

Una investigación sobre la enseñanza de la termodinámica fuera del equilibrio en un curso básico universitario

An investigation on the teaching of non-equilibrium thermodynamics in a basic university course

Carlos Silva^{1,2*} e Ignacio Hamad¹

¹ Departamento de Física, Escuela de Ciencias Exactas y Naturales, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Av. Pellegrini 250, CP 2000, Rosario, Santa Fe, Argentina.

² Grupo TIDCyT, Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Av. Pellegrini 250, CP 2000, Rosario, Santa Fe, Argentina.

*E-mail: csilva@fceia.unr.edu.ar

Recibido el 30 de septiembre de 2022 | Aceptado el 24 de octubre de 2022

Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de una investigación realizada al implementar y evaluar una propuesta de incorporación de aspectos de la termodinámica fuera del equilibrio en un curso universitario básico para estudiantes de Licenciatura y Profesorado en Física. Para llevar adelante esta investigación se adoptó como metodología la investigación basada en el diseño. Los resultados de la evaluación de esta propuesta son prometedores porque muestran los conocimientos adquiridos por los alumnos y nos proporcionan información para validar, mejorar y ampliar las alternativas didácticas implementadas.

Palabras clave: Enseñanza de la termodinámica; Procesos irreversibles; Termodinámica fuera del equilibrio; Transferencia de calor; Investigación basada en el diseño.

Abstract

This paper presents the results of a research carried out to implement and evaluate a proposal to incorporate aspects of non-equilibrium thermodynamics in a basic university course for Physics undergraduates. To carry out this research, design-based research was adopted as a methodology. The results of the evaluation of this proposal are promising because they show the knowledge acquired by the students and provide us with information to validate, improve and expand the implemented didactic alternatives.

Keywords: Teaching of thermodynamics; Irreversible processes; Non-equilibrium thermodynamics; Heat transfer; Design-based research.

I. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presentan los resultados de una investigación realizada al implementar y evaluar una propuesta de incorporación de aspectos de la termodinámica fuera del equilibrio en un curso universitario básico.

La presentación usual de la termodinámica en estos cursos desarrolla principalmente situaciones problemáticas en estados de equilibrio termodinámico y en procesos reversibles. En muy pocas situaciones se abordan temas de

termodinámica fuera del equilibrio, ya sea porque estos no existen en los libros de texto usuales o por la complejidad matemática con que se desarrolla en los textos especializados en el tema.

Hemos observado que en los cursos tradicionales el único tema que se aborda sobre termodinámica fuera del equilibrio es el de transferencia de calor. Los libros de texto usuales describen de manera somera los mecanismos de conducción, convección y radiación y dan ecuaciones para calcular la corriente calorífica en algunos casos particulares de interés técnico, siempre en el estado estacionario.

Esta presentación solamente orientada al cálculo y desconectada del carácter irreversible del estado estacionario hace que los estudiantes pierdan la única oportunidad de ver las características generales de los procesos termodinámicos fuera del equilibrio. Como consecuencia de este enfoque queda soslayada la importancia de la producción de entropía en los procesos irreversibles que amplía el concepto de energía al agregar la idea de degradación, de relevancia tanto disciplinar como social y ambiental (Solbes y Tarín, 2008).

Bittencourt (2007) señala que la termodinámica de los procesos reales irreversibles ha sido dejada de lado en la enseñanza tradicional, mientras que se enfatiza por demás la termodinámica del equilibrio, insistiendo en un enfoque histórico que se concentra fuertemente en las máquinas térmicas y en los gases ideales. Por contraposición, este autor propone la incorporación de temas de termodinámica de procesos fuera del equilibrio que preparen a los estudiantes para enfrentarse a los fenómenos de aumento de orden y complejidad que aparecen, desde hace más de 50 años en fisicoquímica, biología, ciencias de la Tierra, entre otras disciplinas.

Los procesos termodinámicos reales, que son irreversibles, se estudian con sucesiones temporales de estados de equilibrio y estados fuera del equilibrio. En muchas situaciones, dependiendo de las condiciones de contorno, cuando un sistema se lleva fuera del equilibrio, lejos del llamado régimen lineal, en donde se esperaría un comportamiento caótico aparecen estructuras autoorganizadas que se sostienen gracias a fuerzas termodinámicas generadas por el intercambio de energía y materia con el exterior. A través de diferentes transformaciones de energía en el interior del sistema, estas estructuras disipativas producen entropía constantemente y se la transmiten al medio ambiente (Kondepudi y Prigogine, 1998).

