

Elaboración de una guía de estudio sobre el concepto de entropía como fuente de consulta para el aprendizaje autónomo

Katherin Brigith Leguizamón López

Línea de profundización IV: "Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias: Enfoques Didácticos".

Universidad Pedagógica Nacional
Facultad de Ciencia y Tecnología
Licenciatura en Física
Bogotá
2026

Katherin Brigith Leguizamón López

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de Licenciada
en Física

Asesora
Sandra Milena Forero Díaz
Docente Departamento de Física

Universidad Pedagógica Nacional
Facultad de Ciencia y Tecnología
Departamento de Física
Bogotá
2026

*Dedico este trabajo de grado a mi
mami, Eliza,*

*por tu amor, tu nobleza y todo lo
que has hecho por mí.
Gracias por preocuparte siempre
por mi bienestar, por encargarte
de todo y por darme la
tranquilidad de concentrarme en
estudiar y luchar por mis sueños,
muchas veces poniendo los míos
por encima de los tuyos.*

*Te debo mucho de lo que soy hoy.
Este trabajo también es tuyo,
porque detrás de cada logro mío
están tu esfuerzo, tu cuidado y tu
amor.*

Con todo mi amor y gratitud.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi mami Eliza, a mi papi Jaime y a mi tío Alex, por ser incondicionales y acompañarme siempre. Su apoyo constante ha sido fundamental para llegar hasta aquí.

Agradezco de manera muy especial a la profesora asesora, la Dra. Sandra Forero, por su paciencia, dedicación y rigurosidad a lo largo de este proceso. Gracias por ser una guía permanente, por su disposición para orientar cada idea, por su lectura cuidadosa del trabajo y por ayudarme a encontrar siempre la forma de plasmar con claridad lo que quería construir en esta investigación.

También quiero agradecer a mi pareja, Camilo, por su escucha atenta, su compañía y sus consejos durante el desarrollo de este trabajo.

Asimismo, expreso mi agradecimiento a las doctoras expertas que participaron en el proceso de validación, por su lectura atenta, oportuna e intencionada del material, y por sus observaciones, sugerencias y aportes, que contribuyeron de manera significativa al fortalecimiento y consolidación final de la guía de estudio.

Tabla de contenidos

Lista de tablas.....	6
Lista de gráficas.....	6
Lista de figuras.....	6
Introducción	1
Capítulo I. Planteamiento del problema	2
1.1 Descripción del problema y justificación	2
1.2 Objetivos.....	8
1.2.1 Objetivo general	8
1.2.2 Objetivos específicos	8
1.3 Antecedentes.....	9
1.4 Metodología.....	13
1.4.1 Revisión bibliográfica y documental	14
1.4.2 Delimitación conceptual y organización temática.....	15
1.4.3 Diseño y elaboración de la guía de estudio	16
1.4.4 Validación por expertas.....	17
Capítulo II. Marco teórico	18
2.1 Irreversibilidad y espontaneidad: Limitaciones de la Primera Ley de la Termodinámica	19
2.2 Origen histórico del concepto de entropía	21
2.3 La entropía y la formulación de la Segunda Ley de la Termodinámica ...	28
2.3.1 Formulaciones de la Segunda Ley de la Termodinámica	28
2.3.2 La entropía en la teoría termodinámica.....	32
2.3.3 Interpretaciones físicas de la entropía	35
2.3.4 Apertura a la perspectiva estadística de la entropía	39
2.4 Implicaciones epistemológicas y didácticas en la enseñanza del concepto de entropía	42
2.5 Enfoque de aprendizaje autónomo y guías de estudio	45
Capítulo III. Diseño y desarrollo de la guía de estudio.....	47
3.1 Criterios y proceso de elaboración de la guía.....	48
3.2 Estructura y componentes de la guía	50

Capítulo IV. Validación de expertos	60
4.1 Propósito y alcance de la validación.....	60
4.2 Diseño del proceso e instrumento de validación	61
4.3 Resultados de la validación por expertas	63
4.4 Ajustes realizados y consolidación final de la guía	66
Conclusiones y recomendaciones	72
Referencias bibliográficas	76
Apéndices	81
Anexos.....	85

Lista de tablas

Tabla 1 - Definición de entropía en libros de Física. Elaboración propia.....	3
Tabla 2 - Síntesis de comentarios de las expertas y análisis derivado de la validación. Elaboración propia	66

Lista de gráficas

Gráfica 1 - Resultados porcentuales de la primera pregunta de la encuesta inicial..	5
Gráfica 2 - Resultados porcentuales de la segunda pregunta de la encuesta inicial.	6

Lista de figuras

Figura 1 - Dificultades en la comprensión del concepto de entropía identificadas en el análisis documental.	13
Figura 2 - Etapas del trabajo desarrollado.....	18
Figura 3 - Procesos termodinámicos en ciclo ideal de Carnot.....	23
Figura 4 - Ciclo de Carnot	25
Figura 5 - Índice de contenidos de la guía de estudio.....	51
Figura 6 - Introducción del apartado de energía en la guía de estudio	52
Figura 7 - Introducción de la sección de caracterización de sistemas en la guía de estudio.....	53
Figura 8 - - Introducción de procesos termodinámicos y proceso cuasiestático en la guía de estudio	54

Figura 9 - Ejercicio 3.2 en la guía de estudio	54
Figura 10 - Surgimiento del concepto de entropía en la guía de estudio	55
Figura 11 - Interpretación de la entropía en la guía de estudio	56
Figura 12 - Introducción de la sección de acercamiento a la perspectiva estadística de la entropía.....	57
Figura 13 - Cápsula de análisis en la guía de estudio	58
Figura 14 - Ejemplo 4.5 en la guía de estudio	59
Figura 15 - Conclusiones conceptuales del apartado final de la guía de estudio ..	59
Figura 16 - Páginas ajustadas en la guía de estudio	69
Figura 17 - Profundización del concepto de energía interna en la guía de estudio.	70

Introducción

El concepto de entropía ocupa un lugar fundamental dentro de la termodinámica y, al mismo tiempo, constituye uno de los contenidos que mayores dificultades presenta en los procesos de enseñanza y aprendizaje de la física. Su nivel de abstracción, la diversidad de interpretaciones construidas históricamente en torno a él y la manera reducida en que con frecuencia es abordado en algunos materiales de estudio hacen necesario proponer alternativas que favorezcan una comprensión más profunda, articulada y conceptualmente rigurosa. Esta situación adquiere especial relevancia en la formación inicial de profesores de física, en la medida en que comprender la entropía no implica únicamente conocer una definición o una formulación matemática, sino reconocer su relación con otros conceptos fundamentales, como la energía, el calor, la irreversibilidad, el equilibrio y la Segunda Ley de la Termodinámica.

En este contexto, la presente monografía se orientó al diseño de una guía de estudio autónomo sobre el concepto de entropía, concebida como un recurso de consulta para estudiantes de Licenciatura en Física. La propuesta se fundamenta en la revisión de dificultades reportadas en la literatura especializada, en el análisis histórico y conceptual del surgimiento de la entropía y en la consideración de referentes didácticos asociados al aprendizaje autónomo. De este modo, el trabajo no solo buscó aportar un material de apoyo al estudio, sino también organizar un recorrido conceptual que permitiera aproximarse al concepto de manera progresiva, evitando su presentación aislada o exclusivamente formal.

La monografía se estructura en cuatro capítulos. En el Capítulo I se expone el planteamiento del problema, la justificación de la investigación, los objetivos y el análisis de antecedentes sobre las dificultades en la comprensión del concepto de entropía. En el Capítulo II se desarrolla el marco teórico, centrado en el origen histórico del concepto, su formulación en la Segunda Ley de la Termodinámica, algunas de sus interpretaciones físicas, así como sus implicaciones epistemológicas, didácticas y formativas en su enseñanza. En el Capítulo III se

presenta el proceso de diseño, elaboración y estructura de la guía de estudio construida como producto central del trabajo. Finalmente, en el Capítulo IV se aborda la validación por expertas, los principales resultados de esta valoración y los ajustes realizados para la consolidación final del material.

Es importante precisar que el alcance conceptual de este trabajo y por ende del material desarrollado se centra en el abordaje de la entropía desde la Termodinámica clásica, es decir que está construido sobre una narrativa alrededor de como avanza conceptualmente la Termodinámica en términos de reversibilidad e irreversibilidad, espontaneidad, dirección de los procesos y lo que ocurre con la energía en estos. Aunque se incluye una aproximación introductoria a la perspectiva estadística, esta constituye un elemento complementario que permite ampliar la comprensión del concepto desde una mirada microscópica.

Capítulo I. Planteamiento del problema

1.1 Descripción del problema y justificación

El concepto de entropía constituye uno de los pilares fundamental en el estudio de la Termodinámica. No obstante, en los procesos de enseñanza suele percibirse como un concepto abstracto y de difícil comprensión, lo que ha llevado a que, en numerosos textos de estudio de Física, su definición se simplifique a la idea de “medida del desorden de un sistema”. Si bien esta aproximación puede resultar útil en niveles introductorios, puede considerarse reduccionista porque limita el concepto de entropía a una única interpretación, dejando de lado su carácter multifacético.

En efecto, la entropía puede ser abordada desde diversas perspectivas (macroscópica, microscópica, energética y probabilística), cada una de las cuales aporta elementos distintos para la comprensión de los sistemas físicos. Como ocurre con otros conceptos científicos, su significado puede ser diverso, ambiguo e impreciso y, en ciertos casos, incluso inestable, sujeto a debate, reformulación y redefinición (Speltini, 2008). En la tabla 1 se presentan algunas definiciones de

entropía extraídas de textos universitarios de Física, que ilustran esta diversidad de enfoques.

N°	Fuente	Definición de entropía
1	<i>Física universitaria vol 1</i> - (Young & Freedman, 2013)	"La entropía es una medida cuantitativa del desorden" (p.691)
2	<i>Física para la ciencia y la tecnología</i> - (Tipler & Mosca, 2008)	"Existe una función termodinámica denominada entropía S que es una medida del desorden del sistema" (p.566)
3	<i>Física para ciencias e ingeniería</i> - (Serway & Jewett, 2014)	"Los sistemas aislados tienden hacia el desorden y la entropía es una medida de este desorden" (p.624)
4	<i>Física conceptual</i> - (Hewitt, 2007)	"La idea de bajar la "calidad" de la energía está implícita en el concepto de entropía, una medida de la cantidad de desorden en un sistema" (p.356)
5	<i>Termodinámica</i> - (Cengel & Boles, 2015)	"La entropía puede verse como una medida de desorden molecular, o aleatoriedad molecular" (p.344)
6	<i>Física universitaria</i> - (Ling y otros, 2021)	"La entropía, como la energía interna, es una función de estado. Esto significa que cuando un sistema hace una transición de un estado a otro, el cambio en la entropía es independiente de la trayectoria y depende únicamente de las variables termodinámicas de los dos estados." (p.160)
7	<i>Física vol 1</i> - (Resnick y otros, 2001)	"La entropía es una variable macroscópica, asociada con el estado general de un sistema y calculable a partir de cantidades macroscópicas asociadas con su estado general" (p.651)
8	<i>Lecciones de Física de Feynman</i> - (Feynman y otros, 1998)	"En un proceso reversible se absorbe tanto Q/T como se libera; no hay ganancia o pérdida de Q/T . Este Q/T se llama entropía" (p.44-15)

Tabla 1 - Definición de entropía en libros de Física. Elaboración propia

La revisión de estas definiciones devela como a través de ellas se refuerza la idea de la entropía como un concepto aislado, ya que como se observa su definición no se establece desde la relación con un concepto fundamental como lo es la energía, a pesar de estar altamente relacionados, en realidad la entropía es un concepto transversal a diversos campos de la Física. Su comprensión resulta esencial para explicar fenómenos naturales como la irreversibilidad de los procesos térmicos, la tendencia de los sistemas al equilibrio, la eficiencia de las máquinas térmicas y la evolución del universo hacia estados de mayor desorden.

Por otra parte, reducir el estudio de la entropía a su tratamiento matemático, sin considerar su significado físico, empobrece la experiencia de aprendizaje y se

aleja del propósito mismo de la Física como disciplina, el cual consiste en interpretar y modelar los fenómenos naturales de manera significativa (Mendivil, 2010). Esta situación adquiere mayor relevancia en el caso de la formación de futuros docentes de Física, para quienes una comprensión profunda del contenido disciplinar resulta fundamental.

En esta línea, Mellado (2000) señala que el dominio del conocimiento científico que se va a enseñar es una condición indispensable para el ejercicio docente, y advierte que su ausencia puede generar inseguridad y activar emociones negativas que afectan la práctica pedagógica. De manera complementaria, García (1993), plantea que el conocimiento profesional del docente integra no solo la comprensión del contenido disciplinar, sino también la capacidad de transformarlo en conocimiento enseñable. Así, comprender la entropía implica no solo conocer sus definiciones, sino también reconocer sus distintos enfoques, los obstáculos conceptuales que plantea y las estrategias más adecuadas para su enseñanza, lo cual supone situarla en el marco de las transformaciones energéticas, la irreversibilidad de los procesos naturales y el desarrollo de la ciencia misma.

En este sentido, cuando los docentes en formación poseen una comprensión superficial de los conceptos científicos, tienden a reproducir modelos de enseñanza tradicionales centrados en la memorización. Por el contrario, como señalan Mellado et al. (2014), una mayor percepción de autoeficacia en la enseñanza favorece la motivación, el compromiso y la disposición para afrontar contenidos complejos, lo cual repercute positivamente en los procesos de enseñanza y aprendizaje.

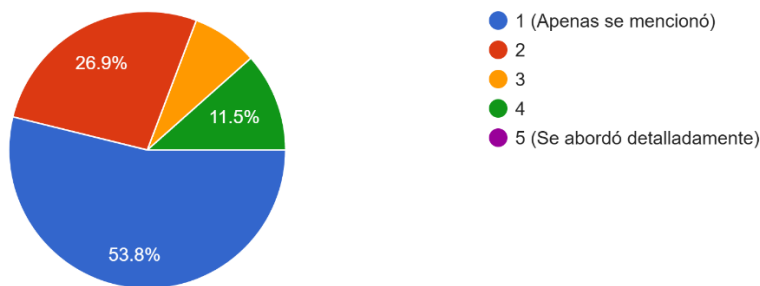
Desde una perspectiva formativa, Ayala (1992) plantea que la formación del profesor de Física no puede equipararse a la del físico profesional, ya que su labor no consiste en producir conocimiento científico, sino en recontextualizarlo en términos pedagógicos y culturales. Desde esta corriente, conocer la Física implica comprender los problemas que dieron origen a sus conceptos, así como los procesos históricos y epistemológicos que los sustentan.

En consecuencia, el dominio riguroso del contenido disciplinar debe constituir un eje central en la formación del profesorado, y los espacios formativos de la Licenciatura en Física deben propiciar el desarrollo de comprensiones profundas que trasciendan las definiciones simplificadas.

En este contexto, surge la necesidad de indagar por la profundidad con la que se aborda el concepto de entropía en los cursos de Termodinámica, así como por el alcance de los aprendizajes logrados por los estudiantes. Para ello, en el marco de este trabajo se aplicó una encuesta a 26 estudiantes del Departamento de Física que habían cursado y aprobado la asignatura de Termodinámica. Los resultados, presentados en la Gráfica 1, sugieren que existen dificultades en la comprensión del concepto, lo que permite inferir posibles limitaciones en su abordaje durante el curso.

En una escala del 1 al 5, durante tu curso de Termodinámica, ¿Consideras que el concepto de entropía fue abordado a profundidad?

26 respuestas

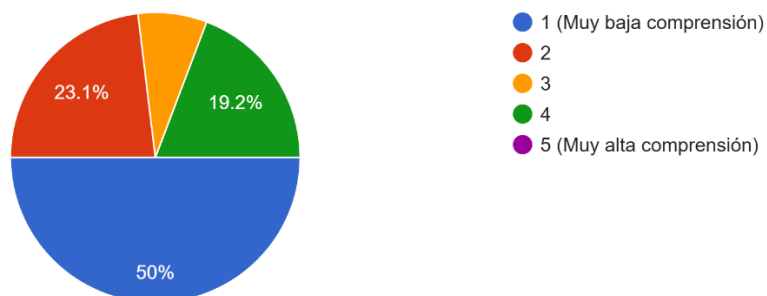


Gráfica 1 - Resultados porcentuales de la primera pregunta de la encuesta inicial. Elaboración propia

De manera complementaria, en la Gráfica 2 se presentan los resultados relacionados con la autopercepción de comprensión del concepto de entropía, en los cuales se evidencian niveles de comprensión que pueden considerarse insuficientes para el estudio posterior de asignaturas como la Física Estadística.

En una escala del 1 al 5, ¿Cómo calificarías tu comprensión del concepto de entropía al finalizar el curso de Termodinámica?

26 respuestas



Gráfica 2 - Resultados porcentuales de la segunda pregunta de la encuesta inicial. Elaboración propia

Estos resultados pueden estar asociados a factores como la organización del tiempo en los cursos, donde frecuentemente se priorizan conceptos como el calor y la temperatura, lo que limita el desarrollo de contenidos relacionados con la segunda ley de la Termodinámica y, en particular, con la entropía. Esta situación puede generar en los estudiantes la percepción de que se trata de un concepto secundario, a pesar de su papel central en la comprensión del comportamiento de los sistemas físicos.

Esta problemática no solo afecta a los estudiantes, sino también a los docentes, quienes se enfrentan al reto de enseñar un concepto complejo cuyo tratamiento en los materiales de estudio no siempre ofrece las condiciones necesarias para una comprensión profunda. Como señalan Flores y Ulloa (2014), la enseñanza de la entropía se ve atravesada por ambigüedades conceptuales que dificultan su apropiación.

En coherencia con lo anterior, Candel Rosell et al. (1984) indican que la comprensión de magnitudes como la entropía requiere, en muchos casos, del apoyo de la Mecánica Estadística y de hipótesis sobre la estructura de la materia. En este sentido, el plan de estudios de la Licenciatura en Física contempla el curso de Física Estadística, en el cual se retoman y profundizan estos conceptos.

A partir de una entrevista realizada a un docente con amplia experiencia en la enseñanza de este curso, se evidenció que los estudiantes presentan dificultades significativas en la comprensión de la entropía, lo que obliga a realizar un abordaje que, en muchos casos, se asemeja más a una introducción que a un repaso. Asimismo, el docente señala la necesidad de fortalecer el tratamiento del concepto desde el curso de Termodinámica y de promover una mayor articulación entre los diferentes espacios formativos, de modo que los estudiantes puedan construir una comprensión progresiva y coherente.

Ante esta situación, el presente trabajo de grado se propone aportar a la comunidad académica del Departamento de Física mediante el diseño de un material de estudio que favorezca la comprensión de la entropía desde una perspectiva conceptual rigurosa y articulada. En particular, se plantea la elaboración de una guía de estudio autónomo dirigida a estudiantes de la Licenciatura en Física de la Universidad Pedagógica Nacional.

La elección de este tipo de recurso se fundamenta en la necesidad de ofrecer un apoyo complementario que permita a los estudiantes abordar el concepto desde el estudio independiente, fortaleciendo su proceso de aprendizaje sin depender exclusivamente de los espacios formales de clase. En este sentido, el aprendizaje autónomo implica que el estudiante asuma un papel activo en la organización y desarrollo de su proceso formativo, gestionando sus recursos, estrategias y tiempos (Lobato, 2006).

Desde esta perspectiva, las guías de estudio constituyen herramientas pedagógicas que orientan el trabajo del estudiante y favorecen la construcción de conocimiento de manera independiente. Como señalan Orozco y Díaz (2018), una guía bien diseñada puede apoyar el aprendizaje incluso en ausencia del docente, sin que ello implique sustituir su papel. Asimismo, Romero y Crisol (2012) destacan que este tipo de recursos responde a enfoques educativos centrados en el estudiante y orientados hacia aprendizajes significativos.

En concordancia con lo anterior, Aguilar (2004) define la guía de estudio como un material educativo que promueve el aprendizaje autónomo y facilita la interacción del estudiante con el contenido mediante recursos didácticos como explicaciones, ejemplos y actividades, que simulan en cierta medida la mediación del docente. De esta forma, la guía propuesta en este trabajo se concibe como un recurso que articula diferentes perspectivas del concepto de entropía, promoviendo una comprensión progresiva, reflexiva y fundamentada.

Finalmente, se plantea la pregunta orientadora del presente trabajo:

¿Cómo elaborar una guía de estudio que aborde con claridad y profundidad el concepto de entropía, de manera que contribuya a los procesos de aprendizaje autónomo en estudiantes de la Licenciatura en Física?

A partir de la pregunta problema se plantean los siguientes objetivos.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Diseñar una guía de estudio autónomo sobre el concepto de entropía, fundamentada en referentes conceptuales, históricos y didácticos, así como en el análisis de dificultades reportadas en la literatura sobre su comprensión, que favorezca el estudio progresivo, articulado y riguroso del concepto y apoye los procesos de aprendizaje autónomo en la formación de Licenciados en Física.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analizar las dificultades en la comprensión del concepto de entropía reportadas en la literatura especializada, con el fin de establecer criterios que orienten el diseño de la guía de estudio.
- Examinar el desarrollo histórico y las distintas interpretaciones del concepto de entropía, con el propósito de construir un enfoque conceptual claro y coherente para su abordaje.

- Diseñar los contenidos, recursos y actividades de la guía articulando explicaciones orientadas al aprendizaje profundo del concepto de entropía.
- Validar la claridad, pertinencia y rigurosidad de la guía mediante juicio de expertos, con el fin de fortalecer su calidad como recurso académico.

1.3 Antecedentes

Al revisar algunos trabajos sobre la enseñanza y el aprendizaje de la entropía, se evidencia que este continúa siendo uno de los conceptos más complejos de abordar en los cursos de Termodinámica. Los antecedentes consultados coinciden en que las dificultades no se limitan al uso de ecuaciones o a la resolución de ejercicios, sino que se relacionan con la comprensión del concepto, su vínculo con la segunda ley y su interpretación en procesos como el equilibrio, la reversibilidad y la irreversibilidad. En este sentido, diversos autores señalan que el problema no radica únicamente en la naturaleza abstracta de la entropía, sino también en la manera en que suele enseñarse y en las ideas que los estudiantes construyen en torno a ella.

