
Del motor a la entropía: Conectando formulaciones del segundo principio de la termodinámica a través del Triángulo de Johnstone

From motor to entropy: connecting formulations of the second thermodynamic principle through Johnstone's Triangle

Investigación

Carlos Rinaldi

Argentina

crinaldi@unsam.edu.ar

Universidad Nacional de San Martín

orcid.org/0000-0003-2821-3123

Resumen

El Segundo Principio de la Termodinámica es conceptualmente complejo e históricamente multifacético, constituyendo un desafío significativo en la educación científica. Este artículo emplea el Triángulo de Johnstone—un modelo que distingue niveles de representación macroscópico, microscópico y simbólico—como marco pedagógico para relacionar las tres interpretaciones fundamentales del Segundo Principio: los límites de eficiencia macroscópica de Carnot, la entropía estadística de Boltzmann, y la axiomatización formal de Carathéodory. Al alinear estas formulaciones con los niveles de Johnstone, proponemos una estrategia educativa comprensiva para fomentar la comprensión conceptual profunda en termodinámica.

Palabras clave: Segundo Principio Termodinámico, Triángulo de Johnstone, Carnot, Boltzmann, Carathéodory, educación científica, niveles de representación

Abstract

The Second Thermodynamic Principle is conceptually complex and historically multifaceted, making it a challenge in science education. This paper employs Johnstone's Triangle—a model distinguishing macroscopic, microscopic, and symbolic levels of representation—as a pedagogical framework to relate the three foundational interpretations of the Second Principle: Carnot's macroscopic efficiency limits, Boltzmann's statistical entropy, and Carathéodory's formal axiomatization. By aligning these formulations with Johnstone's levels, we propose a comprehensive educational strategy for fostering deep conceptual understanding in thermodynamics.

Palabras clave: Second Thermodynamic Principle, Johnstone's Triangle, Carnot, Boltzmann, Carathéodory, science education, representational levels

Revista
Entropía
Educativa

Entropía Educativa Centro de Investigación

ISSN-e: 2981-4723

vol. 4, n.º 6, enero - junio 2026 p. 126 - 135

revista@entropiaeducativa.org

Aprobación: 21 de abril de 2026

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-CompartirIgual 4.0 Internacional.

Introducción

Enseñar el Segundo Principio de la Termodinámica sigue siendo un desafío persistente en la educación científica debido a su naturaleza abstracta, múltiples formulaciones y complejidad representacional. A diferencia de la mecánica newtoniana o las transformaciones de energía simples, el Segundo Principio no se presta fácilmente a procesos intuitivos y observables. Sus complejidades conceptuales frecuentemente generan concepciones alternativas y comprensión fragmentada en los estudiantes (Kesidou & Duit, 1993; Viennot, 1998). Comprender el Segundo Principio también requiere que los estudiantes experimenten un cambio conceptual significativo, ya que las intuiciones tradicionales frecuentemente entran en conflicto con las explicaciones científicas formales. Esto se alinea con la investigación educativa más amplia sobre el estudiantaje de química y física, que destaca la naturaleza dinámica y transformadora de los procesos de estudiantaje científico (Talanquer, 2011a).

Dentro de este contexto pedagógico, el Triángulo de Johnstone ha emergido como una herramienta analítica poderosa. Originalmente desarrollado en el dominio de la educación química (Johnstone, 1991), el modelo identifica tres niveles representacionales distintos pero interrelacionados:

- Macroscópico:** fenómenos directamente observables como temperatura, calor y presión,
- Microscópico:** procesos a nivel de partículas incluyendo movimiento molecular y comportamiento estadístico,
- Simbólico:** expresiones matemáticas y gráficas como ecuaciones y funciones de entropía.

