (2 puntos)	Inicial (1 punto)
Análisis de los aportes de culturas antiguas a la observación y explicación de fenómenos naturales	Analiza aportes de Mesopotamia, Egipto, China, India y Maya; relaciona cada uno con el desarrollo de la física.	Reconoce aportes de varias culturas antiguas y los vincula parcialmente con la física.	Menciona algunas culturas antiguas, pero no explica sus aportes ni su relación con la física.	Desconoce aportes de culturas antiguas o los considera irrelevantes para la física.
Comprensión de la transición del mythos al logos y su impacto en el pensamiento científico	Explica el paso del mito a la razón con Tales, Demócrito y Aristóteles; valora su impacto en la ciencia moderna.	Reconoce la transición del mythos al logos y menciona algunos filósofos griegos clave.	Identifica el cambio de pensamiento mítico a racional, pero sin precisar autores o conceptos.	No comprende la diferencia entre mythos y logos o la considera irrelevante.
Evaluación de los avances científicos y limitaciones del conocimiento en la Edad Media	Analiza avances (Al-Haytham, Filopón, universidades) y limitaciones institucionales de la ciencia medieval.	Reconoce avances científicos medievales y menciona algunas limitaciones de la época.	Identifica algunos avances medievales, pero no sus limitaciones ni su contexto histórico.	Desconoce los avances científicos medievales o los subestima como periodo de estancamiento.
Capacidad para comparar explicaciones antiguas con interpretaciones físicas modernas (Ejercicio 2)	Compara visión aristotélica y newtoniana del movimiento con ejemplos concretos de Ingeniería Mecánica.	Compara ambas visiones del movimiento y plantea un ejemplo general de aplicación en ingeniería.	Menciona diferencias entre ambas visiones, pero sin ejemplos concretos o aplicación técnica.	No logra comparar o confunde ambas explicaciones del movimiento.
Argumentación y pensamiento crítico en las respuestas a preguntas y ejercicios	Responde con coherencia, fundamentación histórica y relaciona la física antigua con problemas actuales.	Expone posturas comprensibles y fundamentadas parcialmente; algunas conexiones son poco explícitas.	Presenta ideas pertinentes pero desorganizadas o con escasa justificación histórica.	Responde con afirmaciones aisladas o vagas, sin fundamento histórico o conceptual.

Fuente: Elaboración propia

P.2

EVOLUCIÓN HISTÓRICA Y CONCEPTUAL DE LA FÍSICA





Lecturas Recomendadas



Aveni, A. F. (2001). Skywatchers: A Revised and Updated Version of Skywatchers of Ancient Mexico.

Permite valorar los conocimientos astronómicos de culturas antiguas y entender que la observación sistemática del cielo tuvo un papel técnico, social y científico.



Kirk, G. S., Raven, J. E., & Schofield, M. (2010). Los filósofos

Ayuda a comprender el paso hacia explicaciones racionales de la naturaleza.



6. REVOLUCIÓN CIENTÍFICA Y FÍSICA CLÁSICA

Objetivos de Aprendizaje del Capítulo

Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

- » Analizar el cambio producido por Galileo, Kepler y Newton, identificando cómo la experimentación, la medición y la matemática transformaron la explicación de la naturaleza.
- » Evaluar el alcance del determinismo científico, reconociendo su importancia para la Física clásica y sus límites frente a sistemas reales.
- » Crear una interpretación conceptual de un sistema mecánico clásico, explicando cómo se relacionan fuerza, movimiento, predicción y condiciones iniciales.

Introducción

El Renacimiento representa un punto de inflexión en la historia del conocimiento, caracterizado por una recuperación crítica del saber clásico y una nueva valoración de la observación, la experiencia y la razón. Este periodo no surge como una ruptura inmediata con la Edad Media, sino como una transformación progresiva en la forma de interpretar la realidad. El ser humano deja de ocupar un lugar pasivo frente al conocimiento heredado y comienza a asumir un rol activo en su construcción, cuestionando las autoridades tradicionales y explorando nuevas formas de comprender la naturaleza. Aquí es donde la Física empieza a desprenderse de la filosofía natural aristotélica y a orientarse hacia una disciplina más rigurosa, donde la medición, la experimentación y la formulación matemática adquieren un papel central. Este cambio de enfoque no solo modifica la manera de hacer ciencia, sino también la forma en que el ser humano se relaciona con el mundo.

Las condiciones que hicieron posible esta transformación fueron múltiples y se desarrollaron de manera interconectada. La invención de la imprenta facilitó la difusión del conocimiento, el fortalecimiento de las universidades permitió la consolidación de comunidades académicas, y el contacto con otras culturas a través de procesos como las traducciones árabes y las exploraciones geográficas amplió el horizonte intelectual europeo. A esto se suma el surgimiento de una nueva actitud crí-





tica frente a la autoridad, que incentivó la observación directa y la verificación empírica.

De acuerdo con Dear (2019), la Revolución Científica puede entenderse como un proceso en el que la investigación de la naturaleza se transformó en una práctica sistemática basada en la experimentación, la cuantificación y la validación colectiva del conocimiento, lo que evidencia que no se trató únicamente de descubrimientos aislados, sino de un cambio profundo en la forma de producir ciencia. Estas condiciones sentaron las bases para el desarrollo de la Física clásica, donde figuras como Galileo, Newton y Kepler consolidarían un nuevo paradigma científico.

6.1. El método experimental de Galileo

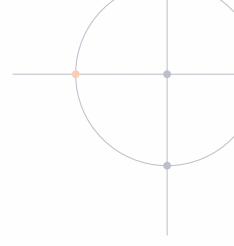
El trabajo de Galileo Galilei²⁹ cambió la forma de estudiar la naturaleza de una manera muy importante. Introdujo un método basado en experimentos controlados, mediciones y fórmulas matemáticas. A diferencia de Aristóteles, Galileo no solo describía los fenómenos, sino que los medía, los reproducía y los explicaba con leyes universales. Su método se puede resumir en los siguientes pasos:

1. Observación sistemática del fenómeno natural.
2. Planteamiento de hipótesis explicativas.
3. Diseño de experimentos controlados.
4. Medición cuantitativa de variables.
5. Análisis matemático de los resultados.
6. Verificación mediante repetición.

Eso se parece más al método científico actual visto en la Figura 2-2. Uno de los campos donde Galileo realizó contribuciones decisivas fue la astronomía telescópica. En *Sidereus Nuncius* describió observaciones de la superficie lunar, la Vía Láctea y los satélites de Júpiter, mostrando que el cielo no era perfecto ni geocéntrico como sostenía la tradición aristotélica (Galilei, 1989). Luego, sus observaciones de las fases de Venus y las manchas solares apoyaron la teoría de Copérnico, que dice que la tierra gira alrededor del sol.

²⁹Galileo Galilei (1564–1642): Astrónomo, físico e ingeniero italiano, pionero en el uso del telescopio para la observación astronómica





Galileo también hizo contribuciones importantes en el estudio del movimiento. Desarrolló la ley de la caída de los cuerpos, el principio de inercia, el estudio del péndulo y la relatividad galileana. En su libro Discursos y demostraciones matemáticas en torno a dos nuevas ciencias, Galileo analiza la aceleración, el movimiento de proyectiles y la caída de los cuerpos, estableciendo una base matemática para la mecánica posterior (Galilei, 1914). Una formulación moderna de la caída libre desde el reposo es:

Ecuación 6-1: Distancia recorrida por un objeto en caída libre.

$$d = \frac{1}{2}gt^2$$

Donde:

- ▶ g (m/s^2) representa la aceleración de la gravedad y
- ▶ t (s) es el tiempo transcurrido.

Esta relación muestra que la distancia que recorre un cuerpo en caída libre aumenta con el cuadrado del tiempo. Esto contradice la explicación de Aristóteles, que decía que la velocidad de caída dependía del peso.

En cuanto a los instrumentos, Galileo mejoró el telescopio. También creó el termoscopio y diseñó el compás geométrico y militar. El Museo Galileo (2026) explica que estos instrumentos fueron clave en su trabajo científico. El termoscopio permitía ver cambios de temperatura por cambios en la densidad del aire. El compás geométrico y militar se usaba para cálculos técnicos, geométricos y de balística. De esta forma, Galileo no solo creó nuevas ideas, sino que también construyó herramientas para observar, medir y cambiar la realidad física.

6.2. El movimiento planetario de Kepler

Antes de los aportes de Johannes Kepler³⁰, el movimiento planetario era comprendido de manera limitada y, en gran medida, incorrecta. El modelo geocéntrico de Ptolomeo³¹, aunque útil para predecir posiciones, se basaba en complejos sistemas de epiciclos que no reflejaban

³⁰**Johannes Kepler (1571-1630):** Astrónomo y matemático alemán, figura clave de la Revolución Científica.

³¹**Claudio Ptolomeo (c. 100-170 d. C.):** Astrónomo, matemático y geógrafo greco-egipcio, autor del Almagesto.





una estructura física real del universo. Incluso el modelo heliocéntrico de Copérnico³², aunque revolucionario, mantenía la idea de órbitas circulares perfectas, lo que generaba discrepancias con las observaciones. En este contexto, la comprensión del movimiento planetario carecía de una base matemática precisa que pudiera describir con exactitud las trayectorias de los cuerpos celestes. Fue Kepler quien, utilizando los datos observacionales de Tycho Brahe³³, logró romper con estas limitaciones y establecer leyes que describían el movimiento de los planetas de manera coherente y verificable.

Kepler formuló sus tres leyes del movimiento planetario, que representan uno de los avances más importantes en la historia de la Física y la astronomía, al introducir por primera vez una descripción matemática precisa del sistema solar.

Ecuación 6-2: Ecuación geométrica de la elipse.

La primera ley establece que los planetas se mueven en órbitas elípticas con el Sol en uno de sus focos, lo cual puede expresarse como:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

Donde:

- ▶ a (m) es el semieje mayor,
- ▶ b (m) es el semieje menor,
- ▶ x e y (m) representan las coordenadas cartesianas.

Ecuación 6-3: Velocidad areolar.

La segunda ley, conocida como ley de las áreas, indica que el radio vector que une al planeta con el Sol barre áreas iguales en tiempos iguales, lo que implica que la velocidad orbital no es constante y puede expresarse como:

$$\frac{dA}{dt} = \text{Constante}$$

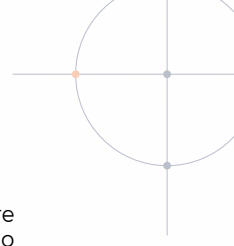
Donde:

- ▶ A es el área barrida por el radio vector de un cuerpo en órbita,
- ▶ t es el tiempo transcurrido y
- ▶ dA/dt es el área barrida por unidad de tiempo

³²Nicolás Copérnico (1473-1543): Astrónomo y clérigo polaco que marcó el inicio de la Revolución Científica con la publicación de *De revolutionibus orbium coelestium*.

³³Tycho Brahe (1546-1601): Astrónomo danés considerado el más grande observador del cielo antes de la invención del telescopio.





Ecuación 6-4: Relación entre el periodo y el tamaño de la órbita.

$$T^2 \propto a^3$$

La última ley o tercera ley establece una relación entre el periodo orbital y el tamaño de la órbita, afirmando que el cuadrado del periodo es directamente proporcional al cubo del semieje mayor:

Donde:

- T es el periodo orbital.

Estas leyes no solo permitieron describir con precisión el movimiento planetario, sino que también eliminaron la necesidad de construcciones artificiales como los epiciclos³⁴, consolidando una visión más simple y exacta del sistema solar. Como señala Kepler (1609) en *Astronomía Nova*, estas relaciones se derivan directamente de la observación rigurosa, marcando el paso hacia una astronomía fundamentada en leyes matemáticas.

El trabajo de Kepler también fue fundamental para consolidar el modelo heliocéntrico. Mientras Copérnico había propuesto una reorganización conceptual del universo y Galileo aportaba evidencia observacional, Kepler proporcionó la base matemática que hacía posible describir con precisión el movimiento de los planetas alrededor del Sol (Cohen, 1985). Esta integración permitió que el heliocentrismo dejara de ser una hipótesis filosófica para convertirse en un modelo científico sólido, sustentado en leyes verificables.

Para concluir con este científico, uno de los logros más prácticos de Kepler fue la elaboración de las Tablas Rudolfinas (Kepler, 1627), consideradas las más precisas de su tiempo para predecir posiciones planetarias. Estas tablas, basadas en sus leyes y en los datos de Tycho Brahe³⁵, fueron esenciales para la navegación y la astronomía durante décadas, evidenciando que el trabajo de Kepler no solo tuvo implicaciones teóricas, sino también aplicaciones concretas en el desarrollo científico y tecnológico de su época.

6.3. La mecánica clásica de Newton

La obra de Isaac Newton³⁶ representa uno de los momentos más trascendentales en la historia de la ciencia, al lograr una unificación conceptual sin precedentes entre los fenómenos terrestres y celestes. Antes de New-

³⁴**Epiciclos:** En el modelo geocéntrico de Ptolomeo, se refiere a los pequeños círculos que describían los planetas mientras sus centros se desplazaban simultáneamente a lo largo de una circunferencia mayor llamada deferente.

³⁵**Tycho Brahe (1473-1543):** Astrónomo danés reconocido como el más grande observador del cielo antes de la invención del telescopio.

³⁶**Isaac Newton (1642-1727):** Físico, matemático y astrónomo inglés, considerado uno de los científicos más influyentes de la historia





ton, el movimiento en la Tierra y el movimiento de los planetas eran estudiados como problemas separados; sin embargo, con su trabajo se demuestra que ambos obedecen las mismas leyes físicas. Esta síntesis convierte a Newton en uno de los científicos más influyentes de toda la historia de la humanidad, al establecer un marco teórico capaz de explicar desde la caída de un objeto (como el ejemplo de la manzana) hasta el movimiento de los cuerpos en el universo. Como él mismo expresa en Principia, su objetivo fue “derivar los fenómenos del movimiento a partir de fuerzas y, a partir de estas fuerzas, explicar otros fenómenos” (Newton, 1999), lo que refleja una visión profundamente integradora de la naturaleza.

Uno de sus aportes más importantes es la Ley de la Gravitación Universal, que establece que todos los cuerpos en el universo se atraen con una fuerza proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. Esta ley permite explicar por qué los objetos caen en la Tierra y, al mismo tiempo, por qué la Luna permanece en órbita alrededor de nuestro planeta y los planetas giran alrededor del Sol. Su formulación matemática es:

Ecuación 6-5: Ley de la Gravitación Universal

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

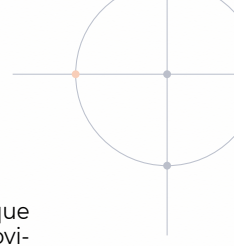
Donde:

- ▶ F (N) es la fuerza gravitatoria
- ▶ G ($N \cdot m^2 / kg^2$) representa la constante de la gravitación universal
- ▶ m_1 y m_2 (kg) las masas de los cuerpos que se atraen y
- ▶ r (m) la distancia entre sus centros que los separa.

La Ecuación 6-4 no solo describe la interacción gravitatoria, sino que también permitió validar matemáticamente las leyes de Kepler, consolidando la astronomía como una ciencia física y dando origen a su nacimiento formal.

Las Tres Leyes del Movimiento constituyen el núcleo de la mecánica clásica y siguen siendo fundamentales en la Física actual.





Ecuación 6-6: Ley de la inercia.

$$\sum \mathbf{F} = \mathbf{0} \rightarrow \mathbf{v} = \text{Constante}$$

La primera ley, o ley de la inercia, establece que un cuerpo permanece en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme si no actúa sobre él una fuerza neta externa. Esto se puede expresar como:

Ecuación 6-7: Principio fundamental de la dinámica.

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}$$

La segunda ley introduce una relación cuantitativa entre fuerza y aceleración:

Donde:

- ▶ $F(N)$ es la fuerza neta aplicada
- ▶ $m(kg)$ es la masa del cuerpo y
- ▶ $a(m/s^2)$ su aceleración.

Esta ley es esencial porque permite predecir el movimiento de un cuerpo bajo la acción de fuerzas, siendo la base de la ingeniería y la física aplicada. Finalmente, la tercera ley establece que a toda acción corresponde una reacción de igual magnitud y sentido opuesto:

Ecuación 6-8: Ley de acción-reacción.

$$\mathbf{F}_{AB} = -\mathbf{F}_{BA}$$

Donde:

- ▶ $F_{AB}(N)$ es la fuerza aplicada del objeto A al B y
- ▶ $F_{BA}(N)$ es la fuerza devuelta del objeto B al A.

Estas leyes siguen vigentes en la actualidad porque describen con gran precisión el comportamiento de sistemas macroscópicos, desde estructuras mecánicas hasta trayectorias de vehículos y satélites, convirtiéndose en herramientas fundamentales para la ciencia y la tecnología.

Otro aporte fundamental de Newton fue el desarrollo del cálculo infinitesimal, al que denominó “método de fluxiones”, como herramienta para describir el cambio conti-





nuo. Este desarrollo ocurrió de manera independiente y casi simultánea al trabajo de Gottfried Wilhelm Leibniz³⁷, lo que dio lugar a una de las disputas más conocidas en la historia de la ciencia. Mientras Newton desarrolló el cálculo en el contexto de problemas físicos relacionados con el movimiento, Leibniz formalizó una notación más sistemática y accesible, que es la que se utiliza actualmente. Aunque existe debate histórico sobre quién lo desarrolló primero, hoy se reconoce que ambos contribuyeron de manera independiente al nacimiento de esta herramienta esencial para la Física moderna.

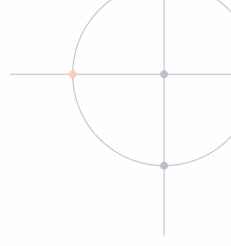
En el campo de la óptica, Newton demostró que la luz blanca está compuesta por un espectro de colores al hacerla pasar a través de un prisma, mostrando que el color no es una modificación de la luz, sino una propiedad intrínseca de ella. Este experimento permitió comprender fenómenos como la refracción y la dispersión. Además, diseñó el telescopio reflector, que utiliza espejos en lugar de lentes, evitando la aberración cromática y mejorando la calidad de las observaciones astronómicas (Westfall, 1980). Estos aportes no solo ampliaron el conocimiento sobre la naturaleza de la luz, sino que también impulsaron el desarrollo de instrumentos científicos más precisos.

Para finalizar, toda esta estructura teórica fue presentada en su obra *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, publicada en 1687, considerada una de las obras más importantes en la historia de la ciencia. En este libro, Newton sistematiza las leyes del movimiento y la gravitación universal mediante un enfoque matemático riguroso, estableciendo las bases de la Física clásica. Como señala Cohen & Whitman (1999) en su traducción moderna, el *Principia* no solo representa una colección de leyes, sino un nuevo paradigma en el que la naturaleza puede ser descrita mediante principios matemáticos universales. Esta obra consolidó definitivamente la transición hacia una ciencia moderna, basada en la relación entre teoría, experimento y formalismo matemático.

Para sintetizar, los científicos tales como Galileo, Kepler y Newton fueron pilares de la física clásica en los siglos XV-XVI que consolidaron con gran perspicacia el conocimiento previo. Galileo impulsó la experimentación y el estudio del movimiento con datos concretos; Kepler descubrió regularidades matemáticas a partir de obser-

³⁷Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716): Polímata, filósofo y matemático alemán, una de las mentes más brillantes de la historia moderna.





vaciones astronómicas; y Newton unificó estos avances en un sistema teórico basado en leyes universales que se sigue usando hasta el día de hoy. En la Tabla 6-1 se recolectan los principales aportes de cada uno de estos pilares junto a su valor para la enseñanza de la física.

Tabla 6-1: Aportes de Galileo, Kepler y Newton al desarrollo de la física clásica

Científico	Aporte principal	Método o evidencia	Herramienta matemática	Implicación didáctica
Galileo Galilei	Estudio de la caída libre, la inercia y el movimiento de proyectiles	Experimentos controlados, observación telescópica y medición de variables	Relaciones entre distancia, tiempo, velocidad y aceleración	Permite enseñar la relación entre observación, experimentación y formulación de leyes físicas
Johannes Kepler	Formulación de las tres leyes del movimiento planetario	Análisis de los registros astronómicos de Tycho Brahe	Geometría de la elipse, velocidad areolar y proporcionalidad entre periodo y semieje mayor	Facilita la comprensión de cómo los datos observacionales permiten construir modelos matemáticos
Isaac Newton	Leyes del movimiento y ley de gravitación universal	Síntesis de resultados experimentales, astronómicos y matemáticos	Cálculo, relaciones vectoriales y ecuaciones dinámicas	Permite integrar los fenómenos terrestres y celestes bajo principios físicos comunes

Fuente: Elaboración propia.

Galileo, al aplicar las bases del método científico sentó una sólida base empírica, Kepler permitió un mayor entendimiento del movimiento de los cuerpos celestes por medio del lenguaje de la física y Newton unió estos avances en un sistema que explicará esto de manera general. Estos aportes constituyen una progresión epistemológica y constructivista pues se demostró que las teorías científicas solo pueden desarrollarse observando la realidad e incorporando conocimientos previamente desarrollados en otros contextos históricos.

6.4. Nace el determinismo científico

El desarrollo de la mecánica clásica con Newton no solo transformó la física, sino que dio origen a una nueva forma de entender la realidad: el determinismo científico. Este enfoque sostiene que todos los fenómenos del universo están regidos por leyes precisas y, por tanto, son completamente predecibles si se conocen las condiciones iniciales. Desde una perspectiva filosófica, el determinismo implica que el universo funciona como un sistema ordenado, donde cada evento es consecuencia



necesaria de estados anteriores. Esta visión reduce la incertidumbre y propone una naturaleza completamente inteligible, donde el azar no tiene un papel fundamental, sino que refleja únicamente una falta de conocimiento por parte del observador.

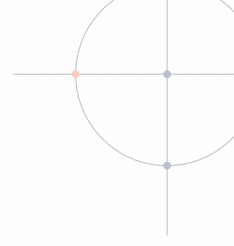
Esta idea alcanza su formulación más extrema con Pierre-Simon Laplace³⁸, quien, con el fin de ilustrar los alcances de la predictibilidad absoluta, propuso un célebre dispositivo conceptual en su obra *Essai philosophique sur les probabilités* (1814). Es fundamental precisar que este concepto, universalmente conocido como el “Demonio de Laplace”, no debe interpretarse bajo ninguna circunstancia como una entidad física o real, sino estrictamente como un experimento mental diseñado para empujar los principios de la mecánica newtoniana hasta sus últimas consecuencias lógicas. Al personificar este ideal de omnisciencia en una figura hipotética, Laplace afirma:

“Una inteligencia que, en un instante dado, conociera todas las fuerzas que animan la naturaleza y la situación respectiva de los seres que la componen... abarcaría en una sola fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes del universo y los del átomo más ligero; nada sería incierto para ella, y el futuro, como el pasado, estaría presente ante sus ojos.” (Laplace, 1814, p. 2).

Desde una perspectiva epistemológica, este planteamiento sacude la forma en que entendemos la relación entre el investigador y el mundo físico. Si asumimos que el estado actual del cosmos nace directamente de su pasado y dicta por completo su mañana, el libre albedrío y la subjetividad humana se reducen a un simple espejismo provocado por las limitaciones de nuestra mente. Bajo esta óptica, hacer ciencia no es un acto creativo, sino una fría tarea de ingeniería dedicada a desenterrar y calcular variables ya escritas en el tejido natural. Esta visión cuadra perfectamente con la metáfora del universo-reloj, donde la realidad opera como un engranaje rígido que se ilustra en la Figura 6-1. Al mirar este mecanismo complejo de piezas interconectadas, queda claro

³⁸Pierre-Simon Laplace (1749-1827): Matemático, astrónomo y físico francés, a menudo llamado el “New-ton de Francia”.





que cada suceso depende de un empuje previo, consolidando la idea de que la regularidad geométrica permite anticipar cualquier movimiento con absoluta certeza.

Sin embargo, este hermoso sueño de orden absoluto tropezó de frente con los descubrimientos de la física moderna. La termodinámica fue la primera en sembrar la duda al demostrar que el calor y los procesos naturales no dan marcha atrás; la irreversibilidad y el desperdicio energético rompieron la simetría de las ecuaciones de Newton. Pero el golpe de gracia al determinismo laplaciano llegó desde el microcosmos con la mecánica cuántica y el Principio de Incertidumbre de Heisenberg. Al probar que la propia naturaleza nos impide conocer a la vez, y con nitidez total, dónde está una partícula y cómo se mueve, las condiciones iniciales perfectas que exigía Laplace pasaron a ser una imposibilidad teórica. La incertidumbre no es un fallo de nuestros aparatos, sino una propiedad de la materia que obligó a la ciencia contemporánea a cambiar la rigidez mecánica por las leyes de la probabilidad.

El determinismo científico surge directamente de las leyes de Newton vistas en la Sección 6.3, ya que estas permiten predecir el movimiento de cualquier sistema físico si se conocen las fuerzas que actúan sobre él y las condiciones iniciales. La combinación de las leyes del movimiento con la gravitación universal ofrecía, por primera vez, un marco completo para describir tanto fenómenos terrestres como celestes. Bajo esta misma línea, el universo newtoniano se concibe como un sistema perfectamente calculable, donde el futuro está implícitamente contenido en el presente (Newton, 1999). Esta idea tuvo una enorme influencia en la ciencia de los siglos XVIII y XIX, consolidando la creencia de que la naturaleza podía ser completamente “descrita” mediante leyes matemáticas.

Figura 6-1: Representación del determinismo mecanicista



Fuente: Wetherell (2009).





Los aportes derivados de esta visión determinista fueron profundos y duraderos. El desarrollo de modelos predictivos, la ingeniería moderna y, en última instancia, la invención de las computadoras, encuentran su fundamento en la idea de que los sistemas pueden ser descritos y calculados con precisión. La computación, en particular, surge como una extensión de este paradigma, permitiendo procesar grandes cantidades de información para predecir comportamientos complejos (Cohen, 1985). No obstante, esta misma visión también establecería las bases para futuras crisis en la Física que veremos en la Sección 8, cuando fenómenos como el caos, la relatividad y la mecánica cuántica demostraron que la predictibilidad absoluta tiene límites. Aun así, el determinismo científico sigue siendo un pilar fundamental para comprender el desarrollo histórico de la ciencia y su impacto en la tecnología moderna.

Sección pedagógica

Preguntas de Reflexión Crítica

1. ¿Por qué la Revolución Científica no consistió solo en descubrir nuevas leyes, sino en cambiar la forma de preguntar, medir y validar el conocimiento?
2. Si conociéramos todas las condiciones iniciales de un sistema mecánico, ¿podríamos predecir siempre su comportamiento futuro?
3. ¿Qué diferencia existe entre usar las leyes de Newton para calcular un movimiento y comprender realmente cómo actúan las fuerzas dentro de un sistema?

Ejercicios Prácticos o de Aplicación Conceptual

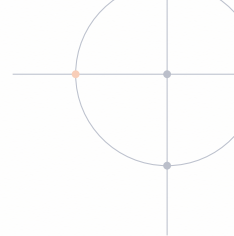
Ejercicio 1. El laboratorio de Galileo en versión moderna

Imagina que debes comprobar cualitativamente cómo cambia el movimiento de un objeto en un plano inclinado. No hagas cálculos. Describe qué observarías, qué controlarías, qué compararías y qué tipo de conclusión física podrías construir. Luego explica por qué esta forma de investigar rompe con la simple aceptación de la autoridad.

Ejercicio 2. Una máquina como sistema determinista

Elige un sistema mecánico: engranajes, mecanismo biela-manivela, poleas, suspensión de vehículo o brazo robótico. Explica qué condiciones iniciales serían necesarias para predecir su movimiento y qué factores reales podrían impedir una predicción perfecta.





Criterios de evaluación

Tabla 6-2: Criterios de evaluación de las preguntas y ejercicios

Criterio de evaluación	Excelente (4 puntos)	Satisfactorio (3 puntos)	En proceso (2 puntos)	Inicial (1 punto)
Comprensión del cambio metodológico de Galileo y su método experimental	Explica método experimental de Galileo, su ruptura con Aristóteles y su influencia en la ciencia moderna.	Reconoce el método experimental de Galileo y su oposición a la física aristotélica.	Identifica algunos aportes de Galileo, pero sin comprender su método ni su impacto.	Desconoce el método de Galileo o lo confunde con enfoques anteriores.
Análisis de las leyes del movimiento planetario de Kepler y su fundamentación matemática	Analiza las tres leyes de Kepler, su base observacional y su relación con la elipse y áreas iguales.	Reconoce las leyes de Kepler y menciona su fundamento matemático, aunque con imprecisiones.	Identifica alguna ley de Kepler, pero no explica su contenido ni su base matemática.	Desconoce las leyes de Kepler o las confunde con otros modelos astronómicos.
Comprensión de la mecánica clásica de Newton y sus leyes del movimiento y gravitación	Explica las tres leyes de Newton y la gravitación universal con sus ecuaciones y condiciones de validez.	Reconoce las leyes de Newton y la gravitación, aunque su explicación es parcial o con omisiones.	Menciona algunas leyes de Newton, pero sin precisión conceptual ni formalismo matemático.	No comprende las leyes de Newton o las aplica de manera incorrecta sin interpretación física.
Evaluación del determinismo científico y sus límites frente a sistemas reales	Analiza el determinismo laplaciano, su origen en la mecánica newtoniana y sus límites frente al caos y la cuántica.	Reconoce el determinismo científico y menciona algunos de sus límites, aunque sin profundizar.	Identifica el determinismo como idea general, pero no explica su origen ni sus limitaciones.	Desconoce el determinismo o lo considera absoluto sin reconocer sus límites.
Capacidad para aplicar conceptos clásicos a sistemas mecánicos de ingeniería (Ejercicio 2)	Aplica conceptos newtonianos a sistemas reales (poleas, engranajes) explicando condiciones y predicciones.	Aplica conceptos a sistemas generales, pero con omisiones en condiciones o predicciones.	Menciona aplicaciones de la mecánica clásica, sin relacionarlas con sistemas concretos.	No logra aplicar conceptos clásicos o los confunde con modelos posteriores.

Fuente: Elaboración propia

P.2





Lecturas Recomendadas



Galilei, G. (1914). Dialogues Concerning Two New Sciences.

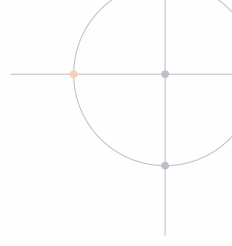
Es una lectura fundamental para comprender cómo la experimentación y el razonamiento matemático transformaron la forma de estudiar el movimiento.



Newton, I. (1999). The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy.

Es una obra central para entender cómo la Física clásica unificó el movimiento terrestre y celeste. No se lee solo como historia, sino como base del pensamiento mecánico moderno.





7. DESARROLLO DE LA FÍSICA ENTRE LOS SIGLOS XVIII-XIX

Objetivos de Aprendizaje del Capítulo

Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

- » Analizar cómo la termodinámica, el electromagnetismo, la física de fluidos y la óptica ampliaron el campo de la Física más allá del movimiento mecánico.
- » Evaluar el impacto tecnológico e industrial de estos desarrollos en máquinas térmicas, sistemas eléctricos, comunicaciones, transporte y procesos productivos.
- » Crear una explicación integrada de un sistema de ingeniería donde intervengan energía, fluidos, electricidad u ondas.

Introducción

El periodo comprendido entre los siglos XVIII y XIX representa una etapa de consolidación y expansión del conocimiento físico, en la cual las bases establecidas por la mecánica clásica de Newton se extendieron hacia nuevos campos de estudio que permitieron comprender fenómenos cada vez más complejos. En este contexto, la Física dejó de centrarse exclusivamente en el movimiento de los cuerpos para abarcar áreas como la termodinámica, el electromagnetismo, la física de fluidos y la óptica, integrando teoría, experimentación y formalización matemática con un nivel de precisión nunca antes vistos.

Este desarrollo no solo permitió profundizar en la comprensión de la naturaleza, sino que también impulsó una transformación tecnológica significativa, dando lugar a avances como la máquina de vapor, los sistemas eléctricos, la iluminación artificial y las telecomunicaciones. Por lo tanto, la Física se consolidó como una ciencia aplicada capaz de transformar la sociedad, estableciendo las bases del mundo industrial moderno y preparando el camino para las revoluciones científicas del siglo XX.

7.1. Termodinámica

El surgimiento de la termodinámica durante los siglos antes mencionados estuvo profundamente ligado al desarrollo de la Revolución Industrial, donde la necesidad de optimizar el funcionamiento de máquinas térmicas,





³⁹**James Prescott Joule (1818-1889):** Físico británico que estableció las bases de la termodinámica al demostrar de manera experimental la equivalencia entre el trabajo mecánico y el calor.

⁴⁰**Julius Robert Mayer (1814-1878):** Médico y físico alemán que fue el primero en enunciar el principio de conservación de la energía, uno de los pilares de la termodinámica moderna.

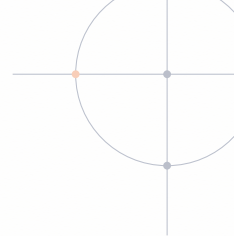
como la máquina de vapor, impulsó el estudio sistemático del calor y su relación con el trabajo. En un inicio, el calor se concebía como una sustancia denominada “calórico”; sin embargo, los experimentos de James Prescott Joule³⁹ y Julius Robert Mayer⁴⁰ demostraron que el calor es una forma de energía en tránsito. Este cambio conceptual permitió establecer las bases de la termodinámica como una ciencia capaz de describir transformaciones energéticas, contribuyendo directamente al desarrollo tecnológico de la época y dando origen a las leyes de la termodinámica siendo los pilares fundamentales de esta ciencia.

Antes de adentrarnos en las leyes de la termodinámica, vale la pena aclarar los conceptos básicos que explican cómo se intercambia y transforma la energía. A veces se usa estas palabras como sinónimos en el día a día, pero en física los significados son distintos y precisos. Para que te sea más fácil seguir el tema, en la Tabla 7-1 resumimos los términos esenciales que te ayudarán a entender el resto de los procesos.

Tabla 7-1: Conceptos fundamentales para el estudio de la termodinámica

Concepto	Definición	Unidad en el SI	Ejemplo en Ingeniería Mecánica
Sistema	Porción del universo seleccionada para el análisis termodinámico	No aplica	Gas contenido en el cilindro de un motor
Entorno	Todo aquello que se encuentra fuera del sistema y puede interactuar con él	No aplica	Aire exterior y estructura que rodean un motor
Frontera	Superficie real o imaginaria que separa el sistema de su entorno	No aplica	Paredes de una tubería o de un cilindro
Temperatura	Magnitud que expresa el estado térmico de un sistema	Kelvin (K)	Temperatura del refrigerante de un motor
Calor	Energía transferida debido a una diferencia de temperatura	Julio (J)	Energía transferida desde una caldera hacia el agua
Trabajo	Transferencia de energía asociada con la acción de una fuerza o con la expansión y compresión de un sistema	Julio (J)	Trabajo producido por la expansión de un gas sobre un pistón
Energía interna	Energía microscópica total contenida en un sistema	Julio (J)	Variación energética de un fluido durante el calentamiento
Presión	Fuerza normal ejercida por unidad de superficie	Pascal (Pa)	Presión de un fluido en un sistema hidráulico
Volumen	Espacio ocupado por el sistema	Metro cúbico (m³)	Volumen de gas dentro de una cámara de combustión

Fuente: Elaboración propia.



Distinguir bien entre calor, temperatura, trabajo y energía interna evitará muchas de las confusiones habituales. El calor y el trabajo no son magnitudes que un sistema guarde dentro, sino las formas en que la energía se mueve de un lado a otro; en cambio, la energía interna sí es una propiedad propia de su estado actual. Tener clara esta diferencia es la clave para entender de verdad cómo funcionan las leyes de la termodinámica siguientes y cómo se aplican en el mundo real, desde motores y refrigeradores hasta turbinas y grandes procesos industriales.

Ecuación 7-1: Equilibrio térmico entre tres cuerpos.

$$T_A = T_B = T_C$$

Donde:

- T_A , T_B y T_C (K) son las correspondientes temperaturas para el cuerpo A, B y C.

La Ley Cero de la Termodinámica, formalizada conceptualmente en el siglo XX, pero implícita en trabajos previos de equilibrio térmico, establece que, si dos sistemas están en equilibrio térmico con un tercero, entonces están en equilibrio entre sí. Este principio permite definir la temperatura como una magnitud física medible. Su fundamento puede expresarse como:

P.2

Este resultado, aunque aparentemente simple, es esencial para la construcción de termómetros y la formalización de la termodinámica. Su desarrollo se asocia con la consolidación del concepto de temperatura absoluta introducido por William Thomson⁴¹.

Ecuación 7-2: Energía interna de un sistema.

$$\Delta U = Q - W$$

Donde:

- ΔU (J) es el cambio de la energía interna del sistema,
- Q (J) es el calor y
- W (J) el trabajo.

La Primera Ley de la Termodinámica representa el principio de conservación de la energía. En la década de 1840, Joule demostró experimentalmente la equivalencia entre trabajo mecánico y calor, mientras que Mayer formuló esta relación desde un enfoque teórico. La ley establece que la variación de la energía interna de un sistema es igual al calor suministrado menos el trabajo realizado:

Este principio fue fundamental para abandonar la teoría del calórico y consolidar la energía como una magnitud conservativa. Joule (1845), en sus experimentos con paletas agitadas en agua, evidenció que el trabajo mecánico se transforma en calor, estableciendo una equivalencia cuantitativa entre ambas formas de energía.