En esta discusión, el trabajo de Ayala et al. (1996) resulta relevante, en tanto permite situar la entropía dentro del proceso histórico y conceptual en el que se configura. Los autores destacan cómo, a partir de los aportes de Carnot sobre el funcionamiento de las máquinas térmicas, la reversibilidad y los límites en la conversión de calor en trabajo, se establecieron bases fundamentales para la construcción del concepto. Asimismo, muestran cómo Planck profundizó en la comprensión de los procesos irreversibles y en la formulación matemática de la entropía. Este antecedente permite reconocer que la entropía no debe entenderse como una definición aislada o puramente formal, sino como una construcción conceptual orientada a dar respuesta a problemas físicos concretos.

En esta misma línea, Smith et al. (2009) refuerzan la importancia de incorporar este trasfondo en la enseñanza, al evidenciar que la comprensión de la entropía mejora cuando se aborda en relación con las máquinas térmicas y el ciclo

de Carnot. De este modo, mientras Ayala et al. (1996) permiten comprender el origen histórico y conceptual del concepto, Smith et al. (2009) muestran, desde una perspectiva didáctica, que dicho origen no debería quedar al margen de su enseñanza. En consecuencia, su comprensión requiere no solo formalismo matemático, sino también un contexto conceptual e histórico que le otorgue sentido.

Esta necesidad de una comprensión más profunda se relaciona con lo evidenciado en diversos estudios sobre las dificultades de los estudiantes en el aprendizaje del concepto. Christensen et al. (2009), encontraron que muchos estudiantes tienden a interpretar la entropía como una magnitud que se conserva de manera similar a la energía, y presentan dificultades para aplicarla en el análisis de sistemas sometidos a procesos reversibles e irreversibles. Esta idea coincide con lo reportado por Loverude (2015), quien muestra que los estudiantes no construyen una comprensión coherente de la entropía, sino que movilizan distintos recursos conceptuales que, en ocasiones, resultan contradictorios. Así, más que errores aislados, se evidencia una comprensión fragmentada del concepto.

Por ejemplo, algunos estudiantes interpretan erróneamente el principio de incremento de la entropía, concluyendo que esta no puede disminuir bajo ninguna condición. De manera simultánea, al asociarla con una medida del desorden, llegan a considerar que el equilibrio implica un aumento del orden, lo cual entra en contradicción con la idea anterior y dificulta la comprensión de la tendencia natural de los sistemas hacia el equilibrio.

Brundage et al. (2024) señalan que estas dificultades persisten incluso en niveles avanzados de formación. Entre las confusiones más frecuentes se encuentran la asociación inadecuada entre entropía y energía, así como la interpretación simplificada de que la entropía siempre aumenta, sin considerar las condiciones del sistema. Esto evidencia no solo un desconocimiento de las propiedades de los distintos tipos de sistemas físicos, sino también dificultades para diferenciar procesos espontáneos de aquellos que no lo son. Desde esta

perspectiva, sus resultados refuerzan la necesidad de recuperar el sentido físico del concepto, entendido como una herramienta para explicar aspectos de los procesos termodinámicos que la primera ley, por sí sola, no permite esclarecer.

A estas dificultades se suman las reportadas por Weber et al. (2024), quienes muestran que muchos estudiantes tienen problemas para comprender e identificar procesos reversibles e irreversibles, así como estados de equilibrio y no equilibrio, y para relacionarlos con situaciones termodinámicas concretas. Visto en conjunto, lo que plantean estos autores permite reconocer que la dificultad no está únicamente en definir la entropía, sino en darle sentido físico dentro de los fenómenos donde realmente aparece.

En este punto, el aporte de Ayala et al. (1996) cobra nuevamente relevancia, al evidenciar que la comprensión de la entropía exige vincularla con los problemas físicos que dieron origen a su formulación. De este modo, los antecedentes coinciden en que su enseñanza no puede limitarse a la formulación matemática, ya que las principales dificultades emergen cuando los estudiantes intentan interpretar su significado físico.

Esta preocupación también se evidencia en estudios de revisión como el de Natalis (2024), quien, a partir de una revisión sistemática sobre la enseñanza de la entropía y de la segunda ley de la Termodinámica, identifica como dificultades recurrentes la abstracción del concepto, su complejidad matemática y la desconexión entre explicaciones microscópicas y macroscópicas. Este aporte resulta significativo, en la medida en que consolida tendencias ya identificadas en estudios particulares, mostrando que se trata de un problema extendido en la enseñanza de estos contenidos.

En otras palabras, lo que Christensen et al. (2009), Loverude (2015), Brundage et al. (2024) y Weber et al. (2024) muestran en contextos específicos,

Natalis lo reafirma como parte de un problema más amplio dentro de la enseñanza de estos contenidos.

No obstante, algunos trabajos proponen alternativas de abordaje. Herrmann (2010), por ejemplo, plantea la introducción temprana de la entropía en cursos básicos de Termodinámica, tratándola como una magnitud física comprensible si se presenta de manera adecuada. Su propuesta permite reconocer que parte de la dificultad no radica exclusivamente en la complejidad del concepto, sino también en las decisiones didácticas que orientan su enseñanza.

En conjunto, los antecedentes revisados permiten afirmar que existe un consenso en torno a la complejidad que representa la entropía tanto para su enseñanza como para su aprendizaje. Por un lado, los estudios evidencian confusiones persistentes en torno a su significado y su relación con otros conceptos de la Termodinámica; por otro, muestran que estas dificultades se ven reforzadas por el nivel de abstracción del tema y por enfoques de enseñanza que no siempre favorecen su comprensión física. Asimismo, se destaca la necesidad de recuperar los problemas históricos y conceptuales en los que surge el concepto.

En este contexto, el presente trabajo se inscribe en esta línea de investigación y busca aportar mediante la elaboración de una guía de estudio sobre el concepto de entropía, que tenga en cuenta estas dificultades y organice el contenido de manera clara, articulada y comprensible para estudiantes de Licenciatura en Física.

A partir del análisis documental realizado, fue posible identificar un conjunto de dificultades recurrentes en la comprensión del concepto de entropía, las cuales se sintetizan en la Figura 1.

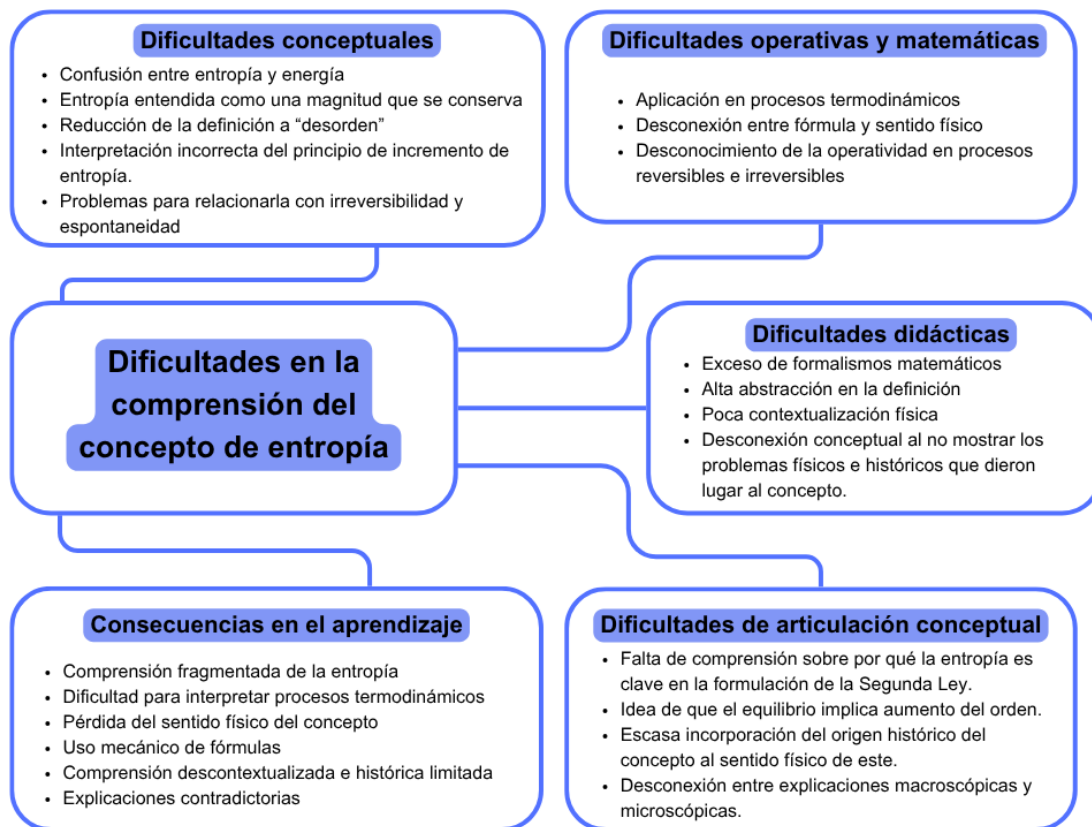


Figura 1 - Dificultades en la comprensión del concepto de entropía identificadas en el análisis documental. Elaboración propia

A pesar de la existencia de investigaciones sobre dificultades conceptuales asociadas a la entropía, todavía son escasos los trabajos orientados específicamente al diseño de materiales de estudio autónomo dirigidos a estudiantes de Licenciatura en Física que articulen dimensiones conceptuales, históricas y didácticas del concepto.

1.4 Metodología

La presente monografía se desarrolló desde un enfoque cualitativo de carácter documental y proyectivo, orientado al diseño y elaboración de una guía de estudio sobre el concepto de entropía para estudiantes de Licenciatura en Física. De acuerdo con Hurtado (2000), las investigaciones proyectivas se caracterizan por

la elaboración de propuestas o recursos que buscan responder a necesidades identificadas dentro de un contexto específico. En este caso, el trabajo se centró en la construcción de un material de apoyo académico fundamentado conceptual y didácticamente, orientado a favorecer el aprendizaje autónomo de uno de los conceptos más complejos de la termodinámica.

El interés principal de la investigación no estuvo dirigido a la medición de variables ni a la implementación experimental de una intervención en aula, sino a la construcción y validación académica de un recurso de consulta elaborado a partir de la revisión de referentes disciplinares, epistemológicos y didácticos relacionados con la enseñanza de la entropía y de la termodinámica. En este sentido, el desarrollo metodológico se organizó en cuatro momentos principales: revisión bibliográfica y documental, delimitación conceptual y organización temática, diseño y elaboración de la guía de estudio, y proceso de validación por expertas.

1.4.1 Revisión bibliográfica y documental

En una primera etapa se realizó una revisión de literatura orientada a identificar antecedentes relacionados con la enseñanza de la entropía, las principales dificultades conceptuales reportadas en estudiantes y profesores, así como discusiones epistemológicas y didácticas sobre la enseñanza de la termodinámica. Para ello, se consultaron libros especializados de física y termodinámica, artículos de investigación en didáctica de las ciencias, estudios sobre aprendizaje de la entropía y documentos relacionados con aprendizaje autónomo y elaboración de guías de estudio.

La revisión permitió reconocer que el concepto de entropía suele presentar dificultades persistentes asociadas a interpretaciones reduccionistas, especialmente aquellas que lo explican únicamente en términos de desorden o caos, dejando en segundo plano aspectos relacionados con irreversibilidad, espontaneidad, dispersión de la energía y equilibrio termodinámico (Candel Rosell

et al., 1984; Loverude, 2015; Natalis, 2024). Asimismo, varios trabajos muestran que en la enseñanza universitaria de la termodinámica predominan enfoques centrados en procedimientos matemáticos y resolución algorítmica de ejercicios, mientras que las discusiones sobre el sentido físico y epistemológico del concepto suelen ocupar un lugar secundario (Flores & Ulloa, 2014).

Además de los referentes específicos sobre termodinámica y entropía, también se revisaron trabajos relacionados con aprendizaje autónomo, elaboración de materiales educativos y diseño de guías de estudio como herramientas de acompañamiento académico (Aguilar, 2004; Crispín et al., 2011; Romero & Crisol, 2012). Estos referentes permitieron identificar características importantes para la organización del material, particularmente en relación con la secuenciación de contenidos, el uso de recursos complementarios y el acompañamiento al estudiante durante el proceso de estudio independiente.

1.4.2 Delimitación conceptual y organización temática

A partir de la revisión documental, se realizó la selección y delimitación de los contenidos que conformarían la guía de estudio. Esta etapa implicó definir qué conceptos debían incluirse, cuál sería el nivel de profundidad de cada apartado y cómo podían organizarse para construir un recorrido progresivo de comprensión alrededor del concepto de entropía.

En este proceso se identificó que la comprensión de la entropía exige la articulación de múltiples conceptos previos, como energía, calor, temperatura, sistemas termodinámicos, variables de estado, procesos termodinámicos, reversibilidad y espontaneidad. Por esta razón, se decidió que la guía no iniciara directamente con la definición de entropía, sino con una serie de apartados que la anteceden orientados a construir las bases conceptuales necesarias para abordar posteriormente la Segunda Ley de la Termodinámica y las distintas interpretaciones del concepto.

La estructura temática de la guía se organizó en dos grandes partes. La primera estuvo orientada a los fundamentos conceptuales necesarios para el estudio de la entropía. La segunda parte se centró específicamente en la formulación del concepto de entropía.

Esta organización respondió tanto a criterios disciplinares como didácticos, ya que se buscó establecer una secuencia conceptual que permitiera al lector construir relaciones progresivas entre los distintos fenómenos y conceptos involucrados en la comprensión de la termodinámica.

1.4.3 Diseño y elaboración de la guía de estudio

Una vez definida la estructura conceptual del material, se inició el proceso de elaboración de la guía. En esta etapa se redactaron los contenidos teóricos, se diseñaron ejemplos y ejercicios, y se incorporaron recursos complementarios orientados a favorecer el estudio autónomo del estudiante.

La construcción de la guía buscó mantener un equilibrio entre rigor conceptual y claridad expositiva. Para ello, se procuró utilizar un lenguaje académico accesible, evitando una presentación excesivamente fragmentada de definiciones y ecuaciones. Asimismo, se incorporaron recursos como cápsulas explicativas, preguntas de reflexión, ejemplos contextualizados, apoyos gráficos, códigos QR con material audiovisual y secciones de conclusiones conceptuales, con el propósito de acompañar progresivamente el proceso de comprensión del lector.

Además, la guía incluye ejercicios de aplicación, situaciones de análisis y un solucionario orientado a que el estudiante pueda contrastar procedimientos y revisar sus resultados. También se diseñó una rúbrica de autoevaluación del aprendizaje, con el fin de promover procesos de autorregulación y reflexión sobre los niveles de comprensión alcanzados durante el estudio del material.

La diagramación final de la guía se realizó mediante la plataforma Canva, herramienta que permitió integrar texto, ilustraciones y apoyos visuales dentro de una composición organizada y coherente con el propósito formativo del documento. Asimismo, algunas ilustraciones presentes en la guía fueron elaboradas con apoyo de la inteligencia artificial ChatGPT de OpenAI, a partir de prompts diseñados específicamente para el contexto del material.

1.4.4 Validación por expertas

Finalmente, la guía fue sometida a un proceso de validación académica mediante la revisión de tres docentes expertas vinculadas a la Universidad Pedagógica Nacional. Dos de ellas pertenecen al campo de la Licenciatura en Física y una al área de Licenciatura en Química; las tres cuentan con formación doctoral y experiencia en enseñanza de las ciencias.

La validación se realizó mediante una rúbrica diseñada para valorar aspectos relacionados con pertinencia conceptual, claridad expositiva, rigor disciplinar, coherencia estructural y relevancia para el aprendizaje autónomo. Además de la valoración general del material, las expertas realizaron observaciones específicas sobre distintos apartados de la guía, identificando fortalezas, posibles imprecisiones conceptuales y sugerencias de ajuste.

Las observaciones derivadas de este proceso permitieron realizar modificaciones relacionadas con precisión conceptual, fortalecimiento de algunos apoyos didácticos, explicitación del público objetivo y revisión de ciertos recursos complementarios. Asimismo, el proceso de validación permitió reconocer que las distintas trayectorias disciplinares de las expertas enriquecieron la lectura crítica del material, evidenciando diferentes formas de aproximarse a conceptos termodinámicos complejos desde campos afines como la física y la química.

En conjunto, el desarrollo metodológico permitió construir una guía de estudio fundamentada tanto en referentes disciplinares y didácticos como en un proceso de

revisión académica orientado a fortalecer la solidez conceptual, la coherencia estructural y el carácter formativo del material elaborado.

Las etapas que conformaron el trabajo se consolidan en la siguiente figura:

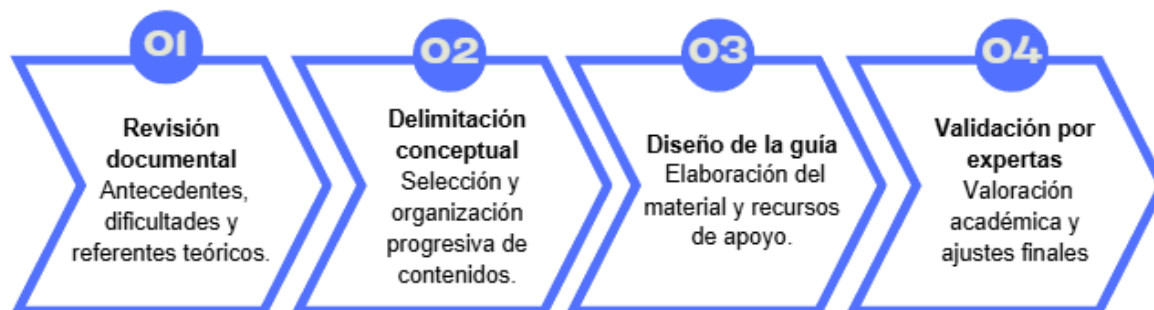


Figura 2 - Etapas del trabajo desarrollado. Elaboración propia

Capítulo II. Marco teórico

El presente capítulo expone los fundamentos conceptuales, históricos, epistemológicos y didácticos que orientan la construcción de la propuesta. En lugar de asumir la entropía como una noción aislada, se la comprende como un concepto articulado con conceptos previos de la termodinámica, tales como energía, sistemas termodinámicos, variables de estado y de proceso, espontaneidad, reversibilidad y máquinas térmicas.

Desde esta perspectiva, el marco teórico no pretende reproducir exhaustivamente todos los contenidos desarrollados en la guía, sino delimitar aquellos núcleos que permiten justificar su enfoque, su organización y su intencionalidad formativa. En este sentido, se abordan la irreversibilidad y la espontaneidad como condiciones para comprender la limitación de la Primera Ley, el origen histórico del concepto de entropía, su formulación en la Segunda Ley de la Termodinámica, algunas de sus interpretaciones físicas y una apertura hacia la perspectiva estadística. Finalmente, se consideran sus implicaciones

epistemológicas, didácticas y su relación con el aprendizaje autónomo, en coherencia con el propósito del trabajo.

2.1 Irreversibilidad y espontaneidad: Limitaciones de la Primera Ley de la Termodinámica

La Primera Ley de la Termodinámica constituye una base fundamental para el análisis de los sistemas termodinámicos, en tanto expresa la conservación de la energía y permite establecer relaciones entre calor, trabajo y energía interna. Gracias a ella es posible describir cuantitativamente los intercambios energéticos y los cambios de estado que experimenta un sistema.

Sin embargo, aunque esta ley resulta indispensable para el estudio de las transformaciones energéticas, no proporciona un criterio suficiente para determinar el sentido en que ocurren los procesos naturales. Como señalan Ayala et al. (1996), el principio de conservación de la energía no permite establecer si un proceso ocurre en una dirección u otra, ni decidir entre estados energéticamente equivalentes cuál es el que efectivamente se realiza en la naturaleza.

Esta limitación se hace evidente al analizar fenómenos cotidianos. El flujo del calor desde un cuerpo caliente hacia uno frío, la expansión de un gas en el volumen disponible o el enfriamiento de un objeto en contacto con el ambiente son ejemplos de procesos que ocurren espontáneamente en un sentido determinado. La espontaneidad, en este contexto, no hace referencia a la rapidez del proceso, sino a la tendencia natural de los sistemas a evolucionar en una dirección específica bajo ciertas condiciones.

Este carácter direccional de los procesos se relaciona con la forma en que la energía participa en las transformaciones. En la experiencia física ordinaria, la energía asociada a estados de mayor “calidad” tiende a transformarse espontáneamente en formas menos aprovechables. Así, por ejemplo, la energía mecánica puede disiparse por fricción en forma de calor, pero el proceso inverso no

ocurre espontáneamente en las mismas condiciones, por ejemplo, al frenar un carro en movimiento, durante este proceso, las ruedas, los rodamientos y cualquier punto donde exista fricción disipan calor. Así, la energía cinética se transforma en energía térmica. Sin embargo, si se intenta calentar un vehículo que está detenido, este no comenzará a moverse, es decir, que la energía térmica, por su parte, no se transforma de manera espontánea en energía cinética (Silvestrini, 1998). Por otro lado, también se reconoce que el calor fluye naturalmente de un cuerpo caliente a uno frío, pero no de uno frío a uno caliente sin intervención externa. En este sentido, la espontaneidad de los procesos muestra que la conservación de la energía no basta para describir completamente el comportamiento físico de los sistemas, porque hace falta también un criterio que permita reconocer hacia dónde evolucionan esos sistemas.

En este contexto emerge la noción de reversibilidad. Un proceso reversible puede entenderse como una idealización en la cual el sistema y sus alrededores podrían regresar exactamente a sus estados iniciales si el proceso se invierte. En contraste, los procesos reales son irreversibles, una vez ocurren, no pueden deshacerse completamente sin dejar cambios en el entorno (Cengel & Boles, 2015).

La irreversibilidad no es una característica excepcional, sino una propiedad general de los procesos naturales. Fenómenos como la fricción, la conducción de calor con diferencias finitas de temperatura, la expansión libre o las reacciones químicas implican disipación de energía y hacen imposible restituir simultáneamente las condiciones iniciales del sistema y del entorno. En este sentido, la irreversibilidad expresa que los procesos naturales poseen una dirección privilegiada.

Desde el punto de vista teórico, la distinción entre procesos interna y externamente reversibles permite precisar esta idea. Un proceso internamente reversible es aquel en el que no hay irreversibilidades dentro del sistema, mientras que uno externamente reversible carece de irreversibilidades en los alrededores. La

reversibilidad completa es, por tanto, una condición ideal que no se alcanza en los procesos reales, pero que resulta fundamental como referencia para su análisis.

A la luz de estas consideraciones, la limitación de la Primera Ley se hace evidente: permite establecer balances energéticos, pero no determina la direccionalidad de los procesos ni las condiciones bajo las cuales estos pueden ocurrir. Como consecuencia, se hace necesario un principio adicional que introduzca restricciones sobre las transformaciones posibles.