126

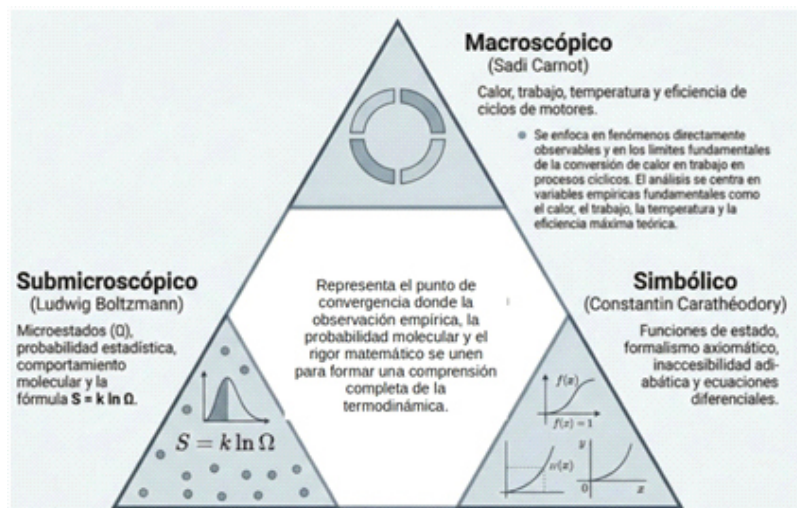


Figura 1: Representa el triángulo de Johnstone para el 2do Principio de la termodinámica.

La investigación ha demostrado que los estudiantes frecuentemente enfrentan dificultades para coordinar estos niveles, operando frecuentemente en un vértice del triángulo mientras descuidan los otros, resultando en una comprensión superficial o inconsistente del concepto científico (Duit & Treagust, 2003). En termodinámica, donde los principios fundamentales se articulan diferentemente a través de líneas históricas y disciplinarias, esta disyunción se vuelve particularmente problemática.

El Segundo Principio ofrece una oportunidad única para síntesis representacional. Las formulaciones de Carnot, Boltzmann y Carathéodory pueden mapearse efectivamente en los vértices macroscópico, microscópico y simbólico del Triángulo de Johnstone, respectivamente. El modelo de eficiencia de motores térmicos de Carnot ejemplifica la perspectiva macroscópica; la entropía estadística de Boltzmann representa la vista microscópica enraizada en la dinámica molecular; y el enfoque abstracto y axiomático de Carathéodory ejemplifica la formulación simbólica. Al integrar estas perspectivas en una narrativa pedagógica coherente, los educadores pueden mejorar la comprensión de los estudiantes e incentivar el pensamiento representacional flexible. Mientras que estudios previos han abordado concepciones alternativas estudiantiles sobre entropía o enfatizado formulaciones específicas del Segundo Principio, pocos han intentado un marco pedagógico integrativo que conecte sistemáticamente múltiples interpretaciones históricas. Por ejemplo, Styer (2000) discute la interpretación estadística de la entropía para cursos introductorios, mientras que Leff (2007) reflexiona sobre la entropía desde perspectivas físicas e instruccionales. Sin embargo, estos trabajos frecuentemente permanecen dentro de un único nivel representacional. El presente artículo contribuye vinculando explícitamente los enfoques de Carnot, Boltzmann y Carathéodory a los tres dominios representacionales de Johnstone, ofreciendo una síntesis novedosa para la educación en termodinámica.

Marco Teórico

El Triángulo de Johnstone

El Triángulo de Johnstone, introducido por Johnstone (1991), propone que la comprensión científica en química — y por extensión en otras ciencias— se organiza a través de tres dominios interrelacionados: macroscópico, submicroscópico y simbólico. Estos dominios representan diferentes modalidades a través de las cuales los estudiantes perciben e interactúan con contenido científico. El nivel macroscópico se refiere a fenómenos observables como temperatura, presión y cambios de estado. El nivel submicroscópico involucra entidades y procesos a escala molecular o atómica, como movimiento cinético molecular o distribución de energía. El nivel simbólico abarca las herramientas matemáticas y representacionales usadas para modelar y predecir comportamiento, incluyendo ecuaciones, gráficos y símbolos científicos.

La fortaleza del modelo de Johnstone radica en su énfasis en las demandas cognitivas de cambiar entre estos modos representacionales. Los estudiantes frecuentemente se inclinan hacia un nivel de razonamiento y encuentran dificultades cuando se requiere traducir a través del triángulo (Duit & Treagust, 2003). Esta compartimentalización puede oscurecer la naturaleza integrativa de la comprensión científica, particularmente en temas abstractos como termodinámica. Como estudios han demostrado, ayudar a los estudiantes a hacer conexiones explícitas entre estas formas representacionales puede mejorar la claridad conceptual y reducir concepciones alternativas (Kesidou & Duit, 1993).