⁴¹William Thomson (Lord Kelvin) (1824-1907): Físico y matemático británico de origen irlandés, figura clave en la unificación de la física del siglo XIX.





La Segunda Ley de la Termodinámica, desarrollada por Rudolf Clausius⁴², introduce el concepto de irreversibilidad en los procesos naturales. Clausius (1865) estableció que el calor fluye espontáneamente de cuerpos calientes a fríos, y en 1865 definió la entropía como una medida del desorden o de la energía no disponible para realizar trabajo. Su formulación matemática es:

Ecuación 7-3: Formulación de la entropía.

$$\Delta S \geq \frac{Q}{T}$$

Donde:

- ▶ ΔS (J/K) es el cambio de entropía y
- ▶ T (K) es la temperatura.

Clausius expresó esta idea en su obra afirmando que:

“La energía del universo es constante; la entropía del universo tiende a un máximo” (Clausius, 1865, p. 400).

Esta ley establece una dirección del tiempo en los procesos físicos, introduciendo una profunda implicación filosófica en la Física.

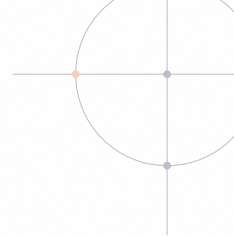
La Tercera Ley de la Termodinámica, formulada por Nernst (1906), establece que es imposible alcanzar el cero absoluto en un número finito de procesos. Matemáticamente, implica que la entropía de un sistema tiende a un valor constante (generalmente cero) cuando la temperatura se aproxima al cero absoluto:

Ecuación 7-4: Entropía de un sistema cuando la temperatura es cercana a cero.

$$\lim_{T \rightarrow 0} S = 0$$

Esta formulación matemática se lee como **“la entropía llega a tener un valor nulo cuando la temperatura tiende al cero absoluto”**. Este resultado se relaciona directamente con la escala absoluta de temperatura desarrollada por William Thomson, quien estableció una forma de medición independiente de las propiedades específicas de las sustancias. A diferencia de las escalas empíricas anteriores, la escala Kelvin se fundamenta en principios termodinámicos universales, particularmente en la imposibilidad de extraer trabajo de un sistema en equilibrio térmico. De este modo, la temperatura deja de ser una magnitud relativa para convertirse en una variable física fundamental, directamente vinculada con la energía interna de los sistemas. Esta formulación no solo consolidó la base teórica de la termodinámica, sino que permitió una unificación conceptual entre calor, trabajo y energía, facilitando el desarrollo posterior de la física estadística y la mecánica cuántica.

⁴²Rudolf Clausius (1822-1888): Físico y matemático alemán, considerado uno de los fundadores de la termodinámica moderna.



El desarrollo de la termodinámica estadística permitió dar una interpretación microscópica a estas leyes macroscópicas, resolviendo una de las limitaciones fundamentales de la termodinámica clásica: su incapacidad para explicar el origen físico del calor y la entropía. Ludwig Boltzmann⁴³ y James Clerk Maxwell⁴⁴ demostraron que el comportamiento térmico de un sistema es consecuencia directa del movimiento caótico y probabilístico de sus partículas constituyentes (Boltzmann, 1877). En este contexto, la entropía deja de ser una magnitud abstracta y adquiere un significado estadístico preciso, relacionado con el número de configuraciones posibles que puede adoptar un sistema. Boltzmann formalizó esta relación mediante la expresión:

Ecuación 7-5: Entropía según Boltzmann-Maxwell

$$S = k \ln \Omega$$

Donde:

- k (J/K) representa la constante de Boltzmann y
- Ω (**adimensional**) el número de microestados compatibles con un estado macroscópico dado.

Esta formulación establece un puente conceptual entre la probabilidad y la física, mostrando que los estados más probables son aquellos con mayor número de configuraciones posibles. En consecuencia, la irreversibilidad de los procesos naturales no surge de una ley fundamental estricta, sino de una tendencia estadística hacia estados de mayor probabilidad, lo que introduce una dimensión probabilística en la descripción de la naturaleza.

Para acabar, uno de los aportes más influyentes en el desarrollo de la termodinámica fue el Ciclo de Carnot, propuesto por Sadi Carnot⁴⁵ en 1824 en su obra *Réflexions sur la puissance motrice du feu*. Carnot analizó el funcionamiento ideal de una máquina térmica y demostró que existe un límite máximo de eficiencia que depende únicamente de las temperaturas entre las cuales opera el sistema, independientemente del diseño o del material de la máquina (Carnot, 1824). Este resultado se expresa como:

⁴³**Ludwig Boltzmann (1844-1906):** Físico y filósofo austriaco que revolucionó la física al conectar el mundo macroscópico de la termodinámica con el mundo microscópico de los átomos a través de la mecánica estadística.

⁴⁴**James Clerk Maxwell (1831-1879):** Físico teórico británico considerado, junto con Newton y Einstein, uno de los tres científicos más importantes de la historia.

⁴⁵**Sadi Carnot (1796-1832):** Ingeniero y físico francés, frecuentemente aclamado como el «padre de la termodinámica».



Ecuación 7-6: Eficiencia de una máquina térmica.

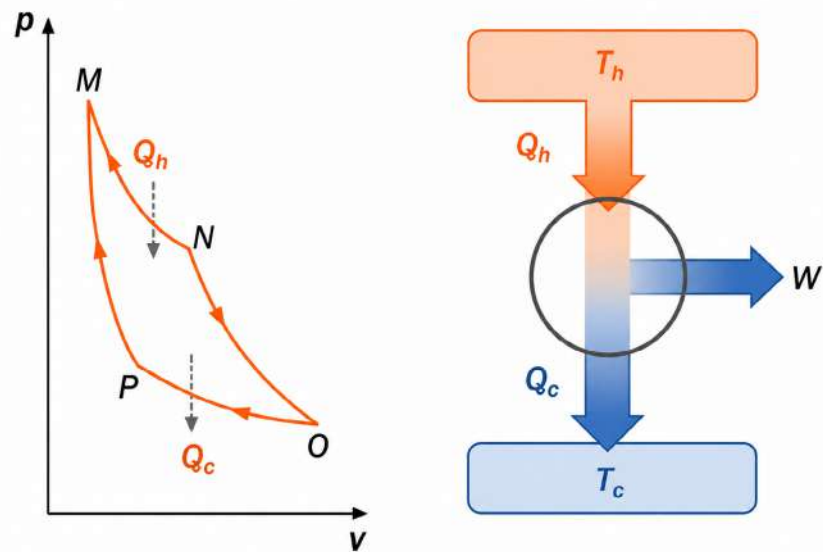
$$\eta = 1 - \frac{T_C}{T_H}$$

Donde:

- ▶ T_H es la temperatura de la fuente caliente y
- ▶ T_C es la temperatura de la fuente fría.

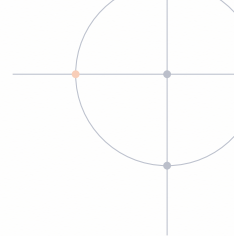
Este límite establece que ninguna máquina térmica puede convertir completamente el calor en trabajo, lo que introduce una restricción fundamental en los procesos energéticos. A continuación, en la Figura 7-1 se presenta una representación didáctica del ciclo de Carnot en un diagrama presión-volumen:

Figura 7-1: Ciclo de Carnot en un diagrama P-V



Fuente: Moebs et al. (2021)

En el diagrama P - V (izquierda), se observan las cuatro etapas reversibles del gas: una expansión isotérmica ($M \rightarrow N$) donde se absorbe calor (Q_h) a temperatura constante (T_h), seguida de una expansión adiabática ($N \rightarrow O$) donde el sistema se enfría; luego, una compresión iso-



térmica ($O \rightarrow P$) para ceder calor (Q_c) al foco frío (T_c), y finalmente una compresión adiabática ($P \rightarrow M$) que devuelve al gas a su estado inicial. El área encerrada por estas curvas equivale al trabajo neto realizado (W). Complementariamente, el esquema de flujo (derecha) ilustra la conversión energética: la máquina toma energía de un depósito caliente, transforma una fracción en trabajo útil y, por mandato de la segunda ley de la termodinámica, expulsa el remanente hacia un depósito frío, demostrando que ninguna máquina puede ser 100% eficiente.

El modelo de Carnot no solo permitió comprender los límites fundamentales de las máquinas térmicas, sino que también sirvió como base para el diseño y optimización de motores reales. Investigaciones contemporáneas, como las de Bejan (2016), continúan utilizando este modelo como referencia teórica para evaluar la eficiencia energética en sistemas complejos, lo que evidencia su vigencia en la ingeniería moderna y su papel central en el desarrollo de tecnologías sostenibles.

7.2. Electromagnetismo

El descubrimiento de la relación entre electricidad-magnetismo marcó uno de los momentos más decisivos en la historia de la Física, porque permitió comprender que fenómenos eléctricos o magnéticos (considerados separados) pertenecían a una misma estructura natural. En 1820, Hans Christian Ørsted⁴⁶ observó que una corriente eléctrica desviaba la aguja de una brújula, demostrando que las corrientes eléctricas generan campos magnéticos (Ørsted, 1820). Este hallazgo abrió el camino hacia el estudio de los campos como entidades físicas reales y permitió posteriormente el desarrollo de electroimanes, motores eléctricos, relés, sistemas de medición eléctrica y dispositivos de conversión de energía. El fenómeno puede describirse mediante:

Ecuación 7-7: La ley de Biot-Savart.

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Id\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

⁴⁶Hans Christian Ørsted (1777-1851): Físico y químico danés que en 1820 descubrió de forma experimental la relación entre la electricidad y el magnetismo.





Donde:

- ▶ $\vec{dB}(T)$ es el campo magnético generado por un pequeño segmento de conductor,
- ▶ μ_o ($T \cdot m/A$) la permeabilidad magnética del vacío,
- ▶ I (A) es la corriente eléctrica,
- ▶ $d\vec{l}(m)$ es el elemento diferencial del conductor,
- ▶ $\hat{r}$ (*adimensional*) es el vector unitario que apunta hacia el punto de observación y
- ▶ $r(m)$ es la distancia a dicho punto.

Esta relación permitió pasar de una observación cualitativa a una descripción matemática del campo magnético producido por corrientes.

El siguiente avance fundamental fue realizado por Michael Faraday (1839) , al descubrir la inducción electromagnética. Faraday demostró que un campo magnético variable puede generar una corriente eléctrica, lo que cambió profundamente la historia tecnológica de la humanidad. A partir de este principio fue posible construir generadores eléctricos, transformadores, alternadores y motores, es decir, los dispositivos que hicieron viable la electrificación de ciudades, industrias y sistemas de transporte. La ley se expresa como:

Ecuación 7-8: Ley de Faraday.

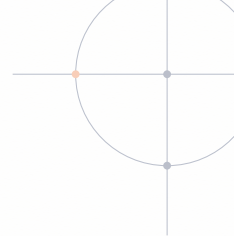
$$\mathcal{E} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Donde:

- ▶ $\mathcal{E}(V)$ representa la fuerza electromotriz inducida,
- ▶ $\vec{E}(V/m)$ es el campo eléctrico,
- ▶ Φ_B ($Wb = T \cdot m^2$) es el flujo magnético que atraviesa una superficie y
- ▶ $d\Phi_B/dt$ ($T \cdot m^2/s$) representa el cambio del flujo magnético a través del tiempo.

El signo negativo, asociado a la ley de Lenz⁴⁷, indica que la corriente inducida se opone al cambio que la produce. En términos físicos, esta ecuación muestra que no basta con tener magnetismo: debe existir variación del flujo magnético para que aparezca una corriente induci-





da. Este principio convirtió el movimiento mecánico en electricidad utilizable, base de centrales hidroeléctricas, termoeléctricas y eólicas.

La unificación definitiva de estos fenómenos fue lograda por James Clerk Maxwell en 1865, al formular un conjunto de ecuaciones que describen de manera coherente el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos (Maxwell, 1865). Su aporte no consistió solo en resumir leyes previas, sino en revelar que electricidad, magnetismo y luz pertenecen a un mismo fenómeno físico: el campo electromagnético. Las ecuaciones de Maxwell son:

Ecuación 7-9: Ecuaciones de Maxwell.

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \\ \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{array} \right.$$

Donde:

- ▶ $\vec{B}$ (T) es el campo magnético,
- ▶ ρ (C/m³) es la densidad de la carga,
- ▶ ϵ_0 (F/m=C²/(N·m²)) es la permitividad del vacío,
- ▶ μ_0 (H/m=T·m/A) es la permeabilidad del vacío y
- ▶ $\vec{J}$ (A/m²) es la densidad de la corriente eléctrica.

El triángulo al revés se llama nabla (∇), este es un "paquete" de derivadas que te dice cómo cambia una función en todas las direcciones del espacio al mismo tiempo, cuando se aplica con un punto a un vector ($\nabla \cdot \vec{E}$) se le denomina gradiente y cuando se aplica con una cruz a un vector ($\nabla \times \vec{E}$) se le llama divergencia. Otra aclaración es el uso del signo ∂ que significa derivada parcial, generalmente este signo se ve cuando se deriva una función o vector que depende de varias variables, para este caso, el campo magnético y eléctrico depende de las coordenadas espaciales y el tiempo. Cada una de estas ecuaciones significa:

⁴⁷**Ley de Lenz:** Principio formulado por el físico estonio Heinrich Lenz en 1834, que establece que la dirección de una corriente eléctrica inducida es tal que el campo magnético que genera se opone siempre a la variación del flujo magnético que la produjo





1.-Ley de Gauss para el campo eléctrico: Establece que las cargas eléctricas son la fuente de los campos eléctricos, es decir, todo campo eléctrico nace de la presencia de carga. Esto implica que el campo no es una propiedad abstracta, sino una manifestación física medible que se distribuye en el espacio en función de la cantidad de carga presente.

2.-Ley de Gauss para el magnetismo: Indica que no existen monopolos magnéticos aislados, lo que significa que los polos magnéticos siempre aparecen en pares (norte y sur). A diferencia de las cargas eléctricas, que pueden existir de forma independiente, los campos magnéticos forman siempre líneas cerradas.

3.-Ley de Faraday de la inducción: Describe cómo un campo magnético variable en el tiempo puede generar un campo eléctrico, lo que constituye el principio fundamental de la inducción electromagnética. Esta relación es clave porque introduce la idea de que los campos no son estáticos, sino dinámicos y capaces de transformarse entre sí.

4.-Ley de Ampère⁴⁸-Maxwell: Establece que los campos magnéticos pueden ser generados tanto por corrientes eléctricas como por campos eléctricos variables en el tiempo. La inclusión del término de desplazamiento eléctrico por Maxwell fue crucial, ya que permitió explicar la propagación de ondas electromagnéticas incluso en ausencia de corriente material.

La consecuencia más profunda de las ecuaciones de Maxwell fue la predicción de ondas electromagnéticas. Al combinar sus ecuaciones, Maxwell encontró que los campos eléctricos y magnéticos podían propagarse juntos en el espacio con una velocidad dada por:

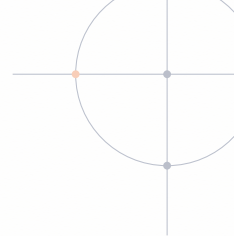
Ecuación 7-10: Velocidad de las ondas electromagnéticas.

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

Este valor coincidía con la velocidad de la luz ($c \approx 3 \times 10^8$ m/s), lo que llevó a una conclusión extraordinaria: la luz es una onda electromagnética. Esta idea transformó la óptica, la electricidad y el magnetismo en partes de una misma teoría, mostrando que el universo podía ser des-

⁴⁸André-Marie Ampère (1775-1836): Matemático y físico francés, considerado uno de los fundadores del electromagnetismo.





crito mediante estructuras matemáticas comunes. Además, preparó el camino para tecnologías basadas en ondas electromagnéticas, como la radio, la televisión, el radar, la telefonía móvil, el Wi-Fi, la comunicación satelital y gran parte de la electrónica moderna.

La predicción de Maxwell fue confirmada experimentalmente por Heinrich Hertz⁴⁹ en 1887, quien logró generar y detectar ondas electromagnéticas en el laboratorio. Sus experimentos demostraron que estas ondas se reflejan, refractan, difractan e interfieren como la luz, validando la teoría electromagnética (Hertz, 1887). Este descubrimiento permitió el nacimiento de la comunicación inalámbrica, ya que mostró que la información podía transmitirse a distancia sin cables mediante ondas electromagnéticas. Así, el electromagnetismo no solo constituyó una unificación teórica monumental, sino también una de las bases materiales de la civilización tecnológica médica y doméstica actual.

P.2

7.3. Física de fluidos

El estudio del movimiento de los fluidos comienza con los aportes de Euler (1757), quien formuló las ecuaciones fundamentales que describen el comportamiento de fluidos ideales, es decir, aquellos que no presentan viscosidad ni pérdidas de energía por fricción interna. Estas ecuaciones permiten analizar cómo varían la velocidad, la presión y la densidad dentro de un fluido en movimiento, constituyendo la base de la dinámica de fluidos. La formulación general de la ecuación se expresa como:

Ecuación 7-11: Ecuación de la conservación de la cantidad de movimiento de un fluido.

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p + \rho \vec{g}$$

Donde:

- ▶ ρ (kg/m^3) es la densidad del fluido,
- ▶ $\vec{v}$ (m/s) su velocidad,
- ▶ p ($\text{Pa}=\text{N}\cdot\text{m}^{-2}$) la presión y
- ▶ $\vec{g}$ (m/s^2) la aceleración debido a la gravedad.

⁴⁹Heinrich Rudolf Hertz (1857–1894): Fue un físico alemán fundamental para el desarrollo del electromagnetismo.





Este conjunto de ecuaciones representa una extensión de la segunda ley de Newton, vista en la Sección 6.3, aplicada a un medio continuo, permitiendo describir fenómenos como el flujo en tuberías ideales, corrientes atmosféricas simplificadas y comportamiento de fluidos en ausencia de fricción. Una duda común es por qué se dice ‘ecuaciones’ cuando solo vemos una ecuación, la respuesta es sencilla, un fluido (en la vida real y no ideal) es tridimensional y, a su vez, va a variar a través del tiempo por lo que componente de la velocidad va a depender de las tres dimensiones espaciales y una temporal, es decir, esto se define como $\vec{v} = \vec{v}(x, y, z, t)$. De aquí nacen cuatro ecuaciones diferenciales (una por cada dimensión) que tendrán que ser solucionadas para comprender el comportamiento físico del sistema, lo mismo se aplica para otras magnitudes físicas como el campo eléctrico o magnético.

La importancia de estas ecuaciones radica en que proporcionan un modelo matemático capaz de predecir el movimiento de fluidos en condiciones ideales, sirviendo como punto de partida para teorías más complejas como las ecuaciones de Navier-Stokes, teoría de la turbulencia, magnetohidrodinámica, entre otros.

Posteriormente, los trabajos de Claude-Louis Navier⁵⁰ y George Gabriel Stokes⁵¹ introdujeron el efecto de la viscosidad, es decir, la resistencia interna del fluido al movimiento (Navier, 1822; Stokes, 1845). Esto permitió desarrollar las ecuaciones de Navier-Stokes, que describen el comportamiento real de los fluidos, incorporando pérdidas de energía y efectos de fricción. Su formulación es:

Ecuación 7-12: Ecuaciones de Navier-Stokes

$$\rho \left(\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} + \rho \vec{g}$$

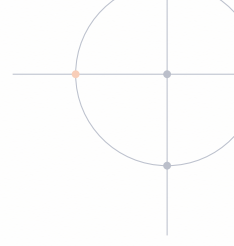
Donde:

► μ (Pa·s) representa la viscosidad dinámica del fluido.

⁵⁰Claude-Louis Navier (1785-1836): Ingeniero y físico francés, considerado uno de los padres de la mecánica de fluidos moderna y la ingeniería estructural.

⁵¹George Gabriel Stokes (1819-1903): Matemático y físico irlandés cuyas contribuciones fueron fundamentales en la dinámica de fluidos y la óptica física.





La Ecuación 7-12 es una de las más importantes de la física aplicada, ya que permite modelar desde el flujo de aire sobre las alas de un avión hasta el comportamiento de océanos, ríos, sangre en el cuerpo humano y procesos industriales. A pesar de su aparente simplicidad, su resolución analítica es extremadamente compleja, y muchos de sus problemas aún no tienen solución general, por lo que en gran medida se utilizan métodos computacionales bajo condiciones determinadas del sistema para poder resolverlas, esto dio paso al campo de la Mecánica de Fluidos Computacional⁵² (CFD) en la actualidad.

Otro avance fundamental en la comprensión de los fluidos fue el desarrollo de la prensa hidráulica, basada en el principio establecido por Blaise Pascal⁵³ y posteriormente aplicado de manera práctica por Joseph Bramah⁵⁴. Este principio establece que la presión aplicada a un fluido confinado se transmite de manera uniforme en todas las direcciones. Matemáticamente, se expresa como:

Ecuación 7-13: Principio de Pascal.

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

Donde:

- F_1 y F_2 (N) son las fuerzas aplicadas y
- A_1 y A_2 (m^2) son las áreas donde se aplica esa fuerza.

Este principio permite multiplicar fuerzas, de modo que una fuerza pequeña aplicada sobre un área reducida puede generar una fuerza mucho mayor en un área más grande (Pascal, 1663). La prensa hidráulica se convirtió en una herramienta esencial en la industria, permitiendo levantar cargas pesadas, moldear materiales y desarrollar sistemas mecánicos como frenos hidráulicos, elevadores y maquinaria pesada. Este ejemplo muestra cómo los principios físicos no solo explican la naturaleza, sino que también permiten transformarla mediante aplicaciones tecnológicas concretas.

- Ejemplo aplicado: análisis de una bomba periférica en mantenimiento industrial

⁵²**Mecánica de Fluidos Computacional:** Es una rama de la mecánica de fluidos que utiliza métodos numéricos y algoritmos para resolver y analizar problemas sobre el flujo de fluidos.

⁵³**Blaise Pascal (1623-1662):** Polímata, físico y matemático francés cuyas contribuciones fueron determinantes para el estudio de los fluidos y la presión.

⁵⁴**Joseph Bramah (1748-1814):** Inventor e ingeniero mecánico británico, reconocido como uno de los padres de la ingeniería industrial.

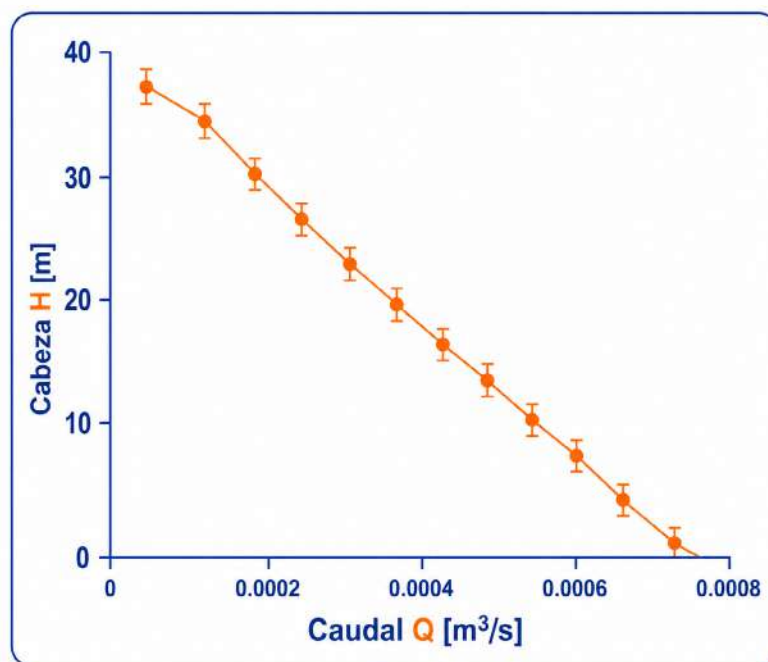




Las bombas rotodinámicas convierten la energía mecánica suministrada por un motor en energía hidráulica, lo que permite elevar la presión del fluido y mantener su circulación a través de tuberías, válvulas y accesorios. Su comportamiento no permanece constante: la altura desarrollada disminuye a medida que aumenta el caudal, mientras que las pérdidas de carga de la instalación crecen con la velocidad del flujo. Esta relación se representa mediante la curva característica H-Q, utilizada para seleccionar el equipo, localizar su zona de funcionamiento y comparar el desempeño medido con las condiciones establecidas por el fabricante.

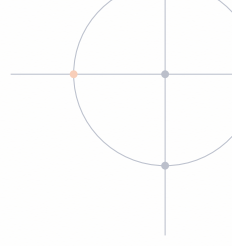
Valencia-Ocho et al. (2020) caracterizaron experimentalmente una bomba periférica mediante un montaje compuesto por tanque de succión, bomba, motor eléctrico, manómetro, válvula de regulación y tanque de descarga. La apertura de la válvula se modificó para obtener distintos valores de presión y caudal. Los resultados formaron la curva presentada en la Figura 7-2 del artículo, donde se observa que la altura entregada por la bomba aumenta cuando el caudal disminuye.

Figura 7-2: Curva característica para la bomba en estudio



Fuente: Valencia-Ocho et al. (2020)





Esta figura muestra la relación inversa entre la altura H (m), expresada en metros de columna de fluido, y el caudal Q ($m^3 \cdot s$). Uno de los puntos experimentales registrados corresponde a $Q=0,000343 \text{ m}^3/s$ y $H=20,8034 \text{ m}$. Este dato puede trasladarse a una situación habitual de mantenimiento: una bomba periférica conduce agua desde un depósito de almacenamiento hasta una línea de servicio industrial y, durante una inspección, el técnico necesita estimar la presión generada y la potencia hidráulica transmitida al fluido. La diferencia de presión equivalente a la altura desarrollada por la bomba se calcula mediante:

Ecuación 7-14: Incremento de presión en pascales

$$\Delta p = \rho g H$$

Donde ρ es la densidad del agua que generalmente tiene un valor de 1000 kg/m^3 . Al sustituir el valor tomado de la investigación mencionada:

$$\Delta p = (1000)(9,81)(20,8034) \approx 204,08 \text{ kPa}$$

La bomba produce, en ese punto de funcionamiento, un incremento de presión aproximado de **204,08 kPa**. Este resultado permite verificar si la instalación dispone de presión suficiente para vencer la diferencia de elevación y las pérdidas causadas por la fricción en tuberías, válvulas, codos y otros accesorios. La potencia hidráulica entregada al agua se obtiene mediante:

Ecuación 7-15: Potencia hidráulica expresada en vatios

$$P_h = \rho g Q H$$

Para el caudal y la altura seleccionados

$$P_h = (1000)(9,81)(0,000343)(20,8034) = 700 \text{ W}$$





El valor calculado representa la potencia útil transferida al fluido, no la potencia eléctrica consumida por el motor. Esta última siempre será mayor debido a las pérdidas mecánicas, hidráulicas y eléctricas. Si el conjunto bomba-motor presentara, por ejemplo, una eficiencia global del $\eta=40\%=0,4$, la potencia de entrada requerida sería:

Ecuación 7-16: Potencia de entrada

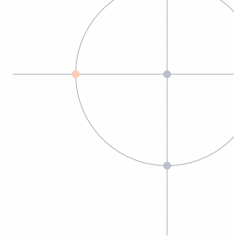
$$P_{\text{entrada}} = \frac{P_h}{\eta} = \frac{70 \text{ W}}{0,4} = 175 \text{ W}$$

La comparación entre la potencia útil y la potencia consumida aporta un indicador directo de eficiencia. Una diferencia creciente entre ambas magnitudes puede relacionarse con desgaste del impulsor, fricción excesiva, obstrucciones, desalineación del eje, deterioro de rodamientos o funcionamiento fuera del rango recomendado.

La curva característica también funciona como referencia para el mantenimiento predictivo. Si una medición posterior registra el mismo caudal de $0,000343 \text{ m}^3/\text{s}$, pero la altura disminuye de 20,8034 a 16 m, la bomba ya no reproduce su comportamiento inicial. La reducción puede advertir desgaste interno, fugas, ingreso de aire o daños en el impulsor. Si aparecen vibraciones, ruido irregular y fluctuaciones de presión en la succión, debe evaluarse igualmente la posibilidad de cavitación, fenómeno que se produce cuando la presión local desciende hasta alcanzar la presión de vapor del líquido y se forman burbujas que colapsan dentro de la bomba.

El análisis no termina en sustituir valores en una ecuación. Desde una perspectiva constructivista, conviene solicitar que el estudiante seleccione varios puntos de la Figura 7-2, calcule la presión y la potencia hidráulica para cada uno y compare los resultados. Después puede interpretar qué ocurre cuando se estrangula la válvula de descarga, por qué la altura aumenta mientras el caudal disminuye y qué señales permitirían reconocer una pérdida de rendimiento. La curva deja entonces de ser una gráfica descriptiva y se convierte en una herramienta para diagnosticar el estado de una máquina real.





7.4. Óptica

La óptica, entendida tradicionalmente como el estudio de la luz, constituye en realidad uno de los pilares históricos más influyentes en la construcción del conocimiento físico. Su desarrollo no ha sido lineal, sino el resultado de un proceso continuo de reformulación de ideas sobre la naturaleza de la luz y la visión. Como se revisó en las Secciones 5.3.1 y 6.3, las bases de esta disciplina se consolidaron desde los estudios de Al-Haytham sobre la naturaleza de la visión hasta la sistematización del espectro cromático realizada por Newton, lo que permitió transitar desde interpretaciones cualitativas hacia modelos más rigurosos. Sin embargo, durante el siglo XIX, la óptica comenzó a desafiar la visión corpuscular newtoniana, dando paso a una concepción más compleja en la que la luz empezó a entenderse como un fenómeno ondulatorio capaz de explicar una mayor variedad de efectos observables.

Bajo este marco, el experimento de la doble rendija realizado por Thomas Young (1804) representó un punto de inflexión en la comprensión de la luz. Young demostró que, al hacer pasar un haz luminoso por dos aberturas estrechas, se generaba un patrón de franjas claras y oscuras en una pantalla, resultado de la superposición de ondas. Este fenómeno, conocido como interferencia, se explica mediante la combinación de ondas que pueden reforzarse (interferencia constructiva) o anularse (interferencia destructiva). La condición para las franjas brillantes está dada por la relación:

Ecuación 7-17: Condición de interferencia constructiva en el experimento de Young

$$\Delta L = d \sin \theta = n \lambda$$

Donde:

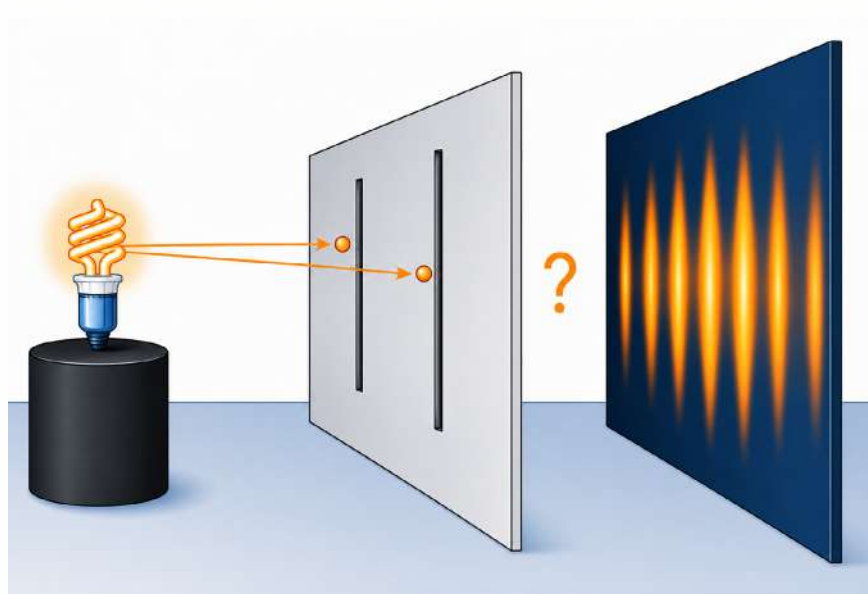
- ▶ ΔL (m) es la diferencia de camino,
- ▶ d (m) es la separación entre rendijas,
- ▶ θ (°) es el ángulo de observación,
- ▶ n (*adimensional*) es un número entero ($n \in \mathbb{Z}$) y
- ▶ λ (m) es la longitud de onda.





Este resultado proporcionó evidencia directa de la naturaleza ondulatoria de la luz, cuestionando el modelo corpuscular dominante. En la Figura 7-2 se tiene este experimento, donde una fuente de luz emite partículas (fotones) que atraviesan dos rendijas paralelas. El signo de interrogación central simboliza el misterio de la dualidad onda-partícula: aunque los proyectiles se lanzan individualmente, en la pantalla de detección (a la derecha) no se observan dos franjas aisladas, sino un patrón de interferencia compuesto por múltiples bandas verticales. Este fenómeno demuestra que cada partícula se comporta como una onda que "pasa por ambas rendijas a la vez", interfiriendo consigo misma hasta que el impacto en la pantalla colapsa su función de onda.

Figura 7-3: El experimento de la doble rendija de Young

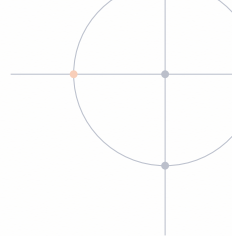


Fuente: Centro Nacional de Física de Partículas Astropartículas y Nuclear (CPAN) (2023)

Esta comprensión ondulatoria permitió que otros investigadores, como Étienne-Louis Malus⁵⁵, exploraran propiedades más sutiles de la luz. En 1808, Malus descubrió de manera accidental el fenómeno de la polarización al observar la luz reflejada en las ventanas del Palacio de Luxemburgo a través de un cristal de espato de Islandia. Este hallazgo reveló que la luz posee una orientación transversal, es decir, que sus vibraciones ocurren en di-

⁵⁵Étienne-Louis Malus (1775-1812): Físico, matemático e ingeniero militar francés, conocido por sus investigaciones pioneras en el campo de la óptica.





recciones específicas (Malus, 1809). La intensidad de la luz polarizada puede describirse mediante:

Ecuación 7-18: Ley de Malus

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$

Donde:

- ▶ I (W/m^2) es la intensidad transmitida,
- ▶ I_0 (W/m^2) es la intensidad inicial y
- ▶ θ ($^\circ$) es el ángulo entre la dirección de polarización y el eje del analizador.

Este descubrimiento no solo profundizó la comprensión de la naturaleza ondulatoria de la luz, sino que también permitió el desarrollo de tecnologías ópticas como filtros polarizadores y aplicaciones en instrumentación.

Paralelamente a estos avances en la naturaleza de la onda, el perfeccionamiento de los instrumentos ópticos permitió abrir una nueva dimensión en el estudio de la luz. Joseph von Fraunhofer⁵⁶, en 1814, observó que el espectro solar no era continuo, sino que contenía una serie de líneas oscuras bien definidas. Estas líneas, conocidas hoy como líneas de Fraunhofer, indicaban la absorción de ciertas longitudes de onda por elementos químicos presentes en la atmósfera solar (Fraunhofer, 1817). Este descubrimiento no solo representó un avance en la óptica experimental, sino que marcó el nacimiento de la espectroscopía como herramienta científica. A partir de este momento, fue posible determinar la composición química de las estrellas sin necesidad de contacto directo, dando origen a la astrofísica moderna.

Wolfschmidt (1999) destaca que el desarrollo de la espectroscopía en el siglo XIX transformó la astronomía en una ciencia física, al permitir que la luz se convirtiera en una fuente de información cuantificable sobre la estructura y composición del universo. Esta reinterpretación de la luz como portadora de información mediante los fotones consolidó una nueva etapa en la física, donde la observación dejó de ser únicamente descriptiva para convertirse en un proceso de inferencia científica rigurosa.

⁵⁶Joseph von Fraunhofer (1787-1826): Óptico y físico alemán que revolucionó la astronomía y la espectroscopía.





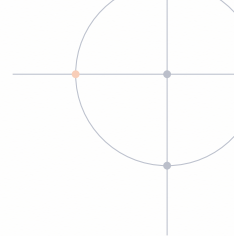
7.5. Impacto tecnológico

El desarrollo de la física entre los siglos XVIII y XIX no se limitó a una expansión del conocimiento teórico, sino que transformó de manera directa la estructura productiva, social y tecnológica de la humanidad. La Revolución Industrial, iniciada en el siglo XVIII, ya había introducido cambios notables en los sistemas de producción mediante el uso de máquinas mecánicas; pero hay que recalcar que fue el avance progresivo de campos como la termodinámica, el electromagnetismo, la óptica y la física de fluidos lo que permitió una transición hacia una industrialización más compleja, eficiente y tecnológicamente integrada. Este proceso no solo incrementó la capacidad de producción, sino que modificó la relación del ser humano con la energía, el trabajo y el entorno, consolidando un modelo de desarrollo basado en la aplicación sistemática del conocimiento científico producido.

En el caso de la termodinámica, su impacto fue determinante en la optimización de las máquinas térmicas, especialmente las máquinas de vapor que impulsaron la primera fase de la Revolución Industrial. El entendimiento más extenso de conceptos como energía, trabajo, calor y eficiencia permitió mejorar el diseño de motores, reduciendo pérdidas energéticas y aumentando la productividad industrial. Posteriormente, estos principios se extendieron a motores de combustión interna, turbinas y sistemas de generación eléctrica, estableciendo las bases de la ingeniería energética moderna. Este avance no solo permitió el crecimiento de la industria, sino que facilitó el desarrollo del transporte ferroviario y marítimo, acortando distancias y transformando el comercio global. A nivel social, estos cambios se tradujeron en una mayor disponibilidad de bienes, crecimiento urbano y una reorganización del trabajo, aunque también generaron nuevas tensiones económicas y ambientales que son presentes hasta hoy.