En este punto se sitúa la Segunda Ley de la Termodinámica, la cual no solo reafirma la conservación de la energía, sino que establece condiciones sobre su transformación, relacionadas con la espontaneidad, la irreversibilidad y la dirección natural de los procesos. Tal como lo señala Planck (1915), los procesos naturales ocurren en una dirección determinada, lo que implica la existencia de un criterio físico adicional para caracterizar los estados y su evolución.

En consecuencia, el estudio de la espontaneidad, la reversibilidad y la irreversibilidad no constituye un aspecto secundario dentro de la termodinámica, sino una condición necesaria para comprender por qué la conservación de la energía es insuficiente para describir completamente el comportamiento de los sistemas físicos y por qué fue necesario introducir el segundo principio y el concepto de entropía.

2.2 Origen histórico del concepto de entropía

Los principios e ideas más importantes de la Termodinámica se consolidaron en estrecha relación con el desarrollo de la máquina de vapor moderna. En este proceso, el perfeccionamiento técnico realizado por James Watt ocupó un lugar decisivo, pues contribuyó a orientar la atención hacia el funcionamiento de las máquinas térmicas y, progresivamente, hacia el problema de su eficiencia. Como señala Mott-Smith (1964), durante este periodo el interés inicial se centró más en el mejoramiento práctico de estas máquinas que en una reflexión explícita sobre los

límites de su rendimiento, cuestión que, con el tiempo, abriría paso a desarrollos conceptuales de gran importancia para la física.

En este contexto histórico se sitúa la figura de Sadi Carnot. Tras la derrota definitiva de Napoleón, su padre, Lazare Carnot, se exilió en Prusia. Durante ese periodo, padre e hijo sostuvieron conversaciones en torno a las máquinas de vapor y a la importancia estratégica de su perfeccionamiento tanto en el campo militar como en el industrial. Según lo expone *Veritasium en español* (2023), estas circunstancias despertaron en Sadi Carnot un profundo interés por el estudio de las máquinas térmicas francesas, las cuales se encontraban rezagadas frente a los avances alcanzados en países como Gran Bretaña.

A partir de ello, Carnot centró su atención en el problema del límite de eficiencia de una máquina térmica. Una máquina térmica puede entenderse como un dispositivo que utiliza calor para producir trabajo útil, es decir, trabajo capaz de generar movimiento. De acuerdo con Hart (1949), en una máquina térmica se distinguen tres componentes básicos: una fuente caliente, una fuente fría y un agente de trabajo, que corresponde al fluido que se expande y comprime durante su funcionamiento. Por su parte, la eficiencia de una máquina térmica se define como la proporción del calor absorbido de la fuente caliente que logra transformarse en energía mecánica (Silvestrini, 1998).

En esta misma línea, Forero (2013) señala que “Toda máquina térmica consta de una serie de procesos de expansión y compresión de un agente, por ejemplo, el vapor de agua o el gas encerrado en un cilindro. Las condiciones iniciales de presión, volumen y temperatura deben ser iguales al inicio y al final del proceso, constituyendo de esta manera un ciclo”. Con base en estas ideas, Carnot concluyó en 1824 que la máxima eficiencia de una máquina se alcanza cuando no existen pérdidas de calor durante la transferencia entre las fuentes térmicas. A partir de ello formuló el ciclo ideal o ciclo de máxima eficiencia, conocido hoy como ciclo de Carnot, que se puede describir de la siguiente forma:

Para comprender este planteamiento, puede considerarse un recipiente de volumen V que contiene un fluido y cuya parte superior está cerrada por un pistón móvil. Esta es una de las representaciones más simples de una máquina térmica. Su funcionamiento se describe mediante una serie de procesos que conforman el ciclo, esquematizados en la siguiente figura. Donde:

$T_H \rightarrow$ Temperatura de la fuente caliente

$T_C \rightarrow$ Temperatura de la fuente fría

$Q_H \rightarrow$ Calor entregado por la fuente caliente

$Q_C \rightarrow$ Calor cedido a la fuente fría

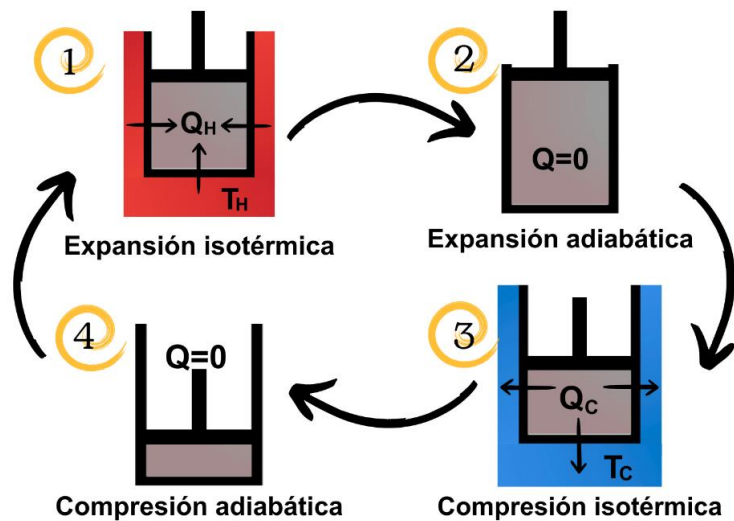


Figura 3 - Procesos termodinámicos en ciclo ideal de Carnot. Elaboración propia

A continuación, se presenta la descripción de los procesos del ciclo y su representación en diagramas P-V, trabajo que se le atribuye a Émile Clapeyron¹.

1. Expansión isotérmica (A $\Rightarrow$ B)

En un primer momento, el fluido se encuentra a una temperatura ligeramente inferior a T_H , que corresponde a la temperatura de la fuente caliente. Suponemos

¹ Émile Clapeyron (1799-1864) fue un ingeniero y físico francés que en 1834 presentó su primera contribución al surgimiento de la termodinámica moderna mediante la publicación de una memoria titulada *Force motrice de la chaleur* (Fuerza motriz del calor). En ella retomaba y desarrollaba matemáticamente las ideas de Sadi Carnot, fallecido dos años antes.

que dicha fuente es un cuerpo de dimensiones mucho mayores en comparación con el recipiente y que permanece a temperatura constante. Al ponerla en contacto con el sistema, la fuente comienza a transferir una cantidad de calor Q_H . Este calor es empleado exclusivamente en la expansión del gas, lo que se traduce en un proceso a temperatura constante y allí se genera el desplazamiento del pistón. Durante este proceso, el agente realiza trabajo hacia el exterior.

2. Expansión adiabática (B => C)

Al retirar la fuente caliente, el fluido continúa expandiéndose debido a la energía interna que tiene acumulada y ahora, como ya no hay intercambio de calor, por consiguiente, su temperatura comienza a disminuir y esta energía se libera en la expansión donde el agente realiza trabajo hacia el exterior ya que sigue desplazando el pistón hacia arriba, idealmente el fluido alcanza la temperatura de la fuente fría.

3. Compresión isotérmica (C => D)

Luego, el recipiente se pone en contacto con la fuente fría la cual está a una temperatura constante T_C y se empuja el pistón hacia abajo, a medida que se comprime el fluido, el calor denominado Q_C se transfiere a la fuente fría, en este proceso se hizo trabajo sobre el agente.

4. Compresión adiabática (D => A)

Por último, se retira la fuente fría y se sigue comprimiendo el fluido aún más, la energía utilizada en la compresión se manifiesta en el cambio de temperatura del fluido, la cual comienza a elevarse hasta volver al estado inicial ligeramente inferior a T_H , en este proceso no hubo intercambio de calor y se realizó trabajo sobre el agente, completando así el ciclo y dando paso a que inicie de nuevo. En la siguiente figura se muestra el diagrama PV del ciclo:

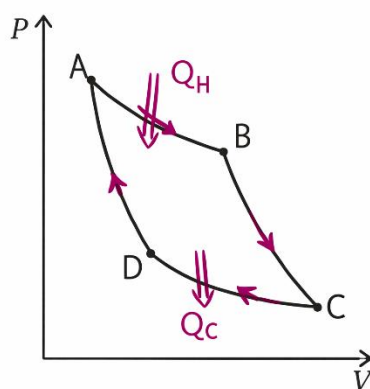


Figura 4 - Ciclo de Carnot. Elaboración propia

Como se puede observar, en el ciclo de Carnot los cambios de temperatura se deben exclusivamente a cambios de volumen, y las transferencias de calor se manifiestan exclusivamente en cambios de volumen, siendo estas, dos condiciones para la máxima eficiencia de la máquina. Asimismo, Carnot también establece que no hay ningún agente de trabajo utilizado en máquinas térmicas que sea mejor que otro, en cuanto a la eficiencia (Forero, 2013).

Uno de los aspectos más relevantes del ciclo de Carnot es su carácter reversible. Si la máquina opera en sentido inverso, puede reproducir los efectos contrarios y retornar al estado inicial al completar el ciclo. Además, los procesos que lo componen son cuasiestáticos, es decir, transformaciones ideales que ocurren de manera infinitamente lenta, de modo que puede suponerse que el sistema pasa por una sucesión de estados de equilibrio (Ben-Naim, 2017). Aunque esta situación no se realiza estrictamente en la práctica, constituye una referencia teórica fundamental para la termodinámica.

En este sentido, el aporte de Carnot fue decisivo porque permitió establecer un límite ideal para la eficiencia de las máquinas térmicas y abrió el camino para formulaciones posteriores de la Segunda Ley de la Termodinámica. Más adelante, Rudolf Clausius profundizó estas ideas y mostró que ninguna máquina térmica puede convertir completamente en trabajo el calor absorbido, principio que

terminaría consolidándose como una de las expresiones fundamentales del segundo principio.

Conviene recordar, además, que la teoría de Carnot se formuló inicialmente dentro del marco de la teoría calórica, según la cual el calor se concebía como una magnitud conservada. En ese contexto, se suponía que el calor fluía desde la fuente caliente hacia la fuente fría y que ese flujo permitía producir trabajo mecánico sin alterar la cantidad total de calor involucrada. Posteriormente, Clausius reinterpretó esta idea a la luz del principio de conservación de la energía y mostró que el trabajo producido por la máquina corresponde a la transformación de una parte del calor absorbido, por lo que la cantidad de calor cedida a la fuente fría es menor que la inicialmente recibida desde la fuente caliente.

A partir del análisis de los ciclos ideales, desarrolló una relación entre el calor intercambiado y la temperatura absoluta a la que ocurre la transferencia, idea que inicialmente tenía un carácter matemático (Mott-Smith, 1964) y que se deriva de la ecuación fundamental del ciclo ideal (ecuación 1).

$$\frac{Q_H}{Q_C} = \frac{T_H}{T_C} \quad (1)$$

De manera equivalente:

$$\frac{Q_H}{T_H} = \frac{Q_C}{T_C} \quad (2)$$

Para Clausius, esta relación tenía un profundo significado físico. Al analizar los ciclos reversibles, observó que la suma cíclica de la cantidad $\frac{\delta Q}{T}$ se anulaba al finalizar el ciclo, lo que indicaba la existencia de una nueva magnitud termodinámica

asociada a esta relación. Con base en ello, en 1865 formuló la conocida desigualdad de Clausius:

$$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0 \quad (3)$$

La desigualdad de Clausius constituye uno de los resultados fundamentales en el análisis de los ciclos termodinámicos y es válida tanto para ciclos reversibles como irreversibles. Cada intercambio de calor entre el sistema y su entorno ocurre en cantidades diferenciales, de manera que la integral cíclica de $\frac{\delta Q}{T}$ puede interpretarse como la suma de todas esas pequeñas transferencias de calor, divididas entre la temperatura en la frontera del sistema en el instante en que ocurre cada intercambio.

Esta expresión indica que, en un ciclo reversible, el valor de la integral es exactamente cero, mientras que, en un ciclo irreversible, resulta negativo. En otras palabras, los procesos reales, al involucrar irreversibilidades, no pueden convertir completamente el calor en trabajo ni operar sin pérdidas asociadas a fenómenos como la fricción, la disipación o la transferencia de calor con diferencias finitas de temperatura. Por ello, la igualdad corresponde al caso reversible ideal, mientras que la desigualdad caracteriza a los ciclos irreversibles.

A partir de este razonamiento, Clausius concluyó que la expresión $(\frac{\delta Q}{T})_{rev}$ puede asociarse al diferencial de una propiedad termodinámica del sistema. Así, en 1865, Clausius reconoció que había identificado una nueva propiedad

termodinámica del sistema y decidió denominarla entropía, cuya definición diferencial es:

$$ds = \left(\frac{\delta Q}{T}\right)_{rev} \quad (4)$$

La elección del término fue justificada por el propio Clausius en los siguientes términos:

Prefiero acudir a las lenguas muertas para los nombres de magnitudes científicas importantes, para que tengan el mismo significado en todas las lenguas vivas. En consecuencia, propongo llamar a S la entropía de un cuerpo, que en griego significa «transformación». He acuñado deliberadamente la palabra entropía por su similitud con energía, porque ambas magnitudes son tan análogas en su significado físico que una analogía terminológica me parece útil. (Ben-Naim, 2017, págs. 40-41).

De esta manera, el concepto de entropía no surge como una definición aislada, sino como el resultado de un proceso histórico y conceptual orientado a comprender las limitaciones en la transformación del calor en trabajo y la direccionalidad de los procesos naturales. Precisamente por ello, su estudio exige considerar no solo su formulación matemática, sino también el problema físico e histórico del que emerge.

2.3 La entropía y la formulación de la Segunda Ley de la Termodinámica

2.3.1 Formulaciones de la Segunda Ley de la Termodinámica

La Segunda Ley de la Termodinámica introduce una condición adicional para la comprensión de los procesos físicos: no basta con que la energía se conserve, sino que también es necesario considerar cómo ocurren las transformaciones y en qué sentido pueden darse. En este marco, un proceso físico solo puede tener lugar si satisface tanto la Primera como la Segunda Ley. Mientras la primera establece relaciones de conservación, la segunda introduce restricciones asociadas a la

direccionalidad de los procesos, su irreversibilidad y las condiciones bajo las cuales son posibles.

Desde esta perspectiva, la energía no solo posee cantidad, sino también calidad, idea que resulta fundamental para comprender por qué no toda transformación energética puede ocurrir de cualquier manera. Así, la Segunda Ley pone de manifiesto que la conservación de la energía, por sí sola, no basta para explicar completamente el comportamiento de los sistemas termodinámicos.

Dentro de la teoría termodinámica, la Segunda Ley suele expresarse a través de dos formulaciones clásicas: el enunciado de Kelvin-Planck y el enunciado de Clausius. El primero establece que es imposible construir un dispositivo que opere en un ciclo y reciba calor de una sola fuente para producir una cantidad neta de trabajo. En otras palabras, no es posible convertir íntegramente en trabajo útil todo el calor absorbido por un sistema cíclico. Çengel y Boles (2015) formulan este enunciado al señalar que ninguna máquina térmica puede producir trabajo neto mientras intercambia calor con un solo depósito térmico. Esto implica que siempre debe existir una fracción de energía que no se transforme en trabajo y que, por tanto, sea rechazada o transferida de otra forma.

Este enunciado resulta importante porque permite reconocer que existe un límite físico en la transformación del calor en trabajo. En términos más generales, muestra que la Segunda Ley no se refiere únicamente a la conservación de la energía, sino también a las condiciones bajo las cuales pueden realizarse ciertas transformaciones. Ayala et al. (1996), señalan que las formulaciones del segundo principio centradas exclusivamente en afirmar que no todo el calor puede convertirse en trabajo no alcanzan, por sí solas, a expresar plenamente su carácter universal ni la necesidad del concepto de entropía. No obstante, sí permiten reconocer un aspecto decisivo: la naturaleza impone restricciones a las transformaciones posibles, y dichas restricciones no quedan contenidas en el principio de conservación de la energía.

La segunda formulación clásica corresponde al enunciado de Clausius, según el cual es imposible construir un dispositivo cuyo único efecto sea transferir calor de un cuerpo de menor temperatura a otro de mayor temperatura. Esto significa que el calor fluye espontáneamente de una región de mayor temperatura a otra de menor temperatura, y no al contrario. Ello no implica que no sea posible transferir calor desde un cuerpo frío hacia uno caliente, sino que esa transferencia no ocurre de manera espontánea y requiere intervención externa. En la práctica, esto es lo que sucede en dispositivos como los refrigeradores, cuyo funcionamiento exige aporte de trabajo desde el exterior.

Aunque los enunciados de Kelvin-Planck y Clausius parecen referirse a situaciones distintas, ambos expresan una misma restricción física fundamental. Son equivalentes en sus consecuencias, de modo que cualquiera de ellos puede emplearse como formulación de la Segunda Ley. Un dispositivo que violara el enunciado de Kelvin-Planck violaría también el de Clausius, y viceversa. Por ello, no se trata de dos leyes distintas, sino de dos formas equivalentes de expresar un mismo principio termodinámico. Esta equivalencia es importante porque muestra que la Segunda Ley no se agota en el análisis de motores o refrigeradores, sino que formula una restricción general sobre la dirección y posibilidad de las transformaciones energéticas.

Un aspecto estrechamente relacionado con estas formulaciones es el de las máquinas de movimiento perpetuo. Se denomina así a cualquier dispositivo que viole la Primera o la Segunda Ley. En este contexto, las máquinas que contradicen la Primera Ley corresponden al movimiento perpetuo de primera clase, mientras que aquellas que violan la Segunda Ley corresponden al movimiento perpetuo de segunda clase (Cengel & Boles, 2015). Esta distinción permite comprender, de manera más concreta, que ambos principios imponen límites diferentes: el primero excluye la creación o destrucción de energía, mientras que el segundo excluye ciertas transformaciones completas o ciertos sentidos de transferencia de calor, aun cuando no se vulnere la conservación energética. Un aspecto estrechamente

relacionado con estas formulaciones es el de las máquinas de movimiento perpetuo. Cualquier dispositivo que viole la Primera o la Segunda Ley recibe este nombre. En este marco, las máquinas que contradicen la Primera Ley corresponden al movimiento perpetuo de primera clase, mientras que aquellas que violan la Segunda Ley corresponden al movimiento perpetuo de segunda clase (Cengel & Boles, 2015). La importancia de esta distinción radica en que muestra, de manera más concreta, cómo los dos principios termodinámicos imponen límites distintos, el primero excluye la creación o destrucción de energía, mientras que el segundo excluye ciertas transformaciones completas o ciertos sentidos de transferencia de calor, aun cuando no se viole la conservación energética.

Desde una perspectiva más amplia, estas formulaciones permiten comprender que la Segunda Ley no se limita a una descripción técnica de motores térmicos, sino que introduce una forma particular de interpretar los procesos naturales. Ayala et al. (1996) destacan que, en el planteamiento de Planck, el segundo principio se refiere a la dirección en la que los procesos ocurren en la naturaleza, aspecto que no es considerado por el primero. En consecuencia, la relevancia de los enunciados de Kelvin-Planck y Clausius no reside únicamente en su aplicación a sistemas térmicos concretos, sino en que expresan una restricción general sobre el comportamiento físico de la naturaleza.

En síntesis, las formulaciones clásicas de la Segunda Ley pueden entenderse como expresiones de una misma idea central: la energía no solo se conserva, sino que sus transformaciones están sujetas a condiciones precisas que introducen las nociones de direccionalidad, irreversibilidad y límite físico. Por ello, estos enunciados constituyen la puerta de entrada a una comprensión más profunda de la termodinámica, en la que la entropía adquirirá un papel central como magnitud capaz de expresar de forma más general estas restricciones.

2.3.2 La entropía en la teoría termodinámica

Dentro de la teoría termodinámica, la entropía se introduce como una magnitud que permite abordar de manera más precisa las restricciones que la Segunda Ley impone sobre los procesos naturales. A diferencia de la energía, cuyo tratamiento en la Primera Ley se centra en la conservación y en los balances entre calor, trabajo y energía interna, la entropía aparece ligada a la direccionalidad de los procesos, a la irreversibilidad y a la imposibilidad de que ciertas transformaciones ocurran de manera espontánea en cualquier sentido.

Una característica fundamental de la entropía es que se trata de una propiedad de estado. Esto significa que, para un estado de equilibrio dado, el sistema posee un valor definido de entropía, y que el cambio de entropía entre dos estados depende únicamente de los estados inicial y final, no de la trayectoria seguida para pasar de uno a otro. En este punto, la entropía se diferencia de manera clara del calor y del trabajo, ya que estas últimas no son propiedades del sistema, sino modos de transferencia de energía. Así como la energía interna es una propiedad del sistema y lo que se define operativamente es su cambio, también en el caso de la entropía lo físicamente significativo es su variación entre estados. Como señalan Çengel y Boles (2015), la entropía tiene un valor definido para cada estado y su cambio depende únicamente de dichos estados, aun cuando el proceso real haya sido reversible o irreversible.

En el marco de la termodinámica clásica, la variación de entropía se define a partir de una trayectoria internamente reversible entre dos estados. De este modo, el cambio de entropía entre un estado 1 y un estado 2 puede expresarse de la siguiente forma:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T} \quad (5)$$

Esta definición es importante porque permite relacionar la entropía con la transferencia de calor y con la temperatura absoluta, pero al mismo tiempo deja claro que no se está definiendo el calor como una propiedad del sistema. Lo que se hace es utilizar una trayectoria reversible como recurso teórico para establecer una nueva propiedad de estado. Esto resulta coherente con la lógica de la termodinámica, cuyos principios se formulan en términos de transformaciones y cambios entre estados.

Esta formulación permite comprender por qué la entropía se relaciona de manera directa con los procesos reversibles e irreversibles. En un proceso reversible ideal, el cambio de entropía del sistema queda completamente determinado por la transferencia reversible de calor. En los procesos irreversibles, en cambio, aparecen efectos disipativos, como la fricción o la transferencia de calor con diferencia finita de temperatura, que impiden deshacer el proceso exactamente y obligan a distinguir entre la entropía transferida por interacción con el entorno y la entropía generada debido a irreversibilidades internas. Por ello, aunque el cambio de entropía del sistema entre dos estados pueda determinarse, en los procesos reales es necesario considerar también la producción de entropía asociada al carácter irreversible de la transformación.

Desde este punto de vista, el principio de incremento de entropía ocupa un lugar central en la teoría termodinámica. En un sistema aislado, la entropía total nunca disminuye, en cambio, permanece constante en el caso reversible ideal y aumenta cuando el proceso es irreversible. Esto significa que la entropía generada es cero para los procesos reversibles, positiva para los irreversibles y negativa en procesos físicamente imposibles (Cengel & Boles, 2015). Así, la generación de entropía se convierte en un criterio decisivo para clasificar los procesos físicos y

para determinar si un proceso puede ocurrir espontáneamente en una dirección determinada.