La termodinámica, como campo multidisciplinario e históricamente rico, ejemplifica la necesidad de fluidez representacional. Cada formulación del Segundo Principio—empírica, estadística y formal—se alinea naturalmente con uno de los vértices del triángulo, haciendo de ella un paisaje conceptual ideal para aplicar el modelo de Johnstone. En esta luz, el Triángulo de Johnstone sirve no meramente como marco diagnóstico sino también como herramienta constructiva para diseñar instrucción que andamie transiciones entre niveles, enriqueciendo así la comprensión conceptual del estudiante. Estudios recientes han enfatizado además la aplicabilidad del modelo de Johnstone más allá de química, particularmente en desarrollar competencia representacional en dominios complejos como física y educación científica interdisciplinaria (Talanquer, 2011b; Kozma & Russell, 2005). Estos trabajos refuerzan la idea de que ayudar a los estudiantes a transitar entre niveles macroscópicos, submicroscópicos y simbólicos es crítico para comprensión conceptual significativa en ciencia.

La Formulación Macroscópica de Carnot

Las precursoras reflexiones de Sadi Carnot sobre la naturaleza de las máquinas térmicas sentaron las bases para la interpretación macroscópica del Segundo Principio. A través de su estudio de procesos cíclicos, Carnot demostró que existe una limitación fundamental a la eficiencia de cualquier motor operando entre dos reservorios térmicos. Esta conclusión fue alcanzada sin depender de teoría atómica, enfocándose en cambio en cantidades medibles como calor, trabajo y temperatura.

El razonamiento de Carnot introdujo la idea de una eficiencia máxima teórica, dependiente solamente de las temperaturas de la fuente de calor y el sumidero. Esta noción subraya la naturaleza irreversible de procesos reales e ilumina el flujo unidireccional de transformaciones de energía, una característica de comportamiento termodinámico macroscópico. Es este énfasis en observaciones empíricamente fundamentadas a nivel del sistema lo que posiciona la contribución de Carnot firmemente dentro del vértice macroscópico del Triángulo de Johnstone.

Educativamente, el marco de Carnot ofrece un punto de entrada concreto para que los estudiantes comprendan el segundo principio a través de conceptos físicos familiares. Examinando límites de desempeño en máquinas prácticas, los estudiantes pueden comenzar a

apreciar las implicaciones más amplias de la irreversibilidad termodinámica sin requerir comprensión microscópica detallada. Así, la formulación de Carnot no solo sirve como fundación histórica, sino también como ancla pedagógicamente efectiva para introducir el Segundo Principio.

La formulación microscópica de Boltzmann

Ludwig Boltzmann revolucionó la termodinámica al proporcionar una interpretación estadística de la entropía enraizada en el comportamiento de constituyentes microscópicos. En lugar de tratar cantidades termodinámicas como puramente empíricas, conectó propiedades macroscópicas con el comportamiento probabilístico de moléculas, introduciendo un marco de mecánica estadística. Su ecuación seminal, $S = k \cdot \ln(\Omega)$, expresa la entropía como función del número de microestados accesibles Ω , vinculando la irreversibilidad termodinámica con la tendencia estadística de sistemas a evolucionar hacia configuraciones más probables.

Esta vista microscópica presenta la entropía como propiedad emergente resultante del comportamiento colectivo de incontables partículas. Ilumina la naturaleza direccional del tiempo y el Segundo Principio no como determinismo estricto, sino como una tendencia abrumadoramente probable. En términos del Triángulo de Johnstone, el enfoque de Boltzmann se alinea con el vértice submicroscópico, permitiendo a los estudiantes profundizar en interacciones en partículas y apreciar las raíces fundamentales de la entropía en probabilidad y desorden.

Desde una perspectiva pedagógica, introducir la vista de Boltzmann enriquece el paisaje conceptual de los estudiantes. Fomenta comprensión que va más allá de observaciones macroscópicas, incentivando a los estudiantes a reconciliar leyes macroscópicas con explicaciones microscópicas. Sin embargo, debido a la abstracción de la probabilidad y la naturaleza invisible del comportamiento molecular, los educadores deben andamiar esta transición cuidadosamente, construyendo puentes intuitivos desde experiencias familiares hacia el razonamiento estadístico.

El formalismo simbólico de Carathéodory

Constantin Carathéodory ofreció un enfoque fundamentalmente diferente al Segundo Principio, enmarcándolo en términos de estructura matemática y geometría diferencial. El tratamiento axiomático de Carathéodory del Segundo Principio fue elaborado y formalizado posteriormente por Planck, cuyas contribuciones enfatizaron la consistencia y rigor matemático de este enfoque (como se cita en Leff, 2007). Su formulación, enraizada en principios axiomáticos rigurosos, postula que, en la vecindad de cualquier estado de equilibrio, hay estados vecinos que no pueden ser alcanzados a través de procesos adiabáticos. Este enfoque conduce a la introducción formal de la entropía como función de estado y permite la derivación de leyes termodinámicas desde consistencia puramente matemática.