Para poder analizar la transferencia de calor, que es un proceso fuera del equilibrio, es necesario introducir la hipótesis del equilibrio local. Gracias a esta hipótesis es posible asignar valores a las variables termodinámicas en diferentes puntos de un sistema y aplicar las leyes de la termodinámica de manera local. De esta manera, es posible analizar el gradiente de temperatura en un sistema y ver que este gradiente es el que fuerza la existencia de un flujo de calor (Kondepudi y Prigogine, 1998). Dentro de este marco, se puede calcular la entropía total de un sistema en estado estacionario, que debe permanecer constante por ser una función de estado. No obstante, como el estado estacionario se produce bajo un intercambio de calor constante con el exterior, es posible demostrar que la entropía entregada por el sistema al exterior es mayor que la entropía ingresada: hay un ritmo uniforme de producción de entropía, que sale al exterior del sistema. Una manera de interpretar este resultado es pensar que el sistema degrada la energía que recibe, y esta degradación de la energía es el precio a pagar para mantener el estado estacionario (Lebon, Jou y Casas-Vázquez, 2008).

Un problema de indiscutible relevancia en la actualidad que se puede abordar desde la termodinámica fuera del equilibrio es el del clima de nuestro planeta. Al respecto, Kleidon (2010) presenta un modelo simplificado de la Tierra como dos cajas: una representa la región ecuatorial y la otra las regiones polares. Si se supone que las cajas están aisladas del exterior y se asume equilibrio local en cada caja, con el transcurso del tiempo ambas llegan a un equilibrio térmico. Sin embargo, al incorporar al modelo el balance entre la radiación solar incidente (del rango ultravioleta) y la emitida por la Tierra hacia el espacio (mayormente infrarroja), se produce un forzamiento que hace que eventualmente cada caja alcance una temperatura diferente a la de la situación de equilibrio térmico. Consideramos que este problema tiene interés educativo pues permite ilustrar en una situación concreta y con cálculos muy simples cómo el sistema es forzado por las condiciones de contorno a evolucionar hacia el estado estacionario. Al estar caracterizado simplemente por dos ecuaciones diferenciales ordinarias lineales de primer orden, se puede resolver numéricamente con el método de Euler. Finalmente, a pesar de ser un modelo muy simplificado, se puede discutir en clases cómo refinarlo aumentando el número de celdas y ajustando los parámetros del modelo. Así, este problema sirve para poner en contexto el tema de transferencia de calor en una situación de gran importancia actual.

Consideramos que volver a tratar la transferencia de calor en el capítulo del segundo principio permite consolidar el concepto de estado estacionario, diferenciarlo del estado de equilibrio y ayuda a comprender la idea de la degradación de la energía. Al respecto, Solbes y Tarín (2008) y Duit (1984) dicen que la definición de energía debe incluir, además de su conservación, la transformación, transferencia y degradación. Un estudiante que no conoce el término degradación de la energía solo puede tener una noción de energía desconectada de la entropía, no podría entender qué nos está diciendo el aumento de entropía acerca de la energía de un sistema aislado.

Los procesos reversibles, aunque irreales, son útiles porque nos dan, por medio del motor de Carnot, una cota superior para el rendimiento de las máquinas térmicas, pero este valor teórico está muy lejos del de las máquinas reales. Adicionalmente, un motor de Carnot, de existir, debería trabajar con procesos cuasiestáticos, es decir que

tendría potencia nula. Como alternativa, se han propuesto otros modelos de motores idealizados: los motores endorreversibles. Estos son motores que operan de manera reversible pero intercambian calor con los focos de manera irreversible, en tiempos finitos. Ejemplos de motor endorreversible son el motor de Curzon-Ahlborn (Lebon *et al.*, 2008), en donde el motor está separado de ambos focos térmicos por una pared conductora y el motor de Novikov que es un caso particular del primero, en el que solo se coloca una pared conductora entre el motor y el foco caliente, por lo que los cálculos son más simples (Hoffmann, 2008). Se demuestra que estos motores tienen rendimientos mucho más cercanos a los que poseen las plantas de generación de energía eléctrica (Leff, 2012), aún cuando solo se ha agregado una única fuente de irreversibilidad.