La noción de sistema aislado es especialmente importante en esta formulación. Un sistema aislado no intercambia masa, calor ni trabajo con el entorno, por lo que el cambio total de entropía de ese sistema coincide con la entropía generada durante el proceso. Un sistema y sus alrededores pueden analizarse conjuntamente como un sistema aislado, de modo que la variación total de entropía es igual a la suma de los cambios de entropía del sistema y de los alrededores. Bajo esta perspectiva, la entropía total de un sistema aislado compuesto por varios subsistemas es igual a la suma de las entropías de cada una de sus partes, y nunca puede ser menor que cero. Esta formulación permite comprender con mayor claridad por qué la Segunda Ley se vincula con la tendencia de los sistemas hacia el equilibrio.

Otra consecuencia importante de este planteamiento es que la entropía de un sistema particular sí puede disminuir durante un proceso, siempre que esa disminución esté acompañada por un aumento mayor de la entropía en los alrededores, de manera que la entropía total del sistema aislado no decrezca. Esta precisión es fundamental, porque evita la interpretación simplificada según la cual la entropía siempre debe aumentar en cualquier parte del sistema considerada de forma aislada. En rigor, lo que establece la Segunda Ley es que la entropía total de un sistema aislado no disminuye.

En conjunto, la entropía en la teoría termodinámica puede entenderse como una propiedad de estado que permite formular de manera rigurosa la Segunda Ley y analizar el comportamiento real de los procesos. Su importancia no radica únicamente en que sea una nueva magnitud introducida en la teoría, sino en que hace posible distinguir procesos reversibles, irreversibles e imposibles, relacionar los cambios de estado con la transferencia de calor y comprender la tendencia natural de los sistemas aislados a evolucionar hacia estados de equilibrio. De este

modo, la entropía no solo amplía el marco conceptual de la termodinámica, sino que le da a la Segunda Ley una formulación más precisa y operativa para el análisis de los procesos físicos.

2.3.3 Interpretaciones físicas de la entropía

Uno de los aspectos más complejos del concepto de entropía es que, aunque ocupa un lugar central dentro de la Termodinámica, no resulta sencillo ofrecer una definición única y completamente satisfactoria de su significado físico. Esta dificultad no constituye una debilidad del concepto, sino que expresa la amplitud de fenómenos que permite interpretar. Algo semejante ocurre con la noción de energía: aunque no siempre sea posible definirla de manera absoluta, su valor explicativo dentro de la física no disminuye. En el caso de la entropía, su importancia radica en que permite abordar la dirección natural de los procesos, la irreversibilidad y las restricciones asociadas a la transformación de la energía.

Una de las interpretaciones más difundidas presenta la entropía como una medida del desorden. Desde esta perspectiva, cuando un sistema evoluciona espontáneamente, tiende hacia estados más desordenados o aleatorios. Esta interpretación puede resultar útil en un nivel inicial, ya que ofrece una imagen intuitiva para comprender que los procesos espontáneos no suelen conducir a configuraciones más organizadas desde un punto de vista macroscópico. Como se mostró en la Tabla 1, numerosos libros de Física recurren a esta idea al afirmar que la entropía puede entenderse como una medida del desorden molecular o de la aleatoriedad molecular, y la emplean para explicar, por ejemplo, por qué la entropía de una sustancia suele ser menor en estado sólido y mayor en estado gaseoso.

Sin embargo, cuando esta interpretación se toma como definición suficiente del concepto, aparece limitaciones importantes. La noción de desorden pertenece al lenguaje cotidiano y suele depender de apreciaciones subjetivas, visuales o contextuales. Algo puede parecer ordenado o desordenado según el criterio desde

el cual se mire, pero la entropía no depende de ese tipo de juicios externos. En termodinámica, lo decisivo no es si un sistema aparenta estar ordenado o caótico, sino cómo se distribuye la energía en él, qué tan posible es que el proceso ocurra en una dirección determinada y cuál es su relación con el equilibrio. Por ello, reducir la entropía a la idea de desorden puede resultar insuficiente, ya que deja en segundo plano su vínculo con la irreversibilidad, con la dirección de los procesos y con la imposibilidad de transformar completamente cierta cantidad de energía en trabajo útil.

Esta limitación se hace más evidente en procesos concretos. Cuando dos cuerpos a distinta temperatura se ponen en contacto, el calor fluye espontáneamente del más caliente al más frío hasta que ambos alcanzan el equilibrio térmico. Si este fenómeno se interpretara únicamente en términos de orden y desorden, podría afirmarse que el estado final es “más desordenado” que el inicial; sin embargo, esa formulación no explica con precisión qué ocurre físicamente. Desde una perspectiva termodinámica, lo que sucede es que la energía inicialmente más concentrada en uno de los cuerpos se distribuye entre ambos hasta alcanzar una situación más uniforme. En este sentido, el aumento de entropía no debe entenderse solo como un paso hacia el desorden, sino como una transformación en la manera en que la energía se encuentra distribuida y disponible dentro del sistema.

Por esta razón, una interpretación físicamente más rica es la que relaciona la entropía con la calidad de la energía. Desde esta perspectiva, no basta con saber que la energía se conserva; también es necesario reconocer que no toda energía es igualmente útil para producir cambios o realizar trabajo. En los procesos irreversibles, lo que se pierde no es la cantidad de energía, sino su calidad, es decir, su capacidad para transformarse en trabajo útil. Como señalan Çengel y Boles (2015), desperdiciar energía significa convertirla en una forma menos útil, de modo que una unidad de energía de alta calidad puede resultar más valiosa que varias unidades de energía de menor calidad.

Esta idea permite comprender mejor por qué la entropía aumenta en los procesos naturales. Cuando una forma de energía inicialmente más organizada o concentrada se transforma, tiende a pasar a estados en los que disminuye su capacidad de producir trabajo. Un ejemplo claro es la fricción: al empujar una caja sobre una superficie áspera, el trabajo mecánico realizado termina transformándose en calor, elevando ligeramente la temperatura de la caja y del entorno. Aunque la energía no desaparece, sí se degrada, pues ya no puede recuperarse espontáneamente en forma de trabajo mecánico. En este sentido, la entropía puede relacionarse con esa degradación progresiva de la energía.

En esta línea, resulta especialmente fecunda la interpretación de la entropía en términos de dispersión de la energía. Más que referirse al simple desorden, esta idea permite entender la entropía como la tendencia de la energía a distribuirse entre un mayor número de partículas, regiones o configuraciones posibles. Cuando un gas se expande dentro de un recipiente, sus moléculas dejan de ocupar una región limitada y pasan a distribuirse en un volumen mayor; cuando una gota de tinta cae en el agua, el colorante se dispersa espontáneamente en el líquido; cuando un cuerpo caliente se enfría en contacto con el ambiente, la energía térmica se reparte entre un mayor número de partículas. En todos estos casos, el aumento de entropía puede interpretarse como la evolución del sistema hacia estados en los que la energía está más distribuida y, por ello, menos concentrada para producir cambios localizados.

La interpretación en términos de dispersión energética presenta varias ventajas. En primer lugar, mantiene la relación con la Segunda Ley, pues permite comprender por qué los procesos espontáneos ocurren en una dirección definida. En segundo lugar, evita la carga excesivamente intuitiva del término desorden y lo sustituye por una idea más cercana al comportamiento físico real de los sistemas. Finalmente, permite conectar la termodinámica clásica con desarrollos posteriores de la física estadística, en los que se reconoce que los estados de mayor entropía

corresponden también a estados en los que la energía puede distribuirse de un mayor número de maneras a nivel microscópico.

Otro aspecto importante de esta interpretación es su relación con el equilibrio. En la termodinámica clásica, los sistemas aislados evolucionan espontáneamente hacia estados de equilibrio, y esta tendencia puede expresarse en términos de incremento de entropía. Cuando un sistema alcanza el equilibrio, ya no existen gradientes internos capaces de producir espontáneamente nuevos cambios macroscópicos del mismo tipo. En este marco, la entropía permite describir la evolución del sistema hacia estados en los que la energía se encuentra más uniformemente distribuida.

En esta misma línea puede comprenderse la llamada flecha del tiempo, expresión propuesta por Arthur Eddington en *The Nature of the Physical World* (1928). Con ella se alude a la existencia de una dirección privilegiada en la evolución de muchos procesos físicos: el calor no pasa espontáneamente del frío al caliente, los gases no se comprimen por sí solos después de expandirse y la energía tiende a degradarse con el tiempo. Esto no significa que la entropía sea equivalente al tiempo, sino que su incremento ofrece un criterio para reconocer la dirección en la que ocurren los procesos naturales.

En conjunto, estas interpretaciones muestran que la entropía no puede reducirse a una sola imagen intuitiva. La lectura en términos de desorden puede ser útil en un nivel inicial, pero resulta limitada si se toma de manera aislada. En cambio, cuando la entropía se relaciona con la calidad de la energía, con su degradación y con su dispersión, su papel dentro de la termodinámica se vuelve más claro. La entropía aparece entonces como una propiedad vinculada a la irreversibilidad, al equilibrio y a la dirección natural de los procesos. La apertura hacia una interpretación estadística, que se aborda en el siguiente apartado, permitirá profundizar aún más en esta comprensión al conectar la entropía con la multiplicidad de configuraciones microscópicas posibles.

2.3.4 Apertura a la perspectiva estadística de la entropía

Aunque la entropía se introduce en la termodinámica clásica como una propiedad útil para analizar la dirección de los procesos y su irreversibilidad, esta formulación macroscópica no da cuenta directamente de la estructura microscópica de la materia. La teoría termodinámica permite describir el comportamiento global de los sistemas, pero no explica por sí sola por qué los procesos naturales tienden a ocurrir en una dirección determinada. Precisamente allí adquiere relevancia la perspectiva estadística, pues permite interpretar el aumento de la entropía a partir del comportamiento colectivo de un gran número de partículas.

Desde el punto de vista microscópico, un sistema aislado que macroscópicamente parece estar en equilibrio puede presentar una intensa actividad molecular. A cada estado macroscópico de equilibrio le corresponde un gran número de configuraciones microscópicas posibles (Çengel & Boles, 2015). Esta ampliación conceptual fue impulsada de manera decisiva por Ludwig Boltzmann, quien formuló la hipótesis de que la entropía de un sistema en un macroestado determinado está relacionada con el número total de microestados compatibles con ese macroestado, representado por W . Mientras el macroestado describe propiedades observables globales del sistema, el microestado corresponde a una configuración microscópica específica.

Esta relación puede expresarse mediante la conocida ecuación de Boltzmann:

$$S = k \ln W \quad (6)$$

donde k es la constante de Boltzmann. En esta formulación, los estados de mayor entropía son aquellos que pueden realizarse de un mayor número de maneras a nivel microscópico y que, por ello, resultan más probables.

Desde esta perspectiva, la entropía permite comprender a los sistemas físicos en términos de probabilidad. Cuando un sistema está formado por un gran número de partículas, existen innumerables maneras posibles de organizar sus posiciones y velocidades. Cada una de esas configuraciones constituye un microestado. Sin embargo, no todos los macroestados son compatibles con el mismo número de microestados. Algunos pueden realizarse de muy pocas maneras, mientras que otros admiten una enorme cantidad de configuraciones posibles. Por ello, los sistemas no evolucionan al azar entre todos los estados concebibles, sino que tienden hacia aquellos que son estadísticamente más probables, es decir, hacia los que corresponden a un mayor número de microestados.

Esta interpretación permite comprender con mayor profundidad por qué el aumento de entropía se asocia con la dirección natural de los procesos. Un ejemplo clásico es el de un recipiente dividido en dos partes iguales que contiene un gas inicialmente concentrado en una sola mitad. Al retirar la división, el gas se expande y ocupa todo el recipiente. Desde el punto de vista macroscópico, se observa un simple cambio de volumen; sin embargo, microscópicamente, el nuevo estado puede realizarse de un número mucho mayor de maneras que el estado inicial. Por eso el sistema evoluciona espontáneamente hacia ese estado: no porque “busque” el desorden, sino porque se trata de un macroestado estadísticamente mucho más probable. La misma lógica permite comprender fenómenos como la difusión de una gota de tinta en agua o el enfriamiento de un objeto caliente en contacto con el ambiente.

La perspectiva estadística muestra, entonces, que los sistemas evolucionan hacia estados que admiten un mayor número de configuraciones microscópicas y que, por ello, resultan más probables. En este marco, la entropía puede entenderse como una medida de la multiplicidad de microestados asociados a un macroestado. Esta lectura es especialmente valiosa porque conserva la relación con la irreversibilidad y con la direccionalidad de los procesos, pero la fundamenta a partir

de la estructura microscópica de la materia. Así, el aumento de la entropía ya no se interpreta únicamente como una restricción fenomenológica de la termodinámica clásica, sino también como una consecuencia del comportamiento estadístico de la materia.

Además, esta perspectiva permite articularse con la idea de dispersión de la energía desarrollada en el apartado anterior. Desde el punto de vista estadístico, cuando la energía se distribuye entre un mayor número de partículas o configuraciones posibles, el sistema accede a un mayor número de microestados y, en consecuencia, su entropía aumenta. Por ello, la dispersión energética y la probabilidad no son interpretaciones opuestas, sino complementarias: la primera describe macroscópicamente la tendencia de la energía a distribuirse de manera más uniforme, mientras que la segunda explica microscópicamente por qué esos estados son más probables.

Ahora bien, aunque la perspectiva estadística amplía significativamente la comprensión del concepto, no reemplaza la formulación termodinámica clásica. La termodinámica sigue siendo el marco desde el cual se define la entropía como propiedad de estado, se establece el principio de incremento de entropía y se analiza el comportamiento de sistemas macroscópicos sin necesidad de describir individualmente cada partícula. La física estadística, por su parte, aporta un nivel adicional de explicación al mostrar cómo estas regularidades macroscópicas pueden comprenderse a partir del comportamiento colectivo de un gran número de constituyentes microscópicos. En este sentido, la perspectiva estadística no anula la formulación termodinámica, sino que la complementa y la profundiza.

En conjunto, esta apertura a la perspectiva estadística permite comprender que la entropía no es solo una magnitud útil para el análisis termodinámico, sino también una noción que conecta la descripción macroscópica de los procesos con la estructura microscópica de la materia. Gracias a ello, el aumento de entropía puede interpretarse no solo como un criterio de irreversibilidad o como una

tendencia hacia el equilibrio, sino también como la evolución natural de los sistemas hacia estados estadísticamente más probables, compatibles con un mayor número de configuraciones posibles. De este modo, la entropía se consolida como un concepto que articula distintos niveles de comprensión dentro de la física y amplía el alcance explicativo de la Segunda Ley de la Termodinámica.

2.4 Implicaciones epistemológicas y didácticas en la enseñanza del concepto de entropía

La enseñanza de la Física no puede reducirse únicamente a la transmisión de fórmulas, definiciones o procedimientos matemáticos. Implica también una reflexión sobre la manera en que se construyen los conocimientos físicos, los problemas que dieron origen a los conceptos y las formas en que estos han sido interpretados dentro de la comunidad científica. En este sentido, enseñar Física supone asumir una postura epistemológica sobre la naturaleza del conocimiento científico y sobre cómo dicho conocimiento puede hacerse comprensible en contextos educativos. Como señalan Olga Castiblanco y Roberto Nardi (2023), la didáctica de la física no consiste únicamente en adaptar contenidos disciplinares para hacerlos más sencillos, sino en problematizar la relación entre el conocimiento científico, su construcción histórica y las formas en que es enseñado y aprendido.

Desde esta perspectiva, el concepto de entropía representa un desafío particular dentro de la enseñanza de la termodinámica. Su dificultad no radica únicamente en el nivel matemático que puede alcanzar en algunos tratamientos, sino en la complejidad conceptual que implica comprender fenómenos como la irreversibilidad, la espontaneidad o la dirección natural de los procesos. Diversos estudios en enseñanza de la física muestran que los estudiantes suelen asociar la entropía exclusivamente con ideas de desorden, caos o pérdida de energía, construyendo interpretaciones parciales o ambiguas del concepto (Candel Rosell et al., 1984; Christensen et al., 2009; Loverude, 2015). Estas dificultades evidencian que la comprensión de la entropía no depende únicamente del dominio algebraico

de ecuaciones termodinámicas, sino también de la posibilidad de construir relaciones conceptuales entre distintos fenómenos físicos.

En este marco, varios autores han señalado la necesidad de incorporar enfoques históricos y epistemológicos en la enseñanza de la termodinámica. Ayala et al. (1996) muestran que el desarrollo de la Segunda Ley y del concepto de entropía estuvo asociado a problemas físicos concretos relacionados con las máquinas térmicas, la eficiencia y la irreversibilidad. Por ello, comprender el surgimiento histórico del concepto permite reconocer que la entropía no apareció como una definición aislada, sino como respuesta a limitaciones presentes en la explicación de ciertos procesos naturales. Esta perspectiva resulta relevante porque favorece una comprensión menos memorística y más contextualizada de la termodinámica.

De manera semejante, Flores y Ulloa (2014) señalan que en la enseñanza universitaria de la entropía suelen predominar enfoques centrados en el formalismo matemático y en la resolución algorítmica de ejercicios, mientras que las discusiones sobre el sentido físico del concepto ocupan un lugar secundario. Esto puede generar que los estudiantes aprendan a operar ecuaciones sin comprender completamente qué representa la entropía ni por qué constituye una magnitud fundamental dentro de la física. En consecuencia, la enseñanza del concepto exige una articulación entre procedimientos matemáticos, interpretación física y problematización conceptual.

Estas consideraciones tienen implicaciones didácticas importantes. En primer lugar, muestran que el aprendizaje de la entropía requiere establecer relaciones entre múltiples conceptos previos, como energía, calor, temperatura, equilibrio, reversibilidad y procesos termodinámicos. Por ello, la enseñanza del concepto no puede presentarse de manera fragmentada ni desligada de los problemas termodinámicos que le dan sentido. En segundo lugar, evidencian la necesidad de incorporar recursos que permitan al estudiante construir

interpretaciones progresivas del concepto, más allá de la repetición de definiciones. Ejemplos, analogías, situaciones cotidianas, problemas abiertos y discusiones sobre fenómenos físicos pueden favorecer procesos de comprensión más reflexivos y menos mecánicos.

Asimismo, estas discusiones adquieren especial relevancia en la formación de profesores de Física. Como señala Mellado (2000), la formación científica del profesorado no implica únicamente dominio disciplinar, sino también la capacidad de transformar el conocimiento científico en conocimiento enseñable. Esta idea se consideró en el diseño de la guía, en tanto las explicaciones fueron elaboradas procurando claridad conceptual y progresividad, de modo que el estudiante pudiera comprender el concepto abordado y no solo memorizar definiciones. Además, algunas actividades fueron orientadas a que el lector reflexionara sobre cómo podría enseñar el concepto trabajado en determinados apartados, fortaleciendo así la relación entre comprensión disciplinar y futura práctica docente.

En este sentido, comprender las dificultades asociadas al concepto de entropía y reconocer las diferentes formas en que este puede ser interpretado resulta fundamental para futuros docentes que posteriormente deberán abordar estos contenidos en distintos contextos educativos. De manera similar, García (1993) plantea que el conocimiento del profesor incluye no solo saber la disciplina, sino comprender las dificultades de aprendizaje, las formas de representación y las estrategias didácticas necesarias para hacer accesibles los contenidos científicos.

En coherencia con estas ideas, la presente guía de estudio se construyó reconociendo que la comprensión de la entropía exige algo más que el manejo de expresiones matemáticas. Por ello, el material organiza los contenidos de manera progresiva, incorpora explicaciones conceptuales, ejemplos, recursos visuales, preguntas de reflexión y apoyos complementarios orientados a favorecer procesos de estudio autónomo. La intención no fue simplificar excesivamente el concepto, sino ofrecer un recorrido que permitiera articular sus fundamentos físicos, históricos

y termodinámicos, manteniendo un equilibrio entre rigor conceptual y accesibilidad para estudiantes de Licenciatura en Física.

2.5 Enfoque de aprendizaje autónomo y guías de estudio

El aprendizaje autónomo constituye un enfoque especialmente relevante en la educación superior, en la medida en que reconoce al estudiante como sujeto activo de su proceso de formación. Este enfoque implica que el estudiante asuma responsabilidad sobre la organización de su trabajo, la planificación de sus acciones, el seguimiento de sus avances y la evaluación de sus aprendizajes (Lobato, 2006). En este sentido, aprender no se limita a recibir información, sino que supone un proceso consciente de construcción de conocimiento.

La autonomía no debe entenderse como trabajo en soledad ni como ausencia del docente, sino como una forma de aprendizaje en la que el estudiante desarrolla capacidades para tomar decisiones, seleccionar estrategias y construir sentido en relación con los contenidos. Caballero-Cantu et al. (2023) señalan que el aprendizaje autónomo implica dimensiones como la autodirección, la reflexión crítica, la responsabilidad personal y la automotivación, las cuales se articulan en un proceso más amplio de autorregulación.

En este marco, la autorregulación ocupa un lugar central. Crispín et al. (2011) plantean que el estudiante autorregula su aprendizaje cuando toma conciencia de sus procesos cognitivos y socioafectivos, los monitorea y los ajusta en función de sus objetivos. Esto se relaciona directamente con la metacognición, entendida como la capacidad de reflexionar sobre el propio aprendizaje. En la misma línea, Arriola (2001), citado por estas autoras, señala que la autorregulación implica planificar, supervisar y evaluar de manera consciente la actividad de aprendizaje.

Lobato (2006) complementa esta perspectiva al indicar que el aprendizaje autónomo en educación superior se apoya en tres tipos de estrategias: cognitivas,

metacognitivas y de apoyo, estas últimas relacionadas con la persistencia y el control del esfuerzo. Promover este tipo de aprendizaje implica generar condiciones que permitan al estudiante asumir el control de su proceso formativo, desarrollar independencia y mantenerse en aprendizaje continuo.

De esta manera, una guía de estudio no se reduce a un conjunto de preguntas o ejercicios, sino que actúa como un mediador entre el estudiante y el conocimiento. Orienta qué estudiar, cómo hacerlo, con qué recursos apoyarse y qué resultados se esperan del proceso. Como plantean González et al. (2017), este tipo de materiales cumple una función de acompañamiento que favorece la apropiación de los contenidos y el desarrollo de estrategias de aprendizaje. A partir de este marco, la guía de estudio adquiere sentido como herramienta didáctica pertinente para favorecer procesos de aprendizaje autónomo. Romero y Crisol (2012) señalan que, en el contexto de la educación superior, las guías de trabajo autónomo constituyen una herramienta que promueve un aprendizaje más reflexivo y menos memorístico, activo en todo el proceso y orientado a fomentar el aprender a aprender. Además, destacan que, aunque implican mayor dedicación por parte del estudiante, estas guías contribuyen a un mejor aprendizaje y favorecen la reflexión sobre los conocimientos.