El electromagnetismo, por su parte, impulsó una segunda fase de la Revolución Industrial caracterizada por la electrificación de la sociedad. A partir de los descubrimientos de Faraday junto a Maxwell, fue posible generar, transmitir y utilizar electricidad de manera eficiente, lo que dio lugar a la creación de redes eléctricas, moto-





res eléctricos y sistemas de iluminación. Este desarrollo transformó radicalmente la vida cotidiana, extendiendo las jornadas productivas, mejorando las condiciones de trabajo y permitiendo el funcionamiento de nuevas industrias. Además, el estudio de las ondas electromagnéticas condujo al desarrollo de tecnologías de comunicación como el telégrafo, el teléfono y la radio, reduciendo las barreras espaciales y temporales en la transmisión de información. En este sentido, el electromagnetismo no solo representó un avance científico, sino la base de la sociedad tecnológica contemporánea.

En el campo de la física de fluidos desempeñó un papel fundamental en el desarrollo de sistemas hidráulicos, aeronáuticos y navales. La comprensión del comportamiento de líquidos y gases permitió optimizar el diseño de tuberías, bombas, canales y sistemas de riego, contribuyendo al desarrollo agrícola e industrial. Más adelante, estos principios fueron esenciales en el diseño de aeronaves y en el estudio de la aerodinámica, abriendo el camino hacia la aviación moderna.

De manera paralela, los avances en óptica no solo permitieron una mejor comprensión de la luz, sino que dieron origen a instrumentos como microscopios y telescopios más precisos, ampliando el conocimiento en áreas como la medicina, la biología y la astronomía. La espectroscopía, en particular, permitió analizar la composición de materiales y cuerpos celestes, integrando la Física con otras disciplinas científicas.

En la Figura 7-3 se presenta una lámina ilustrativa en estilo de grabado del siglo XIX que recopila cuatro de las innovaciones más trascendentales de la era industrial. En el cuadrante superior izquierdo se detalla la locomotora de vapor de Stephenson⁵⁷ (1825), motor del transporte masivo. A su derecha, la máquina de vapor de James Watt⁵⁸ (1769), cuya mejora en la eficiencia energética permitió la mecanización de las fábricas. En la sección inferior, la figura muestra el telégrafo eléctrico de Morse⁵⁹ (1837) como precursor de las telecomunicaciones globales y, para acabar, la bombilla eléctrica de Edison⁶⁰ (1879), que revolucionó la vida urbana al extender la jornada productiva y doméstica mediante luz artificial segura.

⁵⁷**George Stephenson (1781-1848):** Ingeniero mecánico británico pionero de la era ferroviaria.

⁵⁸**James Watt (1736-1819):** Ingeniero mecánico e inventor escocés cuyas mejoras en la máquina de vapor fueron el motor tecnológico de la Revolución Industrial.

⁵⁹**Samuel Morse (1791-1872):** Inventor y artista estadounidense que en 1837 patentó una versión práctica del telégrafo eléctrico, transformando para siempre las comunicaciones globales.

⁶⁰**Thomas Alva Edison (1847-1931):** Inventor y empresario estadounidense que en 1879 logró desarrollar la primera lámpara incandescente comercialmente viable, utilizando un filamento de carbono en un vacío casi perfecto que podía arder durante 13.5 horas.



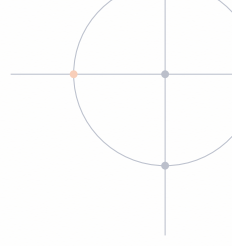
Figura 7-4: Hitos tecnológicos de la Revolución Industrial



Fuente: Elaboración propia mediante DALL-E 3.

En conjunto, estos avances no solo impulsaron el desarrollo industrial, sino que transformaron profundamente la calidad de vida. La disponibilidad de energía, la mejora en los sistemas de transporte, el acceso a la comunicación y los avances en la ciencia aplicada permitieron una expansión sin precedentes de las capacidades humanas. La física dejó de ser únicamente una herramienta para interpretar la naturaleza y se convirtió en un motor de transformación social y tecnológica. Este proceso, sin embargo, también plantea una reflexión crítica coherente con el enfoque de este libro: el progreso científico no es neutro, sino que está condicionado por contextos históricos, económicos y sociales, lo que refuerza la necesidad de comprender la ciencia no solo como conocimiento, sino como una fuerza activa en la construcción del futuro.

Por último, vincular las innovaciones mecánicas con el entorno industrial esmeraldeño es indispensable; la eficiencia analítica pierde sentido de forma aislada. Pensemos en las fallas de transporte del SOTE ocurridas en marzo de 2025: el vertido de 25 116 barriles de crudo sobre los ríos Caple, Viche y Esmeraldas generó un colapso socioeconómico inmediato (Empresa Pública Petroecuador, 2025). Frente a esta catástrofe hídrica, la termodinámica de fluidos y las leyes de conservación abandonan las aulas universitarias para convertirse en herramientas de remediación activa. ¿Cómo contener de forma hidrodinámica contaminantes en cuerpos de agua en movimiento? La ingeniería mecánica interviene diseñando e instalando Barreras Reactivas Permeables (BRP). Estos dispositivos subsuperficiales actúan interceptando el flujo afectado mediante la adsorción in situ con carbón activado. A través de un balance cinético preciso, el sistema combina retención superficial y sorción física. El mecanismo atrapa eficientemente los Hidrocarburos Totales de



Petróleo (TPHs), resguardando las zonas de captación urbana de agua dulce (Vereda Alonso et al., 2004). Mediante estas aplicaciones reales, la UTELVT transforma el formalismo matemático en un motor de resiliencia y desarrollo sostenible local.

Sección pedagógica

Preguntas de Reflexión Crítica

1. ¿Por qué la Física de los siglos XVIII y XIX obligó a pensar la naturaleza más allá de cuerpos que se mueven bajo fuerzas?
2. ¿Cómo cambió la sociedad cuando el calor, la electricidad, los fluidos y la luz dejaron de ser fenómenos curiosos y se convirtieron en tecnologías?
3. En un sistema mecánico real, como un motor o una bomba hidráulica, ¿es posible separar completamente la mecánica, la termodinámica y los fluidos?

Ejercicios Prácticos o de Aplicación Conceptual

Ejercicio 1. Leer una máquina térmica sin números

Analiza conceptualmente un motor de combustión, una turbina o un sistema de refrigeración. Explica dónde aparece el calor, dónde aparece el trabajo, qué pérdidas podrían existir y por qué la eficiencia nunca puede ser del 100%. No uses datos; trabaja con relaciones físicas.

Ejercicio 2. Un sistema integrado de ingeniería

Toma como caso una planta industrial pequeña, una bomba de agua, un sistema de ventilación o una red eléctrica básica. Identifica al menos tres campos físicos presentes: termodinámica, electromagnetismo, fluidos u óptica. Explica cómo se relacionan y qué pasaría si el ingeniero analizara solo uno de ellos

P.2

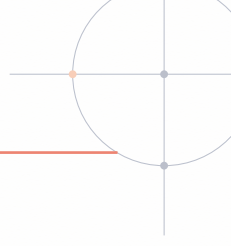


Criterios de evaluación

Tabla 7-2: Criterios de evaluación de las preguntas y ejercicios

Criterio de evaluación	Excelente (4 puntos)	Satisfactorio (3 puntos)	En proceso (2 puntos)	Inicial (1 punto)
Comprensión de la termodinámica y sus leyes fundamentales	Explica las leyes cero, primera, segunda y tercera; relaciona entropía, eficiencia y ciclos térmicos con máquinas reales.	Reconoce las leyes de la termodinámica y menciona entropía o eficiencia, aunque con imprecisiones.	Identifica algunas leyes termodinámicas, pero sin comprender su significado físico o aplicación.	Desconoce las leyes de la termodinámica o las confunde con otros principios físicos.
Análisis del electromagnetismo y las ecuaciones de Maxwell	Analiza las ecuaciones de Maxwell, la inducción de Faraday y su unificación de electricidad, magnetismo y luz.	Reconoce las ecuaciones de Maxwell y la inducción electromagnética, aunque con omisiones parciales.	Menciona algunos conceptos electromagnéticos, pero sin precisión formal ni relación entre ellos.	Desconoce el electromagnetismo o lo reduce a fenómenos aislados sin comprensión unificada.
Comprensión de la física de fluidos y las ecuaciones de Navier-Stokes	Explica ecuaciones de Euler y Navier-Stokes, viscosidad, flujo y su aplicación en sistemas hidráulicos y aerodinámicos.	Reconoce las ecuaciones de fluidos y menciona viscosidad o flujo, aunque con explicación parcial.	Identifica algunos conceptos de fluidos, pero sin comprender su formalismo matemático o aplicación.	Desconoce la física de fluidos o la reduce a conceptos cualitativos sin base matemática.
Evaluación del impacto tecnológico de la física en la Revolución Industrial	Analiza impacto de termodinámica, electromagnetismo, fluidos y óptica en máquinas, redes eléctricas y comunicaciones.	Reconoce el impacto tecnológico de algunos campos físicos en la industrialización, aunque con omisiones.	Menciona avances tecnológicos generales, pero sin relacionarlos con principios físicos específicos.	Desconoce el impacto tecnológico de la física o lo considera secundario en la historia industrial.
Capacidad para explicar un sistema integrado de ingeniería con múltiples campos físicos (Ejercicio 2)	Explica sistema (motor, bomba, red) integrando termodinámica, fluidos y electromagnetismo con relaciones causales claras.	Explica sistema integrando algunos campos, pero las relaciones causales son parciales o imprecisas.	Menciona varios campos en un sistema, sin establecer relaciones claras entre ellos.	No logra integrar campos físicos o los analiza de forma aislada sin conexión funcional.

Fuente: Elaboración propia



Lecturas Recomendadas



Carnot, S. (1824). *Réflexions sur la puissance motrice du feu*.

Es esencial para comprender el origen de la termodinámica y la idea de eficiencia en máquinas térmicas. Para Ingeniería Mecánica, su valor es directo.

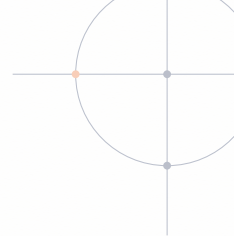


Faraday, M. (1839). *Experimental Researches in Electricity*

Permite comprender cómo la electricidad pasó de ser un fenómeno experimental a una base tecnológica. Es útil para conectar ciencia, laboratorio e innovación industrial.

P.2





8. LA CRISIS DE LA FÍSICA CLÁSICA Y EL SURGIMIENTO DE LA FÍSICA MODERNA

Objetivos de Aprendizaje del Capítulo

Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

- » Analizar los problemas experimentales y conceptuales que mostraron los límites de la Física clásica.
- » Evaluar cómo la mecánica cuántica y la relatividad transformaron las ideas de continuidad, certeza, simultaneidad y observación científica.
- » Crear una comparación razonada entre una explicación clásica y una explicación moderna de un fenómeno físico.

Introducción

Entre finales del siglo XIX y principios del XX, varios experimentos dejaron claro que la física de siempre (la mecánica, la termodinámica y el electromagnetismo clásicos) ya no alcanzaba para explicarlo todos los problemas que había en la física. Esto no significa que las teorías antiguas estuvieran erradas, sino que se quedaban cortas cuando se intentaba entender el mundo de los átomos, los objetos que viajan casi a la velocidad de la luz o ciertos fenómenos eléctricos y magnéticos. En la Tabla 8-1 se reúne esos grandes misterios que obligaron a los científicos a replantear el conocimiento de la época para dar vida a la física moderna.

Tabla 8-1: Fenómenos que evidenciaron los límites de la física clásica

Fenómeno o experimento	Dificultad para la física clásica	Respuesta de la física moderna	Concepto relacionado
Radiación del cuerpo negro	La teoría clásica predecía una emisión ilimitada de energía a frecuencias elevadas	Planck propuso que la energía se intercambia en cantidades discretas	Cuantización de la energía
Efecto fotoeléctrico	La energía de los electrones emitidos no dependía únicamente de la intensidad de la luz	Einstein explicó la interacción mediante cuantos de luz o fotones	Naturaleza corpuscular de la luz
Espectros atómicos	La física clásica no explicaba las líneas discretas emitidas por los átomos	Bohr propuso niveles de energía cuantizados	Transiciones electrónicas
Experimento de Michelson y Morley	No se detectó el movimiento de la Tierra respecto de un supuesto éter luminífero	La relatividad especial eliminó la necesidad del éter y estableció la invariancia de la velocidad de la luz	Relatividad especial
Estabilidad del átomo	Según el electromagnetismo clásico, el electrón acelerado debía perder energía y caer hacia el núcleo	La mecánica cuántica describió estados y energías permitidos	Estructura cuántica del átomo

Fuente: Elaboración propia





La transición hacia la física moderna se produjo cuando estas anomalías mencionadas dejaron de ser tratadas como excepciones y comenzaron a interpretarse como señales de la necesidad de un nuevo paradigma. El abandono de ideas fundamentales como la continuidad de la energía, el determinismo absoluto y la separación entre materia y radiación implicó una transformación radical en la forma de entender la naturaleza, a los cuales muchos se opusieron. La introducción de conceptos como cuantización, relatividad del espacio-tiempo y dualidad onda-partícula no solo resolvió los problemas existentes, sino que redefinió los límites del conocimiento hace más de un siglo. Este cambio no representó una ruptura total con la Física clásica, sino una ampliación de su alcance, en la que las teorías anteriores quedaron incorporadas como casos particulares dentro de un marco más general y complejo, mostrando una evolución hacia una Física más compleja.

8.1. Mecánica cuántica

El inicio de la mecánica cuántica suele situarse en el trabajo de Max Planck⁶¹ de 1900 sobre la radiación del cuerpo negro. Los datos experimentales mostraban una distribución espectral que la física clásica no podía reproducir correctamente. Para describirla, Planck introdujo el supuesto matemático de que los osciladores materiales intercambian energía en cantidades discretas proporcionales a su frecuencia, según:

Ecuación 8-1: Relación de Planck-Einstein.

$$E = h\nu$$

Donde:

- ▶ $E (J)$ es la energía de una sola partícula de luz o fotón,
- ▶ $h (J \cdot s)$ es la constante de Planck y
- ▶ $\nu (Hz)$ es la frecuencia.

El planteamiento de la Ecuación 8-1 no solo resolvía el problema experimental de la radiación del cuerpo negro, sino que introducía una constante universal (h) que pasaría a ser fundamental en toda la física moderna. Max Planck describió más tarde la introducción de los cuantos de energía como un "acto de desesperación" (*Akt der Verzweiflung*), admitiendo que fue una suposi-

⁶¹Max Planck (1858-1947): Físico alemán considerado el padre de la teoría cuántica.





⁶²Albert Einstein (1879-1955): Físico teórico alemán, considerado el científico más importante del siglo XX.

ción necesaria para que la teoría coincidiera con los datos experimentales (Planck, 1901). El aporte de Planck no fue simplemente técnico, sino epistemológico: abrió la posibilidad de que las leyes físicas no describan cantidades continuas, sino estructuras discretas.

Esta idea fue extendida por Albert Einstein⁶² en 1905, al explicar el efecto fotoeléctrico, uno de los fenómenos que la teoría clásica no podía justificar. Einstein propuso representar la radiación luminosa mediante cuantos localizados de energía con valor definido en la Ecuación 8-1, posteriormente denominados fotones. En los experimentos fotoeléctricos se observa que la emisión requiere una frecuencia mínima y que la energía cinética máxima de los electrones depende de la frecuencia de la radiación incidente; la intensidad, en cambio, influye principalmente en la cantidad de electrones emitidos cuando se supera el umbral. El modelo de Einstein explicó estos resultados con mayor precisión que la descripción ondulatoria clásica empleada de forma aislada. Hablar de una “naturaleza corpuscular” de la luz constituye una interpretación del formalismo y de los datos, mientras que el umbral de frecuencia y la energía de los electrones son resultados medibles. La relación que describe este fenómeno es:

Ecuación 8-2: El efecto fotoeléctrico de Einstein

$$E = h\nu - \phi$$

Donde:

- E (J), para este caso, es la energía cinética máxima de los electrones expulsados y
- ϕ (J) representa la energía mínima necesaria para liberar un electrón del material.

En su propio artículo, Einstein plantea con claridad esta ruptura conceptual:

“La energía de un rayo de luz... no está distribuida continuamente en el espacio, sino que consiste en un número finito de cuantos, de energía localizados en puntos del espacio, que pueden ser absorbidos o emitidos como unidades indivisibles.” (Einstein, 1905, p. 133).





Los resultados del efecto fotoeléctrico mostraron que una descripción exclusivamente ondulatoria de la luz era insuficiente para explicar determinados procesos de interacción entre radiación y materia. Otros experimentos, como la interferencia y la difracción, conservaron al mismo tiempo rasgos asociados con el comportamiento ondulatorio. El formalismo cuántico integra ambos tipos de resultados sin exigir que la luz se identifique de manera exclusiva con una onda clásica o con una partícula clásica. La interpretación de esta dualidad varía entre distintas corrientes filosóficas. Einstein recibió el Premio Nobel de Física de 1921, principalmente por su explicación del efecto fotoeléctrico, aunque mantuvo objeciones frente al carácter fundamental de la probabilidad defendido por algunas interpretaciones de la teoría cuántica.

En 1913, Niels Bohr⁶³ llevó la cuantización al corazón de la materia al proponer un modelo atómico en el que los electrones solo pueden ocupar órbitas discretas alrededor del núcleo. A diferencia del modelo clásico, en el que los electrones deberían colapsar hacia el núcleo, Bohr postuló que existen estados estacionarios en los que no se emite energía, y que las transiciones entre estos estados ocurren mediante saltos cuánticos. Este modelo permitió explicar el espectro del hidrógeno con gran precisión, estableciendo una relación directa entre niveles de energía y emisión de radiación. Bohr lo describe de la siguiente manera:

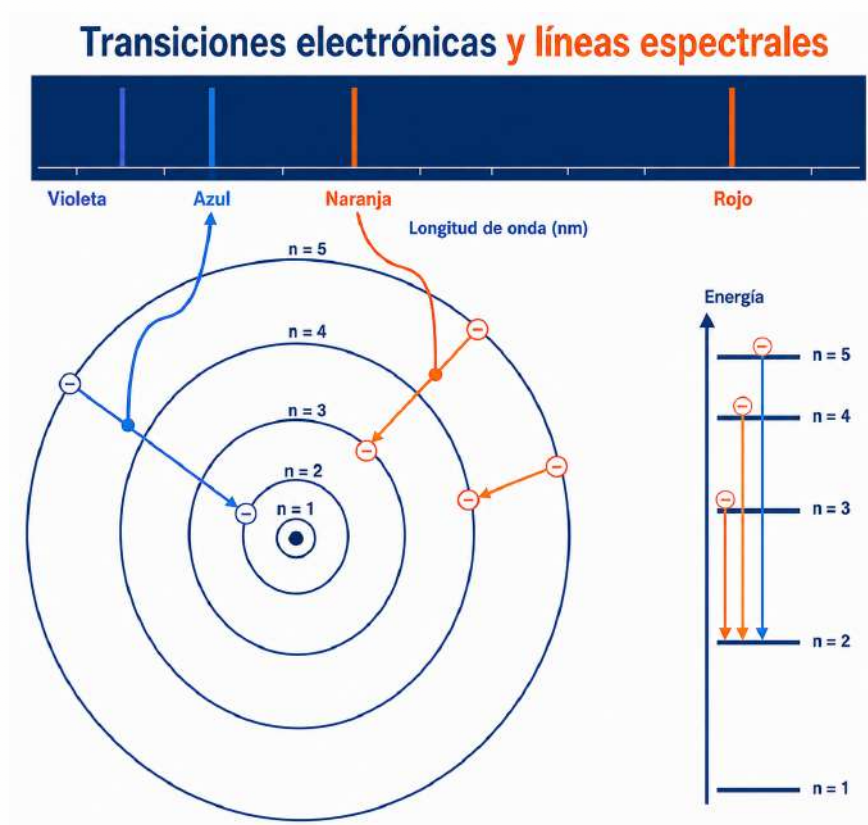
La Figura 8-1 representa el modelo propuesto por Bohr para relacionar los niveles energéticos del átomo con sus líneas espectrales. En el laboratorio se observan frecuencias discretas de emisión y absorción, que constituyen el hecho experimental. El modelo asigna esas frecuencias a transiciones entre estados de energía cuantizados y expresa la diferencia mediante $\Delta E = h\nu$. Las órbitas dibujadas no deben entenderse como trayectorias electrónicas observadas directamente, sino como un recurso del modelo histórico de Bohr. La mecánica cuántica posterior sustituyó esas órbitas definidas por estados descritos mediante funciones de onda. Como se mira en la parte superior, las transiciones de mayor energía producen luz en el extremo azul o violeta, mientras que los saltos menores se manifiestan en la banda del rojo; este fenómeno convierte a la luz en un código de barras de la mate-

⁶³Niels Bohr (1885-1962): Físico danés fundamental en la transición hacia la física moderna.



ria, permitiendo descifrar la composición química de los cuerpos celestes a partir de su radiación, lo que permitió la creación del campo de la Astroquímica.

Figura 8-1: Emisión de fotones en el modelo atómico de Bohr.



Fuente: : The Physics Classroom (2025)

Además, el aporte de Bohr (1913) fue crucial porque introdujo una estructura discreta en la materia misma, mostrando que la cuantización no era un fenómeno aislado, sino una propiedad fundamental del universo.

El siguiente avance conceptual fue propuesto por Louis de Broglie⁶⁴ en 1924, quien extendió la dualidad onda-partícula a la materia. De Broglie sugirió que, si la luz puede comportarse como partícula, entonces las partículas materiales también deben poseer propiedades ondulatorias. Esta idea no solo unificaba la descripción de la luz y la materia, sino que transformaba completamente la noción de partícula clásica. En su tesis doctoral afirma:

⁶⁴Louis de Broglie (1892-1987): Físico francés que revolucionó la ciencia al proponer, en su tesis doctoral de 1924, la dualidad onda-partícula.



“Se puede admitir que a todo punto material en movimiento se le asocia una onda... cuya longitud está determinada por su cantidad de movimiento.”
(de Broglie, 1924, p. 30).

Ecuación 8-3: Longitud de onda de Broglie.

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Donde:

- ▶ λ (m) es la longitud de onda asociada a la partícula y
- ▶ p (N·s) es la cantidad de movimiento o momento lineal de la partícula,

La relación de De Broglie permitió predecir una longitud de onda asociada con el momento de una partícula y adquirió respaldo empírico mediante experimentos de difracción de electrones visto en la Sección 7.4. El patrón de difracción constituye el resultado observado; la expresión de la Ecuación 8-3 pertenece al formalismo que permite calcularlo. La noción de “onda de materia” puede entenderse de maneras distintas: algunas interpretaciones la vinculan con una amplitud de probabilidad, mientras que otras le atribuyen un papel físico más directo. El aporte de De Broglie no eliminó por sí solo el problema conceptual entre onda y partícula, pero mostró que las categorías clásicas resultaban insuficientes para describir todos los fenómenos cuánticos.

El desarrollo de la mecánica cuántica alcanzó un nuevo nivel con Werner Heisenberg⁶⁵, quien formuló la mecánica matricial⁶⁶ y estableció el *Principio de Incertidumbre*, introduciendo un límite fundamental al conocimiento físico. Esta desigualdad es derivada de la estructura matemática de los operadores cuánticos y de su falta de conmutatividad. Heisenberg lo expresa de la siguiente forma:

⁶⁵Werner Heisenberg (1901-1976): Físico teórico alemán y uno de los principales fundadores de la mecánica cuántica.

⁶⁶Mecánica matricial: Es la primera formulación completa de la mecánica cuántica, desarrollada por Werner Heisenberg en 1925, con la colaboración de Max Born y Pascual Jordan.



“No podemos conocer, en principio, la trayectoria exacta de una partícula... cuanto más exactamente se determina una magnitud, menos exactamente puede conocerse la otra.” Heisenberg (1927, p. 172).

Matemáticamente, este principio se escribe como el producto de las incertidumbres de la posición y el momento de una partícula, resultado que debe ser mayor o igual a un valor mínimo:

Ecuación 8-4: Relación de indeterminación de Heisenberg

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi} = \frac{\hbar}{2}$$

Donde:

- Δx (m) es la incertidumbre en la posición de la partícula o en forma de pregunta: ¿qué tan bien sabemos dónde está?,
- Δp (N·s) es la incertidumbre en el momento lineal o cantidad de movimiento o, otra vez, en forma de pregunta: ¿qué tan bien sabemos a qué velocidad y en qué dirección se mueve? y
- $\hbar$ (J·s) es la razón entre la constante de Planck y 2π ; la mitad de esta razón representa el límite entre la mecánica cuántica y la clásica.

La Ecuación 8-4 establece un límite para la dispersión conjunta de los resultados obtenidos al medir posición y momento en conjuntos de sistemas preparados de manera equivalente. El formalismo cuántico estándar utiliza estados matemáticos para calcular distribuciones de probabilidad, pero no determina por sí solo qué existe antes de una medición. Según la interpretación de Copenhague, ciertos observables no poseen valores definidos con independencia del contexto experimental; la interpretación de variables ocultas de David Bohm⁶⁷ conserva una dinámica determinista, aunque no local, y la interpretación de los mundos múltiples atribuye una evolución determinista al estado cuántico universal. La desigualdad de Heisenberg es compartida por estas formulaciones, mientras que su significado ontológico continúa siendo objeto de debate.

Entre los científicos más relevantes de esta revolución está Erwin Schrödinger⁶⁸, quien desarrolló en 1926 la mecánica ondulatoria, proporcionando una formulación matemática capaz de describir la evolución de los sistemas cuánticos. Su ecuación:

⁶⁷David Joseph Bohm: Fue un físico estadounidense que hizo importantes contribuciones en los campos de la física teórica, la epistemología y la neuropsicología. Ha sido ampliamente considerado como uno de los mejores físicos cuánticos de todos los tiempos.

⁶⁸Erwin Schrödinger (1887-1961): Físico y teórico austriaco, figura clave en el desarrollo de la mecánica cuántica.





Ecuación 8-5: Ecuación de Schrödinger.

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H}\Psi$$

Donde:

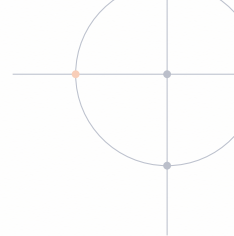
- ▶ i es la unidad imaginaria que tiene el valor de $i=\sqrt{-1}$,
- ▶ Ψ es la función de onda de la partícula, el cuadrado del módulo de esta función ($|\Psi|^2$) da información de cuánta probabilidad hay de encontrar una partícula en un lugar fijo,
- ▶ $\hat{H}$ es el operador hamiltoniano que representa la energía total del sistema,
- ▶ $\partial\Psi/\partial t$ esta derivada parcial de la función de onda respecto del tiempo indica cómo cambia el estado cuántico de esa partícula a medida que pasan los segundos.

La ecuación de Schrödinger determina su evolución temporal. De acuerdo con la regla de Born, $|\Psi(r,t)|^2$ representa una densidad de probabilidad, de modo que la probabilidad de detectar la partícula dentro de una región se obtiene integrando esa densidad sobre el volumen correspondiente. El clic localizado de un detector constituye el resultado experimental; la función de onda y su evolución pertenecen al formalismo, mientras que aquello que Ψ representa físicamente depende de la interpretación adoptada. Schrödinger describe su idea de la función de onda como:

"Se ha dicho que la función Ψ no es un catálogo de la realidad, sino un catálogo de las expectativas de un observador" (Schrödinger, 1935).

La ecuación de Schrödinger proporcionó una regla matemática precisa para calcular la evolución temporal de los estados cuánticos. Entre mediciones, esa evolución es continua y determinista dentro del formalismo estándar; el carácter probabilístico aparece al aplicar la regla de Born a los posibles resultados experimentales. En la formulación tradicional asociada con Copenhague, la medición se representa mediante una actualización o colapso del estado, aunque otras interpretaciones prescinden de un colapso fundamental o lo describen mediante dinámicas diferentes. La eficacia predictiva de la





ecuación no depende de que exista acuerdo sobre cuál de estas interpretaciones describe mejor la realidad.

La mecánica cuántica permitió describir fenómenos que excedían el alcance de la física clásica, entre ellos la radiación del cuerpo negro, el efecto fotoeléctrico, los espectros atómicos y la difracción de partículas. Su formalismo reúne estados cuánticos, operadores, ecuaciones de evolución y reglas probabilísticas cuya capacidad predictiva ha sido confirmada en numerosos experimentos. El acuerdo sobre estos resultados y procedimientos no elimina la discusión filosófica. La interpretación de Copenhague, los mundos múltiples, las variables ocultas de Bohm y los modelos de colapso objetivo ofrecen narrativas diferentes acerca del estado cuántico, la medición y el determinismo, aunque pueden coincidir en amplios dominios experimentales. Conviene distinguir, entonces, lo que se observa, lo que las ecuaciones permiten calcular y lo que cada interpretación sostiene acerca de la realidad microscópica.

8.2. Relatividad

La relatividad no apareció como una ruptura aislada, sino como el resultado de una tensión acumulada entre la mecánica newtoniana y el electromagnetismo. Como se revisó en la Sección 7.2, específicamente con las Ecuaciones de 7-9, Maxwell había mostrado que la luz podía entenderse como una onda electromagnética, cuya velocidad en el vacío quedaba determinada por constantes eléctricas a la vez que magnéticas como se ve en la Ecuación 7-10. Esta conclusión era problemática para la visión clásica, porque la mecánica de Newton suponía que las velocidades dependían del sistema de referencia del observador. Si una onda luminosa viajaba siempre con la misma velocidad, entonces el espacio y el tiempo absolutos comenzaban a perder consistencia física.

La relación de la Ecuación 8-6 muestra que la velocidad de la luz no aparece como una propiedad accidental, sino como una consecuencia directa de la estructura electromagnética del vacío. Allí comienza el problema filosófico: si la luz posee una velocidad definida por leyes universales, ¿respecto de qué sistema se mide esa velocidad? La respuesta clásica fue proponer la existen-





cia del éter luminífero, un medio invisible y absoluto por el cual se propagaría la luz. Esta hipótesis conservaba la idea de un fondo privilegiado del universo, pero pronto sería puesta a prueba.

El experimento de Michelson⁶⁹ y Morley⁷⁰, realizado en 1887, buscó detectar el movimiento de la Tierra a través de ese supuesto éter. La idea era que, si la Tierra se desplazaba dentro de ese medio, la luz debería mostrar pequeñas variaciones de velocidad según la dirección de propagación. El resultado fue inesperado: no apareció el desplazamiento de franjas de interferencia que se esperaba. En su artículo original, los autores expresaron:

“El desplazamiento esperado de las franjas de interferencia no fue observado; el resultado del experimento fue, por tanto, negativo” (Michelson & Morley, 1887, p. 333).

Este resultado transformó la ontología⁷¹ de la Física. No se trataba únicamente de que un instrumento no hubiera detectado algo, sino de que una entidad fundamental para la Física clásica, el éter, comenzaba a perder necesidad conceptual. La ausencia de evidencia obligaba a reconsiderar si realmente existía un sistema de referencia absoluto. A partir de este punto, el problema ya no era solo experimental, sino filosófico: la naturaleza parecía comportarse como si ningún observador privilegiado tuviera derecho a reclamar una posición absoluta en el universo.

Hendrik Lorentz⁷² intentó resolver esta dificultad sin abandonar completamente el éter. Para ello desarrolló transformaciones matemáticas que permitían explicar por qué el experimento de Michelson y Morley daba un resultado negativo. Según Lorentz (1904), los cuerpos en movimiento a través del éter sufrían una contracción real en la dirección del movimiento. Esta contracción compensaría el efecto esperado, haciendo imposible detectar el movimiento absoluto mediante experimentos ópticos. La contracción se define mediante:

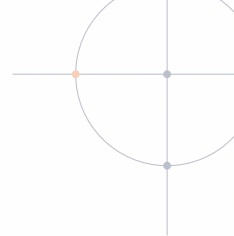
⁶⁹ **Albert A. Michelson (1852-1931):** Físico estadounidense conocido por su extraordinaria precisión en la medición de la velocidad de la luz.

⁷⁰ **Edward W. Morley (1838-1923):** Químico y físico estadounidense que colaboró con Michelson en sus experimentos más famosos.

⁷¹ **Ontología:** Rama de la filosofía que estudia la naturaleza del ser, la existencia y la realidad.

⁷² **Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928):** Físico teórico neerlandés y Premio Nobel de Física en 1902, cuya labor fue fundamental para la transición entre la física clásica y la moderna.





Ecuación 8-6: Factor de Lorentz.

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

Donde:

- c (m/s) es la velocidad de la luz y
- v (m/s) es la velocidad relativa del sistema en movimiento.

Este factor se vuelve significativo cuando v se aproxima a c . Para velocidades cotidianas, mucho menores que la velocidad de la luz, γ es prácticamente igual a 1, razón por la cual los efectos relativistas no se perciben en la experiencia diaria. Tras el resultado nulo de Michelson y Morley, Lorentz propuso salvar la teoría del éter mediante la contracción de la longitud utilizando la Ecuación 8-8. Lorentz planteó:

“Las dimensiones de un sistema en movimiento se modifican en la dirección del movimiento, mientras que las dimensiones perpendiculares permanecen inalteradas” (Lorentz, 1904, p. 811).

Aunque Einstein reinterpretaría este fenómeno como una propiedad cinemática del espacio-tiempo y no como un efecto físico sobre los átomos, el formalismo matemático de Lorentz se consolidó como una piedra angular de la relatividad.

Ecuación 8-7: Contracción de Lorentz.

$$L = \frac{L_0}{\gamma}$$

Donde:

- L_0 (m) es la longitud inicial del objeto antes de contraerse.

La matemática de Lorentz era poderosa, pero su interpretación seguía atada al viejo paradigma. El éter permanecía como una entidad oculta, hasta poco comprendida, aunque cada vez menos necesaria. Einstein tomaría estas mismas transformaciones y les daría otro sentido: no eran deformaciones materiales causadas por el movimiento en un medio absoluto, sino relaciones ci-





nemáticas entre observadores. El cambio no fue solo técnico, sino conceptual. La contracción de longitudes y la dilatación del tiempo dejaban de ser artificios para salvar el éter y pasaban a expresar la estructura misma del espacio y del tiempo.

Henri Poincaré⁷³ aportó un paso filosófico decisivo al formular con claridad el principio de relatividad. Para Poincaré, ningún experimento mecánico, óptico o electromagnético debía permitir distinguir un estado de reposo absoluto de un Movimiento Rectilíneo Uniforme (MRU). Con ello, la idea de movimiento absoluto quedaba vacía de significado físico gracias a la siguiente afirmación:

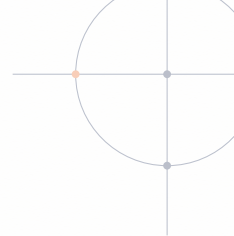
“Las leyes de los fenómenos físicos deben ser las mismas para un observador fijo que para un observador arrastrado por un movimiento de traslación uniforme; de modo que no tenemos, ni podemos tener, ningún medio para discernir si somos llevados o no por tal movimiento” (Poincaré, 1905, p. 104).

Esta afirmación desplaza el centro de la Física desde la búsqueda de un fondo absoluto hacia el estudio de las relaciones invariantes entre observadores. La pregunta ya no es “¿quién está realmente en reposo?”, sino “¿qué permanece igual para todos los observadores?”. Esta inversión epistemológica es una de las claves de la relatividad. La realidad física deja de apoyarse en un escenario fijo y pasa a organizarse alrededor de magnitudes invariantes, es decir, cantidades que conservan su valor, aunque cambie el sistema de referencia.

La síntesis final llegó con Albert Einstein en 1905. Su teoría de la Relatividad Especial partió de dos postulados: las leyes de la Física son las mismas en todos los sistemas inerciales, y la velocidad de la luz en el vacío es constante para todos los observadores, independientemente del movimiento de la fuente o del observador. La formulación de la Ecuación 8-8 eliminó la necesidad del éter y convirtió la relatividad en una teoría sobre la estructura del espacio-tiempo.

⁷³Henri Poincaré (1854-1912): Polímata, físico y matemático francés, considerado uno de los últimos grandes universalistas de la ciencia.





Ecuación 8-8: Dilatación temporal.

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0$$

Donde:

- ▶ Δt (s) es el intervalo de tiempo medido por un observador que ve el sistema en movimiento y
- ▶ Δt_0 (s) es el tiempo propio, medido por un observador que se mueve junto con el sistema.

La Ecuación 8-8 expresa que el tiempo no transcurre de manera idéntica para todos los observadores. A velocidades cercanas a la luz, un reloj en movimiento marca un intervalo menor respecto de un observador externo. Esta idea contradice directamente la noción newtoniana de tiempo absoluto, según la cual el tiempo fluye igual para todo el universo, lo cual sabemos que es totalmente mentira.