En 2020, en el contexto de la enseñanza remota de emergencia por la pandemia de COVID-19 realizamos una experiencia de aula invertida donde se les pidió a los estudiantes leer el capítulo de transferencia de calor del libro de (Sears y Zemansky, 1981) y luego, en el encuentro sincrónico analizamos un problema de transferencia de calor desde un foco térmico hacia un sistema de masa pequeña a través de una pared conductora. En este problema se pidió hallar la función de la evolución temporal de la temperatura del sistema, primero de manera cualitativa y luego a través de una simulación numérica realizada en planilla de cálculo utilizando el método de Euler (Silva y Evangelista, 2021).

El objetivo de la actividad era en primer lugar, poder relacionar la transferencia de calor con otros temas de la asignatura ya que percibíamos que siempre se encuentra aislado del resto como un simple problema de cálculo y, en segundo lugar, considerábamos que mostraría a los estudiantes un ejemplo de cómo es un régimen transitorio, lo que ayudaría a comprender luego qué es el estado estacionario. Si bien la actividad implementada logró dar relevancia al tema transferencia de calor y conectarlo con otros temas del curso, principalmente calorimetría, y sirvió para que los estudiantes pusieran en juego habilidades de modelización en un problema contextualizado y más complejo que los habituales, en la evaluación encontramos que no se habían producido mejoras significativas en la comprensión de los conceptos que se querían enseñar. En efecto, en el examen final la mayoría de los estudiantes que aprobaron no logró asociar el concepto de estado estacionario con el fenómeno de transferencia de calor.

En lo que sigue se describe la metodología de investigación empleada, la ejecución de los pasos llevados a cabo para implementarla y los resultados obtenidos.

II. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

Para esta investigación se decidió adoptar la metodología de “investigación basada en el diseño” ya que es un enfoque de investigación que amplía los métodos existentes y facilita la necesidad de vincular la teoría y la práctica en la investigación educativa, además permite operar con métodos cualitativos y cuantitativos, recolectar datos multifacéticos y realizar corroboraciones en profundidad de las teorías.

Es un enfoque que apoya la exploración de problemas educativos y refina la teoría y la práctica definiendo un resultado pedagógico orientado a crear un entorno de aprendizaje sobre ese resultado. Es de carácter cíclico: las actividades de análisis, diseño, evaluación y revisión se repiten hasta lograr un resultado satisfactorio entre las metas propuestas y los logros obtenidos.

Como admite un conjunto de procedimientos en lugar de uno único permite flexibilidad en el diseño de la investigación (Barab y Squire, 2004), los procesos iterativos de diseño, implementación, análisis y rediseño facilitan el desarrollo de entornos de aprendizaje y la construcción de teorías por lo que es útil para los investigadores que realizan estudios en situaciones educativas auténticas para producir diseño y teorías relevantes en un contexto particular (Velasco, Gandolfo, y Buteler, 2021).

Aunque algunos estudios que adoptan la investigación basada en el diseño suelen tener hasta cinco etapas o fases (Middleton, Gorard, Taylor, y Bannan-Ritland, 2008) en nuestro caso trabajamos con tres fases distintas: fase de investigación preliminar y diseño, fase de implementación y fase de evaluación.

En la fase de investigación preliminar y diseño, se lleva a cabo un análisis de las necesidades y contexto, se realiza una revisión de la literatura existente y los investigadores desarrollan un marco conceptual o teórico para el estudio, se diseñan y planifican las intervenciones y se preparan los materiales necesarios para llevar a cabo la intervención.

La fase de implementación de la secuencia de enseñanza aprendizaje diseñada exige registrar el proceso y para ello se emplean todos los métodos adecuados para la recopilación de datos, ya que la combinación de estrategias de recopilación de datos permite una comprensión más sólida del entorno de aprendizaje para mejorar y refinar los materiales, el enfoque y la teoría.