De manera complementaria, Orozco y Díaz (2018) plantean que una guía de aprendizaje es un recurso didáctico que promueve el aprendizaje autónomo y cómo ya se mencionó en el planteamiento de la problemática, esta debe aproximar al estudiante el material de estudio y los diversos recursos didácticos necesarios para aprender lo que plantea el docente. Estos autores resaltan, además, que una guía bien diseñada debe presentar una redacción clara y actividades explícitas, de modo que el estudiante pueda realizar las tareas de forma autónoma e independiente. En esa misma línea, señalan que la guía de aprendizaje no solo orienta el trabajo del estudiante, sino que le ayuda a decidir qué estudiar, cómo hacerlo, cuándo hacerlo, con qué recursos apoyarse y qué productos debe obtener a partir de las actividades propuestas. Esto permite entender que la guía de estudio es pertinente para este

trabajo no solo porque organiza contenidos, sino porque media entre el estudiante y el conocimiento, orientando el recorrido que debe seguir para apropiarse de un tema complejo. Tal como retoman González et al. (2017), las guías de estudio cumplen una función de apoyo en la medida en que ofrecen pautas para orientar la apropiación de los contenidos cuando han sido elaboradas con la intención de promover el aprendizaje autónomo. Así, dejan de ser un simple listado de preguntas o tareas y se convierten en un material planificado, tanto en el aspecto lógico como en el científico.

En coherencia con este enfoque, la guía elaborada en esta monografía se concibe como una herramienta que busca favorecer la comprensión progresiva del concepto de entropía mediante un recorrido estructurado, claro y articulado. Dado que se trata de un contenido abstracto y conceptualmente complejo, la guía no se limita a presentar definiciones, sino que incorpora explicaciones, relaciones conceptuales y actividades que orientan al estudiante en su proceso de aprendizaje.

De este modo, la propuesta no solo responde a la necesidad de organizar el contenido disciplinar, sino también a la intención de promover procesos de autorregulación, reflexión y construcción de sentido. En este sentido, la guía se configura como un recurso didáctico que articula los fundamentos conceptuales de la termodinámica con un enfoque de aprendizaje autónomo, contribuyendo a una comprensión más profunda y significativa del concepto de entropía.

Capítulo III. Diseño y desarrollo de la guía de estudio

En este capítulo se presenta el diseño y desarrollo de la guía de estudio elaborada como producto central de la presente monografía. Debido a la extensión del material, no se incluye de manera íntegra en el cuerpo del documento; por ello, en este apartado se presentan fragmentos representativos que permiten evidenciar su estructura, organización y recursos didácticos. La versión completa de la guía puede consultarse en el Apéndice A.

El propósito de este capítulo no se limita a mostrar el producto final, sino a dar cuenta de los criterios conceptuales, didácticos y metodológicos que orientaron su elaboración, así como de la manera en que estos se materializan en la organización y diseño del recurso.

3.1 Criterios y proceso de elaboración de la guía

La elaboración de la guía de estudio se orientó a la construcción de un material didáctico organizado, legible y conceptualmente articulado, dirigido a estudiantes de Licenciatura en Física. Más que reunir información sobre el concepto de entropía, el proceso implicó tomar decisiones fundamentadas sobre la selección, secuenciación y presentación de los contenidos, con el propósito de favorecer una comprensión progresiva del tema.

Un primer criterio de elaboración fue la ***organización secuencial del contenido***. En coherencia con los planteamientos del marco teórico, la guía no inicia directamente con la entropía, sino que desarrolla un recorrido previo que permite establecer las bases conceptuales necesarias para su comprensión. Por ello, se incluyen apartados relacionados con energía, sistemas termodinámicos, variables de estado y de proceso, Primera Ley y análisis de procesos, de modo que el estudiante pueda construir progresivamente el significado del concepto central. Esta organización responde a la necesidad de evitar una presentación fragmentada o descontextualizada del contenido.

Un segundo criterio fue la ***claridad en la presentación del contenido***. En este sentido, se procuró mantener un lenguaje académico accesible, evitando tanto la simplificación excesiva como el uso de formalismos desarticulados. Para favorecer la comprensión, se incorporaron diversos recursos didácticos como introducciones breves, ejemplos desarrollados, recuadros explicativos, preguntas orientadoras y conclusiones parciales. Estos elementos no solo estructuran el contenido, sino que actúan como mediadores en el proceso de aprendizaje.

Un tercer criterio fue la ***integración de recursos de apoyo al estudio***, en coherencia con el enfoque de aprendizaje autónomo. La guía incluye ejercicios, situaciones de análisis, material audiovisual complementario y un solucionario, con el propósito de que el estudiante pueda contrastar sus procedimientos, verificar resultados y profundizar en los contenidos. A diferencia de materiales tradicionales, estos recursos no se presentan como elementos aislados, sino que hacen parte de la secuencia didáctica del documento.

Un cuarto criterio, es el ***uso intencionado de recursos visuales***. La incorporación de esquemas, diagramas y representaciones gráficas no responde únicamente a un criterio estético, sino a la necesidad de apoyar la comprensión de procesos termodinámicos que, por su naturaleza, resultan abstractos. En este sentido, las gráficas diseñadas por la estudiante cumplen una función explicativa y no solo ilustrativa, facilitando la relación entre representaciones y conceptos.

En cuanto al proceso de elaboración, este se desarrolló en varias etapas. En un primer momento, se realizó la revisión conceptual y bibliográfica que permitió delimitar los contenidos centrales y definir la secuencia de la guía. Posteriormente, se llevó a cabo la redacción de los apartados, el diseño de ejemplos, ejercicios y recursos didácticos, así como la construcción de representaciones gráficas que acompañan la explicación de los contenidos.

Finalmente, se realizó la ***diagramación del material mediante la plataforma Canva***, en la que se integraron texto, imágenes y elementos visuales dentro de una estructura coherente y legible. Este proceso permitió consolidar un documento que no solo organiza el contenido conceptual, sino que también favorece su acceso y comprensión.

De este modo, la guía se configura como el resultado de un proceso de elaboración que articula decisiones conceptuales, didácticas y de diseño, orientadas a facilitar el estudio autónomo y la comprensión progresiva del concepto de entropía.

3.2 Estructura y componentes de la guía

La guía de estudio se organiza a partir de una secuencia conceptual progresiva, orientada a que el estudiante pueda aproximarse al concepto de entropía de manera fundamentada. Su estructura responde a la necesidad de construir un recorrido que articule nociones previas, análisis de procesos termodinámicos y formulaciones más complejas del concepto.

En este sentido, la organización del material no obedece a una simple distribución temática, sino a la construcción de un hilo conductor que permite comprender la entropía como respuesta a un problema físico específico. La guía inicia con el abordaje de conceptos fundamentales, como energía y sistemas termodinámicos, y avanza hacia el análisis de la Primera Ley, la irreversibilidad y la Segunda Ley, hasta llegar a la formulación y comprensión del concepto de entropía.

Además de esta secuencia conceptual, la guía incorpora diversos componentes que fortalecen su carácter didáctico. Entre ellos se encuentran:

- Explicaciones conceptuales progresivas
- Ejemplos desarrollados paso a paso
- Representaciones gráficas (como diagramas y esquemas)
- Preguntas de reflexión orientadas a la interpretación
- Ejercicios de aplicación
- Recursos audiovisuales complementarios

Estos componentes no se presentan de manera aislada, sino integrados dentro de la estructura del documento, de modo que cada sección combine explicación, interpretación y aplicación. En particular, las representaciones gráficas elaboradas permiten visualizar procesos termodinámicos y apoyar la comprensión de conceptos abstractos, mientras que las preguntas y ejercicios favorecen la participación del estudiante en su proceso de aprendizaje.

ÍNDICE	2
FUNDAMENTOS CONCEPTUALES PARA EL ESTUDIO DE LA ENTROPIA	
1. Energía	
1.1 ¿Qué es la energía?	3
1.2 Formas de energía	4
1.3 Propiedades de la energía	5
2. Caracterización y análisis de sistemas termodinámicos	
2.1 Tipos de sistemas	6
2.2 Variables de estado	7
2.3 Variables de proceso	8
2.4 Ley cero de la termodinámica	9
2.5 Calorimetría	10
2.6 Primera ley de la termodinámica	11
2.7 Espontaneidad y sentido privilegiado de los procesos	12
3. Procesos termodinámicos	
3.1 Proceso cuasiestático	13
3.2 Proceso adiabático	14
3.3 Procesos con alguna propiedad constante	15
3.4 Ciclo	16
3.5 Operatividad en situaciones con gases ideales	17
FORMULACIÓN DEL CONCEPTO DE ENTROPIA	
4. Entropía	
4.1 Procesos reversibles e irreversibles	18
4.2 Máquinas térmicas	19
4.3 Eficiencia	20
4.4 Ciclo de Carnot	21
4.5 Limitaciones de la Primera Ley de la Termodinámica	22
4.6 Surgimiento del concepto de entropía	23
4.7 La entropía y la Segunda Ley de la Termodinámica	24
4.8 Operatividad y cálculo de la entropía	25
4.9 Sentido físico de la entropía, ¿Qué es la entropía?	26
4.10 Un acercamiento a la entropía desde la perspectiva microscópica	27
SOLUCIONARIO	
CONSIDERACIONES DIDÁCTICAS	
AUTOEVALUACIÓN DEL APRENDIZAJE LOGRADO	
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	

La primera parte de la guía, titulada *Fundamentos conceptuales para el estudio de la entropía*, reúne tres secciones principales que cumplen la función de establecer las bases necesarias para la comprensión del concepto central.

51



Figura 6 - Introducción del apartado de energía en la guía de estudio. Elaboración propia

La segunda sección corresponde a la caracterización y análisis de sistemas termodinámicos, en donde se abordan conceptos como sistema, tipos de sistemas, variables de estado, variables de proceso, Ley Cero, calorimetría, Primera Ley de la Termodinámica y espontaneidad. Su inclusión responde a la necesidad de ofrecer al lector un marco de referencia que le permita reconocer qué se estudia en termodinámica, cómo se describen los sistemas y qué magnitudes intervienen en su comportamiento.

Desde el punto de vista didáctico, esta sección cumple una función organizadora, en la medida en que introduce el lenguaje conceptual necesario para analizar sistemas y procesos termodinámicos, evitando que el estudio de la entropía se realice de manera desarticulada o sin referentes claros.



*Figura 7 - Introducción de la sección de caracterización de sistemas en la guía de estudio.
Elaboración propia*

La tercera sección se centra en los procesos termodinámicos e incluye el tratamiento de procesos cuasiestáticos, procesos adiabáticos, procesos con alguna propiedad constante, ciclos y situaciones operativas con gases ideales. Esta parte prepara al lector para comprender posteriormente la reversibilidad, la irreversibilidad y las condiciones bajo las cuales pueden analizarse las transformaciones entre estados. En términos formativos, esta sección resulta clave porque desplaza el énfasis desde la presentación de definiciones hacia el análisis de procesos. Esto permite que el estudiante no solo describa lo que ocurre en un fenómeno, por ejemplo, que un gas se expande o que cambia su temperatura, sino que pueda relacionarlo con las variables involucradas, las condiciones del proceso y los principios termodinámicos que permiten explicarlo.



Figura 8 - - Introducción de procesos termodinámicos y proceso cuasiestático en la guía de estudio. Elaboración propia

Resuelva...

Ejercicio 3.2

Un litro de gas monoatómico a T ambiente $T_1 = 25^\circ\text{C}$, a $P_1 = 1 \text{ atm}$, se somete a los siguientes procesos:

1. Compresión isotérmica hasta reducir su volumen a la mitad
2. Proceso isocórico hasta regresar a la presión inicial
3. Expansión isobárica hasta regresar al estado inicial

- Grafique el ciclo en un diagrama PV
- Calcule las variables de estado y de proceso, y ubique las magnitudes en las siguientes tablas:

Estado	$V \text{ (m}^3\text{)}$	$P \text{ (Pa)}$	$T \text{ (K)}$
1			
2			
3			

Proceso	$Q \text{ (J)}$	$W \text{ (J)}$	$\Delta U \text{ (J)}$
Ciclo			

Figura 9 - Ejercicio 3.2 en la guía de estudio. Elaboración propia

La segunda gran parte de la guía se titula *Formulación del concepto de entropía* y constituye el núcleo central del material. En esta sección se desarrolla, en primer lugar, la distinción entre procesos reversibles e irreversibles, con el fin de introducir una de las bases conceptuales más importantes para la comprensión de la Segunda Ley.

Posteriormente, se incluyen apartados sobre máquinas térmicas, eficiencia y ciclo de Carnot, los cuales permiten reconocer las restricciones termodinámicas que conducen al problema central del concepto de entropía. En coherencia con el marco teórico, esta secuencia no responde a una acumulación de contenidos, sino a la construcción progresiva del problema físico que da origen al concepto.

A continuación, se aborda de manera explícita el tema de las limitaciones de la Primera Ley de la Termodinámica, seguido por el surgimiento del concepto de entropía y la sección La entropía y la Segunda Ley, en donde se articula el nuevo concepto con la direccionalidad de los procesos y la irreversibilidad.



Figura 10 - Surgimiento del concepto de entropía en la guía de estudio. Elaboración propia

Después de este desarrollo conceptual, la guía incorpora un apartado de operatividad y cálculo de la variación de entropía. Este elemento resulta especialmente relevante, ya que permite evidenciar que la comprensión del concepto no se limita a su formulación cualitativa, sino que también implica su tratamiento matemático en situaciones concretas.

Para fortalecer este proceso, se diseñó una playlist en YouTube con videos de autoría propia (ver Apéndice B), en los que se explican los desarrollos matemáticos asociados a distintos procesos y se analizan problemas típicos presentes en los textos de referencia. Este recurso amplía las posibilidades de estudio y favorece la comprensión autónoma del contenido.

Más adelante, la guía incluye una sección dedicada al sentido físico de la entropía, en la que se problematiza su significado más allá de su expresión formal, y finalmente incorpora un acercamiento a la perspectiva microscópica, con el propósito de ofrecer una apertura hacia la interpretación estadística sin perder el énfasis en la termodinámica clásica.



Figura 11 - Interpretación de la entropía en la guía de estudio. Elaboración propia

4.10 Un acercamiento a la entropía desde la perspectiva microscópica

En termodinámica, la entropía se introduce como una propiedad que permite analizar la energía, la dirección de los procesos y su irreversibilidad, sin mencionar nada acerca de la naturaleza atómica de la materia. De esta forma, se describe el comportamiento global de los sistemas sin explicar su carácter microscópico.

Eso es, precisamente, el llamado límite termodinámico del enfoque clásico, una teoría válida para sistemas macroscópicos en equilibrio, pero que no da cuenta del comportamiento individual de las partículas ni del fundamento estadístico de sus leyes. Superar ese límite conduce naturalmente a la física estadística, que permite comprender la entropía a partir del comportamiento colectivo microscópico y fundamentar así las leyes termodinámicas.

En 1877, yo, Ludwig Boltzmann, comprendí que el hecho de que el calor fluya espontáneamente de un cuerpo frío a uno caliente no es imposible, sino extraordinariamente improbable, tan improbable que, nunca ocurre.

De esta manera, la segunda ley de la Termodinámica puede entenderse como una afirmación de carácter estadístico. Incluso los estados más improbables podrían llegar a presentarse, y en ciertos casos la entropía podría disminuir momentáneamente.

Observe el siguiente video que presenta de manera introductoria los conceptos estadísticos en el desarrollo de la entropía.

Para reflexionar:
Imagina un recipiente dividido en dos partes iguales que contiene un gas inicialmente concentrado en uno de los lados. Cuando se retira la división, el gas se expande ocupando todo el recipiente.
¿Por qué es mucho más probable encontrar el gas distribuido en todo el volumen que concentrado nuevamente en una sola mitad del recipiente?




82

*Figura 12 - Introducción de la sección de acercamiento a la perspectiva estadística de la entropía.
Elaboración propia*

Además de esta organización temática, la guía incorpora diversos componentes orientados a favorecer el aprendizaje autónomo. Entre ellos se encuentran:

- Introducciones conceptuales para cada sección
- Conclusiones parciales que sintetizan ideas clave
- Preguntas de reflexión
- Apartados de operatividad
- Cápsulas de análisis de ideas importantes
- Videos de apoyo mediante códigos QR
- Un solucionario de ejercicios que permite contrastar procedimientos y resultados
- Rúbrica de autoevaluación del aprendizaje

Asimismo, la guía incluye una sección de consideraciones didácticas y otra de autoevaluación del aprendizaje, en la que se diseñó una rúbrica que permite al estudiante valorar sus niveles de comprensión (ver Apéndice C).

En cuanto a los recursos visuales, se destaca que las ilustraciones presentes en la guía, incluyendo los personajes que acompañan el desarrollo del contenido, fueron elaboradas con apoyo de ChatGPT a partir de prompts de elaboración propia. Este elemento no solo aporta al diseño visual del material, sino que también contribuye a hacerlo más cercano y accesible para el lector.



Figura 13 - Cápsula de análisis en la guía de estudio. Elaboración propia

Interpretación del aumento de entropía en un sistema aislado

El principio enunciado anteriormente significa que, si en un sistema no hay intercambio de materia ni de energía con el entorno, los procesos espontáneos solo pueden ocurrir de tal manera que la entropía total permanezca constante o aumente. Permanece constante en el caso ideal de un proceso reversible, y aumenta cuando el proceso es irreversible.

Ejemplo 4.5

Considere un sistema aislado formado por dos cuerpos en contacto térmico, uno a mayor temperatura y otro a menor temperatura. Como el sistema está aislado, no intercambia energía ni materia con el entorno; sin embargo, sí puede ocurrir transferencia de calor entre los cuerpos que forman parte del sistema.

En esta situación, el calor fluye espontáneamente del cuerpo caliente hacia el cuerpo frío hasta que ambos alcanzan una temperatura de equilibrio. Durante este proceso, la energía total del sistema permanece constante, ya que no entra ni sale energía del sistema aislado. No obstante, aunque la energía se conserva, su distribución cambia, la energía inicialmente más concentrada en el cuerpo caliente se dispersa entre ambos cuerpos.

Esta evolución muestra una idea fundamental, y es que el sistema cambia espontáneamente hacia un estado en el que la energía se encuentra más distribuida y en el que ya no existe una diferencia de temperatura capaz de producir el mismo intercambio de manera espontánea. Por ello, la entropía total del sistema aumenta durante el proceso.

Si se quisiera que el calor regresara espontáneamente del cuerpo frío al caliente, el proceso no ocurriría por sí solo, a pesar de que no violaría la conservación de la energía. Esto pone en evidencia que la Primera Ley no basta para explicar el sentido del cambio y que el aumento de entropía en sistemas aislados permite comprender por qué los procesos espontáneos ocurren en una dirección determinada.



65

Figura 14 - Ejemplo 4.5 en la guía de estudio. Elaboración propia

CONCLUSIONES CONCEPTUALES

En esta sección final se profundizó en el carácter operativo, físico e interpretativo de la entropía. A partir de ello, pueden sintetizarse las siguientes conclusiones conceptuales:

- La entropía no solo puede definirse de manera formal, sino también calcularse en distintos procesos termodinámicos, lo que permite analizar cuantitativamente la variación de los sistemas y verificar la coherencia de los resultados con la segunda ley.
- El tratamiento operativo de la entropía muestra que esta magnitud no es un concepto meramente abstracto, sino una herramienta de análisis físico aplicable a cambios de fase, procesos isotérmicos, transformaciones en gases ideales y ciclos termodinámicos.
- La idea de que la entropía es simplemente una medida del desorden resulta insuficiente, ya que puede conducir a interpretaciones ambiguas o subjetivas, especialmente cuando se asocia con apariencias visuales o con nociones cotidianas de orden.
- Desde la perspectiva desarrollada en esta guía, resulta más fecundo interpretar la entropía en términos de dispersión, degradación y pérdida de calidad de la energía, ya que esta lectura permite relacionarla con fenómenos concretos como la fricción, la transferencia de calor y la eficiencia de las máquinas térmicas.
- El equilibrio no debe entenderse como una forma de "orden", sino como el estado hacia el cual los sistemas evolucionan espontáneamente cuando la energía se ha distribuido de forma más uniforme y ya no existen diferencias capaces de producir cambios netos.
- El análisis de situaciones cotidianas y preguntas conceptuales pone de manifiesto que la entropía no es un concepto aislado, sino una noción que atraviesa múltiples fenómenos físicos y obliga a pensar con mayor profundidad las explicaciones termodinámicas.
- Finalmente, el acercamiento al límite termodinámico muestra que la termodinámica clásica describe adecuadamente el comportamiento macroscópico de los sistemas, pero no agota la comprensión del concepto de entropía, ya que su interpretación puede ampliarse al considerar perspectivas más profundas, como la estadística. En ese sentido, el estudio de la entropía enseña que en física ninguna interpretación debe asumirse como definitiva o suficiente por sí sola: cada formulación ilumina un aspecto del fenómeno, pero también abre nuevas preguntas y exige seguir profundizando.

Pregunta para reflexionar

Si a lo largo de la física un mismo concepto puede entenderse desde distintas formulaciones e interpretaciones, ¿cómo saber cuándo una explicación realmente capta el sentido físico de un fenómeno y cuándo es necesario seguir buscando más allá de ella?

84

Figura 15 - Conclusiones conceptuales del apartado final de la guía de estudio. Elaboración propia

En conjunto, la estructura y los componentes de la guía responden a una lógica de construcción progresiva del concepto de entropía. Cada sección cumple una función específica dentro del recorrido general: algunas establecen bases conceptuales, otras introducen problemas termodinámicos relevantes, otras desarrollan el concepto central y otras ofrecen recursos para su aplicación, interpretación y reflexión.

De este modo, la guía se configura no solo como un material organizado, sino como un recurso didáctico que articula profundidad conceptual, claridad expositiva y estrategias orientadas al aprendizaje autónomo.

Capítulo IV. Validación de expertos

4.1 Propósito y alcance de la validación

El proceso de validación tuvo como propósito someter la guía de estudio a una revisión académica externa que permitiera validar su pertinencia conceptual, el rigor disciplinar de sus contenidos, la coherencia estructural de la propuesta, la claridad expositiva del material y su relevancia como recurso de apoyo para el aprendizaje autónomo del concepto de entropía.