Hermann Minkowski⁷⁴ dio a la relatividad una forma geométrica más profunda. En 1908 propuso que espacio y tiempo no debían entenderse como entidades separadas, sino como componentes de una estructura única: el espacio-tiempo. Su afirmación es una de las más conocidas de la física moderna:

“De ahora en adelante, el espacio por sí mismo y el tiempo por sí mismo están condenados a desvanecerse en meras sombras, y solo una especie de unión de ambos conservará una realidad independiente” (Minkowski, 1909, p. 75).

La justificación filosófica de esta idea se encuentra en el concepto de evento. Un fenómeno físico no ocurre solamente en un lugar, ni solamente en un instante; ocurre en una coordenada espacial-temporal. Para conservar la causalidad, es decir, para distinguir qué eventos pueden influirse entre sí y cuáles no, se requiere una magnitud que permanezca invariante para todos los observadores, esta magnitud se define como:

⁷⁴Hermann Minkowski (1864-1909): Matemático alemán de origen lituano que proporcionó el marco geométrico definitivo para la relatividad especial.





Ecuación 8-9: Intervalo espaciotemporal.

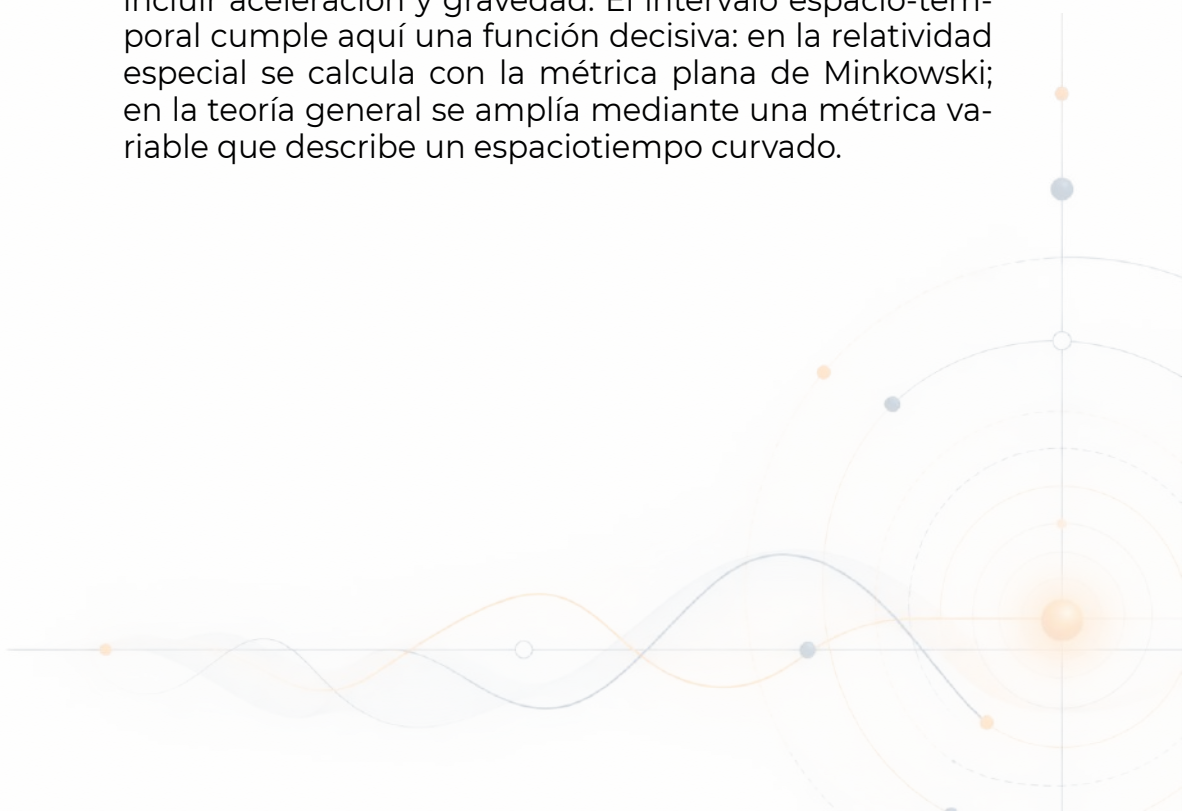
$$s^2 = c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2$$

Donde:

- ▶ s (m) es el intervalo espacio-temporal,
- ▶ t (s) es la coordenada temporal,
- ▶ x, y y z (m) son las coordenadas espaciales.

El intervalo espacio-temporal muestra que el tiempo participa en la geometría del universo de manera tan necesaria como las tres dimensiones espaciales. No es un simple parámetro externo que ordena los sucesos, sino una coordenada indispensable para definir la estructura causal de la realidad. En este bloque tetradi-dimensional, los eventos se organizan según relaciones geométricas que no dependen del observador. La relatividad, por tanto, no solo corrigió la mecánica clásica; modificó la idea misma de realidad física, sustituyendo el espacio y el tiempo absolutos por una estructura dinámica donde medir significa siempre relacionar.

Los cuatro conceptos fundamentales de la relatividad se reúnen en la Tabla 8-1. Su lectura permite seguir el paso desde las mediciones dependientes del marco inercial hasta la búsqueda de una geometría capaz de incluir aceleración y gravedad. El intervalo espacio-temporal cumple aquí una función decisiva: en la relatividad especial se calcula con la métrica plana de Minkowski; en la teoría general se amplía mediante una métrica variable que describe un espaciotiempo curvado.



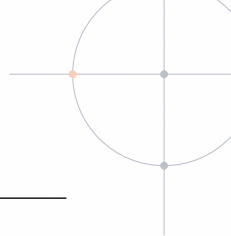


Tabla 8-2: Conceptos fundamentales de la relatividad

Concepto	Definición física	Formalismo
Simultaneidad	Dos eventos simultáneos para un observador no tienen que serlo para otro que se mueve respecto del primero. La asignación temporal ($\Delta t'$) depende del marco de referencia y de la separación espacial (Δx) entre los acontecimientos.	$\Delta t' = \gamma \left(\Delta t - \frac{v \Delta x}{c^2} \right)$
Dilatación temporal	El tiempo propio medido (Δt_0) por un reloj que acompaña al fenómeno es menor que el intervalo registrado (Δt) desde un marco donde ese reloj se encuentra en movimiento.	$\Delta t = \gamma \Delta t_0$
Contracción de longitud	La longitud de un objeto en movimiento (L), medida paralelamente a su velocidad, resulta menor que su longitud propia (L_0). Las dimensiones perpendiculares no se contraen.	$L = \frac{L_0}{\gamma}$
Intervalo espacio-temporal	Magnitud invariante que combina las separaciones temporal (t) y espacial (x, y, z) entre dos eventos y conserva el mismo valor para todos los observadores inerciales.	$s^2 = c^2 t^2 - x^2 - y^2 - z^2$ $ds^2 = \eta_{\mu\nu} dx^\mu dy^\nu$

Fuente: Elaboración propia

8.2.1. Relatividad especial

La relatividad especial surgió como una respuesta directa a las contradicciones que habían comenzado a fracturar la física clásica a finales del siglo XIX. El problema no era menor: si la velocidad de la luz era verdaderamente constante, entonces el tiempo y el espacio no podían seguir siendo absolutos. Einstein comprendió que la incompatibilidad no residía en el electromagnetismo, sino en la concepción clásica de la realidad física.

En el artículo de Einstein sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento, Einstein formuló una nueva estructura conceptual basada en dos principios fundamentales. El primero establecía que:

“Las leyes mediante las cuales cambian los estados de los sistemas físicos son independientes de si estos cambios de estado se refieren a uno u otro de dos sistemas de coordenadas en movimiento de traslación uniforme” (Einstein, 1905b, p. 891).



Esta afirmación eliminaba la existencia de un sistema de referencia absoluto privilegiado. La física debía describir la naturaleza del mismo modo para todos los observadores inerciales. Poco después, Einstein introduce el segundo principio, el cual transforma radicalmente la comprensión del espacio y del tiempo:

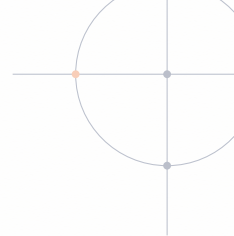
“Todo rayo de luz se mueve en el sistema ‘en reposo’ con una velocidad determinada c , independiente de si ese rayo de luz es emitido por un cuerpo en reposo o en movimiento” (Einstein, 1905b, p. 895)

La consecuencia de esta idea era profundamente revolucionaria. Si la velocidad de la luz debía permanecer constante para todos los observadores, entonces el tiempo ya no podía fluir universalmente. Dos observadores en movimiento relativo medirían tiempos distintos para un mismo fenómeno. La simultaneidad dejaba de ser absoluta y pasaba a depender del sistema de referencia. La realidad física comenzaba a entenderse no como un escenario fijo donde ocurren los eventos, sino como una relación entre observador, movimiento y medición.

La estructura matemática de esta teoría quedó expresada mediante las transformaciones de Lorentz, ya discutidas en la sección anterior, y particularmente a través del factor relativista mostrado en la Ecuación 8-6. Este factor permite describir fenómenos como la dilatación temporal (Ecuación 8-8) y la contracción de la longitud (Ecuación 8-7). A medida que un objeto se aproxima a la velocidad de la luz, el tiempo transcurre más lentamente respecto de un observador externo y las distancias en la dirección del movimiento se contraen. Estas predicciones, inicialmente consideradas casi filosóficas, terminaron siendo verificadas experimentalmente décadas después mediante partículas subatómicas y relojes atómicos de alta precisión.

Uno de los desarrollos más trascendentales de la relatividad especial fue la equivalencia entre masa y energía. Einstein comprendió que la masa no debía interpretarse como una propiedad completamente separada de





la energía, sino como una de sus manifestaciones. Esta transición conceptual quedó expuesta en su artículo de 1905 ¿Depende la inercia de un cuerpo de su contenido de energía?, donde plantea:

“Si un cuerpo entrega la energía L en forma de radiación, su masa disminuye en L/c^2 ” (Einstein, 1905a, p. 641).

A partir de esta relación se obtiene una de las ecuaciones más conocidas de toda la historia de la ciencia:

Ecuación 8 10: Equivalencia masa-energía.

$$E = mc^2$$

Donde:

- E (J) representa la energía total asociada a un cuerpo y
- m (kg) la masa de ese cuerpo.

La Ecuación 8-10 muestra que una pequeña cantidad de masa puede transformarse en enormes cantidades de energía debido al valor extremadamente elevado de c . Esta formulación modificó completamente la comprensión de la materia y abrió el camino hacia el desarrollo de la física nuclear, la energía atómica y la cosmología moderna. Procesos como la fisión y la fusión nuclear encuentran aquí su fundamento teórico, al igual que la explicación energética del Sol y de las estrellas. El universo dejaba de entenderse como un mecanismo puramente mecánico y comenzaba a revelarse como un sistema dinámico donde materia y energía podían transformarse mutuamente. Este descubrimiento permitió un gran avance en la física nuclear y, tiempo después, la creación de la bomba nuclear por parte de J. Robert Oppenheimer⁷⁵ en 1945.

Las implicaciones filosóficas de la relatividad especial fueron igualmente profundas. El espacio y el tiempo, que desde Newton habían sido considerados absolutos e independientes del observador, pasaron a entenderse como construcciones relacionales. La medición de una distancia o de una duración ya no podía separarse

⁷⁵J. Robert Oppenheimer (1904-1967): Físico teórico estadounidense, a menudo llamado el «padre de la bomba atómica» por su liderazgo científico en el Proyecto Manhattan durante la Segunda Guerra Mundial.





del estado de movimiento del observador que realiza la medición. La realidad física dejaba de presentarse como algo completamente objetivo e inmutable para convertirse en una estructura dependiente de relaciones observacionales precisas.

Esta transformación conecta de manera directa con la perspectiva constructivista desarrollada a lo largo de este libro. Desde este enfoque, el conocimiento no es una copia exacta de la realidad, sino una construcción conceptual elaborada a partir de modelos, relaciones y marcos interpretativos. La relatividad especial representa una validación científica de esta idea, porque demuestra que incluso magnitudes aparentemente absolutas como el tiempo o la longitud dependen de la relación entre el observador y el fenómeno observado. En palabras de Cassirer⁷⁶ (1923):

“Los conceptos fundamentales de la física no son imágenes pasivas de una realidad dada, sino construcciones intelectuales mediante las cuales organizamos la experiencia” (Cassirer, 1923, p. 267)

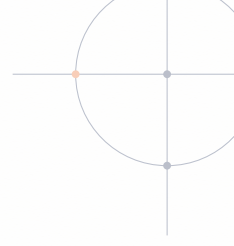
De manera similar, Piaget sostuvo que el conocimiento científico no surge de una simple acumulación de datos, sino de una reorganización progresiva de estructuras cognitivas:

“La objetividad no consiste en copiar lo real, sino en construir sistemas de relaciones cada vez más coherentes” (Piaget, 1970).

La relatividad especial evidencia precisamente esta transición epistemológica. El espacio y el tiempo no desaparecen, pero dejan de ser entidades absolutas para convertirse en relaciones construidas dentro de una estructura matemática coherente. La física moderna, por tanto, no solo transformó las ecuaciones del universo; transformó también la manera en que el ser humano comprende la realidad.

⁷⁶Ernst Cassirer (1874-1945): Filósofo y epistemólogo alemán, figura clave de la escuela neokantiana de Marburgo.





8.2.2. Relatividad general

La relatividad general surgió como una extensión natural de la relatividad especial vista en la Sección 8.2.1, aunque implicó una transformación mucho más profunda en la comprensión de la gravedad y de la estructura misma del universo. Mientras la relatividad especial había eliminado el espacio y el tiempo absolutos en sistemas de movimiento uniforme, todavía permanecía sin resolver un problema fundamental: la gravedad. Newton había descrito la gravitación como una fuerza de atracción instantánea entre cuerpos masivos, una idea extraordinariamente efectiva desde el punto de vista matemático, pero difícil de reconciliar con el nuevo límite universal impuesto por la velocidad de la luz. Einstein comprendió que la gravedad no podía seguir interpretándose como una fuerza convencional propagándose instantáneamente a través del vacío. El problema exigía replantear la naturaleza misma del espacio-tiempo.

El punto de partida de esta nueva teoría fue el Principio de Equivalencia. Einstein observó que los efectos producidos por la gravedad son indistinguibles de los efectos producidos por una aceleración. Un observador encerrado en un sistema acelerado no puede diferenciar si la fuerza que percibe proviene de un campo gravitatorio o de la aceleración del sistema. Esta intuición, aparentemente sencilla, destruyó la separación clásica entre geometría y dinámica. La gravedad dejaba de ser una interacción externa entre cuerpos y pasaba a interpretarse como una propiedad geométrica del espacio-tiempo.

En 1916, Einstein expresaría esta idea afirmando:

“En la teoría general de la relatividad, el espacio y el tiempo ya no pueden considerarse entidades separadas e independientes, sino formas de ordenamiento ligadas inseparablemente a los procesos físicos” (Einstein, 1916).

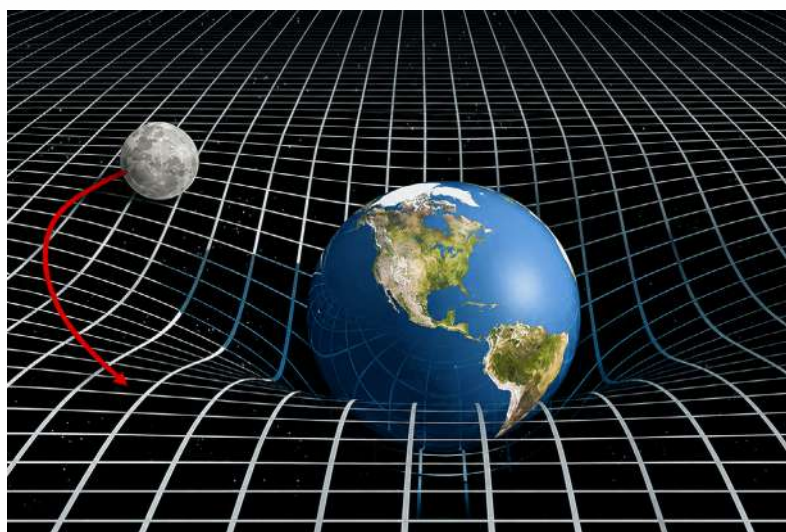




A partir de esta concepción, la presencia de materia y energía modifica la geometría del espacio-tiempo, alterando las trayectorias naturales de los cuerpos. Un planeta no órbita alrededor del Sol porque exista una fuerza invisible que lo atrae, sino porque el Sol curva el espacio-tiempo a su alrededor y el planeta sigue la trayectoria más natural posible dentro de esa geometría deformada.

La Figura 8-2 representa de manera didáctica la deformación del espacio-tiempo causada por una masa. En la imagen, la Tierra genera una curvatura en la geometría espacial, mientras la Luna se desplaza siguiendo esa deformación. Aunque esta representación utiliza una analogía bidimensional, permite visualizar una de las ideas centrales de la relatividad general: la masa le dice al espacio cómo curvarse y el espacio le dice a la masa cómo moverse (Wheeler, 1990), idea posteriormente sintetizada por John Archibald Wheeler⁷⁷. La gravedad deja así de interpretarse como una fuerza newtoniana y pasa a entenderse como una consecuencia geométrica del espacio-tiempo.

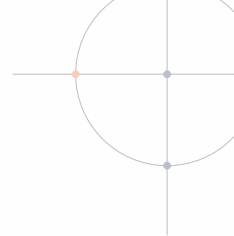
Figura 8-2: Deformación del espacio-tiempo por la masa terrestre



Fuente: ABC Ciencia (2019).

⁷⁷John Archibald Wheeler (1911-2008): Físico teórico estadounidense que desempeñó un papel crucial en el desarrollo de la relatividad general y la física cuántica.





Esta relación entre materia y geometría quedó formalizada matemáticamente mediante las Ecuaciones de Campo de Einstein, Einstein Field Equations (EFE) en inglés, publicadas en 1915. Estas ecuaciones representan una de las construcciones matemáticas más profundas de toda la historia de la física:

Ecuación 8 11: Ecuaciones de Campo de Einstein.

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$$

Donde:

- ▶ $G_{\mu\nu} (m^{-2})$ corresponde al tensor de Einstein, que describe la curvatura del espacio-tiempo,
- ▶ $\Lambda (m^{-2})$ representa la constante cosmológica introducida por Einstein para permitir soluciones estáticas del universo,
- ▶ $g_{\mu\nu} (adimensional)$ es el tensor métrico, encargado de definir la geometría del espacio-tiempo,
- ▶ $\kappa (m \cdot s^2/kg)$ corresponde a la constante de acoplamiento gravitacional y
- ▶ $T_{\mu\nu} (J/m^3)$ representa el tensor energía-momento, el cual describe la distribución de materia y energía.

Estas ecuaciones establecen una conexión directa entre geometría y contenido físico. El lado izquierdo describe cómo se curva el espacio-tiempo; el lado derecho describe la materia y la energía presentes en él. Einstein resumió esta relación conceptual afirmando que la geometría del universo no es independiente de la materia, sino una consecuencia de ella. El espacio deja de ser un escenario vacío donde ocurren los fenómenos físicos y se convierte en un actor dinámico que participa activamente en la evolución del cosmos.

La potencia explicativa de estas ecuaciones fue extraordinaria. Poco después de su publicación, Karl Schwarzschild⁷⁸ encontró una solución exacta para describir el campo gravitatorio alrededor de una masa esférica. Su trabajo en 1916 mostró que las ecuaciones permitían la existencia de regiones del espacio donde la curvatura se vuelve tan extrema que ni siquiera la luz puede escapar. Aunque en aquella época todavía no existía el término “agujero negro”, la solución de Schwarzschild representó el primer fundamento matemático de estos objetos.

⁷⁸Karl Schwarzschild (1873-1916): Físico y astrónomo alemán que proporcionó la primera solución exacta a las ecuaciones de campo de la relatividad general de Einstein.





Schwarzschild escribió:

“La teoría gravitacional de Einstein permite una solución exacta para el campo gravitatorio de una masa puntual estacionaria” (Schwarzschild, 1916).

Décadas más tarde, estas soluciones se convertirían en uno de los pilares fundamentales de la astrofísica moderna, permitiendo comprender fenómenos asociados a estrellas colapsadas, núcleos galácticos y la evolución extrema del universo que veremos en la Sección 9.

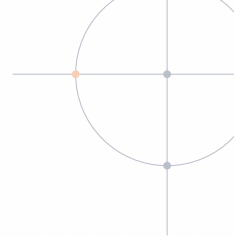
Otra de las consecuencias más sorprendentes de las ecuaciones de Einstein fue la predicción de las ondas gravitacionales. Si la gravedad es una deformación dinámica del espacio-tiempo, entonces perturbaciones masivas deberían generar ondulaciones propagándose a la velocidad de la luz. Einstein propuso esta idea en 1916, aunque durante mucho tiempo se dudó de su existencia física real debido a la extrema dificultad para detectarlas experimentalmente. Un siglo después, el observatorio LIGO⁷⁹ confirmó su existencia mediante la detección de ondas gravitacionales producidas por la colisión de agujeros negros, verificando una predicción realizada exactamente cien años antes.

La relatividad general transformó radicalmente la visión humana del universo. La gravedad dejó de ser una fuerza mecánica para convertirse en una propiedad geométrica del cosmos. Gracias a esta teoría fue posible comprender la expansión del universo, la existencia de agujeros negros, la evolución estelar y la estructura a gran escala del espacio. La cosmología moderna, la exploración espacial y gran parte de la astrofísica contemporánea descansan directamente sobre las ecuaciones formuladas por Einstein en 1915.

Desde una perspectiva epistemológica, la relatividad general también representa una confirmación de que el conocimiento científico evoluciona mediante reconstrucciones profundas de la realidad. El universo descrito por Newton no desapareció; fue reinterpretado dentro de un marco geométrico más amplio y preciso. Esta transición evidencia nuevamente que las teorías científicas

⁷⁹LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory): Gran observatorio de física e instalación de investigación de vanguardia diseñado para detectar ondas gravitacionales cósmicas.





cas no son verdades absolutas e inmutables, sino modelos conceptuales que se transforman conforme cambia la capacidad humana de observar, medir e interpretar la naturaleza. La exploración futura del cosmos, la gravedad cuántica y la comprensión del origen del universo continúan dependiendo de esta misma lógica: construir nuevas formas de entender la realidad a partir de preguntas que todavía permanecen abiertas.

Sección pedagógica

Preguntas de Reflexión Crítica

1. ¿Por qué una teoría exitosa, como la Física clásica, puede entrar en crisis cuando intenta explicar fenómenos nuevos con sus propios supuestos?
2. ¿Qué idea resulta más difícil de abandonar para el sentido común: que la energía pueda estar cuantizada o que el tiempo no sea absoluto?
3. ¿Cómo cambia nuestra forma de pensar la realidad cuando aceptamos que un modelo físico puede ser correcto en una escala y limitado en otra?

Ejercicios Prácticos o de Aplicación Conceptual

Ejercicio 1. Cuando lo clásico ya no alcanza

Elige uno de estos fenómenos: radiación del cuerpo negro, efecto fotoeléctrico, dilatación temporal o dualidad ondapartícula. Explica primero qué esperaría la Física clásica y luego qué cambio conceptual introduce la Física moderna. No desarrolles ecuaciones; trabaja con ideas.

Ejercicio 2. Escalas y validez del modelo

Plantea tres escenarios: una grúa levantando una carga, un electrón interactuando con luz y un satélite orbitando la Tierra a gran velocidad. Indica qué marco físico usarías en cada caso: clásico, cuántico o relativista. Justifica tu decisión según la escala, la velocidad y el tipo de fenómeno.

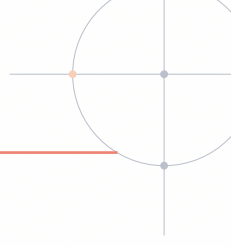


Criterios de evaluación

Tabla 8-3: Criterios de evaluación de las preguntas y ejercicios

Criterio de evaluación	Excelente (4 puntos)	Satisfactorio (3 puntos)	En proceso (2 puntos)	Inicial (1 punto)
Comprensión de la crisis de la física clásica y sus limitaciones	Analiza problemas experimentales (cuerpo negro, efecto fotoeléctrico, Michelson-Morley) que evidenciaron límites de la física clásica.	Reconoce algunos problemas de la física clásica y menciona su incapacidad para explicar nuevos fenómenos.	Identifica algún problema de la física clásica, pero sin comprender su significado ni sus implicaciones.	Desconoce la crisis de la física clásica o la considera inexistente.
Análisis de la mecánica cuántica y sus conceptos fundamentales	Explica cuantización, efecto fotoeléctrico, dualidad onda-partícula, principio de incertidumbre y ecuación de Schrödinger.	Reconoce conceptos cuánticos fundamentales, aunque su explicación es parcial o con imprecisiones.	Menciona algunos conceptos cuánticos, pero sin precisión formal ni comprensión de su significado.	Desconoce la mecánica cuántica o la reduce a ideas vagas sin contenido físico.
Comprensión de la relatividad especial y sus consecuencias	Explica postulados de Einstein, dilatación temporal, contracción de longitud y equivalencia masa-energía.	Reconoce los postulados de la relatividad especial y menciona algunas consecuencias, aunque con omisiones.	Identifica algún concepto relativista, pero sin comprender su formalismo o implicaciones.	Desconoce la relatividad especial o la confunde con otros modelos físicos.
Análisis de la relatividad general y su interpretación geométrica de la gravedad	Explica principio de equivalencia, curvatura del espacio-tiempo, ecuaciones de campo y ondas gravitacionales.	Reconoce la relatividad general y menciona la curvatura o las ondas gravitacionales, aunque con explicación parcial.	Identifica algunos conceptos de relatividad general, pero sin comprender su geometría o implicaciones.	Desconoce la relatividad general o la reduce a una idea vaga de gravedad.
Capacidad para comparar explicaciones clásicas y modernas de un fenómeno físico (Ejercicio 1)	Compara explicación clásica y moderna de un fenómeno (cuerpo negro, fotoeléctrico, dilatación) con claridad conceptual.	Compara ambos enfoques, aunque la explicación moderna es parcial o imprecisa en algunos aspectos.	Menciona diferencias entre enfoques, pero sin precisión conceptual o con confusión entre ellos.	No logra comparar o confunde explicaciones clásicas y modernas.

Fuente: Elaboración propia



Lecturas Recomendadas



Planck, M. (1901). "On the Law of Distribution of Energy in the Normal Spectrum".

Es clave para entender cómo nació la idea de cuantización. El capítulo trabaja esta ruptura al explicar que la energía no siempre puede comprenderse como una magnitud continua.



Einstein, A. (1905b). "On a Heuristic Point of View Concerning the Production and Transformation of Light".

Resulta valiosa porque muestra cómo el efecto fotoeléctrico obligó a repensar la naturaleza de la luz.

P.2





9. COSMOLOGÍA MODERNA

Objetivos de Aprendizaje del Capítulo

Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

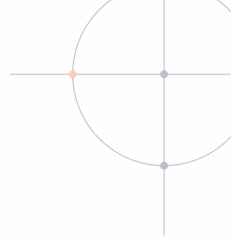
- » Analizar la cosmología moderna como una construcción científica basada en modelos matemáticos, observaciones astronómicas y evidencias físicas.
- » Evaluar el papel del Modelo Estándar, el Big Bang, la radiación de fondo, la materia oscura y la energía oscura como explicaciones científicas sujetas a revisión.
- » Crear una interpretación conceptual sobre la expansión del universo, diferenciando una explicación científica de una representación intuitiva o simplificada.

Introducción

La cosmología moderna representa uno de los esfuerzos intelectuales más ambiciosos de la historia de la ciencia al buscar comprender el origen, la estructura y la evolución del universo como un sistema físico integral; a diferencia de las antiguas visiones filosóficas o religiosas, este estudio contemporáneo se construye mediante modelos matemáticos y observaciones capaces de describir fenómenos a escalas inimaginables. La relatividad general de Einstein transformó radicalmente este campo al demostrar que el universo es una estructura dinámica cuya geometría evoluciona junto con la materia y la energía, permitiendo que la cosmología transitara de la especulación abstracta hacia una disciplina sustentada por evidencias verificables. Durante el siglo XX y comienzos del XXI, el desarrollo tecnológico de espectroscopía, radiotelescopios y observatorios espaciales amplió extraordinariamente la capacidad humana para estudiar galaxias lejanas, remanentes estelares y cúmulos con una precisión sin precedentes, modificando la relación entre observación y teoría al convertir las imágenes astronómicas en fuentes cuantificables de información física sobre la composición, el movimiento y la edad de los objetos celestes.

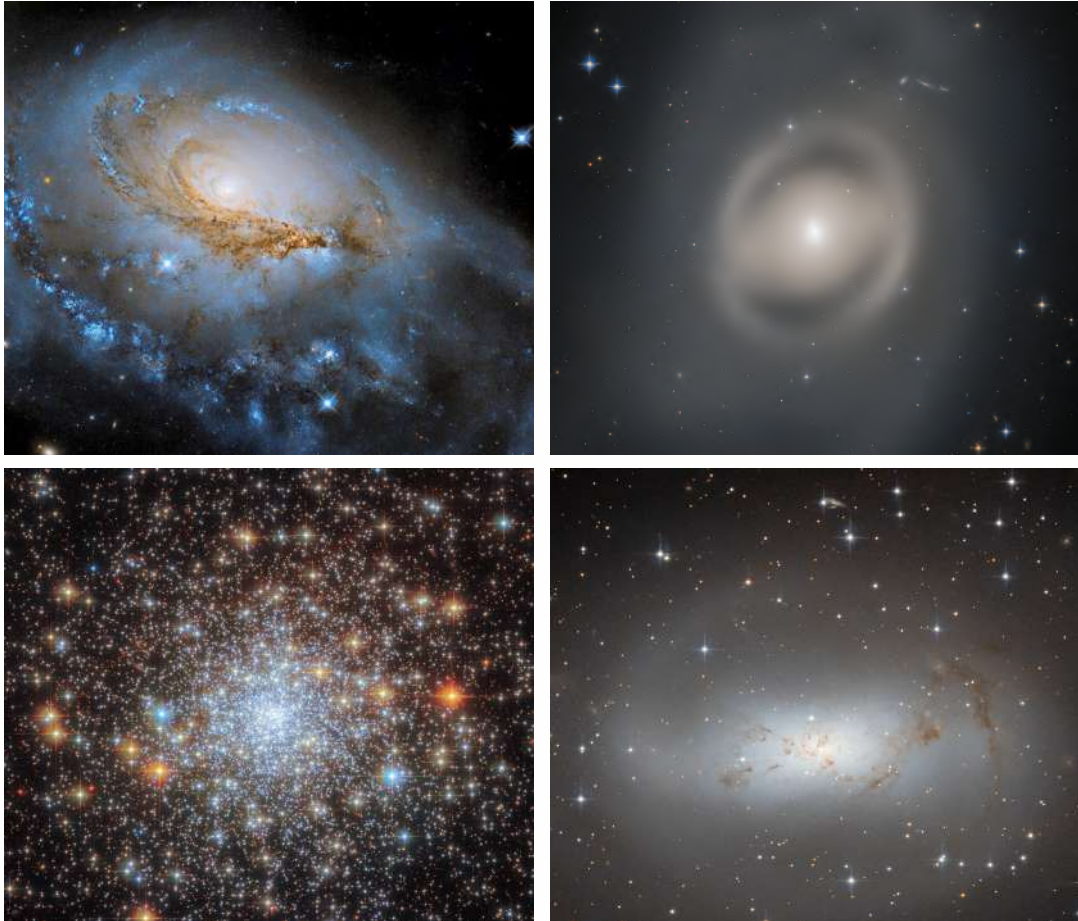
El Telescopio Espacial Hubble marcó un punto de inflexión en esta transformación. Sus observaciones permitieron medir con mayor precisión la tasa de expansión del universo, estudiar galaxias distantes y revelar la enorme diversidad morfológica de estructuras galácticas





presentes en el cosmos observable. La Figura 9-1 muestra algunos ejemplos de esta diversidad, incluyendo galaxias espirales, lenticulares, irregulares y cúmulos globulares capturados mediante observaciones del Hubble. En el sentido de las agujas del reloj, partiendo desde la esquina superior izquierda, se observan: la galaxia espiral NGC 1961, la galaxia lenticular NGC 6684, la galaxia irregular ESO 174-1 y el cúmulo globular NGC 1651.

Figura 9-1: Diversidad de estructuras galácticas y estelares



Fuente: ESA/Hubble & NASA (2023), NASA/ESA Hubble Space Telescope (2022), NASA/ESA Hubble Space Telescope (2024), NASA/ESA Hubble Space Telescope (2023b).

El lanzamiento del Telescopio Espacial James Webb (JWST) profundizó todavía más esta revolución observacional. Gracias a su capacidad para trabajar en el espectro infrarrojo, el JWST ha permitido observar regiones ocultas por polvo interestelar y detectar estructuras extremadamente antiguas, cercanas a los primeros momentos de formación del universo.





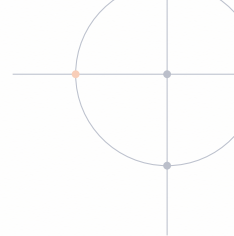
La Figura 9-2 presenta algunos de estos fenómenos de alta energía y formación estelar, incluyendo remanentes de supernovas, nebulosas y galaxias activas observadas con un nivel de detalle sin precedentes. Estas imágenes muestran no solo la complejidad del universo, sino también la capacidad creciente de la Física moderna para reconstruir procesos cósmicos ocurridos hace millones o incluso miles de millones de años. En el sentido de las agujas del reloj, desde la esquina superior izquierda, se muestran: el remanente de supernova Cassiopeia A, la nebulosa del Cangrejo (M1), la región de formación estelar Rho Ophiuchi y la galaxia espiral M61.

Figura 9-2: Fenómenos de alta energía observados por el telescopio James Webb



Fuente: NASA ESA CSA (2023b), NASA ESA CSA (2023a), NASA ESA CSA (2023c), NASA ESA CSA (2024).





La cosmología moderna evidencia que el universo no es un sistema estático ni completamente conocido, sino una realidad en permanente expansión conceptual. Cada nuevo instrumento modifica la manera en que el ser humano interpreta el cosmos, reforzando la idea de que el conocimiento científico se construye mediante modelos que evolucionan junto con la capacidad de observación. Esta perspectiva abre paso a una serie de preguntas fundamentales que definirán las siguientes secciones: ¿de qué está compuesto el universo a nivel más elemental?, ¿cómo se originó el cosmos?, ¿qué evidencias sostienen el modelo del Big Bang?, y ¿por qué gran parte de la materia y energía del universo permanece invisible? A partir de estas interrogantes se desarrollarán temas centrales de la Física contemporánea.

P.2

EVOLUCIÓN HISTÓRICA Y CONCEPTUAL DE LA FÍSICA

9.1. Modelo Estándar de Partículas

El desarrollo de la cosmología moderna llevó inevitablemente a una pregunta más profunda: ¿de qué está hecho el universo en su nivel más fundamental? La respuesta construida por la física contemporánea tomó forma en el llamado Modelo Estándar de Partículas, un marco teórico que describe las partículas elementales conocidas y las interacciones fundamentales responsables de la estructura de la materia. Este modelo representa una de las construcciones intelectuales más sofisticadas de la ciencia moderna, ya que combina mecánica cuántica, relatividad especial y teoría de campos⁸⁰ para explicar fenómenos observados tanto en aceleradores de partículas como en procesos astrofísicos de alta energía.

El Modelo Estándar organiza las partículas fundamentales en dos grandes familias: fermiones y bosones. Los fermiones constituyen la materia y obedecen el principio de exclusión de Pauli⁸¹, mientras que los bosones son las partículas mediadoras de las interacciones fundamentales. Los fermiones se subdividen a su vez en quarks y leptones. Los quarks forman partículas compuestas como protones y neutrones, mientras que los leptones incluyen partículas como el electrón y los neutrinos. Esta estructura generacional refleja una organización jerárquica de la materia, donde partículas más pesadas aparecen como versiones energéticas de otras más estables.

⁸⁰**Teoría de campos:** Marco teórico de la física que describe cómo ciertas magnitudes (como la gravedad, la electricidad o el magnetismo) se distribuyen y varían en cada punto del espacio y el tiempo.

⁸¹**Principio de exclusión de Pauli:** Regla de la mecánica cuántica enunciada por Wolfgang Pauli en 1925, que establece que dos fermiones (como los electrones) no pueden ocupar simultáneamente el mismo estado cuántico dentro de un sistema.





⁸²**Sheldon Lee Glashow (1932):** Físico teórico estadounidense de enorme influencia, galardonado con el Premio Nobel de Física en 1979.

⁸³**Abdus Salam (1926-1996):** Físico teórico paquistaní, galardonado con el Premio Nobel de Física en 1979 por sus contribuciones a la unificación de la interacción electromagnética y la interacción débil en la teoría electrodébil.

⁸⁴**Steven Weinberg (1933-2021):** Físico teórico estadounidense y una de las figuras más influyentes de la física contemporánea.

⁸⁵**Abdus Salam (1926-1996):** Físico teórico paquistaní, galardonado con el Premio Nobel de Física en 1979 por su contribución fundamental a la teoría electrodébil, que unifica las interacciones electromagnética y nuclear débil.