La etapa final es la fase de evaluación, el propósito de esta fase es concluir cómo el resultado de la investigación cumple con las especificaciones predeterminadas para resolver el problema (Plomp, 2007). Según sean los resultados se acepta el diseño o se reinicia el proceso a través de un rediseño de la secuencia de enseñanza aprendizaje con los aportes obtenidos en la segunda y tercera fase.

III. PRIMERA FASE DE LA INVESTIGACIÓN: DISEÑO Y PLANIFICACIÓN DE LA INTERVENCIÓN

Física II es una actividad curricular obligatoria para las carreras de Licenciatura y Profesorado en Física de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA) de la Universidad Nacional de Rosario. Se cursa en el primer cuatrimestre con una carga horaria de siete horas semanales. Se trata de un curso básico de termodinámica cuyos contenidos principales son: fluidos ideales, temperatura empírica, variables de estado y equilibrio termodinámico, sustancias puras, gases ideales, primer principio desde una perspectiva macroscópica y segundo principio y finalmente se cierra con un breve capítulo sobre el tercer principio. Un detalle importante es que después del primer principio se trabajan calorimetría y transferencia de calor, antes de tratar la teoría cinética de los gases y cuando se considera el segundo principio de la termodinámica y las máquinas térmicas hay un breve comentario sobre la interpretación microscópica de la entropía para facilitar la articulación con el futuro curso de mecánica estadística.

Para la incorporación de los nuevos contenidos se elaboraron nuevos materiales de cátedra para la mayoría de las unidades del programa, considerando los resultados obtenidos con las experiencias implementadas en el año 2020 y los aportes de autores citados que proponen esta renovación en la enseñanza de la termodinámica. En particular, en lo que atañe a esta investigación, se preparó material sobre transferencia de calor que se explaya sobre el concepto de estado estacionario y muestra aplicaciones concretas de la vida cotidiana.

Para el segundo principio de la termodinámica se incorporó la producción de entropía, la interpretación macroscópica de la variación de entropía como pérdida de oportunidad para producir trabajo y finalmente se incorporó el tema de termodinámica endorreversible. Si bien este material no pretende reemplazar a los libros de texto usuales busca ordenar los contenidos en una secuencia que consideramos es la más adecuada para estudiarlos.

La intervención comenzó con el planteo del primer principio de la termodinámica. Allí se formuló por primera vez la hipótesis del equilibrio local indicando que aun cuando un sistema no estaba en equilibrio termodinámico, este debía poder dividirse en celdas con variables termodinámicas bien definidas (aunque distintas entre celdas vecinas) en las que el principio de conservación de la energía debía seguir siendo válido. También se planteó que debía cumplirse el principio de conservación de la masa, aunque se aclaró que no nos ocuparíamos de problemas de transferencia de masa en esta unidad curricular.

Antes de comenzar la unidad de transferencia de calor, se planteó de manera introductoria el problema de dos cajas presentado siguiendo el trabajo de Kleidon (2010). Como ya se mencionó, este es un problema de dos celdas que, asumiendo que están en equilibrio local, se muestra que, sometiénolo a un flujo de energía, este sistema llega a un estado estacionario en el que en cada celda hay una temperatura diferente. Luego se presentó el tema de conducción a través de una pared utilizando el apunte incorporado, remarcando la necesidad de la condición de equilibrio local para poder definir temperaturas punto a punto. Para finalizar, se mostró una simulación más compleja utilizando el lenguaje Python en la que se puede observar la distribución de temperaturas a lo largo de una barra sometida en sus extremos a diferentes condiciones de contorno. En esta simulación se podía apreciar la división por celdas para realizar el cálculo, se podía elegir el número de celdas y se obtenían diferentes perfiles de temperatura para diferentes instantes de tiempo durante el régimen transitorio. Además el programa permitía construir una animación de distribución de temperaturas en función del tiempo, lo que mejoraba la visualización del fenómeno. La duración de esta parte de la intervención fue de una clase y media.

A continuación se presentó el mecanismo de convección. Para esto se utilizó un video que ilustra el fenómeno y se discutieron aplicaciones de la convección en la vida cotidiana, algunos de los cuales estaban en el apunte de cátedra y otros surgieron como inquietudes de los estudiantes. La duración fue de media clase.