En este sentido, la validación se concibió como un espacio de retroalimentación especializada orientado, por una parte, a respaldar académicamente la guía y, por otra, a identificar observaciones y sugerencias que permitieran fortalecer su versión final. Más que un procedimiento de verificación cerrada, este proceso se asumió como una instancia de lectura crítica y de diálogo académico en torno al material elaborado.

El alcance de esta validación se centró en la calidad conceptual, didáctica y formativa del material elaborado. Por ello, no se trató de un proceso de implementación con estudiantes ni de una evaluación de impacto en aula, sino de una revisión experta del documento como recurso de consulta dirigido a estudiantes

de Licenciatura en Física. Desde esta perspectiva, la validación permitió examinar la solidez del tratamiento del concepto de entropía, la articulación entre sus secciones y la pertinencia de la guía como apoyo para procesos de estudio autónomo.

4.2 Diseño del proceso e instrumento de validación

El proceso de validación se llevó a cabo con la participación de tres docentes expertas, seleccionadas por su conocimiento del tema y por su formación académica en campos afines a las ciencias y su enseñanza. Dos de ellas son Licenciadas en Física y una es Licenciada en Química; además, las tres cuentan con formación doctoral y son profesoras de planta de la Universidad Pedagógica Nacional.

La participación de una experta proveniente del campo de la Química no se entendió como una dificultad para el proceso, sino como una posibilidad de enriquecer la revisión desde un lugar disciplinar cercano, pero no idéntico, al de la Física. En efecto, su lectura puso en evidencia que en torno a algunos conceptos de la termodinámica existen énfasis, usos y tradiciones interpretativas que no siempre coinciden plenamente entre disciplinas. Lejos de deslegitimar la solidez de la guía, esta diferencia permitió reconocer con mayor claridad el lugar epistemológico y disciplinar desde el cual el material fue construido, al tiempo que aportó elementos valiosos para precisar formulaciones, matizar ciertos usos del lenguaje y fortalecer la explicitación del enfoque asumido.

De este modo, la validación no solo reunió experticia en el campo específico de la Física, sino también una mirada complementaria que contribuyó a problematizar algunos conceptos desde otra tradición de enseñanza de la termodinámica. Esta pluralidad de lecturas fortaleció el proceso, pues permitió contrastar la consistencia del material frente a diferentes formas de comprender y enseñar nociones compartidas por varios campos de las ciencias.

A cada experta se le hizo llegar una carta de invitación en la que se explicaba el propósito de la valoración, el objetivo del proyecto y una breve descripción del material a revisar. Junto con ello, se envió la guía de estudio completa y la rejilla de valoración correspondiente, con el fin de que la revisión pudiera realizarse de manera organizada y con criterios previamente establecidos. De este modo, la validación no se planteó como una apreciación general del documento, sino como un proceso orientado a obtener observaciones específicas sobre sus distintas secciones.

En coherencia con ello, se elaboró una rúbrica de validación por expertas cuyo propósito fue recoger una apreciación fundamentada sobre la calidad conceptual, la coherencia estructural, la utilidad y la pertinencia académica de la guía, de modo que fuera posible realizar ajustes orientados a fortalecer su consistencia teórica y su aporte formativo.

La rejilla fue organizada siguiendo la estructura interna de la guía, de manera que cada sección pudiera ser valorada por separado. Para ello, se incluyeron columnas correspondientes al número y nombre de la sección, así como a cuatro criterios de valoración: pertinencia conceptual de la sección, claridad expositiva y rigor disciplinar de la sección, coherencia con el objetivo del trabajo y relevancia para el proceso de aprendizaje autónomo del concepto. A estos criterios se añadió una columna final de comentarios y sugerencias, pensada para que cada experta pudiera registrar observaciones puntuales sobre fortalezas, debilidades o posibles ajustes del material. Finalmente, se dejó un espacio para comentarios generales al final del instrumento.

De esta manera, se buscó que el proceso de validación no solo ofreciera un juicio general sobre el material, sino también insumos específicos para su revisión y consolidación final. El instrumento empleado en este proceso puede consultarse en el Apéndice D.

4.3 Resultados de la validación por expertas

Las validaciones emitidas por las expertas permiten sostener que la guía fue reconocida, en términos generales, como un material académicamente pertinente, conceptualmente sólido y coherente con el objetivo de constituirse en una fuente de consulta para el aprendizaje autónomo del concepto de entropía. En el conjunto de instrumentos diligenciados predominó una apreciación favorable en los criterios de pertinencia conceptual, claridad expositiva y rigor disciplinar, coherencia con el objetivo del trabajo y relevancia formativa.

Junto con este reconocimiento, se formularon sugerencias orientadas a fortalecer la mediación didáctica del material, la síntesis visual de algunos contenidos y la precisión conceptual de ciertos apartados. Estas observaciones no fueron homogéneas, lo cual resulta comprensible si se considera que las expertas realizaron la valoración desde trayectorias disciplinares y didácticas parcialmente distintas. En particular, una de las lecturas puso de manifiesto diferencias de énfasis y concepción presentes entre la Física y la Química en torno a algunos conceptos termodinámicos. Esta situación no se interpretó como una objeción a la validez de la guía, sino como un elemento que enriqueció el proceso de revisión al permitir contrastar el material con perspectivas cercanas, aunque no idénticas, y al exigir una mayor explicitación del enfoque desde el cual se organiza el tratamiento conceptual.

Con el fin de organizar los principales aportes del proceso de validación, a continuación, se presenta una síntesis analítica de los comentarios emitidos por las expertas, sin embargo, las rejillas de validación emitidas por las expertas se pueden consultar en el Anexo A.

Eje de análisis	Experta 1	Experta 2	Experta 3	Análisis
Valoración global del material	Considera que la guía es un material agradable de leer, claro y ameno, sin perder rigurosidad académica. Destaca la coherencia conceptual y la secuencia entre apartados.	Considera que es un trabajo interesante, pero denso para el formato de una guía de estudio, por lo que recomienda hacerlo más ilustrativo.	Considera que la guía es pertinente, relevante y coherente con el propósito del trabajo, pero señala la necesidad de revisar con mayor cuidado el rigor disciplinar y la problematización conceptual de varios apartados.	La valoración global de las tres expertas fue favorable. No obstante, las observaciones muestran énfasis distintos: mientras dos de las valoraciones se concentran especialmente en la claridad, la organización y el potencial formativo del material, la tercera subraya la necesidad de revisar con mayor detenimiento ciertas formulaciones conceptuales. Esta diferencia puede comprenderse también a la luz de los lugares disciplinares desde los cuales se realizó la lectura, lo cual aporta al proceso una mirada complementaria y enriquecedora sobre conceptos termodinámicos que no siempre se abordan del mismo modo en Física y en Química.
Pertinencia conceptual y secuencia temática	Señala que la delimitación de la profundidad y extensión de apartados como variables de estado se ajusta al objetivo de la guía. Destaca la importancia de distinguir variables de estado y variables de proceso. Resalta especialmente	No formula observaciones puntuales por sección, pero su valoración general reconoce la pertinencia del tratamiento temático y del contenido desarrollado.	Reconoce la pertinencia general de la secuencia, pero recomienda revisar la conexión entre el apartado inicial sobre energía y los desarrollos posteriores. Además, señala la necesidad de problematizar mejor varios conceptos centrales, en	La estructura temática de la guía es reconocida como pertinente, pero la tercera valoración sugiere que la coherencia no depende solo del orden de los temas, sino también de la solidez conceptual con que se enlazan. Esto indica que la secuencia general funciona, aunque requiere fortalecer algunos puentes

	los apartados sobre Primera Ley, espontaneidad y sentido privilegiado de los procesos, procesos reversibles e irreversibles y sentido físico de la entropía.		especial la entropía, para no reproducir una versión excesivamente convencional del tema.	conceptuales y la problematización de nociones centrales.
Claridad expositiva y rigor disciplinar	Afirma que la diagramación y el estilo de narración hacen que el texto sea claro y ameno sin perder rigurosidad. Destaca la ilación textual y el vínculo entre los distintos apartados.	Señala que algunas secciones resultan densas para una guía de estudio y recomienda usar mapas conceptuales u otros recursos más ilustrativos.	Advierte imprecisiones en varios conceptos y usos del lenguaje, especialmente en relación con energía, calor, temperatura, sistema aislado, espontaneidad y algunas explicaciones apoyadas en videos. También sugiere evitar expresiones valorativas o cotidianas que puedan restar precisión científica.	La guía presenta una fortaleza clara en términos de claridad y continuidad expositiva, pero la tercera experta muestra que esa claridad debe sostenerse con mayor precisión disciplinar. El reto no es solo hacer el texto comprensible, sino asegurar que esa comprensibilidad no se logre a costa del rigor conceptual.
Coherencia con el objetivo del trabajo	Considera que la organización conceptual permite que la guía funcione como apoyo para quienes inician el estudio de la termodinámica. Además, reconoce que la construcción conceptual refleja el análisis documental realizado por la autora y su vínculo con	Recomienda indicar explícitamente el nivel educativo al que va dirigida la guía, especialmente por el nivel de formalización presente en la sección de entropía.	Considera que el material responde al propósito planteado y puede ser pertinente para el público previsto	Las tres valoraciones respaldan la coherencia de la guía con el objetivo del trabajo.

	estudiantes de Licenciatura en Física.			
Relevancia para el aprendizaje autónomo	Destaca las cápsulas, citas, ejemplos, ejercicios y videos, ya que permiten que el lector no se canse y mantenga el hilo argumentativo. Valora positivamente la inclusión de videos elaborados por la autora.	Sugiere incorporar una sección con orientaciones sobre el uso de la guía, la gestión del tiempo y de los materiales. También recomienda incluir objetivos de aprendizaje por sección.	Considera que la propuesta es adecuada para el aprendizaje autónomo, pero sugiere equilibrar mejor el énfasis expositivo y algorítmico con situaciones más conceptuales, problemas abiertos y recursos que favorezcan una comprensión menos mecánica.	La guía posee un alto potencial como recurso de estudio independiente, pero puede fortalecerse aún más si incorpora orientaciones explícitas de uso y metas de aprendizaje visibles para cada sección, también se debe promover un trabajo conceptual más reflexivo y menos centrado en procedimientos estandarizados.
Recursos complementari os y ajustes sugeridos	Sugiere enriquecer algunos apartados con situaciones experimentales o actividades prácticas. Señala además que conviene reforzar apoyos sobre conceptos como energía interna y revisar la correspondencia entre los videos anunciados y los disponibles.	Sugiere agregar pequeñas experiencias de aprendizaje o citar experimentos históricamente significativos, además de incorporar más recursos ilustrativos.	Recomienda revisar títulos ambiguos, fortalecer algunos apartados conceptuales, precisar mejor el tratamiento de la entropía como variable de estado, enriquecer la relación entre perspectiva termodinámica y estadística, y cuidar la selección y función de algunos videos y apoyos gráficos.	En conjunto, las sugerencias trazan una ruta de ajuste en dos direcciones: por un lado, fortalecer los recursos de apoyo y el vínculo con experiencias o materiales complementarios; por otro, profundizar el tratamiento conceptual de ciertos apartados para aumentar la solidez científica de la guía.

Tabla 2 - Síntesis de comentarios de las expertas y análisis derivado de la validación. Elaboración propia

4.4 Ajustes realizados y consolidación final de la guía

A partir de las observaciones formuladas por las expertas durante el proceso de validación, se realizó una revisión de la guía de estudio con el propósito de fortalecer aquellos aspectos más relevantes para su consolidación final. Este

proceso se orientó por dos criterios principales: atender las sugerencias que aportaban de manera directa al rigor conceptual y al carácter formativo del material, y hacerlo sin incrementar innecesariamente su extensión, dado que una de las observaciones señaló que la guía ya presentaba una densidad textual considerable para este tipo de recurso.

En consecuencia, los ajustes realizados buscaron mejorar la claridad, la precisión conceptual y el acompañamiento al lector, manteniendo la estructura general y la secuencia temática que fueron valoradas positivamente por las expertas.

En primer lugar, se revisaron algunos títulos y formulaciones cuya redacción podía resultar ambigua, especialmente en secciones donde se sugirió mayor precisión conceptual. De igual manera, se ajustaron ciertos desarrollos para fortalecer el rigor científico del material, cuidando el uso del lenguaje y afinando la presentación de algunos conceptos que, según las observaciones recibidas, podían prestarse a interpretaciones imprecisas. Estos cambios implicaron una revisión puntual de expresiones, definiciones y transiciones con el fin de hacer más consistente el tratamiento conceptual en varios apartados.

En segundo lugar, se atendió la recomendación de explicitar con mayor claridad la población a la que va dirigida la guía. Para ello, se incorporó en la portada una mención expresa a su orientación hacia estudiantes universitarios, particularmente en el contexto de la Licenciatura en Física. Esta decisión buscó hacer más visible desde el inicio el nivel formativo previsto para el material y reforzar la correspondencia entre el grado de formalización alcanzado en la guía y el público al que se dirige.

En tercer lugar, se añadió en la introducción una aclaración dirigida al lector acerca de las condiciones de trabajo que exige el estudio autónomo del concepto de entropía. En esta nota se enfatiza que la guía requiere tiempo, disposición y

dedicación, y que su aprovechamiento supone un proceso de autorregulación por parte del estudiante, quien debe organizar su lectura y gestionar sus tiempos de acuerdo con sus posibilidades y necesidades de aprendizaje. Con ello se dio respuesta a la sugerencia de incorporar orientaciones más explícitas sobre el uso del material, pero procurando que estas no se convirtieran en una sección extensa adicional, sino en una orientación breve y funcional integrada al inicio de la guía.

Otro ajuste importante fue la inclusión de cápsulas con actividades experimentales y materiales de consulta complementarios. Estas incorporaciones fueron pensadas para enriquecer la comprensión de secciones específicas de la guía mediante experiencias que el lector pudiera observar, analizar o, si contaba con la disposición y los recursos necesarios, intentar reproducir. La decisión respondió de manera directa a la recomendación de incorporar situaciones experimentales, actividades prácticas o referencias a experimentos históricamente significativos, de modo que algunos desarrollos teóricos pudieran ponerse en relación con fenómenos observables y con posibles usos didácticos en la formación del futuro profesor de física.

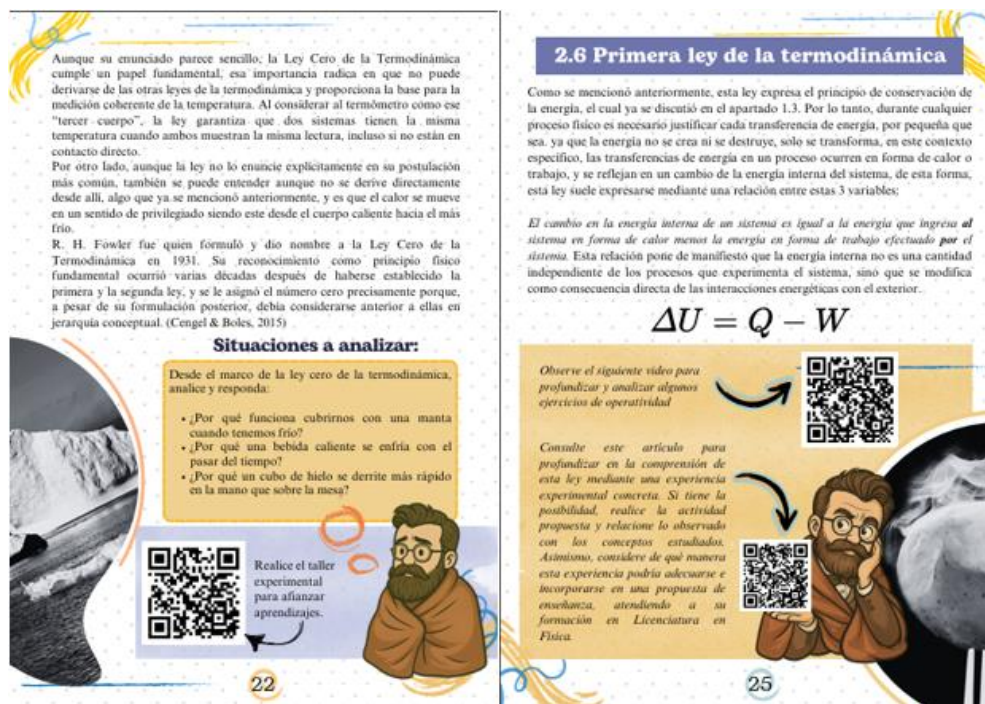


Figura 16 - Páginas ajustadas en la guía de estudio. Elaboración propia

Por otro lado, se reforzaron algunos contenidos mediante enlaces a materiales de estudio adicional, especialmente en aquellos conceptos que también resultan problemáticos en la enseñanza de la física, como la energía interna. Este ajuste se realizó en atención a la observación de que ciertos apartados podrían enriquecerse con apoyos complementarios que ayudaran al lector a distinguir con mayor claridad nociones previas indispensables para comprender los procesos termodinámicos y, posteriormente, el concepto de entropía. En este sentido, la incorporación de materiales externos se asumió como una estrategia de profundización focalizada que permitiera atender la sugerencia sin ampliar de manera excesiva el cuerpo principal de la guía.



Figura 17 - Profundización del concepto de energía interna en la guía de estudio. Elaboración propia

Ahora bien, no todas las sugerencias fueron incorporadas de manera explícita en la versión final del material. Tal es el caso de la formulación independiente de objetivos de aprendizaje para cada sección. Aunque esta recomendación fue considerada pertinente, se estimó que dichos objetivos ya se encuentran orientados de manera implícita en las introducciones de los apartados y se articulan de forma integradora en la rejilla de autoevaluación del aprendizaje incluida en la guía. Por esta razón, añadir un apartado específico para objetivos por sección hubiera incrementado la extensión del documento sin modificar sustancialmente la lógica de acompañamiento ya prevista en el material.

De manera semejante, la sugerencia de incorporar mapas conceptuales tampoco fue acogida en esta versión final. Si bien se reconoce que este tipo de recurso puede resultar útil como estrategia de organización o síntesis, en el contexto particular de esta guía se consideró que su inclusión no era prioritaria frente a otros

apoyos de estudio ya presentes. Además, se estimó que la función principal del material no consiste en condensar esquemáticamente los contenidos, sino en acompañar al lector en una construcción progresiva, razonada y articulada del concepto de entropía. En ese sentido, la densidad textual de algunos apartados se entiende como parte de una decisión de diseño orientada a sostener un acompañamiento cercano al estudiante en su proceso de estudio autónomo, especialmente frente a un concepto cuya comprensión exige la articulación de múltiples nociones previas.

En relación con la sugerencia de modificar de manera más profunda el tratamiento del concepto de energía, se realizaron ajustes de redacción y precisiones puntuales, pero no se modificaron las ideas base que orientan ese apartado. Esta decisión se fundamenta en que la guía adopta deliberadamente una forma de tratamiento frecuente en la enseñanza de la Física y de la Termodinámica, en la que la energía se presenta mediante un lenguaje cuasi-material o sustancialista que permite seguir sus transformaciones, transferencias, almacenamiento y conservación. Lancor (2014) muestra que la conceptualización de la energía no es completamente uniforme entre disciplinas, e incluso puede variar dentro de la propia física, dependiendo del contexto y del modelo explicativo empleado. Asimismo, la representación de la energía como una cantidad de tipo sustancial puede resultar didácticamente productiva para razonar sobre conservación, almacenamiento y transferencia en física (Brewer, 2011).

Emplear ese lenguaje no implica asumir literalmente que la energía sea una sustancia material, sino adoptar una representación conceptual útil para ciertos fines didácticos. En esta misma dirección, Harrer (2017) señala que la energía es un concepto abstracto e “imponderable” y que, precisamente por ello, la física ha recurrido históricamente a metáforas para conceptualizarla y hacerla comprensible mediante la descripción de manifestaciones observables.

A la luz de lo anterior, y teniendo en cuenta que una de las expertas realizó su lectura desde el campo de la Química, se consideró necesario reconocer que ciertas observaciones remiten también a diferencias en las formas de conceptualizar algunos contenidos termodinámicos entre disciplinas próximas. En lugar de entender esta situación como un defecto de la guía, se asumió como una oportunidad para precisar que el material adopta deliberadamente una perspectiva anclada en la enseñanza de la Física, sin desconocer que existen otros modos legítimos de organizar y significar estos conceptos en campos afines. Desde esta perspectiva, la observación no debilitó la propuesta, sino que contribuyó a hacer más consciente y explícito su lugar disciplinar.

En conjunto, los ajustes realizados permitieron fortalecer la guía sin alterar su estructura general ni extender de manera innecesaria su longitud. De este modo, la consolidación final de la guía recoge los aportes de las expertas y mantiene el criterio formativo que orientó su elaboración desde el inicio: ofrecer un recurso de consulta riguroso, progresivo y útil para el aprendizaje autónomo del concepto de entropía.

Conclusiones y recomendaciones

La presente monografía permitió diseñar y consolidar una guía de estudio orientada al aprendizaje autónomo del concepto de entropía en estudiantes de Licenciatura en Física, a partir de una propuesta que articula fundamentos conceptuales de la termodinámica, interpretaciones físicas del concepto y recursos de apoyo al estudio. El proceso desarrollado mostró que la comprensión de la entropía exige una construcción conceptual progresiva, pues no puede abordarse únicamente como una definición aislada o como un procedimiento matemático, sino como una noción estrechamente relacionada con conceptos previos como energía, calor, sistemas termodinámicos, espontaneidad, reversibilidad, equilibrio y Segunda Ley de la Termodinámica. En este sentido, uno de los principales aportes del trabajo de grado radica en la organización secuencial de contenidos que permiten

aproximarse al concepto desde diferentes niveles de comprensión y favorecer una visión más articulada de la termodinámica.

La revisión teórica realizada evidenció que la entropía constituye uno de los conceptos más complejos dentro de la enseñanza de la física, debido tanto a su carácter abstracto como a la diversidad de interpretaciones que históricamente se han construido alrededor de ella. A partir del análisis bibliográfico se reconoció que muchas de las dificultades asociadas a su aprendizaje no se limitan a la resolución de ejercicios o al manejo formal de ecuaciones, sino que involucran problemas de interpretación física, comprensión de la irreversibilidad y uso de lenguajes explicativos que, en ocasiones, pueden resultar ambiguos o insuficientes. Por ello, la guía fue estructurada de manera que integrara explicaciones conceptuales, ejemplos, apoyos visuales, ejercicios, preguntas de reflexión y recursos audiovisuales, buscando ofrecer diferentes posibilidades de aproximación al concepto y contribuir a una comprensión más amplia de su significado físico.