El método de Carathéodory elude tanto modelos mecánicos como razonamiento probabilístico, ofreciendo en cambio una lente simbólica y abstracta enraizada en el formalismo de espacios de estado y condiciones de integrabilidad. Tal enfoque se alinea naturalmente con el vértice simbólico del Triángulo de Johnstone, donde el significado es transmitido a través de constructos teóricos y elegancia matemática en lugar de visualización empírica o molecular directa. Aunque menos intuitivo que las formulaciones de Carnot o Boltzmann, la axiomatización de Carathéodory proporciona alto nivel de generalidad y coherencia lógica. Es particularmente valioso para estudiantes avanzados, ofreciendo un enfoque sobre la estructura fundamental de la teoría termodinámica. Desde una perspectiva instructiva, introducir este punto de vista puede cultivar en los estudiantes apreciación por la naturaleza simbólica y deductiva de la química física teórica, especialmente cuando se enmarca como parte de una narrativa más amplia que la conecta a otros niveles representacionales.

Formulación	Figura histórica	Nivel representacional	Conceptos clave
Eficiencia de Carnot	Sadi Carnot	Macroscópico	Calor, trabajo, temperatura, ciclos de motores
Entropía Estadística	Ludwig Boltzmann	Submicroscópico	Microestados, probabilidad, comportamiento molecular
Formalismo Axiomático	Constantin Carathéodory	Simbólico	Funciones de estado, inaccesibilidad adiabática, ecuaciones diferenciales

130

Tabla 1: Mapeando las Tres Formulaciones del Segundo Principio en el Triángulo de Johnstone

La Tabla 1 resume el mapeo pedagógico de cada formulación del Segundo Principio de la Termodinámica en los niveles representacionales del Triángulo de Johnstone, reforzando el marco integrativo propuesto en este trabajo.

Propuesta y aplicación

Las actividades de aula y estrategias discutidas aquí están basadas en datos empíricos originales, no publicados, pero si utilizados en los cursos de Química Física de la Universidad, y sintetizadas de trabajos publicados previos y experiencias docentes documentadas en la literatura (e.g., Munfaridah et al., 2021; Kozma & Russell, 2005; Styer, 2000).

Para aprovechar efectivamente el Triángulo de Johnstone en la enseñanza de termodinámica, los educadores podrían diseñar actividades que explícitamente comprometan a los estu-

diantes a través de los tres niveles representacionales. Esta sección delinea estrategias prácticas e ilustraciones de aula que promueven integración representacional y profundizan la comprensión del Segundo Principio.

Mapeo conceptual y tareas de Triangulación

Incentivar a los estudiantes a construir mapas conceptuales que vinculen fenómenos macroscópicos (e.g., flujo de calor), explicaciones submicroscópicas (e.g., movimiento molecular) y representaciones simbólicas (e.g., ecuaciones de entropía). Asignar tareas de triangulación en las cuales los estudiantes deben describir un proceso—como la operación de un refrigerador o un motor de vapor—en cada vértice del Triángulo de Johnstone. Esta práctica ayuda a los estudiantes a desarrollar fluidez en cambiar entre perspectivas y reconocer cómo diferentes niveles se complementan mutuamente (Johnstone, 1991; Duit & Treagust, 2003).

Simulaciones de sistemas termodinámicos

Tener estudiantes que simulen sistemas termodinámicos (e.g., moléculas de agua en estado gaseoso, componentes de un motor de Carnot). A través de interacciones de las partes de un motor, los estudiantes experimentan la transferencia de energía y restricciones de procesos adiabáticos o isotérmicos. Este enfoque incentiva el pensamiento submicroscópico y macroscópico simultáneamente y construye un andamio memorable para formalización simbólica posterior (Kesidou & Duit, 1993).

Talleres de resolución de problemas integrados

Diseñar conjuntos de problemas que requieran que los estudiantes interpreten una situación termodinámica dada de tres maneras. Por ejemplo, después de calcular la eficiencia máxima de un motor de Carnot simbólicamente, los estudiantes explican la razón molecular detrás de este límite y reflexionan sobre cómo se observa en el desempeño de motores en el mundo real. Incentivar este nivel de traducción analítica refuerza conexiones cross-representacionales (Viennot, 1998).