La Figura 9-3 presenta la organización general del Modelo Estándar. En ella se observan las tres generaciones de fermiones, incluyendo quarks y leptones, así como los bosones mediadores asociados a las interacciones fundamentales. Los fotones transmiten la interacción electromagnética; los gluones median la interacción fuerte responsable de mantener unidos los quarks dentro de protones y neutrones; mientras que los bosones $W^\pm$ y Z^0 participan en la interacción débil, vinculada a procesos radiactivos y transformaciones nucleares. Esta clasificación debe verse como la representación de simetrías matemáticas profundas que organizan las propiedades de la materia y de las fuerzas fundamentales.

Uno de los aspectos más revolucionarios del Modelo Estándar fue la unificación electrodébil desarrollada por Sheldon Glashow⁸², Abdus Salam⁸³ y Steven Weinberg⁸⁴ durante la segunda mitad del siglo XX. Sus trabajos demostraron que la interacción electromagnética y la interacción débil pueden entenderse como manifestaciones diferentes de una misma estructura física a altas energías. Weinberg (1967) mostró que esta unificación requería un mecanismo capaz de explicar por qué algunas partículas poseen masa mientras otras permanecen sin ella. Allí aparece el papel fundamental del campo de Higgs.

El Bosón de Higgs no es simplemente otra partícula dentro del modelo, sino la manifestación observable de un campo cuántico que permea todo el universo. La ruptura espontánea de la simetría electrodébil permite que ciertas partículas adquieran masa al interactuar con este campo. Salam⁸⁵ describía esta idea señalando que:

“La simetría de las leyes fundamentales puede permanecer oculta debido al estado físico del vacío” (Salam, 1968, p. 368).



Figura 9-3: El Modelo Estándar de Partículas elementales

TRES GENERACIONES DE MATERIA (FERMIONES)						INTERACCIONES / PARTÍCULAS PORTADORAS DE FUERZA (BOSONES)		
	I	II	III					
masa	$\approx 2.4 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.44 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$	0		
carga	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0	0		
spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0	2		
nombre	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs	G graviton		
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$	0 0 1			BOSONES ESCALARES	BOSONES TENSORES (HIPOTÉTICOS)
	d down	s strange	b bottom	γ photon				
LEPTONES	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$	$\approx 105.67 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1			BOSONES DE CALIBRE (BOSONES VECTORIALES)	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson				
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1				
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson				

Fuente: Pérez & González (2024)

La confirmación experimental del bosón de Higgs en el CERN⁸⁶ en 2012 representó uno de los mayores logros de la física contemporánea, validando una predicción formulada casi medio siglo antes y consolidando el Modelo Estándar como una teoría extraordinariamente precisa.

A pesar de su éxito, el Modelo Estándar no constituye una teoría completa del universo. Su incapacidad para incorporar la gravedad dentro del marco cuántico revela una fractura conceptual que todavía permanece abierta. Mientras las otras tres interacciones fundamentales pueden describirse mediante partículas mediadoras cuánticas, la gravedad continúa siendo explicada por la relatividad general de Einstein vista en la Sección 8.2.2, una teoría geométrica incompatible con la formulación cuántica estándar en escalas extremas. Esta ausencia no representa un detalle menor, sino uno de los mayores problemas de la física moderna.

La propia estructura del Modelo Estándar evidencia que el conocimiento científico permanece en construcción. El modelo describe con enorme precisión fenómenos observables, pero no explica cuestiones fundamentales como la naturaleza de la materia oscura, la energía oscu-

⁸⁶CERN (Organización Europea para la Investigación Nuclear): Es el laboratorio de física de partículas más grande del mundo, situado en la frontera entre Suiza y Francia.



ra o la gravedad cuántica. El gravitón⁸⁷, representado en muchos esquemas como una partícula hipotética, sigue sin ser detectado experimentalmente. Esta situación ha impulsado el desarrollo de propuestas como la supersimetría, las teorías de gran unificación y la teoría de cuerdas, todas orientadas hacia una posible “Nueva Física” capaz de extender el alcance del modelo actual.

Desde una perspectiva epistemológica, el Modelo Estándar constituye un ejemplo paradigmático de cómo la ciencia construye representaciones progresivamente más complejas de la realidad. Sus ecuaciones y simetrías no son una fotografía definitiva del universo, sino una estructura conceptual elaborada para organizar observaciones, predecir fenómenos y ampliar la capacidad humana de comprender el mundo microscópico. La búsqueda de una teoría más completa no invalida sus logros; al contrario, confirma que el conocimiento científico avanza precisamente allí donde sus propios límites se vuelven visibles.

9.2. Teoría del Big Bang

Las EFE vistas en la Ecuación 8.11 transformaron la cosmología al demostrar que el universo no tenía por qué ser estático. Como se desarrolló en la Sección 8.2.2, la geometría del espacio-tiempo depende de la distribución de materia y energía, lo que implicaba que el cosmos podía evolucionar dinámicamente. Esta consecuencia inquietaba incluso al propio Einstein, quien inicialmente introdujo la constante cosmológica Λ para mantener un universo inmóvil. No obstante, durante las primeras décadas del siglo XX comenzaron a aparecer observaciones astronómicas que indicaban exactamente lo contrario: las galaxias parecían alejarse unas de otras. La idea de un universo eterno e inmutable comenzaba a fracturarse, dando paso a una concepción radicalmente distinta del cosmos.

El primero en comprender matemáticamente esta posibilidad fue Georges Lemaître⁸⁸. En 1927, utilizando las ecuaciones de Einstein, propuso que el universo debía expandirse y relacionó dicha expansión con el corrimiento al rojo observado en galaxias distantes. Lemaître afirmaba:

⁸⁷**Gravitón:** Partícula elemental hipotética que actuaría como el mediador o bosón de intercambio de la interacción gravitatoria en el marco de la teoría cuántica de campos.

⁸⁸**Georges Lemaître (1894-1966):** Sacerdote católico, astrónomo y físico belga, reconocido como el padre de la teoría moderna del Big Bang.





“El universo no puede permanecer estático; debe expandirse o contraerse” (Lemaître, 1927, p. 51) .

Su propuesta fue inicialmente recibida con escepticismo, en parte porque implicaba abandonar la idea clásica de un cosmos permanente. Dos años más tarde, Edwin Hubble⁸⁹ confirmó observacionalmente esta expansión al demostrar que las galaxias más lejanas presentan mayores velocidades de recesión. El universo dejaba así de entenderse como un escenario fijo y pasaba a concebirse como una estructura dinámica en evolución.

La relación descubierta por Hubble y anticipada por Lemaître quedó expresada como:

Ecuación 9-1: Ley de Hubble-Lemaître.

$$v = H_0 d$$

Donde:

- ▶ v (km/s) representa la velocidad de recesión de una galaxia,
- ▶ H_0 (km/s)/Mpc corresponde a la constante de Hubble, que mide la tasa de expansión del universo y
- ▶ d (Mpc) es la distancia entre la galaxia observada y el observador.

La Ecuación 9-1 establece que cuanto más distante se encuentra una galaxia, mayor es la velocidad con la que parece alejarse. Este resultado no significa que las galaxias estén viajando a través de un espacio vacío como fragmentos expulsados por una explosión convencional. La interpretación correcta es más profunda: el propio espacio-tiempo se está expandiendo. Las galaxias no se desplazan necesariamente “dentro” del universo; es el tejido geométrico del cosmos el que aumenta sus distancias.

Esta idea modificó profundamente la comprensión del origen cósmico. El término Big Bang, popularizado por Fred Hoyle⁹⁰ de manera irónica, puede inducir una interpretación equivocada, pues no describe una explosión ocurrida en un punto determinado dentro de un espacio previamente vacío. El modelo representa la evolución del universo desde un estado temprano extremadamente denso y caliente, durante el cual el propio espacio co-

⁸⁹Edwin Hubble (1889-1953): Astrónomo estadounidense cuyas observaciones en el observatorio del Monte Wilson transformaron nuestra visión del cosmos.

⁹⁰Fred Hoyle (1915-2001): Astrónomo y físico teórico británico, célebre por sus contribuciones fundamentales a la nucleosíntesis estelar, el proceso mediante el cual las estrellas crean elementos pesados a partir del hidrógeno.





menzó a expandirse. Como resultado, aumentaron las distancias entre regiones que no permanecían ligadas por interacciones locales; no se trató de materia expulsada desde un centro hacia un exterior preexistente.

La Figura 9-4 permite seguir de forma esquemática esta expansión junto con algunas etapas posteriores de la evolución cósmica, desde el universo temprano hasta la formación de estrellas, galaxias y sistemas planetarios. La apertura progresiva del diagrama representa el aumento de la escala del espacio con el transcurso del tiempo, no los límites físicos del universo ni el desplazamiento de las galaxias desde un punto central. Conviene leer la imagen como una secuencia cronológica simplificada: todos los sectores del espacio participan en la expansión y ningún lugar ocupa el centro privilegiado del proceso.

Figura 9-4: Representación conceptual de la expansión y evolución del universo

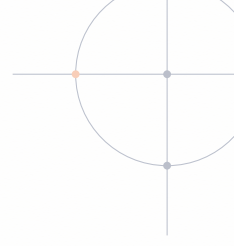


Fuente: Zapata (2020)

La expansión cósmica encontró respaldo observacional en la relación entre la distancia de las galaxias y la velocidad con que se alejan. Hubble (1929) expresó este resultado al señalar:

“Los datos disponibles indican una correlación entre distancia y velocidad de las nebulosas extragalácticas” (Hubble, 1929).





La cosmología moderna nació precisamente cuando esta correlación dejó de interpretarse como una anomalía astronómica y pasó a entenderse como una propiedad global del universo.

El impacto filosófico de este modelo fue enorme. Durante siglos, gran parte de la humanidad había concebido el universo como un escenario eterno organizado alrededor de la experiencia terrestre. La expansión cósmica desplazó nuevamente al ser humano del centro de la realidad, ampliando la escala espacio-temporal hasta dimensiones difíciles de imaginar. El universo observable pasó a entenderse como un proceso evolutivo que abarca miles de millones de años, donde galaxias, estrellas y planetas emergen dentro de una historia cósmica mucho más vasta que la experiencia humana.

Desde la epistemología, la teoría del Big Bang también evidencia cómo la ciencia transforma continuamente sus modelos sobre la realidad. El paso de un universo estático a uno dinámico no surgió de una especulación filosófica aislada, sino de la interacción entre matemáticas, observación astronómica y reinterpretación conceptual. La cosmología contemporánea continúa desarrollándose bajo esta misma lógica: cada nueva observación obliga a reconstruir la imagen del universo y a replantear preguntas sobre su origen, evolución y destino final.

9.3. Radiación de fondo

La teoría del Big Bang necesitaba algo más que formulaciones matemáticas y observaciones sobre la expansión del universo; requería una evidencia física capaz de demostrar que el cosmos había atravesado realmente un estado extremadamente caliente y denso como se teorizaba. Esa evidencia apareció en forma de una débil radiación electromagnética distribuida de manera prácticamente uniforme por todo el universo: la Radiación Cósmica de Fondo de Microondas (CMB, por sus siglas en inglés). Este fenómeno corresponde al “eco” térmico del universo temprano, emitido aproximadamente 380 000 años después del inicio de la expansión cosmológica, durante un proceso conocido como recombinación. Antes de ese momento, el universo era un plasma opa-





co de partículas cargadas y fotones que interactuaban constantemente. Cuando la temperatura descendió lo suficiente para que protones y electrones formaran átomos neutros, la radiación pudo propagarse libremente por primera vez, quedando registrada como una huella fósil del universo primitivo.

El descubrimiento experimental de esta radiación ocurrió de manera accidental en 1965, cuando Arno Penzias⁹¹ y Robert Wilson⁹² detectaron una señal de microondas persistente mientras trabajaban con una antena de comunicaciones en los Laboratorios Bell. Inicialmente interpretaron el ruido como un problema instrumental o ambiental, pero pronto comprendieron que provenía de todas las direcciones del cielo con una intensidad prácticamente uniforme. En su obra original ellos señalaron:

“Un exceso de temperatura de antena de aproximadamente 3.5 K ha sido detectado en todas las direcciones observadas” (Penzias & Wilson, 1965, p. 419).

Este raro fenómeno transformó la cosmología moderna porque proporcionó la primera evidencia empírica sólida de que el universo había pasado por una fase extremadamente caliente. La radiación de fondo dejó de ser una predicción teórica para convertirse en un fenómeno observable, consolidando definitivamente el modelo del Big Bang frente a las antiguas propuestas de universo estacionario.

Décadas después, misiones espaciales como COBE, WMAP y especialmente Planck permitieron estudiar esta radiación con un nivel de precisión extraordinario. Aunque el fondo cósmico presenta una temperatura media cercana a 2.7 K, los mapas obtenidos revelaron pequeñas fluctuaciones térmicas del orden de millonésimas de grado. Estas anisotropías representan variaciones mínimas en la densidad del universo temprano y constituyen una de las piezas más importantes para comprender el origen de las estructuras cósmicas actuales.

⁹¹Arno Penzias (1933-2024): Físico radioastrónomo estadounidense de origen alemán, galardonado con el Premio Nobel de Física en 1978.

⁹²Robert Woodrow Wilson (1936): Radioastrónomo estadounidense galardonado con el Premio Nobel de Física en 1978



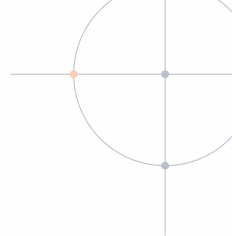
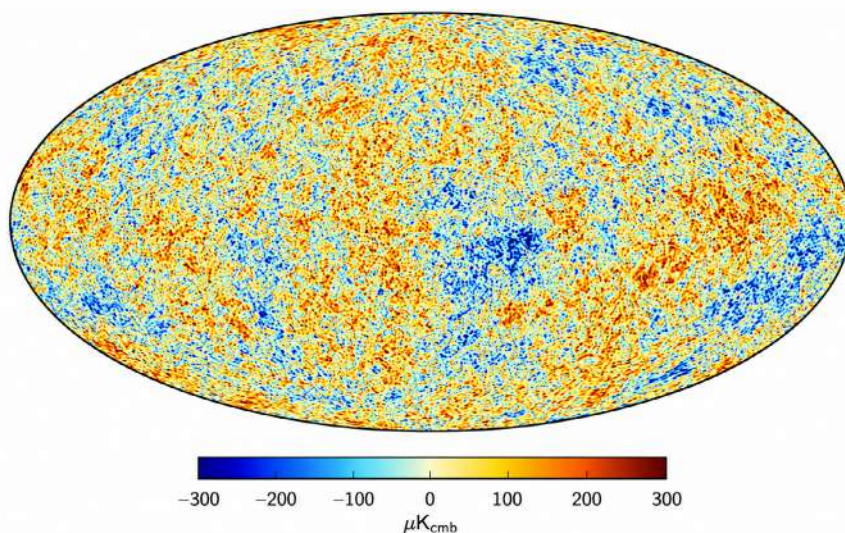


Figura 9-5: Anisotropías del fondo cósmico de microondas observadas por Planck



Fuente: European Space Agency (2020).

La Figura 9-4 muestra el mapa de anisotropías del fondo cósmico de microondas elaborado por la misión Planck de la Agencia Espacial Europea (ESA). Las regiones representadas en tonos rojizos corresponden a zonas ligeramente más calientes y densas, mientras que las regiones azuladas indican áreas ligeramente más frías. Aunque estas diferencias parecen insignificantes, representan las semillas gravitacionales a partir de las cuales se formaron galaxias, cúmulos galácticos y estructuras a gran escala. La distribución actual de materia en el universo tiene su origen en estas pequeñas fluctuaciones cuánticas amplificadas durante las primeras etapas de expansión cosmológica.

Los resultados de la misión Planck también reforzaron de manera significativa el modelo inflacionario del universo temprano. Según esta propuesta, el cosmos atravesó una fase de expansión exponencial extremadamente rápida fracciones de segundo después de que sucediera el Big Bang. Esta inflación habría suavizado la geometría global del universo y amplificado fluctuaciones microscópicas iniciales hasta convertirlas en estructuras observables a escalas cosmológicas. El equipo científico de Planck concluyó que:



“Las observaciones del fondo cósmico de microondas son consistentes con las predicciones de los modelos inflacionarios más simples” (Planck Collaboration, 2020).

La radiación de fondo constituye, por tanto, una de las validaciones experimentales más sólidas de la cosmología moderna. No se trata únicamente de una señal electromagnética antigua, sino de una evidencia física que conecta directamente el universo observable con sus primeras etapas evolutivas.

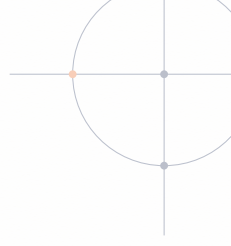
El estudio del CMB muestra cómo la ciencia puede reconstruir fenómenos ocurridos miles de millones de años antes de la existencia humana mediante modelos matemáticos y observaciones indirectas. La cosmología contemporánea no observa el origen del universo de manera directa; interpreta rastros físicos preservados en la estructura del cosmos. Este proceso reafirma que el conocimiento científico se construye mediante inferencias cada vez más precisas sobre una realidad que solo puede comprenderse parcialmente a través de sus huellas observables.

9.4. Materia y energía oscura

A medida que la cosmología moderna avanzó en precisión observacional, el universo comenzó a revelar una paradoja inquietante: gran parte de su contenido parecía invisible. Las ecuaciones gravitacionales como la Ecuación 6.5 y 8.11 describían movimientos y estructuras que no podían explicarse únicamente con la materia observable. Estrellas, galaxias y nebulosas, que durante siglos habían representado el universo visible para la humanidad, resultaron constituir apenas una pequeña fracción del cosmos. Esta situación transformó profundamente la investigación cosmológica, porque evidenció que el conocimiento humano sobre la composición del universo seguía siendo parcial e incompleto.

Cuando miramos el cosmos, nos damos cuenta de que todo lo observable es apenas una mínima parte de lo que realmente existe. Gracias a los datos que la misión Planck recogió sobre el fondo cósmico de microondas,





hoy se pueden dar conclusiones de cómo se reparte el universo entre materia común, materia oscura y energía oscura. Para ver más a detalle el panorama completo, se ordenan estos porcentajes en la Tabla 9-1.

Tabla 9-1: Composición aproximada del universo según la misión Planck

Componente	Proporción aproximada	Evidencia principal	Estado del conocimiento
Materia ordinaria o bariónica	4,9 %	Estrellas, galaxias, gas, polvo cósmico y radiación observable	Está constituida por partículas descritas, en gran parte, por el modelo estándar
Materia oscura	26,8 %	Curvas de rotación galáctica, lentes gravitacionales, dinámica de cúmulos y formación de estructuras	Se detecta mediante sus efectos gravitacionales, pero su naturaleza aún no se ha identificado
Energía oscura	68,3 %	Expansión acelerada del universo, supernovas tipo Ia y observaciones cosmológicas	Su naturaleza permanece desconocida; se asocia con la aceleración de la expansión cósmica

Fuente: Tanabashi & others (2018)

Estas cifras, obtenidas a partir del análisis de las anisotropías de la radiación cósmica de fondo, representan la estimación más precisa hasta la fecha sobre la composición del cosmos. Sin embargo, es fundamental distinguir entre lo que constituye una evidencia observacional sólida y lo que pertenece al terreno de las hipótesis teóricas. La existencia de la materia oscura, por ejemplo, no es una especulación: se infiere de múltiples observaciones independientes que no pueden explicarse con la materia visible.

Uno de los primeros indicios sólidos de este problema apareció en los estudios de rotación galáctica desarrollados por Vera Rubin⁹³ durante la década de 1970. Según la dinámica newtoniana, las estrellas situadas lejos del centro galáctico deberían moverse más lentamente debido a la disminución de la masa visible. Sin embargo, las observaciones mostraban algo muy diferente: las velocidades orbitales permanecían prácticamente constantes incluso en regiones alejadas de la galaxia. Rubin describió este fenómeno señalando que:

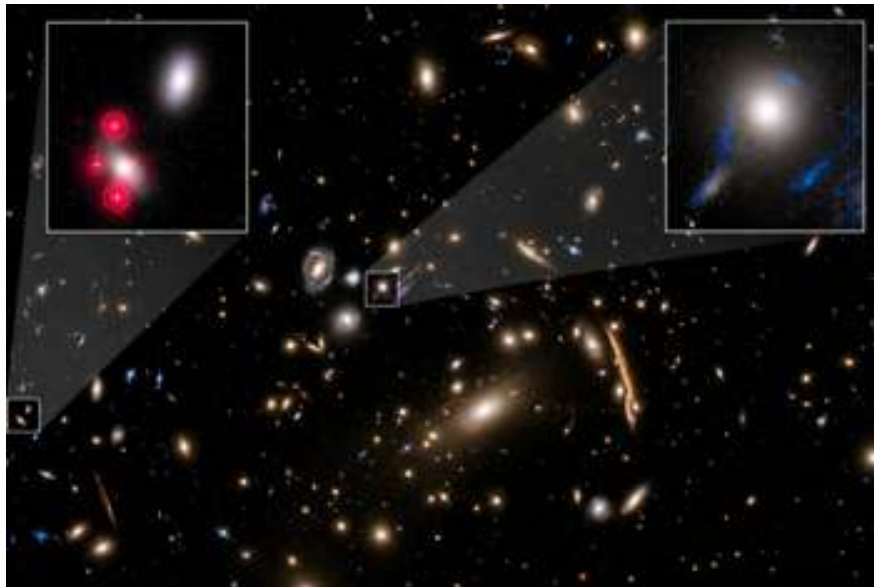
⁹³Vera Florence Cooper Rubin (1928-2016): Astrónoma estadounidense cuya labor transformó nuestra comprensión del universo al proporcionar la evidencia observacional más sólida sobre la existencia de la materia oscura.

“Las curvas de rotación de galaxias espirales permanecen planas a grandes distancias del núcleo, sugiriendo la existencia de masa no visible” Rubin et al. (1980, p. 485).

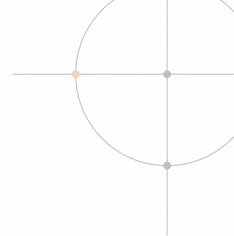
La conclusión era inevitable: debía existir una enorme cantidad de materia que no emitía ni absorbía luz, pero cuya gravedad influía directamente sobre el movimiento galáctico. A esta componente invisible se la denominó materia oscura.

La evidencia de esta materia no observable se fortaleció posteriormente mediante el estudio de lentes gravitacionales predichas por la relatividad general. Cuando una gran concentración de masa se interpone entre una fuente luminosa y el observador, la curvatura del espacio-tiempo desvía la trayectoria de la luz, deformando visualmente galaxias distantes. La magnitud de estas deformaciones reveló nuevamente que la masa visible no era suficiente para explicar el efecto gravitacional observado.

Figura 9-6: Lente gravitacional como evidencia indirecta de materia oscura



Fuente: NASA/ESA Hubble Space Telescope (2023a).



La Figura 9-5 muestra un ejemplo de lente gravitacional observado por el Telescopio Espacial Hubble. Las deformaciones luminosas alrededor del cúmulo galáctico permiten estimar la distribución total de masa presente en la región. Los análisis indican que la mayor parte de esa masa no corresponde a estrellas ni gas observable, sino a una componente invisible distribuida alrededor de las galaxias. La materia oscura no puede detectarse directamente mediante radiación electromagnética, pero sus efectos gravitacionales se manifiestan de manera consistente en escalas galácticas y cosmológicas.

El panorama se volvió todavía más complejo a finales del siglo XX, cuando diferentes observaciones mostraron que la expansión del universo no se estaba desacelerando debido a la gravedad, como se esperaba, sino acelerándose. Los estudios de supernovas tipo Ia realizados por los equipos liderados por Saul Perlmutter⁹⁴, Adam Riess⁹⁵ y Brian Schmidt⁹⁶ demostraron que las galaxias distantes se alejaban más rápidamente de lo previsto por los modelos cosmológicos clásicos. Riess & otros (1998) afirmaron:

“Las observaciones de supernovas distantes sugieren un universo en expansión acelerada”.

Esta aceleración implicaba la existencia de una forma de energía capaz de contrarrestar el efecto gravitatorio de la materia. A esta componente desconocida se la denominó energía oscura.

La energía oscura suele relacionarse con la constante cosmológica Λ introducida por Einstein en las EFE discutidas en la Sección 8.2.2. Inicialmente, Einstein incorporó este término para mantener un universo estático, aunque posteriormente lo consideró innecesario tras descubrirse la expansión cósmica. Paradójicamente, las observaciones modernas devolvieron relevancia física a esta constante.

Dentro de la cosmología contemporánea, Λ se interpreta frecuentemente como una energía inherente al vacío cuántico, distribuida uniformemente por el universo y responsable de la expansión acelerada. Aunque su naturaleza física permanece desconocida en la actualidad, las observaciones más precisas, como las de la misión

⁹⁴Saul Perlmutter (1959): Astrofísico estadounidense y profesor en la University of California, Berkeley, galardonado con el Premio Nobel de Física en 2011 por el descubrimiento de la expansión acelerada del universo.

⁹⁵Adam Riess (1969): Astrofísico estadounidense y profesor en la Universidad Johns Hopkins, galardonado con el Premio Nobel de Física en 2011.

⁹⁶Brian Paul Schmidt (1967): Astrofísico estadounidense-australiano galardonado con el Premio Nobel de Física en 2011.





Planck, indican que la energía oscura constituye aproximadamente el 68.5 % del contenido energético total del cosmos (Aghanim et al., 2020).

La investigación sobre materia y energía oscura representa uno de los mayores desafíos científicos del siglo XXI. El universo observable parece estar dominado por componentes que no comprendemos completamente. La materia oscura, aunque respaldada por abrumadora evidencia gravitacional, no ha sido detectada directamente en laboratorios, y su naturaleza podría estar relacionada con partículas más allá del Modelo Estándar. La energía oscura, por su parte, es aún más esquiva: desconocemos su origen, su naturaleza y si realmente es constante en el tiempo. Algunos estudios recientes incluso sugieren que podría estar cambiando.

Lejos de representar un fracaso, esta incertidumbre se ha convertido en uno de los motores más poderosos para el desarrollo tecnológico y teórico contemporáneo. La cosmología moderna, al reconocer que desconoce la naturaleza de la mayor parte del universo, no se debilita; al contrario, se fortalece al aceptar sus límites y continuar preguntando. Precisamente allí, en esa tensión entre evidencia observacional e hipótesis teórica, se encuentra el futuro de la cosmología moderna.

Sección pedagógica

Preguntas de Reflexión Crítica

1. ¿Cómo puede la Física estudiar algo tan grande como el universo sin convertir sus explicaciones en simple especulación?
2. Si la materia oscura no se observa directamente, ¿por qué puede formar parte de una explicación científica válida?
3. ¿Por qué la expansión del universo no debe imaginarse simplemente como una explosión común dentro de un espacio vacío?

Ejercicios Prácticos o de Aplicación Conceptual

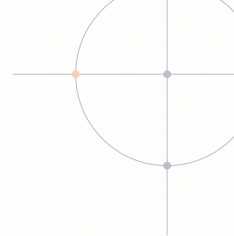
Ejercicio 1. Evidencia indirecta en ciencia e ingeniería

Compara la materia oscura con un problema de ingeniería donde no se observa directamente la causa, pero sí sus efectos: vibraciones anómalas en una máquina, pérdida de eficiencia en un motor o deformaciones estructurales. Explica cómo se construye una hipótesis a partir de evidencias indirectas.

Ejercicio 2. El universo como modelo, no como dibujo

Diseña una explicación para estudiantes de primer semestre sobre la expansión del universo. Debe evitar la idea de “explosión en el espacio” y usar una analogía con límites claros. Luego indica qué parte de la analogía ayuda y qué parte puede confundir.





Criterios de evaluación

Tabla 9-2: Criterios de evaluación de las preguntas y ejercicios

Criterio de evaluación	Excelente (4 puntos)	Satisfactorio (3 puntos)	En proceso (2 puntos)	Inicial (1 punto)
Comprensión del Modelo Estándar de Partículas y sus interacciones fundamentales	Explica fermiones, bosones, unificación electrodébil y campo de Higgs; reconoce sus límites explicativos.	Reconoce el Modelo Estándar y menciona partículas o interacciones, aunque con omisiones parciales.	Identifica algunas partículas elementales, pero sin comprender su organización o interacciones fundamentales.	Desconoce el Modelo Estándar o lo reduce a una lista de partículas sin sentido físico.
Análisis de la teoría del Big Bang y la expansión del universo	Analiza evidencia del Big Bang, ley de Hubble-Lemaître y expansión del espacio-tiempo; diferencia de explosión común.	Reconoce la teoría del Big Bang y menciona la expansión, aunque con imprecisiones conceptuales.	Identifica el Big Bang como origen del universo, pero sin comprender su evidencia o su interpretación física.	Desconoce la teoría del Big Bang o la interpreta como una explosión convencional en el espacio.
Comprensión de la radiación cósmica de fondo de microondas y su significado	Explica origen de la CMB, su descubrimiento y su papel como evidencia del universo temprano y la inflación.	Reconoce la CMB y menciona su origen o su importancia como evidencia, aunque con explicación parcial.	Identifica la CMB como radiación del universo, pero sin comprender su origen ni su significado cosmológico.	Desconoce la CMB o la confunde con otras formas de radiación cósmica.
Análisis de la materia oscura y la energía oscura como componentes del universo	Analiza evidencia observacional de materia oscura (curvas de rotación, lentes) y energía oscura (expansión acelerada).	Reconoce materia y energía oscura y menciona algunas evidencias, aunque con explicación imprecisa.	Identifica materia y energía oscura como componentes, pero sin comprender su evidencia o su naturaleza hipotética.	Desconoce materia y energía oscura o las considera especulaciones sin base observacional.
Capacidad para explicar la expansión del universo sin recurrir a analogías equivocadas (Ejercicio 2)	Diseña explicación clara que evita analogía de explosión y usa modelos (globo, masa) con límites explícitos.	Explica expansión con analogía adecuada, aunque señala límites de forma parcial o imprecisa.	Usa analogía para explicar expansión, pero no señala sus límites o puede inducir confusión conceptual.	No logra explicar expansión o recurre a analogías equivocadas (explosión) sin corrección conceptual.

Fuente: Elaboración propia

P.2





Lecturas Recomendadas



Lemaître, G. (1927). “Un univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques”.

Es una lectura histórica muy importante para comprender el origen de la idea de un universo en expansión.

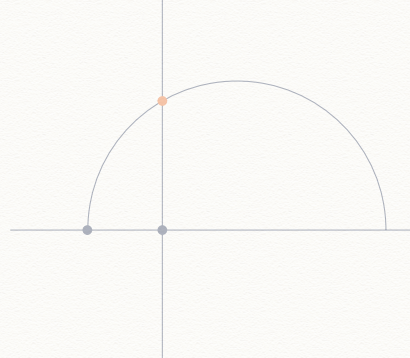


Perlmutter, S., et al. (1999). “Measurements of Ω and Λ from 42 High-Redshift Supernovae”.

Ayuda a entender por qué la expansión acelerada del universo abrió el debate sobre la energía oscura, uno de los grandes problemas abiertos de la cosmología contemporánea.







PARTE III.

APLICACIONES,
FUTURO Y DIDÁCTICA



10. FUTURO DE LA FÍSICA

Objetivos de Aprendizaje del Capítulo

Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

- » Analizar áreas emergentes de la física contemporánea, como computación cuántica, nanotecnología, energías limpias, física médica, astrofísica e inteligencia artificial.
- » Evaluar el impacto científico, tecnológico y social de estas áreas en la formación del ingeniero mecánico y en los desafíos actuales de sostenibilidad, salud, energía e industria.
- » Crear una propuesta conceptual de aplicación futura de la física en un problema real de ingeniería, considerando viabilidad, límites técnicos y responsabilidad social.

Introducción

El futuro de la física representa un cambio en la relación entre ciencia y sociedad. Áreas como la nanotecnología, la biofísica, la fusión nuclear y la astrofísica moderna no solo buscan ampliar el conocimiento teórico, sino responder a desafíos globales relacionados con energía, salud, sostenibilidad y exploración espacial. Al mismo tiempo, la integración entre física e IA está transformando la manera en que se desarrollan modelos científicos, permitiendo descubrir patrones, optimizar simulaciones y acelerar investigaciones en escalas nunca antes alcanzadas. Estas transformaciones evidencian que la física del siglo XXI no puede entenderse únicamente como una disciplina académica que puede trazar su camino solo, sino como uno de los principales motores del desarrollo de la sociedad del futuro. Es por esto que es importante hacer una revisión al estado actual de los campos de interés para el futuro de la física.

10.1. Computación cuántica

La computación cuántica representa uno de los cambios de paradigma más profundos en la historia reciente de la computación. Durante décadas, la informática clásica se construyó sobre la lógica binaria del bit (0 y 1) pero naturaleza microscópica no opera bajo esa lógica rígida. Como se discutió en la Sección 8.1, la mecánica cuántica introdujo un universo gobernado por superposición, probabilidad e interferencia, donde una partícula puede existir simultáneamente en múltiples estados hasta ser





medida. La computación cuántica surge precisamente de intentar utilizar ese comportamiento natural como mecanismo de procesamiento de información. El qubit, unidad fundamental de este modelo, no reemplaza simplemente al bit tradicional: transforma la manera en que entendemos el cálculo, permitiendo que un sistema explore múltiples configuraciones al mismo tiempo gracias a la superposición cuántica y al entrelazamiento.

Esta transición posee implicaciones filosóficas-científicas profundas. Mientras la computación clásica fragmenta los problemas complejos en secuencias lineales de operaciones, la computación cuántica intenta modelar la complejidad siguiendo la lógica misma de la naturaleza. Richard Feynman⁹⁷ ya había advertido en la década de 1980 que los sistemas cuánticos son extremadamente difíciles de simular mediante computadoras convencionales, precisamente porque la realidad microscópica no evoluciona de forma clásica. (Feynman, 1982) Esto lleva a que el computador cuántico no sea únicamente una herramienta más potente, sino una nueva forma de representación del mundo físico. El procesamiento deja de depender exclusivamente de algoritmos deterministas, como se tenía en la informática clásica, y comienza a construirse sobre amplitudes de probabilidad, interferencias y correlaciones cuánticas imposibles de reproducir eficientemente mediante arquitectura clásica.

El desarrollo contemporáneo de esta tecnología ha avanzado de manera acelerada durante los últimos años. Uno de los hitos más importantes fue presentado por Google AI Quantum y colaboradores en Nature (Arute et al., 2019), donde se reportó el primer experimento de “ventaja cuántica” utilizando el procesador Sycamore, capaz de resolver en aproximadamente 200 segundos un problema que habría requerido miles de años en un supercomputador clásico. Más recientemente, IBM presentó avances en arquitecturas escalables de procesadores cuánticos, orientados a reducir errores y aumentar la estabilidad de los sistemas de múltiples qubits (IBM Quantum, 2023). Estos importantes avances muestran que la computación cuántica ya no pertenece únicamente al terreno teórico, sino que comienza a consolidarse como una plataforma tecnológica con aplicaciones potenciales

⁹⁷Richard Feynman (1918-1988): Físico teórico estadounidense, uno de los científicos más influyentes del siglo XX y Premio Nobel de Física en 1965 por su trabajo en electrodinámica cuántica (QED).



en criptografía, modelado molecular, IA, optimización industrial y simulación de materiales complejos.

La computación cuántica también transforma nuestra relación epistemológica con la naturaleza. Durante siglos, la Física intentó describir el universo mediante modelos clásicos inspirados en máquinas, engranajes y trayectorias deterministas como se mostró en la Figura 6-1. Hoy, la computación cuántica nos obliga a pensar desde otro marco conceptual: uno donde la información, la materia y la energía aparecen profundamente entrelazadas. El ser humano no solo intenta observar la naturaleza desde afuera, sino construir sistemas capaces de operar utilizando sus propias reglas fundamentales. En cierto sentido, esta tecnología representa el momento en que la humanidad comienza a programar el universo utilizando el lenguaje mismo con el que el universo parece estar escrito: el lenguaje cuántico.

10.2. Física de los materiales y nanotecnología

Desde los primeros atomistas griegos (Sección 5.2) hasta la mecánica cuántica contemporánea (Sección 8.1), una de las aspiraciones más persistentes de la Física ha sido comprender cómo la estructura microscópica de la materia determina las propiedades visibles del mundo macroscópico. Durante siglos, esta búsqueda estuvo limitada por la incapacidad tecnológica de manipular átomos individualmente. Esto ha quedado en el pasado debido al gran desarrollo de la nanotecnología y de la física moderna de materiales, lo que llevó a una transformación radical en este panorama: hoy no solo es posible observar estructuras atómicas, sino también reorganizarlas deliberadamente para diseñar materiales con propiedades específicas. La materia dejó de entenderse únicamente como algo que se descubre; comenzó también a concebirse como algo que puede construirse.

La Física de materiales contemporánea se apoya en principios cuánticos vistos en anteriores secciones para modificar propiedades eléctricas, térmicas, magnéticas y ópticas a escalas nanométricas. Uno de los ejemplos más revolucionarios ha sido el descubrimiento de los materiales bidimensionales, especialmente el grafeno y las estructuras derivadas de capas atómicas ultrafi-





nas. En los últimos años, investigaciones sobre el denominado grafeno de ángulo mágico⁹⁸ demostraron que pequeñas variaciones geométricas entre capas pueden generar fenómenos completamente nuevos, incluyendo superconductividad y estados electrónicos altamente correlacionados. Cao et al. (2020), en una revisión publicada en *Nature Reviews Physics*, muestran cómo estas estructuras permiten controlar propiedades cuánticas mediante el simple ajuste de configuraciones atómicas, abriendo la posibilidad de diseñar materiales “a la carta” para aplicaciones electrónicas y energéticas futuras.