Asimismo, el desarrollo de la guía permitió reconocer la relevancia de los materiales educativos como mediadores en procesos de aprendizaje autónomo dentro de la formación inicial de profesores de física. En este caso, el material elaborado no se concibió como un libro de texto ni como un compendio amplio de información, sino como una guía de estudio orientada a acompañar progresivamente al estudiante en la construcción de relaciones conceptuales y en la organización de su propio proceso de estudio. Su diferencia frente a un texto disciplinar tradicional radica en que no solo presenta contenidos, sino que propone una ruta de lectura, preguntas de reflexión, cápsulas de análisis, ejercicios, recursos audiovisuales, solucionarios y espacios de autoevaluación que buscan orientar el trabajo autónomo del lector. En consecuencia, todos los recursos incorporados respondieron a la intención de favorecer procesos de autorregulación y acompañamiento conceptual sin perder rigurosidad disciplinar.

El proceso de validación por expertas permitió fortalecer y consolidar la versión final de la guía mediante una revisión académica externa centrada en la pertinencia conceptual, la claridad expositiva, el rigor disciplinar y la relevancia formativa del material. Las valoraciones realizadas evidenciaron una apreciación favorable frente a la organización de la guía, su coherencia interna y su potencial como recurso de consulta para estudiantes universitarios. Del mismo modo, las observaciones formuladas hicieron visible la importancia de revisar críticamente ciertos usos del lenguaje y algunas explicaciones conceptuales, especialmente en un campo como la termodinámica, donde existen diferentes tradiciones de interpretación incluso entre disciplinas cercanas como la física y la química. Lejos de debilitar el trabajo realizado, estas diferencias permitieron enriquecer el proceso de revisión y reafirmaron la necesidad de asumir una mirada crítica frente a los conceptos científicos y sus formas de enseñanza.

De igual manera, la elaboración de esta monografía permitió reconocer que el diseño de materiales educativos implica decisiones didácticas que trascienden la simple selección de contenidos. Aspectos como el tipo de lenguaje utilizado, la profundidad conceptual de las explicaciones, la elección de representaciones, la inclusión de recursos gráficos o audiovisuales y la manera de secuenciar los temas responden a una determinada comprensión sobre cómo puede favorecerse el aprendizaje de conceptos complejos en física. En este sentido, el trabajo desarrollado evidenció que construir una guía de estudio supone también asumir una postura frente a la enseñanza del conocimiento disciplinar y frente al papel activo del estudiante en la construcción de su aprendizaje.

Por otro lado, en cuanto al alcance formativo del material, se considera que la guía elaborada constituye un aporte pertinente para la formación inicial de profesores de física, particularmente en relación con el estudio autónomo de la termodinámica y del concepto de entropía, se considera que el material elaborado puede resultar especialmente valioso para ser implementado en un curso de Termodinámica, en la medida en que permite abordar conceptos necesarios para la

comprensión de la entropía y, al mismo tiempo, identificar problemas físicos que expresan la necesidad del surgimiento de un concepto de esta naturaleza. Siguiendo esta idea, la guía orienta al estudiante hacia el por qué la entropía se vuelve una magnitud necesaria dentro de la teoría termodinámica. También, se reconoce que el material constituye un recurso valioso para el estudio autónomo. No obstante, se recomienda que su uso esté acompañado por la orientación del docente, especialmente en lo relacionado con los procesos de autorregulación del estudiante, de manera que este pueda organizar sus tiempos de estudio, reconocer sus dificultades, revisar sus avances y hacer un uso más consciente, valioso y formativo de la guía.

En concordancia con lo anterior, futuras investigaciones podrían profundizar en el diseño de materiales semejantes para otros conceptos complejos de la física y en el estudio de las relaciones entre aprendizaje autónomo, mediación didáctica y comprensión conceptual en la enseñanza universitaria de las ciencias.

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda continuar fortaleciendo la producción de materiales de estudio orientados al aprendizaje autónomo en la formación inicial de profesores de ciencias, especialmente en áreas conceptualmente complejas como la termodinámica. Del mismo modo, se considera importante promover investigaciones que analicen cómo los estudiantes interactúan con este tipo de recursos, qué estrategias de estudio desarrollan y qué dificultades conceptuales persisten durante el proceso de aprendizaje.

También se recomienda que futuras versiones de la guía puedan complementarse con procesos de implementación en aula, espacios de discusión colectiva y actividades experimentales más amplias que permitan enriquecer la relación entre teoría, interpretación física y experiencia observable. De igual forma, podría resultar pertinente incorporar progresivamente otros recursos de síntesis y organización conceptual, siempre que estos mantengan coherencia con la lógica formativa y secuencial que orientó el diseño del material.

Finalmente, se considera necesario seguir problematizando la enseñanza del concepto de entropía y, en general, de la termodinámica, reconociendo que muchas de las dificultades presentes en su aprendizaje no dependen únicamente del estudiante, sino también de las formas en que históricamente estos conceptos han sido presentados en libros, cursos y materiales de enseñanza. En consecuencia, se hace necesario continuar desarrollando propuestas didácticas que permitan abordar estos conceptos desde perspectivas más reflexivas, articuladas y conceptualmente fundamentadas dentro de la formación universitaria en física.

Referencias bibliográficas

- Aguilar, R. (2004). La guía didáctica, un material educativo para promover el aprendizaje autónomo. *Revista Iberoamericana de educación a distancia. Evaluación y mejoramiento de su calidad en la modalidad abierta y a distancia de la UTPL*(2), 179-192.
- Arriola, A. (2001). *Relación entre estrategias de aprendizaje y autorregulación*. Tesis de grado. Universidad Iberoamericana, Ciudad de México.
- Ayala, M. M. (1992). La enseñanza de la física para la formación de profesores de física. *Revista brasileña de enseñanza de la física*, 14(3), 153-157.
- Ayala, M. M., Romero, Á., & Malagón, F. (1996). Carnot y Plank y la segunda ley de la Termodinámica. *Física y cultura: cuadernos sobre historia y enseñanza de las ciencias*(3), 73-81.
- Ben-Naim, A. (2017). *La entropía desvelada*. Tusquets Editores.
- Brewe, E. (2011). Energy as a substancelike quantity that flows: Theoretical considerations and pedagogical consequences. *Physical Review Physics Education Research*, 7(2), 1-14.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.7.020106>

Brundage, M., Meltzer, D., & Singh, C. (2024). Investigating introductory and advanced students' difficulties with entropy and the second law of thermodynamics using a validated instrument. *Physical Review Physics Education Research*, 2(20).

<https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.20.020110>

Caballero-Cantu, J., Chavez-Ramirez, E., Lopez-Almeida, M., Inciso-Mendo, E., & Méndez Vergaray, J. (2023). El aprendizaje autónomo en educación superior. Revisión sistemática. *Salud, Ciencia y Tecnología*, 3(391).

<https://doi.org/10.56294/saludcyt2023391>

Candel Rosell, A., Satoca Valero, J., & Soler Llopis, J. (1984). Interpretación errónea del concepto de entropía. *Enseñanza de las ciencias*, 2(3), 198-201. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.5349>

Castiblanco, O., & Nardi, R. (2023). *Didáctica de la Física*. Cultura académica.

Cengel, Y., & Boles, M. (2015). *Termodinámica*. Mc Graw Hill Education.

Christensen, W. M., Meltzer, D., & Ogilvie, C. (2009). Student ideas regarding entropy and the second law of thermodynamics in an introductory physics course. *American Association of Physics Teachers*, 77(10), 907-917.

<https://doi.org/10.1119/1.3167357>

Crispín, M. L., Caudillo, L., Doria, C., & Esquivel, M. (2011). *Aprendizaje autónomo: orientaciones para la docencia*. Universidad Iberoamericana.

Eddington, S. (1928). *The Nature of the Physical World*.

Feynman, R., Sands, M., & Leighton, R. B. (1998). *Lecciones de Física de Feynman*. Addison Wesley Iberoamericana S.A.

Flores, F., & Ulloa, N. (2014). ¿Cómo enseñan la entropía los profesores universitarios? *Revista Electrónica de Enseñanza de las Ciencias*, 13(2), 201-221.

- Forero, S. M. (2013). Sadi Carnot, el ciclo ideal. *Revista Latin American Journal of Physics Education*, 7(3), 473-477.
- García, C. M. (1993). Cómo conocen los profesores la materia que enseñan. Algunas contribuciones de la investigación sobre conocimiento didáctico del contenido. *Universidad de Sevilla*.
- Gonzalez, Y. V., Del campo, M., & Mendez, A. M. (2017). Estrategias que favorecen el aprendizaje autónomo en estudiantes universitarios. *Caleidoscopio*(37), 75-90.
- Harrer, B. (2017). On the origin of energy: Metaphors and manifestations as resources for conceptualizing and measuring the invisible, imponderable. *American Association of Physics Teachers*, 85(6), 454-460.
<https://doi.org/10.1119/1.4979538>
- Hart, I. (1949). *James Watt and the history of steam power*. New York, H. Schuman.
- Herrmann, F. (2010). Comencemos con la entropía. *Revista Cubana de Física*, 27(2A), 113-118.
- Hewitt, P. G. (2007). *Física conceptual*. Editorial Pearson.
- Hurtado, J. (2000). *Metodología de la investigación holística*. Fundación Sygal.
- Lancor, R. (2014). Uso de la teoría de la metáfora para examinar las concepciones de la energía en biología, química y física. *Science & Education*, 23(6), 1245-1267. <https://doi.org/10.1007/s11191-012-9535-8>
- Ling, J., Sanny, J., & Moebs, W. (2021). *Física universitaria*. Openstax.
- Lobato, C. (2006). El estudio y trabajo autónomo del estudiante. En F. M. Miguel Díaz, *Metodologías de enseñanzas y aprendizaje para el desarrollo de competencias: Orientaciones para el profesorado* (págs. 191-223). Alianza.

- Loverude, M. (2015). Identifying student resources in reasoning about entropy and the approach to thermal equilibrium. *Physical Review Special Topics- Physics Education Research*, 11(2), 020118-1 - 020118-14.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.11.020118>
- Mellado, V. (2000). ¿Es adecuada la formación científica del profesorado de ciencias de secundaria para sus necesidades profesionales? . *Alambique: Didáctica de las ciencias experimentales*(24), 57-65.
- Mellado, V., Borrachero, B., Brígido, M., Melo, L., Dávila, A., & Cañada, F. (2014). Las emociones en la enseñanza de las ciencias. *Enseñanza De Las Ciencias. Revista De investigación Y Experiencias didácticas*, 32(3), 11-36.
<https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.1478>
- Mendivil, C. (2010). Qué es la Física y donde está presente. *Revista del instituto de Matemáticas*, 6(11), 97-103. <https://doi.org/10.30972/rim.6117013>
- Mott-Smith, M. (1964). *The concept of energy - simply explained*. Dover publications, Inc. New York.
- Natalis, V. (2024). Improving the teaching of entropy and the second law of thermodynamics: a systematic review with meta-analysis. *Chemistry Education Research and Practice*. <https://doi.org/10.1039/D4RP00158C>
- Orozco, J., & Díaz, A. (2018). Un reto a la innovación pedagógica: las guías de aprendizaje. *Revista Electrónica de Conocimientos, Saberes y Prácticas*, 1(1), 54-71.
- Planck, M. (1915). *Reversibilidad e irreversibilidad*. (M. Garzón Barrios, Trad., julio de 2020). Traducción al castellano no publicada.
- Resnick, R., Halliday, D., & Krane, K. K. (2001). *Física 1*. Compañía editorial continental.

- Romero, A., & Crisol, E. (2012). Las guías de aprendizaje autónomo como Herramienta didáctica de apoyo a la docencia . *Escuela abierta*(15), 9-31.
- Serway, R. A., & Jewett, J. W. (2014). *Física para ciencias e ingeniería*. Cengage Learning.
- Silvestrini, V. (1998). *Qué es la entropía*. Grupo editorial norma.
- Smith, T., Christensen, W., & Thompson, J. (2009). Addressing Student Difficulties with Concepts Related to Entropy, Heat Engines and the Carnot Cycle. *Center for Science and Mathematics Education Research, University of Maine, Orono, 1179*(1), 277-280.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.11.020116>
- Speltini, C. (2008). El concepto de entropía en el aula universitaria. *Revista de enseñanza de la física, 21*(2), 75-76.
- Tipler, P. A., & Mosca, G. (2008). *Física para la ciencia y la tecnología*. Reverté.
- Veritasium en español. (02 de Septiembre de 2023). Pocos entienden esto de la física moderna. Youtube.
<https://www.youtube.com/watch?v=hRLMIFZWqnw>
- Weber, I., Borić, T., Mardešić, J., Bilušić, A., & Zoranić, L. (2024). Enhancing Thermodynamics Education: Insights from Student Knowledge Assessments on (Ir)reversible Processes and (Non)equilibrium Phenomena. *Education sciences, 14*(12), 1-21. <https://doi.org/10.3390/educsci14121395>
- Young, H. D., & Freedman, R. A. (2013). *Física universitaria vol 1*. Pearson Educación.

Apéndices

Apéndice A. Guía de estudio autónomo

Debido a la extensión del material elaborado, la guía de estudio completa se presenta en formato digital. Su consulta puede realizarse a través de cualquiera de los siguientes enlaces:

- [Guía de estudio del concepto de entropía - Canva](#)
- [Guía de estudio del concepto de entropía – One Drive](#)

Apéndice B. Videos sobre operatividad y cálculo de cambios de entropía

En este apéndice se presenta el enlace de acceso a una playlist de YouTube que recopila los videos elaborados por la autora como material complementario para el apartado de operatividad y cálculo del cambio de entropía. Estos recursos audiovisuales fueron diseñados con el propósito de ampliar la explicación de algunos procedimientos y apoyar el estudio autónomo de los contenidos desarrollados en la guía:

- [Playlist de videos para el estudio de la operatividad de la entropía](#)

Apéndice C. Rúbrica de autoevaluación del aprendizaje logrado

Rúbrica de autoevaluación del aprendizaje (1/2)

Marque con una X el nivel que mejor represente su comprensión actual en cada criterio.

Criterio	Inicial	En proceso	Logrado	Avanzado
Comprendo el papel de la energía en la explicación de los fenómenos físicos.	Reconozco algunas formas de energía, pero no logro relacionarlas con los procesos estudiados.	Identifico varias formas de energía y algunas transformaciones, aunque con dificultades para interpretarlas.	Comprendo las formas, transformaciones, dispersión y degradación de la energía en los procesos físicos.	Explico con claridad cómo las propiedades de la energía permiten analizar situaciones físicas diversas.
Reconozco la importancia de caracterizar sistemas termodinámicos y sus variables.	Distingo pocos elementos del sistema y confundo variables o tipos de sistema.	Identifico sistema, entorno y algunas variables, pero aún presento vacíos en su análisis.	Caracterizo sistemas, variables de estado y variables de proceso de manera adecuada.	Relaciono con claridad la caracterización del sistema con el análisis de sus transformaciones.
Comprendo el alcance y la limitación de la Primera Ley de la Termodinámica.	Sé que la energía se conserva, pero no identifico su alcance conceptual.	Comprendo parcialmente los balances de energía, pero no explico bien sus límites.	Comprendo que la Primera Ley describe la conservación de la energía, pero no explica por sí sola la dirección de los procesos.	Explico con argumentos por qué esta limitación hace necesaria la introducción del concepto de entropía.
Diferencio procesos reversibles e irreversibles.	Tengo dificultad para distinguirlos.	Los diferencio en algunos casos, pero con dudas conceptuales.	Distingo adecuadamente entre procesos reversibles e irreversibles y reconozco su importancia en termodinámica.	Explico además por qué los procesos reversibles, aunque ideales, son fundamentales para analizar procesos reales.
Comprendo el funcionamiento y las limitaciones de las máquinas térmicas.	Identifico de manera muy general qué es una máquina térmica.	Comprendo parcialmente su funcionamiento, pero no explico bien sus límites.	Comprendo que una máquina térmica no puede transformar todo el calor en trabajo, ni siquiera en condiciones ideales.	Relaciono esa limitación con la irreversibilidad, la eficiencia y la necesidad de una fuente fría.

Rúbrica de autoevaluación del aprendizaje (2/2)

Marque con una X el nivel que mejor represente su comprensión actual en cada criterio.

Criterio	Inicial	En proceso	Logrado	Avanzado
Comprendo la entropía como magnitud termodinámica.	Recuerdo la fórmula o el nombre del concepto, pero no su sentido físico.	Reconozco algunas ideas asociadas a la entropía, aunque aún de forma fragmentada.	Comprendo la entropía como una función de estado asociada a la dirección de los procesos y a la irreversibilidad.	Explico con claridad su definición, su carácter de función de estado y su papel en la Segunda Ley.
Interpreto el cambio de entropía en procesos reversibles, irreversibles y en sistemas aislados.	Presento dificultades para interpretar el signo o el significado del cambio de entropía.	Comprendo algunos casos, pero aún no logro generalizar su interpretación.	Comprendo que en sistemas aislados la entropía no disminuye y que aumenta en procesos irreversibles.	Explico con ejemplos el principio de incremento de entropía y su relación con la evolución hacia el equilibrio.
Reconozco que la noción de “desorden” es limitada para entender la entropía.	Asocio entropía únicamente con desorden.	Reconozco que esa idea es insuficiente, aunque todavía me apoyo mucho en ella.	Comprendo que la idea de desorden es limitada y prefiero interpretaciones ligadas a la dispersión de la energía y al equilibrio.	Explico críticamente por qué la noción de desorden puede ser engañosa en termodinámica.
Puedo aplicar el concepto de entropía para interpretar situaciones físicas.	No logro aplicar el concepto en ejemplos concretos.	Lo aplico solo en casos muy guiados o sencillos.	Lo uso para interpretar ejemplos relacionados con transferencia de calor, irreversibilidad o eficiencia.	Lo aplico de manera argumentada en situaciones nuevas, conectando distintos apartados de la guía.
Desarrollé hábitos de estudio autónomo durante el uso de la guía.	Leí la guía de forma fragmentada y sin mucha reflexión.	Seguí parcialmente las actividades y preguntas, pero sin continuidad.	Utilicé la guía de manera organizada, respondiendo preguntas y revisando ejemplos cuando fue necesario.	Además de lo anterior, identifiqué vacíos conceptuales, retomé apartados y regulé activamente mi propio proceso de aprendizaje.

Apéndice D. Rejilla de valoración de expertos

Trabajo de Investigación: Elaboración de una guía de estudio sobre el concepto de entropía como fuente de consulta para el aprendizaje autónomo

Rubrica de validación expertos

Reciba un cordial saludo. Agradezco de manera especial su disposición para participar en el proceso de valoración académica de la *Guía de estudio sobre el concepto de entropía*, elaborada como producto del trabajo de grado en modalidad de monografía de la Licenciatura en Física.

El presente proceso de validación tiene como propósito someter el documento a revisión experta con el fin de evaluar la pertinencia conceptual, el rigor disciplinar, la coherencia estructural, la claridad expositiva y la relevancia formativa de cada una de las secciones que conforman la guía. Su juicio académico resulta fundamental para garantizar la solidez teórica del tratamiento del concepto de entropía, desde la perspectiva termodinámica y una breve fundamentación en la física estadística, así como la consistencia interna del desarrollo argumentativo propuesto.

La valoración que usted realice permitirá fortalecer la calidad académica del material, consolidar su validez conceptual y asegurar que el documento cumpla con los estándares propios de la formación en Licenciatura en Física.

Objetivo del proyecto: Diseñar una guía de estudio autónomo centrada en el concepto de entropía que desarrolle el concepto con profundidad teórica y con la claridad expositiva necesarias para consolidarse como una fuente rigurosa de consulta en el contexto de la formación de Licenciados en Física.

Objetivo del instrumento de valoración: Recoger la apreciación fundamentada de expertos en el área respecto a la calidad conceptual, coherencia estructural, utilidad y pertinencia académica de cada sección de la guía, con el fin de realizar los ajustes necesarios que fortalezcan su consistencia teórica y su aporte formativo.

Instrucciones de diligenciamiento: Se solicita revisar cuidadosamente cada sección de la guía y registrar su valoración en los criterios establecidos. La evaluación deberá considerar, entre otros aspectos:

- El rigor conceptual y la precisión disciplinar.
- La coherencia interna y la articulación entre apartados.
- La claridad en el desarrollo de las explicaciones y argumentos.
- La pertinencia del nivel de profundidad para la formación en Licenciatura en Física.
- La contribución del material al fortalecimiento del estudio autónomo.

En caso de considerarlo pertinente, puede consignar observaciones o recomendaciones específicas en el espacio destinado a comentarios, con el propósito de enriquecer y perfeccionar el documento.

Rúbrica de Validación

N.º Sección	Nombre de la sección	Pertinencia conceptual de la sección	Claridad expositiva y rigor disciplinar de la sección	Coherencia con el objetivo del trabajo	Relevancia para el proceso de aprendizaje autónomo del concepto	Comentarios / Sugerencias
1.1	¿Qué es la energía?	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	
1.2	Formas de energía	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	
1.3	Propiedades de la energía	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	

2.1	Tipos de sistemas	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	
2.2	Variables de estado	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	
2.3	Variables de proceso	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	
2.4	Ley Cero de la Termodinámica	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	
2.5	Calorimetría	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	
2.6	Primera Ley de la Termodinámica	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	
2.7	Espontaneidad y sentido privilegiado de los procesos	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	

3.1	Proceso cuasiestático	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	
3.2	Proceso adiabático	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	
3.3	Procesos con alguna propiedad constante	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	
3.4	Ciclo	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	
3.5	Operatividad en situaciones con gases ideales	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	
4.1	Procesos reversibles e irreversibles	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	
4.2	Máquinas térmicas	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	

4.3	Eficiencia	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	
4.4	Ciclo de Carnot	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	
4.5	Limitaciones de la Primera Ley de la Termodinámica	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	
4.6	Surgimiento del concepto de entropía	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	
4.7	La entropía y la Segunda Ley de la Termodinámica	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	
4.8	Operatividad y cálculo de la entropía	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	
4.9	Sentido físico de la entropía, ¿Qué es la entropía?	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	

4.10	Un acercamiento a la entropía desde la perspectiva microscópica	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	☐ Si ☐ No	
------	---	---	---	---	---	--

Comentarios Generales

Agradezco que utilice este espacio para registrar sus apreciaciones generales. Puede incluir observaciones globales relacionadas con la estructura, pertinencia, claridad, coherencia y relevancia de la guía de estudio, así como sugerencias para su mejora. Sus aportes serán fundamentales para optimizar la mejora de la guía y garantizar que cumpla con los objetivos propuestos en la monografía.