Narrativa histórica y discusión filosófica

Introducir el desarrollo histórico del Segundo Principio, comparando motivaciones y limitaciones de Carnot, Boltzmann y Carathéodory. Entendiendo el contexto de cada figura, los estudiantes pueden apreciar por qué múltiples formulaciones existen y cómo cada una mapea en compromisos epistemológicos diferentes—empírico, estadístico y formal. Este enfoque narrativo invita reflexión metacognitiva y ayuda a estudiantes a evaluar críticamente modelos científicos (Planck, como se cita en Leff, 2007).

Evaluación formativa diagnóstica

Usar evaluaciones dirigidas para diagnosticar preferencias representacionales por defecto de los estudiantes. Instrumentos como preguntas de opción múltiple con justificaciones

pueden revelar si los estudiantes dependen predominantemente de razonamiento macroscópico, submicroscópico o simbólico. Basado en estos enfoques, los profesores pueden adaptar retroalimentación e intervención para cerrar brechas representacionales.

Estas estrategias no solo facilitan el cambio conceptual, sino que también cultivan alfabetización científica al ayudar a estudiantes a enganchar la ciencia como disciplina multicapa e integrativa.

Las implementaciones preliminares en aula de estas estrategias, llevadas a cabo en cursos de termodinámica de nivel superior, sugieren que los estudiantes responden positivamente al uso integrativo del Triángulo de Johnstone. Las encuestas informales y observaciones del profesor indicaron mayor participación y habilidad mejorada para articular conexiones a través de niveles macroscópicos, microscópicos y simbólicos. Estos hallazgos son consistentes con investigación más amplia en educación de física, mostrando que múltiples representaciones en instrucción—como combinar gráficos, diagramas, expresiones matemáticas y descripciones verbales—apoyan el aprendizaje y el engagement estudiantil (Munfaridah, Avraamidou & Goedhart, 2021). Aunque la evaluación sistemática está en curso, estos insights iniciales apoyan el valor pedagógico de la triangulación representacional en mejorar comprensión conceptual.

Discusión

132

El marco integrativo propuesto en este trabajo, mapeando el Segundo Principio Termodinámico en el triángulo representacional de Johnstone, abre nuevas sendas para reconceptualizar la instrucción en termodinámica. Más allá de su aplicación pedagógica inmediata, este enfoque invita a reflexionar sobre problemas epistemológicos y curriculares más amplios en educación científica.

Primero, la alineación de formulaciones históricas con niveles representacionales revela cómo el conocimiento disciplinario evoluciona a través de cambios en representaciones dominantes. Moviéndose del razonamiento macroscópico empírico de Carnot hacia la vista submicroscópica estadística de Boltzmann y finalmente hacia el formalismo simbólico de Carathéodory, los estudiantes no solo transitan terreno conceptual, sino que también se enganchan con la naturaleza cambiante de la explicación científica en sí. Este ordenamiento histórico-representacional subraya el valor de incrustar filosofía e historia de la ciencia en diseño educativo.

Segundo, mientras el modelo ayuda a aclarar contenido abstracto, también revela barreras potenciales. No todos los estudiantes fácilmente cambiarán entre niveles, especialmente en contextos donde el razonamiento simbólico es privilegiado sobre la experiencia empírica. Por lo tanto, los profesores deben permanecer atentos a demandas cognitivas planteadas por traducción representacional. Las evaluaciones formativas, como aquellas sugeridas en

este estudio, son esenciales para identificar modos de razonamiento por defecto de estudiantes y apoyar una integración más balanceada.

Tercero, el marco basado en Johnstone puede informar enseñanza interdisciplinaria. Los conceptos termodinámicos recurren en química, biología, ingeniería y aún economía. Mapear representaciones en estos dominios podría enriquecer la competencia interdisciplinaria de estudiantes y promover la transferencia de estudiantes.

Un trabajo futuro podría investigar cómo el triángulo opera en campos más allá de física, o si su geometría pudiera ser adaptada para acomodar dominios representacionales emergentes como simulaciones o metáforas visuales.