Este avance no solo representa un logro tecnológico, sino también un cambio conceptual profundo en la relación entre humanidad y la materia. Tradicionalmente, los materiales eran seleccionados según las propiedades que la naturaleza ofrecía; hoy, la Física permite intervenir directamente en la arquitectura microscópica para producir comportamientos antes inexistentes. Algo similar ocurre con las investigaciones recientes sobre superconductividad de alta temperatura en hidruros sometidos a presiones extremas, donde la combinación precisa entre composición química y estructura cristalina ha permitido acercarse al antiguo sueño de transportar electricidad sin pérdidas energéticas. Estas investigaciones muestran que las propiedades físicas emergen de relaciones extremadamente sensibles entre geometría, interacción electrónica y organización cuántica de la materia (Basov et al., 2021).

La nanotecnología a la vez que la Física de materiales representan, en cierto modo, la culminación de un recorrido histórico iniciado cuando el ser humano comenzó a preguntarse de qué está hecho el universo. La diferencia es que hoy esa pregunta ya no pertenece únicamente al terreno filosófico. Gracias al desarrollo experimental, computacional y cuántico, la humanidad ha comenzado a intervenir directamente en la estructura íntima de la materia, diseñando materiales con propiedades previamente imaginadas solo en teoría. Esta nueva visión produce una forma particular de asombro racional: comprender que las leyes fundamentales de la Física no solo describen la realidad, sino que permiten reconfigurarla deliberadamente átomo por átomo, algo inimaginable hace un milenio.

⁹⁸Ángulo mágico: En la física de la materia condensada, se refiere al ángulo específico de torsión (aproximadamente 1.1°) entre dos capas superpuestas de grafeno.



10.3. Energías limpias y fusión nuclear

La historia de la civilización humana puede entenderse, en gran medida, como la historia de su relación con el uso de la energía. Desde el dominio del fuego hasta la revolución industrial y la electrificación global, cada etapa del desarrollo tecnológico ha dependido de la capacidad de transformar energía de manera cada vez más eficiente. La humanidad ha cruzado por el crecimiento industrial y demográfico que también evidenció los límites físicos y ambientales de los modelos energéticos basados en combustibles fósiles. La termodinámica, estudiada en la Sección 7.1, mostró que toda transformación energética implica pérdidas, irreversibilidad y aumento de entropía. En el siglo XXI, la supervivencia energética de la humanidad depende de encontrar fuentes capaces de sostener el desarrollo tecnológico sin comprometer el equilibrio climático del planeta. Dentro de esa búsqueda, la fusión nuclear aparece como uno de los mayores desafíos científicos y tecnológicos de la Física contemporánea.

La fusión nuclear intenta reproducir en la Tierra el mismo proceso físico que alimenta a las estrellas como nuestro propio sol. A diferencia de la fisión nuclear, donde núcleos pesados se fragmentan liberando energía, la fusión consiste en unir núcleos ligeros (principalmente isótopos del hidrógeno) para formar núcleos más pesados, liberando enormes cantidades de energía debido a la equivalencia masa-energía descrita por Einstein en la Ecuación 8-10. El problema radica en que los núcleos atómicos poseen cargas positivas que se repelen intensamente; superar esa barrera requiere temperaturas y presiones extremas comparables a procesos internos del sol. La dificultad técnica de contener plasma a millones de grados convierte a la fusión en uno de los retos más complejos jamás enfrentados por la ingeniería y la física aplicada.

Uno de los hitos más importantes ocurrió en diciembre de 2022, cuando el National Ignition Facility (NIF) de Estados Unidos logró por primera vez una ganancia neta de energía en un experimento de fusión por confinamiento inercial. El experimento produjo aproximadamente 3.15 megajulios (MJ) de energía a partir de una entrada láser de 2.05 megajulios, demostrando que la reacción podía liberar más energía de la que absorbía





directamente el combustible (National Ignition Facility, 2023). Este resultado, publicado posteriormente en *Physical Review Letters* y otras revistas de alta relevancia científica por Abu-Shawareb & others (2024), representó una validación histórica para décadas de investigación en fusión nuclear. Paralelamente, proyectos internacionales como International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) continúan desarrollando reactores de confinamiento magnético capaces de sostener reacciones de plasma estables durante períodos prolongados, con el objetivo de construir futuras centrales energéticas basadas en fusión controlada (ITER Organization, 2024).

En el trasfondo, la Física intenta comprender si las mismas leyes termodinámicas y nucleares que sostienen la vida de las estrellas pueden utilizarse para construir una fuente prácticamente ilimitada de energía limpia en la Tierra. Este desafío simboliza una paradoja profundamente humana: nuestra civilización depende de aprender a controlar procesos físicos que ocurren naturalmente en escalas cósmicas. A muy largo plazo, el dominio eficiente de la fusión podría representar uno de los pasos fundamentales hacia una civilización de Tipo II en la escala de Kardashev⁹⁹, es decir, una sociedad capaz de aprovechar de manera directa una fracción significativa de la energía emitida por su estrella. Aunque hoy esta idea pertenece principalmente al terreno teórico y prospectivo, refleja cómo la Física contemporánea no solo busca resolver necesidades inmediatas de sostenibilidad, sino también ampliar las posibilidades futuras de supervivencia y expansión tecnológica de la especie humana.

10.4. Astrofísica y cosmología

Como se desarrolló en las Secciones 9.3 y 9.4, la cosmología moderna reveló una realidad profundamente desconcertante: la materia visible constituye apenas una pequeña fracción del universo. El resto parece estar dominado por componentes invisibles ya mencionados (materia oscura y energía oscura) cuya naturaleza física continúa siendo uno de los mayores problemas abiertos de la ciencia contemporánea. Esta situación ha transformado la astrofísica en una disciplina orientada no solo a observar estrellas y galaxias, sino a reconstruir indirectamente estructuras y fenómenos que escapan a la percepción humana directa.

⁹⁹ Escala de Kardashev: Método propuesto en 1964 por el astrofísico soviético Nikolái Kardashev para medir el nivel de avance tecnológico de una civilización basado en la cantidad de energía que es capaz de aprovechar de su entorno.



En este contexto, instrumentos como el JWST funcionan como una extensión tecnológica de la mirada humana hacia regiones extremadamente lejanas del cosmos. Gracias a su capacidad infrarroja, ha permitido observar galaxias formadas pocos cientos de millones de años después del Big Bang, obligando incluso a reconsiderar algunos modelos sobre la evolución temprana del universo. Estudios recientes derivados de sus observaciones, como los publicados por Robertson et al. (2024), muestran que las primeras estructuras galácticas podrían haberse desarrollado con una rapidez mucho mayor de la esperada. En la misma línea, colaboraciones internacionales como NANOGrav Collaboration et al. (2023) anunciaron evidencia consistente con un fondo de ondas gravitacionales de baja frecuencia, probablemente originado por fusiones de agujeros negros supermasivos distribuidos a escala cosmológica. Estos descubrimientos indican que el universo no solo emite luz; también “vibra” gravitacionalmente, y la Física contemporánea comienza apenas a desarrollar herramientas capaces de escuchar esas oscilaciones del espacio-tiempo.

La astrofísica moderna representa, en cierto sentido, la continuidad tecnológica de una curiosidad ancestral que acompaña al ser humano desde científicos como Galileo, Kepler y Newton. La diferencia es que hoy nuestros “ojos” ya no son únicamente telescopios ópticos, sino sistemas capaces de detectar radiación infrarroja, ondas gravitacionales, partículas de alta energía y señales extremadamente débiles provenientes de regiones remotas del cosmos. Cada nuevo instrumento amplía no solo el alcance de la observación, sino también la frontera de lo desconocido. Precisamente allí reside el valor filosófico de la cosmología contemporánea: recordarnos que comprender el universo implica aceptar que todavía observamos apenas una pequeña parte de él.

10.5. Física médica y biofísica

Pocas áreas muestran de manera tan evidente la dimensión humana de la Física como su aplicación en la medicina y en el estudio de los sistemas biológicos. A lo largo de este último siglo, conceptos desarrollados inicialmente para comprender la materia, la radiación o las propiedades electromagnéticas terminaron convirtiéndose en herramientas capaces de diagnosticar enfermedades,





monitorear funciones biológicas y salvar miles de millones de vidas. La Física médica representa, en esencia, el momento en que el conocimiento científico deja de orientarse únicamente hacia la comprensión del universo y comienza también a intervenir directamente sobre la fragilidad del cuerpo humano. La luz, las partículas subatómicas y la radiación, que alguna vez fueron objetos de estudio abstractos, pasaron a convertirse en instrumentos terapéuticos y diagnósticos de enorme precisión.

Uno de los desarrollos más importantes de los últimos años ha sido la protonterapia, una técnica avanzada de radioterapia que utiliza haces de protones para destruir células cancerígenas minimizando el daño sobre tejidos sanos circundantes. A diferencia de la radiación convencional, los protones liberan la mayor parte de su energía exactamente en la región tumoral mediante el denominado pico de Bragg¹⁰⁰, permitiendo tratamientos más precisos y menos invasivos. Estudios recientes, como los analizados por Durante & Paganetti (2022), muestran que las nuevas generaciones de protonterapia combinadas con IA e imágenes médicas de alta resolución están mejorando significativamente la personalización de tratamientos oncológicos. La física aplicada ahora busca controlar con extrema precisión cómo interactúan partículas y energía dentro de estructuras biológicas complejas.

De manera paralela, la biofísica y la nanomedicina han comenzado a transformar la manera en que se estudian procesos celulares y moleculares. Técnicas de imagen basadas en fluorescencia, resonancia magnética avanzada y microscopía de altísima resolución permiten observar dinámicas biológicas imposibles de detectar hace apenas unas décadas. La combinación de nanotecnología-Física médica ha impulsado además el desarrollo de nanopartículas capaces de transportar fármacos directamente hacia células específicas, reduciendo efectos secundarios y aumentando la eficacia terapéutica (Weber & Huiskens, 2021). Es claro afirmar que el cuerpo humano empieza a entenderse no solo desde la biología clásica, sino también como un sistema físico donde fuerzas, campos electromagnéticos, transporte energético y Dinámica Molecular (DM) desempeñan un papel fundamental.

¹⁰⁰**Pico de Bragg:** Fenómeno físico característico de las partículas con carga (como protones o iones) al desplazarse a través de la materia, donde la mayor parte de su energía se deposita de forma brusca justo antes de detenerse.



La física médica representa una de las expresiones más humanas del conocimiento científico porque transforma principios físicos fundamentales en herramientas para salvar vidas. El control de la radiación, la luz y la energía sobre sistemas biológicos demuestra que las mismas leyes que describen estrellas, partículas o campos electromagnéticos pueden utilizarse también para aliviar el sufrimiento humano. Esta convergencia entre estos dos campos revela la idea notable que comprender la naturaleza no solo amplía el conocimiento sobre el universo, sino también la capacidad de intervenir responsablemente sobre nuestra propia existencia biológica.

10.6. Inteligencia Artificial y física computacional

La Física contemporánea produce cantidades de información imposibles de analizar únicamente mediante métodos tradicionales. Simulaciones cosmológicas, colisiones de partículas, modelos climáticos, dinámica cuántica, DM y observaciones astronómicas generan volúmenes masivos de datos cuya complejidad supera la capacidad humana de procesamiento directo. En este escenario, la IA comenzó a ocupar un lugar central dentro de la investigación científica, transformándose en una herramienta capaz de identificar patrones, optimizar cálculos y construir modelos predictivos con velocidades sin precedentes. La IA se ha convertido en el nuevo laboratorio del físico teórico, un espacio donde hipótesis, simulaciones y datos convergen dentro de arquitecturas computacionales cada vez más sofisticadas.

Uno de los desarrollos más importantes en esta integración entre Física e IA ha sido el uso de redes neuronales para resolver ecuaciones diferenciales parciales¹⁰¹ (EDP) complejas, fundamentales en mecánica de fluidos, física cuántica, relatividad y sistemas dinámicos. Las denominadas Physics-Informed Neural Networks (PINNs), desarrolladas inicialmente por Raissi et al. (2019), permiten entrenar modelos de IA incorporando directamente leyes físicas dentro del proceso de aprendizaje computacional. Un estudio reciente publicado en Nature Reviews Physics muestra que estas arquitecturas están revolucionando áreas como simulación de plasmas, predicción meteorológica, dinámica molecular y modelado astrofísico, reduciendo tiempos de cálculo que antes requerían

¹⁰¹Ecuaciones Diferenciales Parciales (EDP): Son ecuaciones matemáticas que relacionan una función de varias variables independientes con sus derivadas parciales.



supercomputadores completos (Karniadakis et al., 2021). La IA comienza así a aprender no solo a reconocer datos, sino también a respetar las restricciones matemáticas impuestas por las leyes de la naturaleza.

La física computacional también ha ampliado profundamente la forma en que se construye el conocimiento científico. Muchas teorías contemporáneas ya no pueden desarrollarse únicamente mediante experimentación directa debido a limitaciones tecnológicas o escalas físicas extremas. Fenómenos asociados a agujeros negros, turbulencia cuántica, interacción de partículas o evolución cosmológica dependen cada vez más de simulaciones avanzadas capaces de reproducir escenarios imposibles de recrear experimentalmente. La IA actúa como un puente entre teoría y observación, acelerando descubrimientos y permitiendo explorar espacios matemáticos de enorme complejidad.

No obstante, la incorporación de IA en la física plantea desafíos epistemológicos y éticos. Los algoritmos pueden procesar datos, optimizar ecuaciones como las EDP e identificar correlaciones invisibles para el análisis humano, pero la interpretación conceptual y filosófica del conocimiento continúa dependiendo de la capacidad crítica del ser humano. Una red neuronal puede aproximar soluciones matemáticas, pero no comprender el significado ontológico¹⁰² de espacio, materia, causalidad o realidad física. Precisamente allí reside el papel irremplazable del pensamiento científico: cuestionar, interpretar y construir sentido más allá del cálculo automatizado. El futuro de la física probablemente estará profundamente ligado a la IA, pero seguirá necesitando aquello que ninguna máquina puede reemplazar completamente, esto se denomina como la capacidad humana de preguntarse por qué existe el universo y cómo debemos comprenderlo.

10.7. Retos y limitaciones

La computación cuántica ha transitado en los últimos años desde la exploración teórica hacia una fase de ingeniería avanzada, donde el desafío central ya no es comprender sus principios, sino integrarla de manera estable y escalable en sistemas híbridos con la computación clásica.

¹⁰²**Ontológico:** Adjetivo que refiere a la ontología, la rama de la filosofía que estudia el "ser" o la naturaleza de la realidad.



sica. Los avances en procesadores basados en uniones Josephson y en plataformas fotónicas integradas muestran un progreso constante, aunque persisten obstáculos significativos como la corrección de errores cuánticos, el crosstalk y los cuellos de botella en la interfaz de control clásico (da Silva et al., 2026). La pregunta para el futuro cercano no es si existirán computadoras cuánticas útiles, sino quién estará preparado para aprovecharlas.

En el ámbito de la física de materiales y la nanotecnología, la capacidad de diseñar y sintetizar estructuras a escala nanométrica ha abierto posibilidades sin precedentes para aplicaciones en energía, detección y bio-integración. Materiales como el óxido de grafeno (GO) exhiben propiedades excepcionales, desde una alta superficie específica hasta una notable flexibilidad estructural y propiedades optoelectrónicas, que los convierten en candidatos ideales para la próxima generación de dispositivos electrónicos y energéticos (Kumar et al., 2026). Sin embargo, la transición desde el laboratorio hacia aplicaciones industriales enfrenta retos relacionados con la escalabilidad, la estabilidad a largo plazo y la reproducibilidad. La convergencia entre la nanotecnología, la ciencia de materiales y la ingeniería promete redefinir los límites de lo que es tecnológicamente posible en las próximas décadas.

La energía de fusión nuclear continúa siendo uno de los desafíos científicos y tecnológicos más ambiciosos de nuestra era. El proyecto ITER, en el que participan 33 naciones, ha propuesto una nueva línea base que incluye modificaciones significativas en la configuración del dispositivo, como el cambio del berilio al tungsteno como material de la primera pared, y divide el plan de investigación en tres fases principales para minimizar los riesgos operativos (ITER Organization, 2025). A pesar de los avances, la generación de energía comercial a partir de fusión no se espera en un futuro inmediato, y el camino hacia un reactor viable sigue estando lleno de obstáculos técnicos y de ingeniería.

La astrofísica y la cosmología están experimentando una revolución observacional gracias al JWST, que está transformando nuestra comprensión de la formación y evolución de las galaxias en los primeros mil millones de





años de historia cósmica. Este instrumento ha confirmado la existencia de galaxias brillantes a tan solo 280 millones de años después del Big Bang, revelando que el universo temprano era mucho más diferente de lo que los astrónomos habían predicho (Naidu et al., 2026). Sin embargo, también han surgido tensiones entre la teoría y la observación que desafían los modelos actuales, abriendo nuevas líneas de investigación sobre la naturaleza del universo primitivo.

En el cruce entre la física y la medicina, los avances recientes están redefiniendo las posibilidades diagnósticas y terapéuticas. Las redes neuronales informadas por la física (PINNs) están emergiendo como una herramienta clave para modelar señales fisiológicas, incorporando leyes físicas conocidas en el entrenamiento de redes neuronales para mejorar la generalización, reducir la dependencia de datos y aumentar la interpretabilidad de los modelos (Zhao et al., 2025). De manera paralela, estas técnicas están siendo aplicadas en imágenes médicas y procesamiento de señales biomédicas, aunque persisten desafíos relacionados con el ruido en los datos, la complejidad computacional y la configuración de los modelos.

Por último, la IA se ha consolidado como un aliado indispensable de la física computacional. Las redes neuronales informadas por la física (PINNs) han demostrado ser una alternativa poderosa a los métodos numéricos tradicionales para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias y parciales, ofreciendo ventajas particulares en problemas inversos, asimilación de datos, dominios irregulares e inferencia paramétrica (Neurocomputing Editorial Team, 2026). Sin embargo, persisten desafíos relacionados con la escalabilidad, el sesgo espectral y la reproducibilidad, lo que subraya que la IA, por muy avanzada que esté, sigue siendo una herramienta que requiere el juicio crítico del físico.



Sección pedagógica

Preguntas de Reflexión Crítica

1. ¿Por qué la Física del futuro ya no puede entenderse como una disciplina aislada, separada de la computación, los materiales, la biología o la inteligencia artificial?
2. ¿Toda innovación basada en Física representa automáticamente progreso, o también debe evaluarse por sus efectos sociales, ambientales y éticos?
3. Si fueras ingeniero mecánico en los próximos diez años, ¿qué problema local podrías abordar usando principios físicos y tecnología emergente?

Ejercicios Prácticos o de Aplicación Conceptual

Ejercicio 1. Física emergente aplicada a un problema local

Elige un problema concreto: eficiencia energética en talleres, refrigeración de productos pesqueros, materiales resistentes a corrosión, energía eólica artesanal, mantenimiento predictivo o diseño de prótesis. Propón cómo una línea actual de la Física podría contribuir a resolverlo. No plantees una solución perfecta; identifica posibilidades, limitaciones y preguntas pendientes.

Ejercicio 2. Inteligencia artificial y Física en Ingeniería Mecánica

Imagina un sistema de mantenimiento predictivo para motores o máquinas industriales. Explica qué datos físicos se podrían medir, cómo ayudaría la IA y por qué el criterio físico del ingeniero seguiría siendo necesario, aunque exista un algoritmo.



Criterios de evaluación

Tabla 10-1: Criterios de evaluación de las preguntas y ejercicios

Criterio de evaluación	Excelente (4 puntos)	Satisfactorio (3 puntos)	En proceso (2 puntos)	Inicial (1 punto)
Análisis de áreas emergentes de la física contemporánea	Analiza computación cuántica, nanotecnología, fusión, astrofísica, física médica e IA; explica su estado actual.	Reconoce varias áreas emergentes y menciona su estado actual, aunque con explicación parcial.	Identifica algunas áreas emergentes, pero sin comprender su desarrollo o aplicaciones concretas.	Desconoce las áreas emergentes o las reduce a conceptos vagos sin contenido técnico.
Evaluación del impacto de la física en sostenibilidad, salud, energía e industria	Evalúa impacto de la física en energía limpia, diagnóstico médico, nuevos materiales e industria 4.0 con ejemplos concretos.	Reconoce el impacto de la física en algunos sectores, aunque con ejemplos imprecisos o incompletos.	Menciona aplicaciones generales de la física, pero sin evaluar su impacto real en la sociedad.	No comprende el impacto de la física o lo considera irrelevante para problemas sociales actuales.
Comprensión de los retos y limitaciones de la física computacional y la IA en la investigación	Analiza retos de la IA en física (escalabilidad, sesgo espectral, interpretabilidad) y su rol como herramienta complementaria.	Reconoce retos de la IA en física y menciona su rol como herramienta, aunque con explicación parcial.	Identifica algunos usos de la IA en física, pero sin comprender sus limitaciones o alcances.	Desconoce el rol de la IA en física o la considera un sustituto del razonamiento humano.
Capacidad para proponer aplicaciones futuras de la física en problemas de ingeniería local (Ejercicio 1)	Propone aplicación concreta de física emergente a problema local de Esmeraldas (energía, pesca, materiales, mantenimiento).	Propone aplicación general, pero sin vincularla claramente con el contexto local o con limitaciones técnicas.	Menciona una posible aplicación, pero sin desarrollar viabilidad o relación con principios físicos.	No logra proponer aplicación o propone solución sin base en física emergente.
Argumentación y pensamiento crítico en respuestas a preguntas de reflexión	Responde con coherencia, evalúa implicaciones éticas y sociales de la física futura; relaciona teoría con práctica.	Expone posturas comprensibles y menciona implicaciones generales, aunque con desarrollo parcial.	Presenta ideas pertinentes pero desorganizadas o con escasa evaluación de implicaciones.	Responde con afirmaciones aisladas o reproduce ideas sin mostrar juicio crítico.

Fuente: Elaboración propia

Lecturas Recomendadas



Feynman, R. P. (1982). "Simulating physics with computers". International Journal of Theoretical Physics.

Es una lectura muy valiosa para entender la relación entre Física, simulación y computación. La referencia aparece en la bibliografía del libro.



Karniadakis, G. E., et al. (2021). "Physics-informed machine learning". Nature Reviews Physics.

Aporta una conexión directa entre Física e inteligencia artificial





11. DIDÁCTICA DE LA FÍSICA DESDE EL CONSTRUCTIVISMO

Objetivos de Aprendizaje del Capítulo

Al finalizar este capítulo, el estudiante será capaz de:

- » Analizar los problemas de la enseñanza tradicional de la física, especialmente la memorización, la resolución mecánica de ejercicios y la desconexión entre ecuación, fenómeno y contexto.
- » Evaluar el valor del aprendizaje significativo, la historia de la ciencia, la filosofía, la matemática interpretativa y las metodologías activas en la enseñanza universitaria de la Física.
- » Crear una secuencia didáctica constructivista para un tema de física, incorporando diagnóstico de ideas previas, actividad contextualizada, discusión conceptual y evaluación formativa.

Introducción

La enseñanza de la Física es algo más que enseñar conceptos y ecuaciones. Hay procesos en el cerebro, en la sociedad y en la cultura que ayudan a los estudiantes a entender el conocimiento científico. Si miramos la historia de la física, desde la antigüedad hasta hoy en día, podemos ver cómo ha cambiado nuestra forma de entender el mundo. Ahora, debemos pensar en cómo enseñar esta materia de manera que los estudiantes la entiendan de verdad.

La forma en que se enseña la Física debe cambiar. No podemos seguir enseñando solo para que los estudiantes memoricen y repitan. La didáctica de la Física debe ser diferente. Los estudiantes deben participar en su propio aprendizaje. Deben entender los conceptos de manera significativa. Esto significa que deben aprender a interpretar lo que pasa en el mundo, a relacionar los modelos con la realidad y a comprender el contexto en el que surgieron las teorías científicas. El aprendizaje de la Física no se trata solo de resolver ecuaciones, se trata de entender el mundo que nos rodea.

11.1. Problemas de la enseñanza tradicional

La enseñanza de la física en muchas universidades de Latinoamérica sigue siendo tradicional, siguiendo los roles del profesor que da clases y los estudiantes que es-



cuchan. En contextos como la UTELVT, esta metodología enfrenta dificultades todavía más profundas debido a condiciones estructurales ocasionadas por el terremoto sucedido el viernes 25 de abril de 2025, esto limitó el desarrollo de experiencias experimentales y prácticas de aprendizaje activo. La Física, al depender fuertemente de la observación, la modelación y la experimentación, pierde gran parte de su potencial formativo cuando se reduce únicamente a exposiciones teóricas y resolución mecánica de ejercicios en el aula. Como consecuencia, muchos estudiantes perciben la asignatura como abstracta, distante y excesivamente matemática, dificultando la construcción de aprendizajes significativos.

Esta problemática se intensificó tras los daños ocasionados por el evento sísmico registrado en Ecuador el 25 de abril de 2025, el cual afectó considerablemente parte de la infraestructura universitaria en Esmeraldas. Muchos lugares de la universidad en Esmeraldas resultaron dañados y no había suficientes laboratorios para hacer experimentos. Alrededor del 70% de las áreas de la universidad tuvieron problemas y no se podían usar (Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional, 2026). La ausencia de laboratorios plenamente equipados no solo afecta la comprensión experimental de conceptos físicos, sino que también debilita la motivación estudiantil, ya que muchos fenómenos científicos quedan reducidos a formulaciones matemáticas desconectadas de experiencias reales.

La situación refleja una problemática más amplia presente en la educación superior ecuatoriana dentro de contextos de vulnerabilidad social y limitaciones institucionales. Un estudio reciente sobre educación superior en Ecuador muestra que las desigualdades territoriales, la insuficiente inversión en infraestructura científica y las dificultades tecnológicas condicionan directamente los procesos de aprendizaje universitario, especialmente en áreas STEM. Según Villavicencio & Romero (2021), las universidades localizadas en contextos periféricos enfrentan mayores obstáculos para sostener procesos de innovación pedagógica y fortalecimiento experimental, generando brechas formativas que impactan particularmente en carreras técnicas e ingenierías. En estas condiciones, la enseñanza tradicional tiende a reproducir es-





quemas memorísticos porque el entorno material limita el desarrollo de metodologías activas y contextualizadas.

Este panorama evidencia que el problema de la enseñanza de la Física no puede atribuirse únicamente al estudiante o al contenido disciplinar, sino también a las condiciones pedagógicas y estructurales donde ocurre el aprendizaje. La dependencia excesiva de la clase magistral, combinada con limitaciones experimentales y contextos de vulnerabilidad institucional, dificulta que el estudiante construya relaciones significativas entre teoría, fenómeno y aplicación tecnológica. Frente a esta realidad, la didáctica contemporánea de la Física exige estrategias capaces de transformar incluso contextos limitados en espacios de aprendizaje activo, donde la experimentación, la contextualización y el pensamiento crítico puedan desarrollarse más allá de las restricciones materiales existentes.

11.2. Aprendizaje significativo

El aprendizaje significativo, desarrollado por David Ausubel, plantea que el conocimiento no se incorpora de manera mecánica o aislada, sino mediante la relación entre los nuevos contenidos y las estructuras cognitivas previas del estudiante (Ausubel, 1968). En simples palabras, aprender implica conectar lo desconocido con experiencias, ideas y realidades que ya poseen sentido para quien aprende. Esta perspectiva resulta especialmente importante en la enseñanza de la Física dentro de contextos como la UTELVT, donde muchos estudiantes provienen de entornos socioculturales profundamente vinculados con actividades productivas, marítimas y comunitarias propias de la región Costa ecuatoriana. Enseñar Física ignorando esa realidad convierte el aprendizaje en un proceso abstracto y distante.

Para que el aprendizaje científico sea verdaderamente significativo en la UTELVT, la Física debe relacionarse con fenómenos presentes en la vida cotidiana del estudiante esmeraldeño. Conceptos como fuerza, presión, flotabilidad, energía o transferencia térmica pueden comprenderse con mayor profundidad cuando se conectan con actividades locales como la pesca artesanal, la navegación fluvial, la construcción en zonas costeras o incluso



el potencial de energías renovables asociadas al movimiento de las mareas y corrientes marinas. La mecánica de fluidos deja de ser únicamente una colección de ecuaciones cuando el estudiante puede relacionarla con el comportamiento del agua en los esteros o con el equilibrio de embarcaciones pesqueras. De la misma forma, la termodinámica adquiere sentido práctico al analizar procesos energéticos vinculados al clima tropical y a sistemas de refrigeración utilizados en actividades comerciales y pesqueras de la provincia.

Desde esta perspectiva, los saberes previos del estudiante no representan obstáculos que deban eliminarse, sino puntos de partida para construir conocimiento científico más complejo. El alumno llega al aula con experiencias acumuladas sobre fenómenos físicos observados en su entorno cotidiano, aunque muchas veces no posea todavía el lenguaje matemático o conceptual para interpretarlos formalmente. La función del docente consiste precisamente en transformar esas intuiciones iniciales en estructuras de comprensión científica más elaboradas. Este enfoque permite disminuir la percepción de la Física como una disciplina lejana y favorece una participación más activa dentro del proceso educativo.

En la literatura actual sobre educación superior en universidades públicas ecuatorianas muestran que los enfoques pedagógicos contextualizados fortalecen significativamente la motivación y comprensión conceptual del estudiante. Estudios desarrollados por Zambrano & Moreira (2022) en instituciones de la región Costa evidencian que el aprendizaje significativo mejora cuando los contenidos científicos se relacionan con problemáticas territoriales y experiencias socioculturales cercanas al alumnado. En contextos como Esmeraldas, donde convergen diversidad cultural, desafíos sociales y una fuerte relación con el entorno natural, la enseñanza de la Física adquiere mayor sentido cuando parte de la realidad concreta del estudiante y no únicamente de modelos abstractos desvinculados de su experiencia cotidiana.





11.3. ¿Cómo integrar la historia, filosofía y matemática en la didáctica?

La enseñanza de la física para los futuros docentes de la UTELVT requiere superar la fragmentación tradicional entre conceptos físicos, matemáticas e historia de la ciencia. Con frecuencia, los estudiantes perciben esta materia como un conjunto de fórmulas abstractas descontextualizadas de la experiencia humana, lo que dificulta la comprensión profunda de los fenómenos naturales. Como se analizó anteriormente en la Sección 5.1 de este libro, el conocimiento físico surgió históricamente como una respuesta a problemas concretos relacionados con la supervivencia, la astronomía, la navegación, la construcción y la comprensión del entorno. Las antiguas civilizaciones, desde un principio, “hacían física” mucho antes de que existiera una formalización matemática moderna, construyendo modelos de realidad a partir de la observación y la experiencia cotidiana. Integrar esta dimensión histórica dentro de la didáctica permite que el estudiante comprenda que la ciencia no nació terminada, sino como un proceso humano de búsqueda, error y transformación conceptual.

Desde esta mirada, la filosofía de la ciencia cumple una función esencial porque ayuda a reflexionar sobre cómo se construyen las teorías científicas y por qué cambian los modelos explicativos a lo largo del tiempo. Comprender que Galileo desafió la física aristotélica, que Newton reorganizó la comprensión del movimiento, que Maxwell unificó el campo de la electricidad con el magnetismo o que Einstein transformó la noción de espacio-tiempo permite que el estudiante identifique la ciencia como una construcción dinámica y no como un conjunto absoluto de verdades inmutables. Este enfoque resulta especialmente importante en la formación docente, porque futuros profesores capaces de comprender la dimensión histórica-epistemológica de la Física tendrán mayores herramientas para enseñar desde la comprensión conceptual y no únicamente desde la repetición mecánica de contenidos y fórmulas.

La matemática, dentro de esta integración interdisciplinaria, debe presentarse como un lenguaje descriptivo para interpretar la naturaleza y no como una barrera de



entrada que excluya al estudiante del aprendizaje científico. Uno de los problemas más frecuentes en la enseñanza tradicional consiste en introducir ecuaciones sin explicar el fenómeno físico que intentan representar ni las incógnitas que se involucran. Cuando las fórmulas aparecen desconectadas de experiencias observables, muchos estudiantes terminan memorizando procedimientos algebraicos y matemáticos sin comprender realmente el significado de las variables o las relaciones físicas involucradas. En cambio, una didáctica integrada permite que las expresiones matemáticas emerjan progresivamente como herramientas para describir patrones, movimientos y transformaciones observadas en la realidad. La ecuación deja así de ser un obstáculo y pasa a convertirse en una forma de narrar matemáticamente el comportamiento del universo.

La confluencia de estas tres dimensiones no permanece en el plano de la reflexión teórica, sino que se operativiza de forma pragmática en la Tabla 11-3, la cual sirve como una guía metodológica para reconfigurar los roles dentro del aula ordinaria. Esta matriz no pretende ser un recetario, sino un punto de partida para que docentes y estudiantes transiten desde la memorización de contenidos hacia la comprensión de su génesis, sus limitaciones y su aplicación en el entorno profesional y social.

Tabla 11-1: Integración operativa de la historia, filosofía y matemática en la didáctica de la física

Dimensión Interdisciplinaria	Acción concreta del docente	Acción concreta del estudiante	Aplicación práctica contextualizada en la UTELVT
Historia de la ciencia	Plantea controversias históricas y problemas técnicos que motivaron reformulaciones teóricas; evita presentar leyes como descubrimientos súbitos.	Indaga origen de modelos con lecturas guiadas; compara explicaciones antiguas y modernas; formula hipótesis históricas.	Víncula evolución de la mecánica con diseño de poleas en astilleros; conecta hidrostática histórica con navegación fluvial local.
Filosofía de la ciencia	Lanza preguntas que quiebran preconcepciones (ej. "¿qué significa que el tiempo se dilate?"); guía debates sobre realismo y empirismo.	Argumenta límites de validez de leyes; participa en debates filosóficos; redacta ensayos sobre alcance ontológico de modelos.	Analiza límites termodinámicos en refrigeración pesquera; discute validez de modelos lineales frente a comportamiento no lineal post-sismo.
Matemática interpretativa	Desarma supuestos físicos de cada ecuación antes del cálculo; diseña actividades donde estudiantes explican significado de cada término.	Verbaliza significado físico y unidades SI de variables; traduce ecuaciones a descripciones cualitativas del fenómeno.	Aplica Navier-Stokes en diagnóstico de flujos en el SOTE; usa Bernoulli en diseño de sistemas hidráulicos para el puerto artesanal.

Fuente: Elaboración propia



Humanizar la ciencia implica también permitir que el estudiante se reconozca como un potencial generador de conocimiento y no únicamente como receptor pasivo de teorías ya construidas. La física debe enseñarse mostrando que detrás de cada descubrimiento existieron dudas, conflictos intelectuales y contextos históricos concretos. Estudios recientes sobre enseñanza de las ciencias, como los desarrollados por Matthews (2021), evidencian que la integración de historia y filosofía de la ciencia fortalece la motivación estudiantil, mejora la comprensión conceptual y favorece una visión más crítica del conocimiento científico. En contextos educativos como el de la UTELVT, donde muchos estudiantes enfrentan dificultades estructurales y desigualdades formativas previas, esta perspectiva puede contribuir significativamente a construir una relación más cercana, humana y significativa con la Física, lo que permitiría superar las barreras materiales existentes en este entorno.

11.4. Estrategias didácticas

La enseñanza de la Física en contextos como la UTELVT requiere estrategias didácticas adaptadas a realidades donde las limitaciones de infraestructura y equipamiento científico forman parte del entorno educativo cotidiano. Frente a la ausencia parcial de laboratorios plenamente equipados, la didáctica constructivista propone transformar la carencia material en una oportunidad para fortalecer la creatividad, la participación activa y el aprendizaje experimental contextualizado. Dentro de este escenario, el estudiante deja de ser únicamente usuario de instrumentos científicos y pasa a convertirse en constructor de experiencias, modelos y dispositivos capaces de representar fenómenos físicos utilizando recursos accesibles y cercanos a la realidad de cada quien.

Entre las estrategias más viables para este contexto destacan los llamados laboratorios de bajo costo, los cuales permiten desarrollar actividades experimentales utilizando materiales reciclados, herramientas domésticas y recursos locales como: caña guadua, bambú, cartón, ladrillo de arcilla o cemento. Estas propuestas no buscan reemplazar completamente los laboratorios especializados, sino garantizar que el aprendizaje experimental



continúe siendo posible incluso en condiciones de limitación tecnológica. Algunas estrategias aplicables en la enseñanza de la Física dentro de la UTELVT incluyen:

- Construcción de péndulos, sistemas de poleas y planos inclinados utilizando madera reciclada, botellas plásticas o materiales reutilizados.
- Experimentos de presión y mecánica de fluidos mediante recipientes domésticos, mangueras y agua para analizar principios hidrostáticos presentes en actividades pesqueras y marítimas locales.
- Elaboración de circuitos eléctricos básicos con componentes de bajo costo para comprender conceptos de corriente, resistencia y energía eléctrica.
- Uso de teléfonos móviles como herramientas experimentales mediante sensores integrados de aceleración, sonido, luz y movimiento.
- Desarrollo de pequeños proyectos de energía renovable vinculados al entorno costero, como prototipos didácticos de energía mareomotriz o eólica artesanal.