Para presentar el tema de Radiación se utilizó una experiencia de laboratorio: utilizando una fuente de tensión variable se fue calentando el filamento de una lámpara de tungsteno. Se le pidió a los estudiantes que observaran el color del filamento y al mismo tiempo, con un espectrofotómetro educativo se graficó en una pantalla el espectro de emisión del filamento. Se observó cómo el pico del espectro se iba corriendo a medida que el filamento se iba calentando, al igual que aumentaba la intensidad de la radiación emitida. Complementando el experimento, se utilizó una simulación de Phet en donde se observa la curva de radiación del cuerpo negro para hallar la relación cuantitativa entre la longitud de onda del pico de la curva y la temperatura, conocida como Ley de Wien. Es de destacar que en nuestro caso teníamos disponible el espectrofotómetro, pero que la misma experiencia se puede repetir sin este, solo con una lámpara incandescente de automóvil y la fuente de tensión variable. Luego de esto se continuó con el tema tal como estaba en el apunte y se resolvieron problemas de aplicación. Para esta parte de la intervención se empleó media clase.

El segundo principio de la termodinámica se abordó, en principio, de forma tradicional. Se introdujo la necesidad de un segundo principio que indique la direccionalidad de los procesos naturales, se formularon los enunciados de Kelvin-Planck y de Clausius, y se trabajó sobre el rendimiento de los motores y la eficiencia de los refrigeradores. Luego se definieron los procesos reversibles e irreversibles y se discutieron diversas fuentes de irreversibilidad. Luego se estudió el ciclo de Carnot, se enunció el teorema de Carnot y se comparó el rendimiento del motor reversible con el

de motores térmicos reales que operan entre dos focos, observando que si bien el primer rendimiento es una cota superior para el de las máquinas irreversibles, lo cierto es que lo sobreestima ampliamente. A continuación, se definió la entropía como una función de estado cuya variación entre dos estados de equilibrio se puede calcular siguiendo el algoritmo de la integral de $\delta Q_{rev}/T$ aun cuando el proceso haya sido irreversible. Luego se explicó el teorema de Clausius y a partir de él se dedujo el principio de aumento de la entropía. Se trabajó con el cálculo de variaciones de entropía en diferentes situaciones problemáticas. Antes de cerrar el tema, se presentó la interpretación de la entropía como pérdida de oportunidad de realizar un trabajo.

Luego se dedicó media clase a discutir el significado de la entropía en un sistema fuera del equilibrio termodinámico, revisitando la hipótesis de equilibrio local, se ejemplificó de qué manera se podría definir la entropía en el caso de una pared conductora por la que se transmite calor y cómo se puede dividir el diferencial de entropía del sistema en un término de intercambio con el exterior y un término de producción interna de entropía, que es el que da cuenta de las irreversibilidades que ocurren en el interior del sistema. De esta manera, se presentó el balance de entropía y se discutió la idea de que en el estado estacionario la entropía entregada por unidad de tiempo por el sistema al exterior es mayor que la entropía que está ingresando. Aquí se hizo hincapié en el hecho, comentado en la introducción, de que una manera de interpretar este resultado es pensar que el sistema degrada la energía que recibe, y esta degradación de la energía es el precio a pagar para mantener el estado estacionario.

Para concluir la intervención, se dedicó una clase a la termodinámica endorreversible. En particular, se explicó en detalle el motor de Novikov, se calculó su rendimiento y se comparó con los rendimientos de algunas centrales de generación de energía eléctrica, todo esto utilizando el material de cátedra elaborado.

IV. SEGUNDA FASE DE LA INVESTIGACIÓN: IMPLEMENTACIÓN

A lo largo del cuatrimestre el curso se desarrolló de acuerdo a lo planificado sin mayores inconvenientes y sin que ni en las consultas de los alumnos ni en los resultados de los parciales registremos dificultades significativas u obstáculos para el desarrollo de las actividades, más allá de las perturbaciones habituales en nuestros cursos universitarios tradicionales. Como consecuencia de ello no hubo dificultades en llevar registros de la evolución del proceso.

Los estudiantes inscriptos asistieron a clases regularmente; muchos de ellos imprimieron los apuntes de cátedra elaborados por nosotros, y tomaron notas sobre ese mismo material. Se ofrecieron clases de consultas que fueron aprovechadas por la mayoría de los estudiantes todas las semanas.