Finalmente, aunque la estrategia propuesta muestra muchas posibilidades, es necesaria una investigación sistemática. Las actividades preliminares de aula son alentadoras, pero los estudios controlados con evaluaciones conceptuales pre/post y seguimiento longitudinal de competencia representacional proporcionarían una base de evidencia más fuerte. Las colaboraciones entre investigadores en educación científica y expertos disciplinarios podrían refinar más el modelo y probar su efectividad a través de poblaciones estudiantiles diversas. Estas reflexiones sugieren que la alineación propuesta entre el Segundo Principio Termodinámico y el triángulo de Johnstone ofrece más que un dispositivo didáctico; también proporciona una lente conceptual para analizar cómo ideas científicas son estructuradas y comunicadas. Mientras el modelo está enraizado en enseñanza de termodinámica, su relevancia puede extenderse a otras áreas donde la abstracción conceptual y fluidez representacional son centrales. El refinamiento continuo y validación empírica serán claves para entender su verdadero potencial en diversos contextos educativos.

133

Conclusión

El Segundo Principio de la Termodinámica, con sus formulaciones multifacéticas y fundamentos abstractos, plantea desafíos duraderos tanto para estudiantes como para educadores. Sin embargo, la integración del Triángulo de Johnstone en educación en termodinámica ofrece un marco pedagógico prometedor para abordar estas dificultades. Al alinear los fundamentos macroscópicos de Carnot, el razonamiento molecular de Boltzmann y el formalismo simbólico de Carathéodory con los niveles representacionales del triángulo, este modelo permite una comprensión más coherente e interconectada de entropía e irreversibilidad.

Tal enfoque triangulado no solo ilumina el paisaje conceptual de la termodinámica, sino que también apoya el desarrollo de fluidez representacional—una habilidad crítica en razonamiento científico. Las estrategias de enseñanza delineadas aquí demuestran cómo prácticas de aula pueden adaptarse para incentivar transiciones a través de dominios macroscópicos, microscópicos y simbólicos, fomentando el compromiso conceptual y pensamiento crítico más profundos.

Finalmente, posicionar el Segundo Principio dentro de la estructura del Triángulo de Johnstone crea puentes entre interpretación histórica y práctica pedagógica moderna. Esta alineación no solo enriquece las experiencias de los estudiantes, sino que también ejemplifica cómo un diseño instruccional reflexivo puede hacer que conceptos científicos complejos sean más accesibles, significativos y duraderos.

Referencias

- Duit, R., & Treagust, D. F. (2003). Conceptual change: A powerful framework for improving science teaching and learning. *International Journal of Science Education*, 25(6), 671–688. <https://doi.org/10.1080/09500690305016>
- Johnstone, A. H. (1991). Why is science difficult to learn? Things are seldom what they seem. *Journal of Computer Assisted Learning*, 7(2), 75–83. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2729.1991.tb00230.x>
- Kesidou, S., & Duit, R. (1993). Students' conceptions of the Second Principle of thermodynamics— An interpretive study. *Journal of Research in Science Teaching*, 30(1), 85–106. <https://doi.org/10.1002/tea.3660300107>
- Kozma, R. B., & Russell, J. (2005). Students becoming chemists: Developing representational competence. In J. K. Gilbert (Ed.), *Visualization in Science Education* (pp. 121–146). Springer. https://doi.org/10.1007/1-4020-3613-2_7
- Leff, H. S. (2007). Entropy, its language, and interpretation. *Foundations of Physics*, 37(12), 1744–1766. <https://doi.org/10.1007/s10701-007-9163-3>
- Munfaridah, N., Avraamidou, L., & Goedhart, M. (2021). The use of multiple representations in undergraduate physics education: What do we know and where do we go from here? *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 17(1), 1–19. <https://doi.org/10.29333/ejmste/9577>
- Munfaridah, N., Avraamidou, L., & Goedhart, M. (2022). Preservice physics teachers' development of physics identities: The role of multiple representations. *Research in Science Education*, 52, 1699–1715. <https://doi.org/10.1007/s11165-021-10019-5>
- Styer, D. F. (2000). Insight into entropy. *American Journal of Physics*, 68(12), 1090–1096. <https://doi.org/10.1119/1.1287353>
- Talanquer, V. (2011a). Learning chemistry: A matter of change. *International Journal of Science Education*, 33(4), 629–653. <https://doi.org/10.1080/09500691003613394>
- Talanquer, V. (2011b). Macro, submicro, and symbolic: The many faces of the chemistry "triplet". *International Journal of Science Education*, 33(2), 179–195. <https://doi.org/10.1080/09500690903386435>

Viennot, L. (1998). Experimental facts and ways of reasoning in thermodynamics: Learners' common approach. *International Journal of Science Education*, 20(9), 1069–1087. <https://doi.org/10.1080/0950069980200905>