Para que estas estrategias puedan trasladarse a la práctica docente, es necesario organizarlas mediante objetivos, recursos, procedimientos, tiempos y evidencias de aprendizaje. La Tabla 11-1 presenta una secuencia didáctica constructivista aplicable al estudio de la mecánica y adaptable a otros contenidos de física.



Tabla 11-2: Secuencia didáctica constructivista para el estudio del movimiento

Estrategia	Objetivo de Aprendizaje	Recursos Didácticos
1. Construcción y análisis de sistemas mecánicos elementales: péndulo, poleas y plano inclinado	Analizar experimentalmente la relación entre fuerza, masa, aceleración y ángulo en sistemas mecánicos simples, identificando fuentes de error y limitaciones de los modelos ideales.	<ul style="list-style-type: none"> - Madera de balsa o caña guadua - Botellas plásticas de diferentes capacidades - Cuerda de cabuya o nailon. - Transportador, regla, cronómetro de teléfono móvil. - Pesas de distintas masas - Aula ordinaria como taller-laboratorio (alternativa post-sismo).
2. Experimentos de presión hidrostática y mecánica de fluidos con materiales domésticos	Determinar experimentalmente la relación entre profundidad, densidad del fluido y presión hidrostática; y aplicar el principio de Pascal para analizar sistemas hidráulicos sencillos.	<ul style="list-style-type: none"> - Recipientes plásticos transparentes de distintas alturas y formas - Mangueras plásticas flexibles de diferentes diámetros - Agua de la red, agua salada - Aceite comestible - Regla graduada y marcadores - Jeringas de diferentes tamaños - Entorno: aula con acceso a lavabo y zona de desagüe
3. Elaboración de circuitos eléctricos básicos con componentes de bajo costo	Verificar experimentalmente la ley de Ohm y analizar la relación entre voltaje, corriente y resistencia en circuitos en serie y paralelo, identificando aplicaciones en sistemas eléctricos de motores y maquinaria industrial.	<ul style="list-style-type: none"> - Baterías de 9V - Cables de cobre con conectores de cocodrilo - Resistencias de carbón de diferentes valores - Diodos LED de bajo costo - Multímetros digitales básicos - Interruptores simples. - Protoboards improvisados - Entorno: aula con mesas y acceso a iluminación
4. Uso de teléfonos móviles como herramientas experimentales para el estudio de movimiento, sonido y luz	Utilizar los sensores integrados de los teléfonos móviles (acelerómetro, giroscopio, micrófono, cámara) para caracterizar cuantitativamente fenómenos físicos como la aceleración en caída libre, el movimiento armónico simple, la frecuencia del sonido y la intensidad lumínica.	<ul style="list-style-type: none"> - Teléfonos móviles de los estudiantes (con Phyphox, SensorKinetics, o Physics Toolbox). - Aplicaciones gratuitas preinstaladas (Phyphox). - Cinta métrica o regla graduada - Superficie plana y elevada para experimentos de caída - Fuentes de sonido - Fuentes de luz - Materiales diversos: muelles, resortes, objetos para caída libre - Aula
5. Desarrollo de prototipos de energía renovable vinculados al entorno costero: energía mareomotriz y eólica artesanal	Diseñar y construir un prototipo funcional de un dispositivo de conversión de energía renovable (mareomotriz o eólica) utilizando materiales reciclados, y evaluar su eficiencia energética y viabilidad técnica para el contexto costero de Esmeraldas.	<ul style="list-style-type: none"> - Madera de balsa o caña guadua - Paletas de madera o plástico reciclado - Ejes metálicos - Rodamientos o piezas móviles - Dínamo de bicicleta o pequeño motor DC - Multímetro para medir voltaje y corriente. - Botellas plásticas, recipientes, mangueras - Ventilador o secador de pelo - Entorno: Áreas abiertas del campus (Nuevos Horizontes o Mútile), con flujo de agua en recipientes grandes o en zonas al aire libre con viento.

Procedimiento Metodológico

Tiempo Estimado

El docente plantea el problema sobre la influencia del ángulo en la aceleración y la tensión de una cuerda, organizando equipos de 3-4 estudiantes. Cada equipo construye un plano inclinado ajustable con caña guadua, un soporte para poleas y un péndulo simple con botella y cuerda. Realizan tres series de mediciones: variación del ángulo (15°, 30°, 45°) midiendo tiempo de descenso; relación entre masa colgante y desplazamiento en poleas; y período del péndulo variando longitud y masa. Calculan aceleraciones experimentales comparándolas con el valor teórico ($a = g \sin \theta$), identifican fuentes de error (fricción, resistencia del aire, precisión del cronómetro) y discuten las discrepancias. Finalmente, relacionan los hallazgos con aplicaciones de Ingeniería Mecánica: diseño de rampas de carga, sistemas de elevación en astilleros locales y tensión en cables de grúas de la refinería.

90 minutos (una sesión de laboratorio alternativo en aula)

El docente problematiza sobre la flotabilidad de buques pesqueros y su relación con la presión en el casco y los sistemas hidráulicos. Los estudiantes perforan agujeros laterales a diferentes alturas en una botella, la llenan de agua y observan el alcance de los chorros, midiendo altura de columna y distancia horizontal; repiten con agua salada y aceite para comparar efectos de densidad. Conectan dos jeringas de diferente diámetro con una manguera llena de agua, aplican fuerza en la jeringa pequeña y miden la fuerza resultante en la grande, verificando el principio de Pascal. Calculan la presión hidrostática teórica ($P = \rho gh$) para cada orificio y comparan con la velocidad de salida observada (teorema de Torricelli), analizando cómo la densidad del fluido afecta la presión. Discuten aplicaciones prácticas: diseño de cascos de embarcaciones pesqueras, prensas hidráulicas en talleres de mantenimiento naval y sistemas de frenos hidráulicos en vehículos de la refinería.

90 minutos

El docente plantea el diseño de un circuito para controlar la velocidad de un motor eléctrico pequeño, como los usados en ventiladores o bombas de agua en la industria pesquera. Los estudiantes arman un circuito en serie con tres resistencias y una batería, midiendo voltajes y corriente; repiten el montaje en paralelo, registrando valores y calculando resistencias equivalentes. Con una resistencia fija, varían el voltaje usando baterías de diferentes valores, miden la corriente resultante y grafican V vs. I para determinar la pendiente (resistencia). Comparan resultados experimentales con cálculos teóricos, discutiendo desviaciones por tolerancias de resistencias y resistencia interna de la batería. Relacionan con aplicaciones en Ingeniería Mecánica: diseño de sistemas de control de motores eléctricos, protección de circuitos en maquinaria industrial y eficiencia energética en sistemas de bombeo.

90 minutos

El docente cuestiona si un teléfono móvil puede reemplazar un costoso laboratorio para medir aceleración de la gravedad, frecuencia de sonido o intensidad lumínica. Los estudiantes colocan el teléfono en caída libre (desde 1.5 m) registrando aceleración con Phyphox, repiten en plano inclinado midiendo aceleración en función del ángulo y realizan un péndulo simple para medir el período con el acelerómetro. Utilizan el micrófono para registrar la forma de onda y frecuencia de un diapasón o silbato, generando sonidos de diferentes frecuencias. Con el sensor de luz ambiental, miden intensidad lumínica a distintas distancias de una fuente puntual (linterna) y verifican la ley del inverso del cuadrado. Procesan los datos calculando aceleración experimental, frecuencia del sonido y relación intensidad-distancia, comparan con valores teóricos y discuten fuentes de error (calibración del sensor, ruido ambiental). Relacionan con aplicaciones en Ingeniería Mecánica: monitoreo de vibraciones en máquinas, análisis de ruido en motores y control de iluminación en talleres.

60 minutos

El docente plantea el desafío de diseñar y construir un prototipo que convierta energía del viento o del movimiento del agua en electricidad, utilizando materiales disponibles en la región, pensando en iluminar puestos de pesca artesanal o talleres costeros. Los equipos investigan principios de aerodinámica (turbinas eólicas) o dinámica de fluidos (turbinas mareomotrices) y elaboran un diseño preliminar con croquis. Construyen el prototipo: paletas de madera o plástico montadas en eje con estructura de caña guadua (eólica) o sistema de paletas que giran al paso del agua (mareomotriz, simulado vertiendo agua desde altura), acoplando un dínamo o motor DC al eje. Someten el prototipo a fuente de viento (ventilador) o flujo de agua controlado, midiendo voltaje y corriente con multímetro variando velocidad del viento o caudal del agua. Calculan potencia eléctrica generada ($P = VI$) y eficiencia energética (potencia eléctrica / potencia mecánica incidente estimada), proponiendo ajustes para mejorar eficiencia (ángulo de aspas, número de paletas, altura de caída). Evalúan viabilidad en el contexto de Esmeraldas (turbinas eólicas en la costa, aprovechamiento de mareas en el puerto pesquero), analizan limitaciones técnicas y económicas, y proponen mejoras futuras.

120 minutos (dos sesiones de 60 minutos)

P.3

APLICACIONES, FUTURO Y DIDÁCTICA



Criterio de Evaluación Formativa	Producto Esperado
Rúbrica de desempeño (100%): <ul style="list-style-type: none">- Precisión en la construcción (25%): estabilidad estructural y correcta alineación del plano/polea.- Calidad de datos (25%): registro sistemático y completo de mediciones.- Análisis de errores (25%): identificación de al menos tres fuentes de error y su impacto.- Interpretación física (25%): relación coherente entre resultados experimentales y modelo teórico.	Informe técnico de laboratorio (estructura: introducción, procedimiento, tablas de datos, gráficos de aceleración vs. ángulo, análisis de errores y conclusiones). El informe debe incluir una sección donde se explique cómo estos principios se aplican en el diseño de sistemas mecánicos para la industria pesquera o portuaria de Esmeraldas.
Rúbrica de desempeño (100%): <ul style="list-style-type: none">- Diseño experimental (25%): correcta disposición de los agujeros y medición de alturas.- Calidad de datos (25%): precisión en las mediciones de distancia y fuerza, registro completo.- Cálculos y análisis (25%): correcta aplicación de las ecuaciones de presión hidrostática y principio de Pascal.- Interpretación contextual (25%): relación entre los resultados experimentales y las aplicaciones en ingeniería naval y pesquera de la región.	Informe de práctica y diseño conceptual: Un informe que incluya tablas de datos, gráficos de presión vs. profundidad y de fuerza vs. área. Además, un diseño conceptual de un sistema hidráulico simple (por ejemplo, un gato hidráulico para levantar una pequeña embarcación) que utilice los principios verificados en el experimento, considerando materiales disponibles en astilleros locales.
Rúbrica de desempeño (100%): <ul style="list-style-type: none">- Montaje correcto del circuito (25%): conexiones seguras y ausencia de cortocircuitos.- Precisión de las mediciones (25%): uso adecuado del multímetro, registro correcto de unidades.- Análisis de datos (25%): correcta verificación de la ley de Ohm, cálculo de resistencias equivalentes, identificación de diferencias entre serie y paralelo.- Interpretación de resultados (25%): capacidad de explicar las desviaciones experimentales y su relación con aplicaciones prácticas.	Informe técnico de práctica: Un informe que contenga esquemas de los circuitos armados, tablas de mediciones, gráficos V-I con la pendiente determinada, cálculos de resistencias equivalentes y un análisis de las diferencias entre los circuitos en serie y paralelo. El informe debe incluir una propuesta de aplicación de estos principios en un sistema de control de un motor eléctrico para un uso específico en la región de Esmeraldas (bombas de agua en la pesca, sistemas de ventilación en la refinería, etc.).
Rúbrica de desempeño (100%): <ul style="list-style-type: none">- Instalación y uso de la aplicación (25%): configuración correcta del sensor y registro de datos.- Calidad de las mediciones (25%): precisión en la toma de datos, identificación de picos y formas de onda.- Análisis de datos (25%): correcta interpretación de gráficos, cálculo de magnitudes físicas (g, frecuencia, intensidad).- Interpretación física (25%): relación de los resultados experimentales con los modelos teóricos y discusión de fuentes de error.	Informe breve y póster digital: Un informe con capturas de pantalla de las aplicaciones, tablas de datos, gráficos procesados y valores calculados (aceleración de la gravedad, frecuencia del sonido, constante de atenuación de la luz). Además, cada equipo elabora un póster digital (presentación de 3 diapositivas) explicando la metodología y los resultados, y proponiendo cómo esta técnica podría utilizarse para el monitoreo de vibraciones en motores industriales o en el control de ruido en talleres de la refinería.
Rúbrica de desempeño (100%): <ul style="list-style-type: none">- Diseño y construcción (25%): creatividad, solidez estructural, funcionalidad del prototipo.- Calidad de las mediciones (25%): registro sistemático de voltaje y corriente para diferentes condiciones.- Análisis de eficiencia (25%): cálculo correcto de potencia y eficiencia, identificación de factores que la afectan.- Contextualización y viabilidad (25%): capacidad de relacionar el prototipo con las condiciones reales de la costa de Esmeraldas y proponer aplicaciones prácticas.	Prototipo funcional y memoria técnica: Un prototipo funcional (aunque sea de baja potencia) de turbina eólica o mareomotriz, junto con una memoria técnica que documente el diseño, los materiales, el procedimiento de construcción, las tablas de datos de voltaje y corriente, el cálculo de potencia y eficiencia, un análisis de las limitaciones del prototipo, y una propuesta de mejora para una posible aplicación real en la provincia (por ejemplo, iluminación de un muelle artesanal o carga de baterías para equipos de pesca).

Fuente: Elaboración propia



En lugar de dar una receta o una lista de pasos obligatorios como se da en las aulas, el truco de esta tabla está en arrancar con lo que ya traen los alumnos en la cabeza. Lanzándoles un problema real que los obligue a experimentar, a equivocarse y a pensar por qué las cosas funcionan de la manera que lo hacen. Es ahí, cuando aplican el concepto y se detienen a analizar los datos por su cuenta, donde realmente desmontan sus ideas viejas y asimilan el verdadero significado del fenómeno físico.

Junto con estas prácticas, el ABP representa una metodología especialmente adecuada para contextos educativos como el de Esmeraldas. Este enfoque propone que el estudiante aprenda Física enfrentando problemas reales vinculados con su entorno social y territorial. En lugar de iniciar desde fórmulas abstractas, el proceso comienza con preguntas concretas relacionadas con fenómenos observables: estabilidad de embarcaciones, sistemas de refrigeración para productos pesqueros, resistencia estructural frente a sismos o aprovechamiento energético de recursos naturales locales. La Física adquiere así un sentido práctico y contextualizado, favoreciendo que el estudiante construya soluciones a partir de investigación, experimentación y discusión colaborativa.

El papel activo del estudiante constituye el núcleo de estas estrategias didácticas. La falta de equipamiento formal no debe interpretarse únicamente como una limitación, sino también como una posibilidad para desarrollar habilidades de innovación, creatividad y pensamiento crítico. Construir dispositivos experimentales propios obliga al estudiante a interpretar fenómenos físicos, adaptar materiales y comprender funcionalmente los principios científicos involucrados. Investigaciones recientes sobre educación en contextos rurales y de escasos recursos en Ecuador, como las desarrolladas por Cedeño & Zambrano (2021), muestran que las metodologías activas y contextualizadas fortalecen significativamente la motivación, la participación y la comprensión conceptual en ciencias básicas. Bajo este marco, enseñar la hermosa materia de Física desde el constructivismo implica reconocer que el aprendizaje científico puede desarrollarse incluso en escenarios adversos cuando el estudiante participa activamente en la construcción de su propio conocimiento.





11.5. Evaluación del aprendizaje

La cultura evaluativa predominante en la educación universitaria latinoamericana sigue anclada en el examen acumulativo de respuesta única, una práctica que mide fundamentalmente tolerancia a la presión y retención temporal, no comprensión profunda. En disciplinas como la física, donde el conocimiento se construye mediante procesos iterativos de abstracción y contraste empírico, este modelo punitivo resulta especialmente inadecuado: un estudiante puede resolver correctamente un ejercicio y, sin embargo, no haber comprendido el fenómeno que representa. En instituciones como la UTELVT, afectadas por daños estructurales que inhabilitaron laboratorios, esta problemática se agudiza, reforzando la dependencia de pruebas escritas y perpetuando la desconexión entre teoría y aplicación tangible.

Frente a esta realidad, se propone un modelo de evaluación formativa y procesual, centrado en el seguimiento continuo del aprendizaje. Evaluar significa acompañar el desarrollo conceptual, identificando avances, dificultades y procesos de reconstrucción cognitiva a lo largo del curso. El error deja de ser un demérito y pasa a interpretarse como una evidencia del camino recorrido. Este enfoque no elimina los exámenes, pero los descentra: los convierte en un insumo más dentro de un sistema diversificado de recogida de evidencias. Las alternativas que complementan o sustituyen al examen tradicional se describen a continuación:

- **Evaluación basada en proyectos de ingeniería de bajo costo:** Consiste en el diseño, construcción y análisis de un dispositivo físico que dé solución a un problema real vinculado con el entorno costero o industrial de Esmeraldas (por ejemplo, una rampa de carga, un sistema de refrigeración pasiva o un freno hidráulico). El estudiante entrega un prototipo funcional (aunque sea a escala) y un informe técnico que documenta el proceso de diseño, los cálculos físicos, los ajustes realizados y las limitaciones encontradas. La evaluación se centra en la coherencia entre los principios físicos estudiados y las decisiones de diseño tomadas.
- **Portafolios de evidencias de aprendizaje:** Carpeta digital o física que el estudiante construye a lo largo del semestre, recopilando de manera reflexiva sus pro-



ducciones más significativas: ejercicios resueltos con anotaciones sobre el significado físico, registros de experimentos caseros, capturas de simulaciones o mediciones con teléfono móvil, respuestas a preguntas de reflexión crítica, y autoevaluaciones periódicas. Cada entrega incluye una breve reflexión metacognitiva sobre lo aprendido, las dificultades enfrentadas y las estrategias empleadas para superarlas. El docente revisa el portafolio cada tres semanas y ofrece retroalimentación escrita y dialogada.

- **Defensas orales grupales en entornos de simulación:** Sustituye la prueba escrita individual por una sesión de exposición y argumentación en grupos reducidos (3-4 estudiantes), donde se plantea un problema físico contextualizado (por ejemplo, "¿qué factores determinan la estabilidad de una barcaza en el estuario?"). Cada grupo debe construir una explicación fundamentada utilizando modelos matemáticos, esquemas y, cuando sea posible, recursos de bajo costo. La defensa se realiza en el aula ordinaria y el docente actúa como facilitador que formula preguntas de profundización. Esta modalidad evalúa la capacidad de argumentación, trabajo colaborativo y transferencia conceptual.
- **Bitácoras experimentales y diarios de aprendizaje:** Para actividades prácticas desarrolladas con materiales domésticos o en el aula-laboratorio improvisado, el estudiante registra paso a paso sus observaciones, mediciones, interpretaciones y correcciones en una bitácora personal. Este registro no se limita a los datos numéricos, sino que incluye dibujos, diagramas de fuerzas, preguntas surgidas durante la experiencia y propuestas de mejora. La bitácora se entrega periódicamente y el docente la utiliza como insumo para retroalimentar el proceso, identificando errores conceptuales tempranos y orientando la reflexión.
- **Coevaluación y autoevaluación estructurada:** Periódicamente, el estudiante evalúa su propio desempeño y el de sus compañeros mediante rúbricas sencillas y preguntas guía ("¿qué concepto dominé?", "¿qué me costó más trabajo?", "¿qué aporté al trabajo en equipo?"). Esta práctica no reemplaza la evaluación docente, pero la complementa al fomentar la conciencia sobre el propio aprendizaje y la responsabilidad colectiva.





Las autoevaluaciones se contrastan con las calificaciones del docente y se utilizan como base para diálogos de mejora personalizada.

La Tabla 11-2 operacionaliza este sistema evaluativo mixto, especificando para cada alternativa la evidencia concreta que el estudiante entrega, el instrumento que el docente utiliza para valorarla y los criterios que definen los niveles de desempeño en sus tres grados.

Tabla 11-3: Sistema evaluativo diversificado para la enseñanza de la física en contextos con limitaciones de infraestructura

Alternativa Evaluativa	Evidencia de Aprendizaje	Instrumento de Evaluación	Criterio Excelente	Criterio Regular	Criterio Insuficiente
Evaluación basada en proyectos de bajo costo	Prototipo funcional con materiales reciclados e informe técnico con cálculos, mediciones y análisis de errores.	Rúbrica analítica (diseño, construcción, análisis físico, comunicación técnica).	Prototipo cumple función con error <10 %; informe justifica decisiones, incluye análisis de incertidumbre y relaciona principios físicos con aplicaciones locales.	Prototipo funcional con desviaciones 10-25 %; informe documenta proceso pero omite análisis de errores o contextualización.	Prototipo no funciona o falla estructuralmente; informe carece de cálculos consistentes o no relaciona con principios físicos.
Portafolios de evidencias	Carpeta con ejercicios anotados, registros experimentales, reflexiones metacognitivas y autoevaluaciones.	Lista de cotejo y escala de estimación para profundidad reflexiva; revisión periódica cada 3-4 semanas.	Contiene todos los elementos; anotaciones demuestran comprensión profunda y evolución conceptual; reflexiones identifican estrategias y áreas de mejora.	Incluye mayoría de elementos; anotaciones descriptivas más que interpretativas; reflexiones mencionan dificultades sin análisis profundo.	Incompleto (>30 % faltante); anotaciones meramente procedimentales; sin reflexiones metacognitivas sustanciales.
Defensas orales grupales	Exposición argumentada (15 min) con modelo matemático, esquemas y respuestas a preguntas de profundización.	Rúbrica analítica (claridad conceptual, uso matemático, argumentación, trabajo colaborativo).	Explicación conceptualmente sólida; uso correcto de formalismo; responde con solvencia a preguntas; participación equilibrada.	Explicación correcta con algunos vacíos; responde a la mayoría de preguntas con inseguridades; participación mayoritariamente equilibrada.	Explicación superficial o con errores graves; no defiende propuesta ante preguntas básicas; participación muy desigual.
Bitácoras experimentales	Registro escrito y gráfico de procedimientos, datos, cálculos, interpretaciones y fuentes de error.	Lista de cotejo por entrada y registro anecdótico de progreso a lo largo del tiempo.	Documentación exhaustiva y ordenada; interpretación rigurosa que relaciona resultados con modelos teóricos; análisis cuantitativo de errores.	Mayoría de entradas completas; interpretación a veces imprecisa; errores mencionados sin análisis profundo.	Varias entradas incompletas; limitada a procedimientos sin reflexión física; no identifica errores ni propone mejoras.
Coevaluación y autoevaluación	Cuestionarios guía al final de cada unidad y de cada trabajo grupal, con preguntas sobre fortalezas, debilidades y aportes.	Escala de estimación (1-5) y registro de coevaluación; contrastación con observación docente.	Conciencia precisa de fortalezas y debilidades; autoevaluación coherente con desempeño observado; valoraciones equilibradas y con ejemplos concretos.	Reconoce dificultades generales sin precisión; autoevaluación no siempre coherente; coevaluación positiva, pero sin ejemplos concretos.	No identifica dificultades o las sobreestima; autoevaluación inconsistente con evidencias; coevaluación superficial o sin fundamento.

Fuente: Elaboración propia.



Este sistema evaluativo diversificado distribuye la exigencia a lo largo del proceso, ofreciendo múltiples oportunidades para que el estudiante demuestre su comprensión desde distintas perspectivas. La evaluación formativa no es un modelo blando: exige construir, argumentar, reflexionar y transferir operaciones cognitivas de orden superior que el examen memorístico no alcanza a medir. En el contexto de la UTELVT, donde las limitaciones materiales son parte del escenario cotidiano, estas alternativas aprovechan los recursos disponibles (el aula, materiales reciclados, teléfonos móviles y el entorno productivo local) para generar evidencias auténticas de aprendizaje. La evaluación, así concebida, deja de ser un mecanismo de selección y se convierte en un verdadero acompañamiento del crecimiento intelectual, contribuyendo a formar profesionales capaces de interpretar, cuestionar y transformar su realidad.

Sección pedagógica

Preguntas de Reflexión Crítica

1. ¿Por qué una evaluación basada solo en exámenes y respuestas numéricas puede ocultar que el estudiante no comprendió el fenómeno físico?
2. ¿Qué cambia cuando la historia y la filosofía de la ciencia se usan para enseñar Física, en lugar de presentar las teorías como verdades terminadas?
3. ¿Cómo debería diseñarse una clase de Física para que el estudiante no sea solo receptor de información, sino constructor de explicaciones?

Ejercicios Prácticos o de Aplicación Conceptual

Ejercicio 1. Diseñar una clase constructivista

Escoge un tema: presión, energía, fuerza, calor, electricidad o movimiento. Diseña una clase breve con cuatro momentos: exploración de ideas previas, actividad o problema contextualizado, construcción guiada del concepto y cierre reflexivo. Explica qué haría el docente y qué harían los estudiantes.

Ejercicio 2. Evaluar sin castigar el error

Propón una forma de evaluar el aprendizaje de un tema de Física sin depender únicamente de una prueba escrita. Puedes usar portafolio, proyecto, bitácora experimental, coevaluación o defensa oral. Explica cómo esa evaluación permitiría ver el proceso de pensamiento del estudiante y no solo el resultado final.



Criterios de evaluación

Tabla 11-4: Criterios de evaluación de las preguntas y ejercicios

Criterio de evaluación	Excelente (4 puntos)	Satisfactorio (3 puntos)	En proceso (2 puntos)	Inicial (1 punto)
Análisis de los problemas de la enseñanza tradicional de la física	Analiza problemas (memorización, algoritmos sin comprensión) y los vincula con vacíos conceptuales y desmotivación.	Reconoce problemas de la enseñanza tradicional y menciona sus consecuencias, aunque con explicación parcial.	Identifica algún problema de la enseñanza tradicional, pero sin comprender su impacto en el aprendizaje.	Desconoce los problemas o considera la enseñanza tradicional adecuada sin cuestionarla.
Comprensión del aprendizaje significativo y su aplicación en la enseñanza de la física	Explica aprendizaje significativo con Ausubel; propone organizadores previos y conexión con experiencias cotidianas de los estudiantes.	Reconoce el aprendizaje significativo y menciona organizadores previos, aunque con aplicación imprecisa.	Identifica el aprendizaje significativo, pero no comprende su fundamento ni su aplicación didáctica.	Desconoce el aprendizaje significativo o lo confunde con memorización mecánica.
Capacidad para integrar historia, filosofía y matemática en la didáctica de la física	Integra las tres dimensiones en secuencia didáctica; relaciona origen de conceptos, supuestos filosóficos y significado físico de ecuaciones.	Reconoce la importancia de historia, filosofía y matemática, aunque su integración es parcial o desarticulada.	Menciona alguna de las dimensiones, pero sin integrarlas en una estrategia didáctica coherente.	No comprende la integración o reduce la didáctica a transmisión de contenidos sin contexto.
Capacidad para diseñar una clase constructivista con cuatro momentos (Ejercicio 1)	Diseña clase con exploración de ideas previas, problema contextualizado, construcción guiada y cierre reflexivo; coherente y aplicable.	Diseña clase con la mayoría de los momentos, aunque alguno está poco desarrollado o desarticulado.	Presenta bosquejo de clase, pero omite momentos clave o la secuencia es confusa.	No logra diseñar una clase constructivista o propone una secuencia tradicional sin indagación.
Argumentación y pensamiento crítico en respuestas a preguntas y ejercicios	Responde con coherencia, fundamentación y relaciona teoría constructivista con práctica real en el aula universitaria.	Expone posturas comprensibles y parcialmente fundamentadas; algunas conexiones con la práctica son poco explícitas.	Presenta ideas pertinentes pero desorganizadas o con escasa justificación teórica.	Responde con afirmaciones aisladas o vagas, sin fundamento conceptual o pedagógico.

Fuente: Elaboración propia

Lecturas Recomendadas



Ausubel, D. P. (1968). Educational Psychology: A Cognitive View.

Es esencial para sostener la idea de aprendizaje significativo. Ayuda a comprender por qué el docente necesita partir de lo que el estudiante ya sabe antes de enseñar un concepto nuevo.



Kirschner, P. A., Sweller, J., & Clark, R. E. (2006). "Why minimal guidance during instruction does not work". Educational Psychologist.

Es muy útil para equilibrar el enfoque constructivista. Permite recordar que la participación activa del estudiante necesita guía, estructura y mediación docente.

P.3





12. CIERRE FINAL

12.1. Conclusiones

A lo largo de esta obra, la Física ha sido presentada no como una acumulación aislada de ecuaciones, sino como una construcción humana que ha evolucionado junto con la propia historia del pensamiento. Desde los saberes ancestrales y el surgimiento del logos griego analizados en el Capítulo 5, pasando por las revoluciones científicas que transformaron nuestra comprensión del espacio, el tiempo y la materia, hasta llegar a las fronteras contemporáneas de la computación cuántica, la cosmología y la IA desarrolladas en el Capítulo 10, se ha evidenciado que el conocimiento científico surge del cuestionamiento constante de la realidad. Cada teoría física estudiada en este libro nació de un conflicto cognitivo: una tensión entre lo que se creía comprender y aquello que los fenómenos naturales obligaban a replantear. Precisamente allí reside el verdadero valor epistemológico de la Física: no en ofrecer respuestas definitivas, sino en ampliar continuamente las formas humanas de interpretar el universo.

Este recorrido también permitió comprender que la física no puede separarse de su dimensión filosófica, histórica y educativa. Las ecuaciones adquieren sentido únicamente cuando representan experiencias, problemas y modelos construidos dentro de contextos concretos. Bajo esta idea, el aprendizaje significativo no consiste en memorizar resultados matemáticos, sino en construir relaciones entre teoría, experiencia y realidad social. La interpretación filosófica de la ciencia desarrollada a lo largo del libro demuestra que incluso los conceptos más abstractos, desde la relatividad hasta la mecánica cuántica, son intentos humanos por organizar el caos aparente de la naturaleza mediante estructuras racionales cada vez más profundas y coherentes.

Para la comunidad de la UTELVT, esta reflexión posee una dimensión particularmente importante. En contextos donde las limitaciones materiales, los problemas estructurales y las desigualdades educativas representan desafíos cotidianos, el verdadero laboratorio no se encuentra únicamente en los equipos especializados o en





las infraestructuras físicas, sino en la capacidad del estudiante esmeraldeño para pensar críticamente, cuestionar modelos establecidos y construir conocimiento incluso en escenarios adversos. La Carrera de Mecánica no debe formar únicamente operadores técnicos, sino profesionales capaces de interpretar científicamente su entorno y transformarlo mediante creatividad, razonamiento y compromiso social. El estudiante no aprende Física para repetir fórmulas; aprende Física para construir modelos de realidad que le permitan intervenir sobre el mundo que habita.

Desde el enfoque constructivista desarrollado en esta obra, enseñar y aprender Física implica reconocer que el conocimiento no se transmite terminado, sino que se reconstruye activamente mediante la experiencia, el diálogo y la reflexión. Cada error conceptual representa una oportunidad de reorganización intelectual; cada problema físico constituye una invitación a comprender más profundamente las relaciones que gobiernan la naturaleza. Gracias a esto, la enseñanza universitaria adquiere una responsabilidad ética y epistemológica: formar sujetos capaces de analizar críticamente la ciencia, comprender sus límites y utilizarla como herramienta para el desarrollo humano y tecnológico de sus comunidades.

La historia de la Física demuestra que las civilizaciones avanzan cuando aprenden a interpretar la naturaleza con rigor, imaginación y pensamiento crítico. Esmeraldas comparte esa misma lógica de resistencia y construcción: incluso frente a la incertidumbre, continúa generando conocimiento, formando profesionales y proyectando futuro. Comprender la Física significa entonces comprender algo mucho más profundo que las leyes del universo; significa reconocer que la humanidad siempre ha tenido la capacidad de reconstruir su realidad mediante la ciencia, y que el futuro comienza precisamente allí donde la curiosidad humana decide no rendirse.

12.2. Recomendaciones

La enseñanza de la física en carreras de ingeniería no puede seguir postergando la articulación entre el formalismo matemático y la experiencia concreta del estudiante. Este libro ha insistido a lo largo de sus capítulos



en que una ecuación bien resuelta no garantiza comprensión; lo que realmente forma criterio profesional es la capacidad de traducir un fenómeno real, como el desplazamiento de un pistón, la presión en una tubería o la eficiencia de un intercambiador de calor, en un modelo matemático y, luego, interpretar los resultados con conciencia de sus límites y supuestos. La salida de campo y el análisis de casos locales, como el comportamiento hidrodinámico del crudo en el sistema de transporte SOTE o las condiciones de operación de las bombas en la refinería de Esmeraldas, deberían ocupar un lugar sistemático en el diseño de problemas y proyectos de aula. No se trata de añadir anécdotas al final de una unidad, sino de reformular los enunciados para que las variables físicas remitan a magnitudes que el estudiante pueda visualizar en su entorno inmediato.

La didáctica constructivista, en este sentido, no es una opción entre otras: es el único camino para que la física deje de ser percibida como un cuerpo de saber ajeno, impuesto desde el exterior. Las instituciones de educación superior de la región costa ecuatoriana, y en particular la UTELVT, deberían incorporar explícitamente en sus lineamientos curriculares el enfoque de cambio conceptual que este libro ha desarrollado: partir de las ideas previas, desestabilizarlas mediante experimentos de bajo costo o simulaciones accesibles, formalizar el modelo matemático y, acto seguido, someterlo a problemas reales de ingeniería. Este ciclo, reiterado a lo largo de cada unidad, transforma la asignatura en un taller permanente de indagación y diseño, donde el error es insumo y no sanción. La experiencia de las mesas de trabajo con docentes de la UTELVT durante la redacción de esta obra mostró que esta metodología es factible incluso con recursos limitados, siempre que exista voluntad de reorganizar el tiempo de clase y la secuencia de contenidos.

Un frente de acción urgente es el diseño de actividades experimentales con materiales disponibles en el entorno: la caña guadua, la madera de balsa, los residuos plásticos del puerto pesquero y los sensores de los teléfonos móviles no son sucedáneos de un laboratorio, son el laboratorio posible y, en muchos casos, el más formativo. La literatura sobre educación en ciencias en contextos de escasos recursos, revisada en los capítulos iniciales,





confirma que la creatividad en el diseño de montajes caseros supera en impacto cognitivo a la simple operación de equipos comerciales cuando estos se utilizan sin reflexión. Por ello, se recomienda institucionalizar un banco de recursos didácticos de bajo costo, con guías de montaje, protocolos de medición y rúbricas de evaluación, que pueda ser alimentado colectivamente por los docentes y estudiantes de la carrera. Este archivo, además, serviría como memoria técnica de las adaptaciones que la crisis de infraestructura ha vuelto necesaria y como evidencia de la capacidad de resiliencia pedagógica de la comunidad universitaria.

La evaluación, finalmente, debe dejar de ser el momento de la verdad para convertirse en una instancia más del proceso de aprendizaje. Los exámenes tradicionales, por su propia estructura, privilegian la memoria a corto plazo y la velocidad de respuesta, dos habilidades que nada tienen que ver con la comprensión de fenómenos físicos ni con el ejercicio profesional de la ingeniería. Se recomienda avanzar hacia sistemas de evaluación diversificados, como los propuestos en la Tabla 11-2, que incluyan portafolios de evidencias, defensas orales grupales, bitácoras experimentales y autoevaluaciones estructuradas. Estos instrumentos no solo recogen información más rica sobre el desarrollo conceptual del estudiante, sino que además reducen la ansiedad evaluativa y fomentan la autonomía y la metacognición. La transición hacia este modelo requiere, eso sí, un acompañamiento sostenido a los docentes para que diseñen rúbricas claras y gestionen tiempos de revisión y retroalimentación que el examen único no exige, pero el aprendizaje significativo sí.

12.3. Limitaciones del libro

Este texto no ha pretendido ni podría sustituir los manuales clásicos de física general que constituyen el piso bibliográfico de la formación en ingeniería. Obras como las de Serway, Resnick o Sears, con sus extensos bancos de problemas y su desarrollo riguroso del cálculo vectorial y diferencial, siguen siendo herramientas indispensables para el dominio algorítmico y la preparación cuantitativa de los estudiantes. Lo que esta obra ofrece es un puente: una interpretación constructivista de esa física



que conecte las ecuaciones con su génesis histórica, con sus condiciones de validez y con aplicaciones concretas de la mecánica, la termodinámica y los fluidos. El libro, por tanto, no es un reemplazo, sino un complemento que el docente puede usar para contextualizar y humanizar el contenido de los manuales canónicos, o que el estudiante puede consultar cuando la pregunta no sea "cómo se despeja esta variable" sino "por qué esta ecuación es útil para diseñar un sistema de refrigeración o para diagnosticar una bomba".

Una limitación de orden material, y no metodológica, ha condicionado el alcance de las propuestas experimentales de este libro. El terremoto del 25 de abril de 2025, con epicentro en la provincia de Esmeraldas, dejó inhabilitado cerca del 75% de los espacios tradicionales de los campus Nuevos Horizontes y Mútilo de la UTELVT, incluyendo los laboratorios de física, termodinámica y mecánica de fluidos que constituían el soporte práctico de la asignatura. Esta pérdida de infraestructura no solo afectó la disponibilidad de equipos especializados, sino que modificó la relación misma entre teoría y experiencia en el aula ordinaria. Las estrategias de laboratorio de bajo costo y las bitácoras experimentales que se proponen en el capítulo 11 no son, por tanto, una opción pedagógica entre otras, sino la respuesta obligada a una realidad de carencia que no puede ocultarse ni minimizarse. Su diseño responde a la urgencia de mantener el aprendizaje experimental en pie mientras se gestiona la reconstrucción de los espacios, pero no debe confundirse con un ideal didáctico: la experimentación con instrumentos convencionales de precisión sigue siendo insustituible para ciertos dominios de la ingeniería mecánica.