Anexos

Anexo A. Rejillas de las validaciones recibidas por las expertas

**Universidad Pedagógica Nacional
Facultad de Ciencia y Tecnología**

Trabajo de Investigación: Elaboración de una guía de estudio sobre el concepto de entropía como fuente de consulta para el aprendizaje autónomo

Rubrica de validación expertos

Reciba un cordial saludo. Agradezco de manera especial su disposición para participar en el proceso de valoración académica de la *Guía de estudio sobre el concepto de entropía*, elaborada como producto del trabajo de grado en modalidad de monografía de la Licenciatura en Física.

El presente proceso de validación tiene como propósito someter el documento a revisión experta con el fin de evaluar la pertinencia conceptual, el rigor disciplinar, la coherencia estructural, la claridad expositiva y la relevancia formativa de cada una de las secciones que conforman la guía. Su juicio académico resulta fundamental para garantizar la solidez teórica del tratamiento del concepto de entropía, desde la perspectiva termodinámica y una breve fundamentación en la física estadística, así como la consistencia interna del desarrollo argumentativo propuesto.

La valoración que usted realice permitirá fortalecer la calidad académica del material, consolidar su validez conceptual y asegurar que el documento cumpla con los estándares propios de la formación en Licenciatura en Física.

Objetivo del proyecto: Diseñar una guía de estudio autónomo centrada en el concepto de entropía que desarrolle el concepto con profundidad teórica y con la claridad expositiva necesarias para consolidarse como una fuente rigurosa de consulta en el contexto de la formación de Licenciados en Física.

Objetivo del instrumento de valoración: Recoger la apreciación fundamentada de expertos en el área respecto a la calidad conceptual, coherencia estructural, utilidad y pertinencia académica de cada sección de la guía, con el fin de realizar los ajustes necesarios que fortalezcan su consistencia teórica y su aporte formativo.

Instrucciones de diligenciamiento: Se solicita revisar cuidadosamente cada sección de la guía y registrar su valoración en los criterios establecidos. La evaluación deberá considerar, entre otros aspectos:

- El rigor conceptual y la precisión disciplinar.
- La coherencia interna y la articulación entre apartados.
- La claridad en el desarrollo de las explicaciones y argumentos.
- La pertinencia del nivel de profundidad para la formación en Licenciatura en Física.
- La contribución del material al fortalecimiento del estudio autónomo.

En caso de considerarlo pertinente, puede consignar observaciones o recomendaciones específicas en el espacio destinado a comentarios, con el propósito de enriquecer y perfeccionar el documento.

Rúbrica de Validación

N.º Sección	Nombre de la sección	Pertinencia conceptual de la sección	Claridad expositiva y rigor disciplinar de la sección	Coherencia con el objetivo del trabajo	Relevancia para el proceso de aprendizaje autónomo del concepto	Comentarios / Sugerencias
1.1	¿Qué es la energía?	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	
1.2	Formas de energía	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	
1.3	Propiedades de la energía	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	

2.1	Tipos de sistemas	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	
2.2	Variables de estado	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	La delimitación realizada en la profundidad y extensión de estos apartados entiendo que se ajusta al objetivo de la guía. La distinción entre este tipo de variables y sobre todo caracterizar las variables de proceso resulta ser indispensable para comprender los procesos termodinámicos. Sin embargo, considero que estos apartados podrían enriquecerse con material de apoyo adicional, que le permita a un estudiante distinguir por ejemplo el concepto de energía interna (que también es un concepto problemático)
2.3	Variables de proceso	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	
2.4	Ley Cero de la Termodinámica	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	
2.5	Calorimetría	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	

2.6	Primera Ley de la Termodinámica	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	Destaco el desarrollo de este apartado porque problematiza y da apretura al propósito central de la guía
2.7	Espontaneidad y sentido privilegiado de los procesos	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	Destaco el desarrollo de este apartado porque problematiza y da apretura al propósito central de la guía
3.1	Proceso cuasiestático	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	
3.2	Proceso adiabático	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	
3.3	Procesos con alguna propiedad constante	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	
3.4	Ciclo	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	
3.5	Operatividad en situaciones con gases ideales	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	

4.1	Procesos reversibles e irreversibles	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	Destaco el desarrollo de este apartado porque problematiza y da apretura al propósito central de la guía
4.2	Máquinas térmicas	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	
4.3	Eficiencia	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	
4.4	Ciclo de Carnot	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	
4.5	Limitaciones de la Primera Ley de la Termodinámica	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	
4.6	Surgimiento del concepto de entropía	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	
4.7	La entropía y la Segunda Ley de la Termodinámica	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	

4.8	Operatividad y cálculo de la entropía	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	
4.9	Sentido físico de la entropía, ¿Qué es la entropía?	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	Destaco el desarrollo de este apartado porque apunta a ideas que ponen en perspectiva de los procesos termodinámicos el significado de la entropía y pone en cuestión la idea de desorden
4.10	Un acercamiento a la entropía desde la perspectiva microscópica	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	X Sí ☐ No	

Comentarios Generales

Agradezco que utilice este espacio para registrar sus apreciaciones generales. Puede incluir observaciones globales relacionadas con la estructura, pertinencia, claridad, coherencia y relevancia de la guía de estudio, así como sugerencias para su mejora. Sus aportes serán fundamentales para optimizar la mejora de la guía y garantizar que cumpla con los objetivos propuestos en la monografía.

En general es un material muy agradable de leer, la diagramación y el estilo de narración permiten que sea claro y ameno sin perder rigurosidad académica. Adicionalmente, los momentos de pause que se proponen con las “cápsulas”, citas, ejemplos, ejercicios y videos permiten que el lector no se canse, sin perder el hilo del argumento que se está desarrollando.

Es pertinente la organización conceptual que se presenta, da la oportunidad de ser una guía para quienes inician el estudio de la termodinámica. La manera como se plantea la secuencia entre un apartado y otro da cuenta de la coherencia conceptual, adicionalmente al lector le permite encontrar razones para el vínculo de un elemento teórico con el siguiente.

Resalto positivamente que se haya incluido material de video, porque orienta al lector en el tipo de información que puede consultar de manera adicional a la guía. Y valoro mucho que la autora del texto, haya hecho videos propios como una manera de presentar lo que

específicamente se espera desarrollar en ese apartado de la guía (Observación: en la guía se enuncian 5 videos, pero en la lista de YouTube sólo hay 4).

La guía aborda con claridad y rigurosidad los diferentes apartados, con una ilación textual que lleva a la comprensión del porqué de cada uno de estos. Asimismo, es evidente que la perspectiva que orienta la construcción conceptual parte del análisis de documentos que ha realizado la autora y el vínculo con situaciones que pueden ser cercanas a los posibles lectores de esta guía (estudiantes de licenciatura en física).

Como sugerencia, considero que la guía podría enriquecerse en algunos apartados con la propuesta de situaciones experimentales o actividades prácticas que los lectores puedan realizar, por ejemplo con la guía de un video (que se encuentre en la web), para enriquecer la experiencia y vincularla con los elementos teóricos. En mi experiencia he encontrado que aunque algunos conceptos y leyes de la termodinámica parece ser cercanas a la experiencia e intuición de las personas, algunas veces no se cuenta con la experiencia consiente que permita de manera inmediata ese vínculo.

**Universidad Pedagógica Nacional
Facultad de Ciencia y Tecnología**

Trabajo de Investigación: Elaboración de una guía de estudio sobre el concepto de entropía como fuente de consulta para el aprendizaje autónomo

Rubrica de validación expertos

Reciba un cordial saludo. Agradezco de manera especial su disposición para participar en el proceso de valoración académica de la *Guía de estudio sobre el concepto de entropía*, elaborada como producto del trabajo de grado en modalidad de monografía de la Licenciatura en Física.

El presente proceso de validación tiene como propósito someter el documento a revisión experta con el fin de evaluar la pertinencia conceptual, el rigor disciplinar, la coherencia estructural, la claridad expositiva y la relevancia formativa de cada una de las secciones que conforman la guía. Su juicio académico resulta fundamental para garantizar la solidez teórica del tratamiento del concepto de entropía, desde la perspectiva termodinámica y una breve fundamentación en la física estadística, así como la consistencia interna del desarrollo argumentativo propuesto.

La valoración que usted realice permitirá fortalecer la calidad académica del material, consolidar su validez conceptual y asegurar que el documento cumpla con los estándares propios de la formación en Licenciatura en Física.

Objetivo del proyecto: Diseñar una guía de estudio autónomo centrada en el concepto de entropía que desarrolle el concepto con profundidad teórica y con la claridad expositiva necesarias para consolidarse como una fuente rigurosa de consulta en el contexto de la formación de Licenciados en Física.

Objetivo del instrumento de valoración: Recoger la apreciación fundamentada de expertos en el área respecto a la calidad conceptual, coherencia estructural, utilidad y pertinencia académica de cada sección de la guía, con el fin de realizar los ajustes necesarios que fortalezcan su consistencia teórica y su aporte formativo.

Instrucciones de diligenciamiento: Se solicita revisar cuidadosamente cada sección de la guía y registrar su valoración en los criterios establecidos. La evaluación deberá considerar, entre otros aspectos:

- El rigor conceptual y la precisión disciplinar.
- La coherencia interna y la articulación entre apartados.
- La claridad en el desarrollo de las explicaciones y argumentos.
- La pertinencia del nivel de profundidad para la formación en Licenciatura en Física.
- La contribución del material al fortalecimiento del estudio autónomo.

En caso de considerarlo pertinente, puede consignar observaciones o recomendaciones específicas en el espacio destinado a comentarios, con el propósito de enriquecer y perfeccionar el documento.

Rúbrica de Validación

N.º Sección	Nombre de la sección	Pertinencia conceptual de la sección	Claridad expositiva y rigor disciplinar de la sección	Coherencia con el objetivo del trabajo	Relevancia para el proceso de aprendizaje autónomo del concepto	Comentarios / Sugerencias
1.1	¿Qué es la energía?	☐ Sí ☐ No	☐ Sí ☐ No	☐ Sí ☐ No	☐ Sí ☐ No	Los comentarios se plantean de manera general para todas las secciones
1.2	Formas de energía	☐ Sí ☐ No	☐ Sí ☐ No	☐ Sí ☐ No	☐ Sí ☐ No	
1.3	Propiedades de la energía	☐ Sí ☐ No	☐ Sí ☐ No	☐ Sí ☐ No	☐ Sí ☐ No	

2.1	Tipos de sistemas	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	
2.2	Variables de estado	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	
2.3	Variables de proceso	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	
2.4	Ley Cero de la Termodinámica	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	
2.5	Calorimetría	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	
2.6	Primera Ley de la Termodinámica	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	
2.7	Espontaneidad y sentido privilegiado de los procesos	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	

3.1	Proceso cuasiestático	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	
3.2	Proceso adiabático	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	
3.3	Procesos con alguna propiedad constante	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	
3.4	Ciclo	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☐ Sí ☐ No	
3.5	Operatividad en situaciones con gases ideales	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	
4.1	Procesos reversibles e irreversibles	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	
4.2	Máquinas térmicas	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	

4.3	Eficiencia	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	
4.4	Ciclo de Carnot	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	
4.5	Limitaciones de la Primera Ley de la Termodinámica	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	
4.6	Surgimiento del concepto de entropía	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	
4.7	La entropía y la Segunda Ley de la Termodinámica	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	
4.8	Operatividad y cálculo de la entropía	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	
4.9	Sentido físico de la entropía, ¿Qué es la entropía?	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	

4.10	Un acercamiento a la entropía desde la perspectiva microscópica	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	x ☐ Sí ☐ No	
-------------	---	---	---	---	---	--

Comentarios Generales

Agradezco que utilice este espacio para registrar sus apreciaciones generales. Puede incluir observaciones globales relacionadas con la estructura, pertinencia, claridad, coherencia y relevancia de la guía de estudio, así como sugerencias para su mejora. Sus aportes serán fundamentales para optimizar la mejora de la guía y garantizar que cumpla con los objetivos propuestos en la monografía.

Considero que es un trabajo interesante, pero resulta denso para una guía de estudio, sugiero que sea ilustrativa utilizando, por ejemplo, mapas conceptuales, pues hay bastante texto en algunas secciones. Además, sugiero agregar la sección de guía de estudio con recomendaciones de cómo gestionar el tiempo y el uso de materiales entre otros. También sugiero agregar pequeñas experiencias que favorecen el aprendizaje o por lo menos citar experimentos que históricamente han sido significativos.

Me parece oportuno indicar a que nivel educativo va dirigida la guía por el nivel de formalización que se alcanza en la sección de entropía, además es importante indicar los objetivos de aprendizaje que se buscan en cada sección.

**Universidad Pedagógica Nacional
Facultad de Ciencia y Tecnología**

Trabajo de Investigación: Elaboración de una guía de estudio sobre el concepto de entropía como fuente de consulta para el aprendizaje autónomo

Rubrica de validación expertos

Reciba un cordial saludo. Agradezco de manera especial su disposición para participar en el proceso de valoración académica de la *Guía de estudio sobre el concepto de entropía*, elaborada como producto del trabajo de grado en modalidad de monografía de la Licenciatura en Física.

El presente proceso de validación tiene como propósito someter el documento a revisión experta con el fin de evaluar la pertinencia conceptual, el rigor disciplinar, la coherencia estructural, la claridad expositiva y la relevancia formativa de cada una de las secciones que conforman la guía. Su juicio académico resulta fundamental para garantizar la solidez teórica del tratamiento del concepto de entropía, desde la perspectiva termodinámica y una breve fundamentación en la física estadística, así como la consistencia interna del desarrollo argumentativo propuesto.

La valoración que usted realice permitirá fortalecer la calidad académica del material, consolidar su validez conceptual y asegurar que el documento cumpla con los estándares propios de la formación en Licenciatura en Física.

Objetivo del proyecto: Diseñar una guía de estudio autónomo centrada en el concepto de entropía que desarrolle el concepto con profundidad teórica y con la claridad expositiva necesarias para consolidarse como una fuente rigurosa de consulta en el contexto de la formación de Licenciados en Física.

Objetivo del instrumento de valoración: Recoger la apreciación fundamentada de expertos en el área respecto a la calidad conceptual, coherencia estructural, utilidad y pertinencia académica de cada sección de la guía, con el fin de realizar los ajustes necesarios que fortalezcan su consistencia teórica y su aporte formativo.

Instrucciones de diligenciamiento: Se solicita revisar cuidadosamente cada sección de la guía y registrar su valoración en los criterios establecidos. La evaluación deberá considerar, entre otros aspectos:

- El rigor conceptual y la precisión disciplinar.
- La coherencia interna y la articulación entre apartados.
- La claridad en el desarrollo de las explicaciones y argumentos.
- La pertinencia del nivel de profundidad para la formación en Licenciatura en Física.
- La contribución del material al fortalecimiento del estudio autónomo.

En caso de considerarlo pertinente, puede consignar observaciones o recomendaciones específicas en el espacio destinado a comentarios, con el propósito de enriquecer y perfeccionar el documento.

Rúbrica de Validación

N.º Sección	Nombre de la sección	Pertinencia conceptual de la sección	Claridad expositiva y rigor disciplinar de la sección	Coherencia con el objetivo del trabajo	Relevancia para el proceso de aprendizaje autónomo del concepto	Comentarios / Sugerencias
1.1	¿Qué es la energía?	☒ Sí ☐ No	☐ Sí ☒ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	Considero que en el abordaje que se hace, se deja la idea que este concepto es abstracto y por tanto difícil de comprender, sin embargo, considero que todos los conceptos son abstractos. Una de las cosas que no se aborda es que energía es la medida de la transformación de una clase de fenómeno en otro. No es algo que se contiene sino algo que se mide.

1.2	Formas de energía	☒ Sí ☐ No	☐ Sí ☒ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	En este apartado se presentan algunos ejemplos ilustrativos, sin embargo como decia antes no se aborda la energia como la medida de las transformación, sino que se trata como algo que existe y puede tomar diferentes formas
1.3	Propiedades de la energía	☒ Sí ☐ No	☐ Sí ☒ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	Considero que los conceptos que introduce de <i>calidad de la energia</i> y <i>degradación</i> , son ambiguos. Se requiere ser mas preciso para ganar en rigor.
2.1	Tipos de sistemas	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	La clasificación es viable y pertinente. Adecuada para el aprendizaje autonomo que se propone pero se recomienda problematizar la formulación del sistema aislado y colocarla como una idealización necesaria para la comprension científica, pero que no se puede objetivar en nuestros sistemas experimentales, lo que podemos hacer es aproximar lo mas posible en los casos que se hace necesario.
2.2	Variables de estado	☒ Sí ☐ No	☐ Sí ☒ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	Se presentan impresiones en la definición de presión Revisar la idea de temperatura porque queda como si para nivel microscopico aplicara una definicion y para nivel macroscopico otro, pero no se problematiza desde que construcciones teoricas se justifica esta diferencia.

2.3	VARIABLES DE PROCESO	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	Se recomienda revisar la redacción y presentar situaciones para tratar la relación entre la variable y la trayectoria del sistema.
2.4	Ley Cero de la Termodinámica	☒ Sí ☐ No	☐ Sí ☒ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	El video de apoyo tiene imprecisiones y formas de hablar del calor como contenido de un cuerpo, Además, cuando se habla de un sentido privilegiado del calor se tendría que matizar porque no se deriva directamente de la ley cero
2.5	Calorimetría	☒ Sí ☐ No	☐ Sí ☒ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	Este apartado debe trabajarse a profundidad o revisar la pertinencia, porque como está en este momento no aporta elementos interesantes. Las formulaciones matemáticas aparecen sin suficiente fundamentación conceptual.
2.6	Primera Ley de la Termodinámica	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	El desarrollo es adecuado aunque la formulación común de la conservación de la energía reitera la energía desde una concepción sustancialista cuando el rigor es relacional. El video de apoyo es adecuado sin embargo, cuando hace la clasificación de la energía en tres clases (cinética, potencial y calor) no se corresponde con la clasificación que había hecho en el punto 1.2. En ambos apartados se tendría que revisar las clasificaciones que se hacen porque no se

						mantiene un mismo criterio de clasificación.
2.7	Espontaneidad y sentido privilegiado de los procesos	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	En esta parte se logra orientar la introducción del problema de la entropía, sin embargo, el uso de terminos como <i>sentido privilegiado o energia mas valiosa o mas versatil</i> , son valoraciones que pueden llevar a confusiones.
3.1	Proceso cuasiestático	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	Buen tratamiento de la temática
3.2	Proceso adiabático	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	Buen tratamiento de la temática
3.3	Procesos con alguna propiedad constante	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	Buen tratamiento de la tematica, sugiero no limitarse a la presentacion formal sino que puede abordarse situaciones específicas El titulo de la sesion es ambiguo
3.4	Ciclo	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	El titulo de la sesion es ambiguo. Se sugiere hacer una presentacion que no solo privilegie lo algoritmico
3.5	Operatividad en situaciones con gases ideales	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	Esta sesion tiene un fuerte énfasis algorítmico que podria equilibrarse con la presentacion de situaciones que reten conceptualmente para la comprensión de los procesos termodinámicos. Los

						videos incluidos, no aportan, podrian ser excluidos.
4.1	Procesos reversibles e irreversibles	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	El tratamiento es adecuado, aunque en el ejemplo final se habla de un proceso natural y se habla del regreso del calor. Habria que cuidar el lenguaje para no introducir modos de hablar inadecuados. Me preguntaba, si realmente se necesita IA para hacer gráficas tan sencillas como la que se presenta en este ejemplo?
4.2	Máquinas térmicas	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	La contextualización es adecuada, pero consideraria hacer más énfasis en que en el ciclo ideal el trabajo producido depende de la diferencia de temperatura entre la fuente fria y la fuente caliente.
4.3	Eficiencia	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	El contenido es adecuado
4.4	Ciclo de Carnot	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	El contenido es adecuado
4.5	Limitaciones de la Primera Ley de la Termodinámica	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	Se hace una buena presentación de la necesidad conceptual de calor no convertido en calor y enlaza con la siguiente sesión de manera adecuada
4.6	Surgimiento del concepto de entropía	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	Aparece como una necesidad conceptual de los anteriores numerales 4

4.7	La entropía y la Segunda Ley de la Termodinámica	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	El desarrollo es adecuado, sin embargo la explicación de la concepción de la entropía como variable de estado se presenta de manera enunciativa. Por ser este el asunto central del material, no basta con solo decirlo en un párrafo, recomendaría problematizar este asunto adecuadamente
4.8	Operatividad y cálculo de la entropía	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	Se hace una presentación adecuada de la operatividad matemática. Considero relevante la inclusión de los videos producidos por la autora, que en la medida que se siga profundizando la problemática, serán mejorados. Los ejercicios que se proponen en el material son los que se presentan de manera estandar, podría enriquecerse el material con problemas abiertos que pongan en juego la relación con el esquema conceptual trabajado.
4.9	Sentido físico de la entropía, ¿Qué es la entropía?	☒ Sí ☐ No	☐ Sí ☒ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	Considero que debe evitarse hacer tratamientos simples como procesos mas fáciles o mas difíciles. Desde el punto de vista científico no se corresponde con lo que esta abordando. También la idea de orden y desorden se asumen desde las ideas corrientes y cotidianas, sin embargo, sugiero que se trabaje la

						perspectiva de probabilidades donde se corresponden con ideas argumentadas científicas.
4.10	Un acercamiento a la entropía desde la perspectiva microscópica	☒ Sí ☐ No	☐ Sí ☒ No	☒ Sí ☐ No	☒ Sí ☐ No	Considero que se hace una presentación general de la entropía desde el punto de vista de la termodinámica estadística. Se iguala la perspectiva microscópica a la perspectiva de probabilidades, pero no se hace un desarrollo suficiente y comparativo con la perspectiva termodinámica fenomenológica que es la que mayoritariamente ocupa los apartados anteriores.

Comentarios Generales

Agradezco que utilice este espacio para registrar sus apreciaciones generales. Puede incluir observaciones globales relacionadas con la estructura, pertinencia, claridad, coherencia y relevancia de la guía de estudio, así como sugerencias para su mejora. Sus aportes serán fundamentales para optimizar la mejora de la guía y garantizar que cumpla con los objetivos propuestos en la monografía.

Se han presentado recomendaciones referidas principalmente al rigor disciplinar en la anterior matriz con respecto a cada ítem. Considero que el material puede ser pertinente, relevante y responde al propósito del trabajo. Hay que revisar la conexión que no ha establecido entre el apartado 1 y los siguientes. También pienso que la conceptualización de la entropía no se problematiza en la medida que se tiende a reproducir una versión convencional, mas o menos igual a la que se acostumbra a encontrar en los libros de consulta de nuestros estudiantes, lo que prioriza un tratamiento expositivo y limita la comprensión crítica de esta parte de las ciencias.