Otra limitación de este trabajo es su circunscripción al contexto de la Carrera de Mecánica de la UTELVT. Si bien los principios epistemológicos y didácticos que se exponen son generalizables a otras carreras técnicas y a otras universidades de la región, las aplicaciones concretas, como los ejemplos de fluidos en el puerto pesquero, de termodinámica en el clima tropical, de mecánica en los astilleros locales y de energía en el sistema de transporte de crudo, han sido seleccionadas para resonar con la realidad de Esmeraldas y con el perfil profesional de sus egresados. Fuera de este entorno, el lector deberá rea-





lizar un trabajo de adaptación similar al que aquí se ha hecho. La obra aspira a ser un modelo transferible, no un recetario universal.

12.4. Líneas de mejora

12.4.1. Mejoras para estudiantes

Se insta a los estudiantes a abandonar la repetición ciega de recetas algebraicas. Resolver un ejercicio copiando los pasos de un problema similar resuelto en clase no es aprender física; es entrenarse para una rutina que no se repetirá en el ejercicio profesional. El estudiante debe formularse, antes de cada cálculo, una pregunta fundamental: "¿qué variable representa cada símbolo de esta ecuación, en qué unidades se mide y qué rango de valores es físicamente plausible?". Esta práctica, reiterada durante el semestre, transforma el acto de operar en un acto de comprender.

Es igualmente importante que los estudiantes interioricen el sentido físico de las variables y las unidades del SI antes de iniciar cualquier cálculo numérico. La ecuación del MRUA no es un conjunto de letras que se despejan; describe la geometría de un movimiento en un espacio-tiempo continuo. El estudiante debe visualizar qué significa cada término: el desplazamiento inicial, la contribución de la velocidad constante y el efecto acumulado de la aceleración. Solo después de esa interiorización tiene sentido sustituir valores y obtener resultados numéricos. Lo mismo aplica a ecuaciones más complejas como las de Navier-Stokes o las de campo de Einstein: cada término tiene un significado físico que debe ser verbalizado antes de ser operado.

Se recomienda también que los estudiantes asuman un rol activo de cocreación pedagógica en el aula ordinaria. El estudiante no es un receptor pasivo de información, sino un constructor de conocimiento que dialoga con el docente y con sus compañeros. Esto implica preparar las clases con anticipación, llevar preguntas formuladas a partir de las lecturas, participar en los debates y diseñar experimentos de bajo costo que pongan a prueba las hipótesis discutidas. La actitud activa no solo acelera el aprendizaje propio, sino que enriquece el entorno



del aula y contribuye a mitigar el rezago educativo que arrastran muchos compañeros debido a la desigualdad en la formación previa.

Por último, se sugiere a los estudiantes usar los laboratorios de bajo costo como oportunidades de invención y no como sucedáneos precarios. La carencia de equipamiento especializado, consecuencia directa de la crisis post-sismo, no debe ser un motivo de frustración, sino un estímulo para la creatividad. Medir el coeficiente de fricción con una tabla de madera y un resorte, calibrar un termómetro con hielo y agua hirviendo, o construir un dinamómetro con una liga y una regla son ejercicios que exigen comprender el principio físico con mucha mayor profundidad que el uso rutinario de un aparato comercial. El estudiante que logra obtener mediciones confiables con materiales domésticos ha aprendido, además de física, una lección de ingeniería aplicada que le servirá en su ejercicio profesional.

12.4.2. Mejoras para profesores

Se recomienda a los docentes adoptar el ciclo de cambio conceptual en sus seis fases operativas, esto es el diagnóstico inicial, la activación del conflicto cognitivo, la modelación matemática formal, la aplicación contextual, la evaluación formativa argumentativa y el cierre de brechas. Estos pasos no deben aplicarse de manera rígida ni secuencial en un sentido estricto, pero constituyen el engranaje metodológico que asegura que el estudiante no memorice fórmulas sin comprender las relaciones físicas que describen. El docente debe planificar cada unidad con este ciclo en mente, diseñando preguntas iniciales que pongan a prueba las intuiciones comunes, por ejemplo "¿qué fuerza mueve un objeto que viaja en línea recta a velocidad constante?", y actividades de bajo costo que generen sorpresa empírica frente a esas intuiciones.

Es fundamental que los profesores utilicen los errores conceptuales de los estudiantes como trampolines cognitivos. El arrastre de ideas aristotélicas, como la creencia de que el movimiento requiere una fuerza constante o que el calor es una sustancia que se transfiere sin pérdidas, no debe ser sancionado ni ridiculizado, sino con-





vertido en el punto de partida de la discusión. El docente debe formular problemas que confronten esas creencias con datos medibles: registrar el tiempo de caída de dos objetos de distinta masa en una rampa, medir el enfriamiento de un líquido caliente en diferentes recipientes, o simular con aplicaciones móviles la aceleración de un carrito en un plano inclinado. La función del profesor no es dar la respuesta correcta de inmediato, sino guiar la interpretación de los resultados para que el estudiante, por sí mismo, reconozca la insuficiencia de su modelo intuitivo y la necesidad de adoptar el formalismo newtoniano o termodinámico.

La aplicación de la matriz de evaluación diversificada propuesta en la Tabla 11-2 constituye otra línea de mejora impostergable. El examen punitivo de respuesta única no puede desaparecer de la noche a la mañana, pero sí puede complementarse, y con el tiempo desplazarse, con portafolios que registren el proceso de razonamiento, bitácoras experimentales que documenten la evolución de las hipótesis, defensas orales grupales que evalúen la argumentación y el trabajo colaborativo, y autoevaluaciones estructuradas que fomenten la conciencia metacognitiva. El docente debe diseñar rúbricas claras para cada uno de estos instrumentos y socializarlas con los estudiantes al inicio del curso, de modo que los criterios de éxito sean transparentes y no sorpresivos.

Finalmente, se aconseja integrar la historia y la filosofía de la ciencia en las explicaciones de aula. Cada concepto físico que se enseña, como la inercia, la entropía o la dualidad onda-partícula, tiene una historia de controversias, errores y reformulaciones que puede humanizar la materia y mostrar que la ciencia no es un catálogo de verdades acabadas. El docente debe dedicar al menos diez minutos de cada sesión a contextualizar el origen del modelo que está presentando: qué problema resolvía, qué autores lo cuestionaron y qué evidencias empíricas lo validaron. Este ejercicio no resta tiempo al contenido, sino que lo dota de significado y reduce la percepción de arbitrariedad que suele acompañar al aprendizaje de la física.



13. BIBLIOGRAFÍA

1. ABC Ciencia. (2019). ¿Y si el espacio tiempo no es continuo, sino que está dividido en pequeñas «piezas»? https://www.abc.es/ciencia/abci-y-si-espacio-tiempo-no-continuo-sino-esta-dividido-pequenas-piezas-201911211955_noticia.html
2. Abu-Shawareb, H., & others. (2024). Achievement of Target Gain Larger than Unity in an Inertial Fusion Experiment. *Physical Review Letters*, 132(6), 65102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.132.065102>
3. Aghanim, N., Akrami, Y., Ashdown, M., Aumont, J., Baccigalupi, C., Ballardini, M., Banday, A. J., Barreiro, R. B., Bartolo, N., Basak, S., & et al. (2020). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>
4. Al-Haytham. (2001). *Alhacen's Theory of Visual Perception: A Critical Edition, with English Translation and Commentary, of the First Three Books of Alhacen's De Aspectibus* (A. M. Smith, Ed.). American Philosophical Society. <https://www.pennpress.org/9780871699145/alhacens-theory-of-visual-perception-first-three-books-of-alhacens-de-aspectibus-volume-one-introduction-and-latin-text/>
5. Angulo Guerrero, R. J., Alvarado León, B. L., & Guzmán Hernández, R. (2024). Desafíos y Oportunidades en la Formación Técnica y Pedagógica de Docentes en Educación Superior en Esmeraldas. *Reincisol.*, 3(6), 7116–7144. [https://doi.org/10.59282/reincisol.v3\(6\)7116-7144](https://doi.org/10.59282/reincisol.v3(6)7116-7144)
6. Aristóteles. (1995). *Física (Libros III-IV)* (G. R. de Echandía, Trad.). Editorial Gredos.
7. Arute, F., Arya, K., Babbush, R., Bacon, D., Bardin, J. C.,arends, R., Biswas, R., Boixo, S., Brandao, F. G. S. L., Buell, D. A., Burkett, B., Chen, Y., Chen, Z., Chiaro, B., Collins, R., Courtney, W., Dunsworth, A., Farhi, E., Foxen, B., ... Martinis, J. M. (2019). Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 574(7779), 505–510. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>
8. Ausubel, D. P. (1968). *Educational Psychology: A Cognitive View*. Holt, Rinehart and Winston.
9. Aveni, A. F. (2001). *Skywatchers: A Revised and Updated Version of Skywatchers of Ancient Mexico*. University of Texas Press.
10. Basov, D. N., Averitt, R. D., & Hsieh, D. (2021). Towards properties on demand in quantum materials. *Nature Materials*, 20(10), 1331–1344.
11. Bejan, A. (2016). *Advanced Engineering Thermodynamics* (4th ed.). John Wiley & Sons.





12. Bodleian Libraries. (2017). The Bakhshali Manuscript: Folio 16 recto showing the use of the zero dot. <https://ox.ac.uk>
13. Bohr, N. (1913). On the Constitution of Atoms and Molecules. *Philosophical Magazine*, 26(151), 1–25.
14. Boltzmann, L. (1877). Über die Beziehung zwischen dem zweiten Hauptsatze der mechanischen Wärmetheorie und der Wahrscheinlichkeitsrechnung. *Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften*, 76, 373–435.
15. British Museum. (2026). The Rhind Mathematical Papyrus (Número EA10057). https://www.britishmuseum.org/collection/object/Y_EA10057
16. Canfora, L. (1989). *The Vanished Library: A History of the Library of Alexandria*. University of California Press.
17. Cao, Y., Rodan-Legrain, D., Rubies-Bigorda, O., & others. (2020). Tunable correlated states and spin-polarized phases in twisted bilayer-bilayer graphene. *Nature Reviews Physics*, 2(8), 1–14.
18. Carnot, S. (1824). *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Bachelier.
19. Cassirer, E. (1923). *Substance and Function*. Open Court Publishing.
20. Cedeño, J., & Zambrano, P. (2021). Estrategias didácticas activas para la enseñanza de ciencias en contextos rurales ecuatorianos. *Dominio de las Ciencias*, 7(3), 1120–1138. <https://doi.org/10.23857/dc.v7i3.2045>
21. Centro Nacional de Física de Partículas Astropartículas y Nuclear (CPAN). (2023). Sobre el colapso de la función de onda en el experimento de la doble rendija. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). <https://www.i-cpan.es/es/content/sobre-el-colapso-de-la-función-de-onda-en-el-experimento-de-la-doble-rendija>
22. Chakrabarti, K. K. (2019). *Classical Indian Philosophy of Mind: The Nyāya Dualist Tradition*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780190050856.001.0001>
23. Chalmers, A. F. (2013). *What Is This Thing Called Science?* (4th ed.). Hackett Publishing Company, Inc. <https://hackettpublishing.com>
24. Clagett, M. (1959). *The Science of Mechanics in the Middle Ages*. University of Wisconsin Press.
25. Clagett, M. (1999). *Ancient Egyptian Science: A Source Book. Volume Three: Ancient Egyptian Mathematics* (Vol. 232). American Philosophical Society. <https://amphilsoc.org>
26. Clausius, R. (1865). *The Mechanical Theory of Heat: With*



- Its Applications to the Steam-engine and to the Physical Properties of Bodies. John van Voorst.
27. Cohen, I. B. (1985). *The Birth of a New Physics* (Revised and updated). W. W. Norton & Company.
 28. Cohen, I. B., & Whitman, A. (1999). *The Principia: A New Translation and Guide*. University of California Press.
 29. Cullen, C. (2017). *Heavenly Numbers: Astronomy and Authority in Early Imperial China*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198733119.001.0001>
 30. da Silva, C. A. R., Santos, A. B., Oliveira, M. L., & Souza, P. R. (2026). Comparative Analysis of Contemporary Quantum Computer Processors: Architectures, Performance, and Perspectives. *IEEE Access*, 14, 36348–36367. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2026.11421923>
 31. de Broglie, L. (1924). *Recherches sur la théorie des quanta*. Sorbonne University.
 32. Dear, P. (2019). *The Scientific Revolution: A Very Short Introduction*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/actrade/9780198739104.001.0001>
 33. Durante, M., & Paganetti, H. (2022). Nuclear physics in particle therapy: a review. *Reports on Progress in Physics*, 85(1), 16701. <https://doi.org/10.1088/1361-6633/ac3ed0>
 34. Einstein, A. (1905a). Ist die Trägheit eines Körpers von seinem Energieinhalt abhängig? *Annalen der Physik*, 323(13), 639–641. <https://doi.org/10.1002/andp.19053231314>
 35. Einstein, A. (1905b). On a Heuristic Point of View Concerning the Production and Transformation of Light. *Annalen der Physik*, 322(6), 132–148.
 36. Einstein, A. (1905c). Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, 322(10), 891–921. <https://doi.org/10.1002/andp.19053221004>
 37. Einstein, A. (1916). Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie [El fundamento de la teoría general de la relatividad]. *Annalen der Physik*, 354(7), 769–822. <https://doi.org/10.1002/andp.19163540702>
 38. Empresa Pública Petroecuador. (2025). Informe técnico de evaluación sobre el derrame de 25.116 barriles de crudo por rotura del oleoducto SOTE en el sector El Vergel. <https://www.eluniverso.com/noticias/economia/derrame-petroleo-esmeraldas-vergel-sote-petroecuador-nota/>
 39. ESA/Hubble & NASA. (2023). Hubble Checks in on a Ghostly Neighbor (NGC 6684). <https://esahubble.org>
 40. Euler, L. (1757). Principes généraux du mouvement des fluides. *Mémoires de l'Académie des Sciences de Berlin*, 11, 274–315.
 41. European Space Agency. (2020). Planck Mission Results. <https://esa.int>





42. Faraday, M. (1839). *Experimental Researches in Electricity*. Richard and John Edward Taylor.
43. Feynman, R. P. (1982). Simulating physics with computers. *International Journal of Theoretical Physics*, 21(6–7), 467–488.
44. Fraunhofer, J. (1817). Bestimmung des Brechungs- und Zerstreuungsvermögens verschiedener Glasarten. *Denkschriften der Königlichen Akademie der Wissenschaften zu München*, 5, 193–226.
45. Freeman, S., Eddy, S. L., McDonough, M., Smith, M. K., Okoroafor, N., Jordt, H., & Wenderoth, M. P. (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(23), 8410–8415. <https://doi.org/10.1073/pnas.1319030111>
46. Galilei, G. (1914). *Dialogues Concerning Two New Sciences* (H. Crew & A. de Salvio, Trans.). Macmillan. <https://oll.libertyfund.org/titles/galilei-dialogues-concerning-two-new-sciences>
47. Galilei, G. (1989). *Sidereus Nuncius (The Sidereal Messenger)* (A. Van Helden, Trans.). University of Chicago Press. <https://octavo.com>
48. Giere, R. N. (2010). *Scientific Perspectivism*. University of Chicago Press. <https://uchicago.edu>
49. Grant, E. (1996). *The Foundations of Modern Science in the Middle Ages: Their Religious, Institutional and Intellectual Contexts*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511817908>
50. Hake, R. R. (1998). Interactive-engagement versus traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics test data for introductory physics courses. *American Journal of Physics*, 66(1), 64–74. <https://doi.org/10.1119/1.18809>
51. Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2014). *Fundamentos de física* (10a ed., Vol. 1). John Wiley & Sons (Grupo Editorial Patria).
52. Heath, T. L. (1897). *The Works of Archimedes*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511695124>
53. Heath, T. L. (1913). *Aristarchus of Samos: The Ancient Copernicus*. Oxford University Press.
54. Heisenberg, W. (1927). Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, 43(3–4), 172–198.
55. Hertz, H. (1887). On Electromagnetic Waves in Air and Their Reflection. *Annalen der Physik*.
56. Hubble, E. (1929). A Relation between Distance and Radial Velocity among Extra-Galactic Nebulae. *Proceedings*



- of the National Academy of Sciences, 15(3), 168–173. <https://doi.org/10.1073/pnas.15.3.168>
57. IBM Quantum. (2023). IBM Quantum Roadmap and Vision for Scalable Quantum Computing.
 58. Institute for the Study of Ancient Cultures. (2026). Highlights from the Collection: Mesopotamia. The University of Chicago. <https://isac.uchicago.edu/collections/highlights/highlights-collection-mesopotamia>
 59. Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. (2026). Artículos por etiqueta: Esmeraldas - IG-EPN.
 60. ITER Organization. (2024). ITER Progress and Fusion Energy Development: Baseline 2024 and Strategic Roadmap. <https://iter.org>
 61. Joule, J. P. (1845). On the Mechanical Equivalent of Heat. Brit. Assoc. Rep. Trans. Chemical Sect, 31.
 62. Karniadakis, G. E., Kevrekidis, I. G., Lu, L., Perdikaris, P., Wang, S., & Yang, L. (2021). Physics-informed machine learning. *Nature Reviews Physics*, 3(6), 422–440. <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00314-5>
 63. Kepler, J. (1609). *Astronomia Nova*. Vögelin.
 64. Kepler, J. (1627). *Tabulae Rudolphinae*. Jonas Saurius.
 65. Kirk, G. S., Raven, J. E., & Schofield, M. (2010). Los filósofos presocráticos: Historia crítica con selección de textos (J. García Fernández, Trad.; 2da revisada). Editorial Gredos.
 66. Kirschner, P. A., Sweller, J., & Clark, R. E. (2006). Why minimal guidance during instruction does not work: An analysis of the failure of constructivist, discovery, problem-based, experiential, and inquiry-based teaching. *Educational Psychologist*, 41(2), 75–86. https://doi.org/10.1207/s15326985ep4102_1
 67. Kumar, A., Sharma, S., Singh, R., & Gupta, P. K. (2026). Graphene oxide as smart sustainable nanomaterial: a versatile multifunctional material with transformative potential in advanced materials science research. *npj Materials Sustainability*, 4(8). <https://doi.org/10.1038/s44296-026-00095-x>
 68. Laplace, P.-S. (1814). *Essai philosophique sur les probabilités*. Courcier. <https://bnf.fr>
 69. Laudij, M. (2026). El Caracol, Chichén Itzá. <https://unesco.org>
 70. Le Goff, J. (2016). ¿Realmente nació la Edad Media?: Sobre la división de la historia en períodos. Akal.
 71. Lederman, N. G. (2007). Nature of Science: Past, Present, and Future. En S. K. Abell & N. G. Lederman (Eds.), *Handbook of Research on Science Education* (pp. 831–879). Lawrence Erlbaum Associates.
 72. Lemaître, G. (1927). *Un univers homogène de masse cons-*





tante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extragalactiques [Un universo homogéneo de masa constante y de radio creciente que explica la velocidad radial de las nebulosas extragalácticas]. *Annales de la Société Scientifique de Bruxelles*, 47, 49–59.

73. Lemke, J. L. (2012). Analyzing verbal data: Principles, methods, and problems. En B. J. Fraser, K. G. Tobin, & C. J. McRobbie (Eds.), *Second International Handbook of Science Education* (pp. 1471–1484). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9041-7_94
74. Lombardi, D., Shipley, T. F., Bailey, J. M., Bretones, P. S., Prather, E. E., Ballen, C. J., Knight, J. K., Smith, M. K., Stowe, R. L., Cooper, M. M., Prince, M., Atit, K., Uttal, D. H., LaDue, N. D., McNeal, P. M., Ryker, K., St. John, K., van der Hoeven Kraft, K. J., & Docktor, J. L. (2021). The Curious Construct of Active Learning. *Psychological Science in the Public Interest*, 22(1), 8–43. <https://doi.org/10.1177/1529100620973974>
75. Lorentz, H. A. (1904). Fenómenos electromagnéticos en un sistema que se mueve con cualquier velocidad menor que la de la luz [Electromagnetic phenomena in a system moving with any velocity smaller than that of light]. *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences*, 6, 809–831.
76. Malus, É. L. (1809). Sur une propriété de la lumière réfléchie. *Mémoires de la Société d'Arcueil*, 2, 143–158.
77. Matthews, M. R. (2021). *History, Philosophy and Science Teaching: New Perspectives*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7654-8>
78. Maxwell, J. C. (1865). A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 155, 459–512.
79. McDermott, L. C., & Redish, E. F. (1999). Resource Letter: PER-1: Physics Education Research. *American Journal of Physics*, 67(9), 755–767. <https://doi.org/10.1119/1.19122>
80. Mestre, J. P., Docktor, J. L., Strand, N. E., & Ross, B. H. (2011). Conceptual Problem Solving in Physics. En *Psychology of Learning and Motivation - Advances in Research and Theory* (Vol. 55). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-387691-1.00009-0>
81. Michelson, A. A., & Morley, E. W. (1887). Sobre el movimiento relativo de la Tierra y el éter luminífero [On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether]. *American Journal of Science*, 34, 333–345.
82. Minkowski, H. (1909). Raum und Zeit [Espacio y tiempo]. *Physikalische Zeitschrift*, 10, 75–88.
83. Moebs, W., Ling, S. J., & Sanny, J. (2021). *Física universitaria Volumen 2*. OpenStax. https://openstax.org/books/f%



- C3%ADsica-universitaria-volumen-2/pages/4-5-el-ciclo-de-carnot
84. Museo Galileo. (2026). Instruments: The originals designed and built by Galileo. Istituto e Museo di Storia della Scienza. <https://www.museogalileo.it/en/galileo/instruments-en.html>
 85. Naidu, R. P., Oesch, P. A., Shen, J., & the JWST Team. (2026). Webb pushes boundaries of observable Universe closer to Big Bang. *The Open Journal of Astrophysics*.
 86. NANOGrav Collaboration, Agazie, G., & others. (2023). The NANOGrav 15 yr Data Set: Evidence for a Gravitational-wave Background. *The Astrophysical Journal Letters*, 951(1), L8. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/acdac6>
 87. NASA ESA CSA. (2023a). Cas A (MIRI Image). <https://webb-telescope.org>
 88. NASA ESA CSA. (2023b). Crab Nebula (NIRCam and MIRI Image). <https://webbtelescope.org>
 89. NASA ESA CSA. (2023c). Rho Ophiuchi Cloud Complex. <https://webbtelescope.org>
 90. NASA ESA CSA. (2024). Spiral Galaxy M61 (NIRCam and MIRI Image). <https://webbtelescope.org>
 91. NASA/ESA Hubble Space Telescope. (2022). Hubble Studies a Spectacular Spiral (NGC 1961). <https://nasa.gov>
 92. NASA/ESA Hubble Space Telescope. (2023a). Gravitational Lensing Observations: Dark Matter Distribution in Galaxy Clusters. <https://esahubble.org>
 93. NASA/ESA Hubble Space Telescope. (2023b). Hubble Checks in on a Galactic Neighbor (ESO 174-1). <https://science.nasa.gov/missions/hubble/hubble-checks-in-on-a-galactic-neighbor/>
 94. NASA/ESA Hubble Space Telescope. (2024). A Sparkling Stellar Swarm (NGC 1651). <https://nasa.gov>
 95. National Ignition Facility. (2023). National Ignition Facility 2023 Annual Report: Lawrence Livermore National Laboratory Reports on Fusion Ignition Breakthrough. <https://annual.llnl.gov/fy-2023/national-ignition-facility-2023>
 96. Navier, C.-L. (1822). Mémoire sur les lois du mouvement des fluides. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, 6, 389–440.
 97. Nernst, W. (1906). *The New Heat Theorem: Its Foundations in Theory and Experiment*. Methuen.
 98. Newton, I. (1999). *The Principia: Mathematical Principles of Natural Philosophy* (I. B. Cohen & A. Whitman, Trans.). University of California Press.
 99. OECD. (2023). *PISA 2022 Results (Volume I): The State of Learning and Equity in Education*. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/53f23881-en>





100. Organization, I. (2025). The new ITER baseline, research plan and open R&D issues. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 67(6), 1–60.
101. Ørsted, H. C. (1820). Experiments on the Effect of a Current of Electricity on the Magnetic Needle. *Annals of Philosophy*, 16, 273–276.
102. Pascal, B. (1663). *Traité de l'équilibre des liqueurs et de la pesanteur de la masse de l'air*. Guillaume Desprez.
103. Penzias, A. A., & Wilson, R. W. (1965). A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 Mc/s. *The Astrophysical Journal*, 142, 419–421. <https://doi.org/10.1086/148307>
104. Pérez, J., & González, M. (2024). Modelo estándar de partículas elementales y gravedad. <https://unam.mx>
105. Piaget, J. (1952). *The origins of intelligence in children*. International Universities Press.
106. Piaget, J. (1970). *Psicología y Epistemología*. Ariel.
107. Piaget, J. (1981). *Psicología y pedagogía*. Editorial Ariel.
108. Planck Collaboration. (2020). Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. *Astronomy & Astrophysics*, 641, A6. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201833910>
109. Planck, M. (1901). On the Law of Distribution of Energy in the Normal Spectrum. *Annalen der Physik*, 309(3), 553–563.
110. Plofker, K. (2009). *Mathematics in India*. Princeton University Press. <https://princeton.edu>
111. Poincaré, H. (1905). Sobre la dinámica del electrón [Sur la dynamique de l'électron]. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 140, 1504–1508.
112. Psillos, S. (2011). Choosing the realist framework. *Synthese*, 180(2), 301–316. <https://doi.org/10.1007/s11229-009-9606-9>
113. Quintanilla, M. Á. (2022). *Historia de la tecnología*. Editorial Universitaria Ramón Areces.
114. Raissi, M., Perdikaris, P., & Karniadakis, G. E. (2019). Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational Physics*, 378, 686–707. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>
115. Rashdall, H. (1936). *The Universities of Europe in the Middle Ages* (F. M. Powicke & A. B. Emden, Eds.; New). Oxford University Press.
116. Redish, E. F. (2003). *Teaching Physics with the Physics Suite*. John Wiley & Sons. <https://physport.org>
117. Riess, A. G., & others. (1998). Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmo-



- logical Constant. *The Astronomical Journal*, 116(3), 1009–1038. <https://doi.org/10.1086/300499>
118. Robertson, B. E., Johnson, B. D., Tacchella, S., & others. (2024). Earliest Galaxies in the JADES Origins Field: Luminosity Function and Cosmic Star Formation Rate Density 300 Myr after the Big Bang. *The Astrophysical Journal*, 970(1), 31. <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ad463d>
 119. Rubin, V. C., Ford, W. K., & Thonnard, N. (1980). Rotational Properties of 21 SC Galaxies with a Large Range of Luminosities and Radii. *The Astrophysical Journal*, 238, 471–487. <https://doi.org/10.1086/158015>
 120. Salam, A. (1968). Weak and Electromagnetic Interactions. En N. Svartholm (Ed.), *Elementary Particle Theory: Relativistic Groups and Analyticity (Proceedings of the Eighth Nobel Symposium)* (pp. 367–377). Almqvist & Wiksell.
 121. Schrödinger, E. (1935). Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik [La situación actual en la mecánica cuántica]. *Naturwissenschaften*, 23(48), 807–812.
 122. Schwarzschild, K. (1916). Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie [Sobre el campo gravitacional de un punto de masa según la teoría de Einstein]. *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, 189–196.
 123. Sears, F. W., Zemansky, M. W., Young, H. D., & Freedman, R. A. (2018). *Física universitaria con física moderna* (14a ed., Vol. 1). Pearson Educación.
 124. Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2018). *Física para ciencias e ingeniería* (10a ed., Vol. 1). Cengage Learning.
 125. Silverman, S. (2026). Ancient Inventions: Compass. *Smith College Museum of Ancient Inventions*. https://www.smith.edu/bigbad/historyscitech/museum/ancient_inventions/compass2.html
 126. Stokes, G. G. (1845). On the Theories of the Internal Friction of Fluids in Motion. *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, 8, 287–305.
 127. Sweller, J. (1988). Cognitive load during problem solving: Effects on learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257–285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4
 128. Tanabashi, M., & others. (2018). Review of Particle Physics: Astrophysical Constants and Parameters. *Physical Review D*, 98(3), 30001. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.030001>
 129. Team, N. E. (2026). Physics-informed neural networks for differential equation solutions: A comprehensive review. *Neurocomputing*, 680, 133317. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2026.133317>
 130. The J. Paul Getty Museum. (2024). *Mesopotamia: Civiliza-*





- tion Begins. <https://www.getty.edu/art/exhibitions/mesopotamia/explore.html>
131. The Physics Classroom. (2025). The Inside Story of the Atom. The Physics Classroom, LLC. <https://www.physics-classroom.com/Chemistry-Tutorial/Elements-Atoms-Ions/Inside-Story-of-the-Atom>
 132. The World Bank. (2024). A commitment to education in Latin America and the Caribbean. <https://www.world-bank.org/en/programs/educacion-america-latina-caribe>
 133. UNESCO. (2024). The urgency of educational recovery in Latin America and the Caribbean. <https://unesco.org>
 134. University of Oxford. (2026). All Souls College: Oxford University Architecture. <https://ox.ac.uk>
 135. Valencia-Ocho, G., Acevedo-Peñaloz, C., & Duarte-Forer, J. (2020). Development of methodology for characteristic curves prediction in regenerative pumps. *Aibi, Revista de Investigacion Administracion e Ingenierias*, 8(2), 54–61. <https://doi.org/10.15649/2346030X.756>
 136. van Fraassen, B. C. (1980). *The Scientific Image*. Oxford University Press.
 137. Vereda Alonso, C., Gómez Lahoz, C., García Herruzo, F., Rodríguez Maroto, J. M., & García Delgado, R. A. (2004). Diseño y aplicación de barreras reactivas: para el tratamiento de aguas subterráneas contaminadas. *Ingeniería Química*, (412), 169–176. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=881205>
 138. Villavicencio, A., & Romero, M. (2021). Desigualdades y desafíos de la educación superior ecuatoriana en contextos de vulnerabilidad social. *Revista Andina de Educación*, 4(2), 45–59. <https://doi.org/10.32719/26312816.2021.4.2.6>
 139. Vosniadou, S. (2013). Conceptual Change: A New Look at the Core Issues. En S. Vosniadou (Ed.), *International Handbook of Research on Conceptual Change* (2nd ed., pp. 1–30). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203154472>
 140. Vygotsky, L. S. (1978). *Mind in Society: The Development of Higher Psychological Processes* (M. Cole, V. John-Steiner, S. Scribner, & E. Souberman, Eds.). Harvard University Press.
 141. Watson, J. B. (1913). Psychology as the behaviorist views it. *Psychological Review*, 20(2), 158–177.
 142. Weber, M., & Huiskens, J. (2021). Light-sheet microscopy for imaging biological systems. *Nature Reviews Physics*, 3(2), 113–128. <https://doi.org/10.1038/s42254-020-00273-y>
 143. Weinberg, S. (1967). A Model of Leptons. *Physical Review Letters*, 19(21), 1264–1266. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.19.1264>
 144. Westfall, R. S. (1980). *Never at Rest: A Biography of Isaac*



- Newton. Cambridge University Press.
145. Wetherell, T. (2009). Clockwork Universe.
146. Wheeler, J. A. (1990). A Journey into Gravity and Spacetime. Scientific American Library.
147. Wolfschmidt, G. (1999). Development of astronomical spectroscopy. Deutsches Museum.
148. World Economic Forum. (2020). The Future of Jobs Report 2020. <https://weforum.org>
149. Young, T. (1804). Experiments and calculations relative to physical optics. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 94, 1-16.
150. Zambrano, L., & Moreira, J. (2022). Aprendizaje significativo y contextualización pedagógica en universidades públicas de la región Costa del Ecuador. *Revista Educación y Desarrollo Social*, 16(2), 55-70. <https://doi.org/10.18359/reds.6148>
151. Zapata, F. (2020). Teoría del Big Bang: características, etapas, evidencias, problemas. Lifeder.
152. Zhao, A., Wang, L., Chen, Y., & Zhang, H. (2025). Physics-informed neural networks for physiological signal processing and modeling: a narrative review. *Physiological Measurement*, 46(7), 07TR02. <https://doi.org/10.1088/1361-6579/adb1d3>





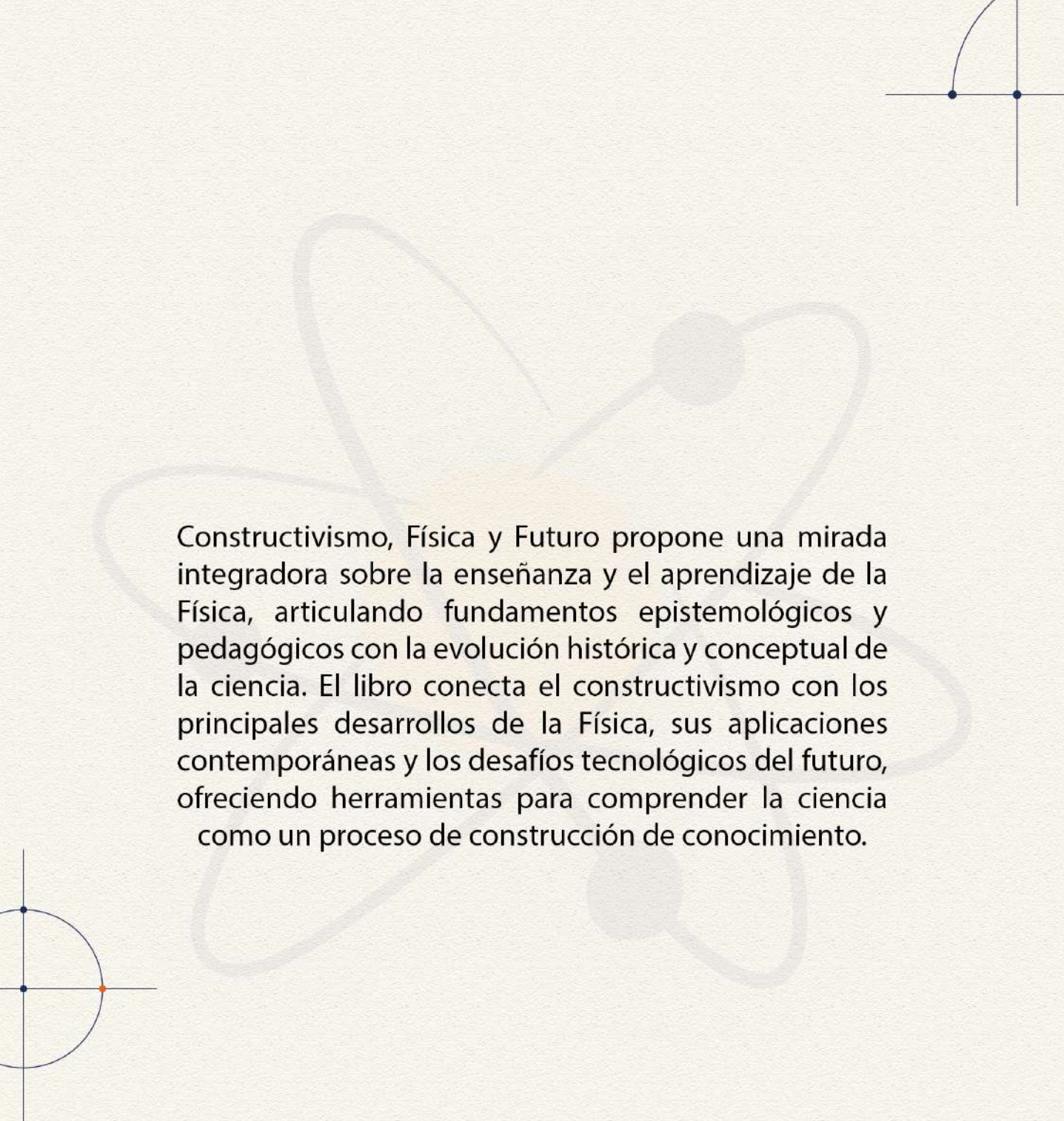
Editorial Queyam es un sello editorial comprometido con la excelencia académica y la difusión del conocimiento. A través de la edición y publicación de libros, revistas científicas y obras especializadas, impulsa la investigación, la innovación y el desarrollo científico, educativo y cultural a nivel nacional e internacional.

<https://grupoqueyam.com/>



Editorial Queyam es signataria del SDG Publishers Compact de las Naciones Unidas, reafirmando su compromiso con la promoción de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) mediante la publicación y difusión de conocimiento que contribuya al desarrollo científico, educativo y social.

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/sdg-publishers-compact-members/>



Constructivismo, Física y Futuro propone una mirada integradora sobre la enseñanza y el aprendizaje de la Física, articulando fundamentos epistemológicos y pedagógicos con la evolución histórica y conceptual de la ciencia. El libro conecta el constructivismo con los principales desarrollos de la Física, sus aplicaciones contemporáneas y los desafíos tecnológicos del futuro, ofreciendo herramientas para comprender la ciencia como un proceso de construcción de conocimiento.