El clima tanto en las clases regulares como en las consultas siempre fue cordial y participativo; en todas las clases se dispararon debates sobre ejemplos de situaciones cotidianas donde los estudiantes preguntaron, comentaron y aportaron. Cuando se desarrolló el capítulo del segundo principio se puso de manifiesto que una buena cantidad de estudiantes leían artículos y libros de divulgación e incluso se intercambiaron este tipo de textos.

V. TERCERA FASE DE LA INVESTIGACIÓN: EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS Y REDISEÑO DE LA INTERVENCIÓN

Para la evaluación de esta intervención nos centramos principalmente en los exámenes finales y en entrevistas no estructuradas posteriores. Cada examen final incluyó un cuestionario de once preguntas sobre aspectos teóricos y conceptuales desarrollados a lo largo del curso. De ellas, tres preguntas correspondieron a los temas motivo de nuestra intervención. En los exámenes se presentaron 8 estudiantes y todos aprobaron con calificación mayor o igual a 7 puntos de 10.

Las respuestas fueron evaluadas en cuanto fueron devueltas por los estudiantes y luego se realizaron entrevistas no estructuradas donde los estudiantes pudieron aclarar aspectos confusos de sus explicaciones.

A continuación presentamos un análisis de las respuestas de los estudiantes.

Pregunta 1

*¿Qué es un estado estacionario en la transferencia de calor? Especifique las condiciones necesarias para que se establezca.
¿Qué tipo de paralelismo puede establecer con la dinámica de fluidos?*

A diferencia de los resultados que obtuvimos en el curso previo, todos los estudiantes pudieron asociar correctamente el estado estacionario a al menos uno de los mecanismos de transferencia de calor, debemos notar que ninguno hizo referencia, inicialmente, al estado estacionario en procesos de convección ni de radiación de manera explícita ya sea en el texto o ya sea a través de dibujos o gráficos, todas las respuestas se orientaron a explicar el estado estacionario para el mecanismo de conducción. Encontramos dos tipos de explicación:

1. Los que emplean en sus explicaciones directa o indirectamente la hipótesis del equilibrio local: *“En el estado estacionario se dice que hay un flujo de calor constante en el tiempo [...] si segmentamos el conductor en celdas, la temperatura de cada celda es distinta y aumenta de forma gradual desde el foco térmico frío hacia el foco térmico caliente”*

2. Los que solo comentan que hay un flujo de calor constante, pero no hacen alusión a las variables de estado del sistema, por lo que no aplican la hipótesis de equilibrio local. En algunos casos solo mencionan los focos térmicos y omiten la presencia de un medio por el que se realiza la transferencia de calor.

No todos pudieron establecer paralelismo con la dinámica de fluidos.

Pregunta 2

¿En qué consiste el mecanismo de radiación en la transferencia de calor? Escriba la ley que lo describe. Dé un ejemplo donde se vea este mecanismo operando.

En este caso todos los estudiantes identificaron correctamente el fenómeno y describieron las leyes que lo describen, aunque solo tres estudiantes hicieron referencia a que en el mecanismo de radiación se transfiere energía a través de ondas electromagnéticas. De los otros tres estudiantes, uno no explica el mecanismo, se limita a caracterizarlo como *“emisión de radiación térmica”* y dos lo explican recurriendo a concepciones alternativas; *“...las partículas están cargadas eléctricamente. Debido a esta carga [...] emiten calor equivalente”* y *“El mecanismo de radiación es un mecanismo por el cual se transfiere energía a través de la radiación de un cuerpo a una temperatura finita”* (aquí la concepción alternativa es que la radiación pertenece al cuerpo).

Los ejemplos proporcionados fueron diversos. Dos de los estudiantes hicieron referencia a resistencias eléctricas incandescentes, tomando el ejemplo de una actividad experimental desarrollada en clase, uno de ellos, ayudándose con un dibujo, lo ejemplificó con el Sol *“entregando calor a la Tierra y a las personas (a través de la atmósfera)”*. Tres estudiantes tomaron un ejemplo del texto elaborado por nosotros, en el que se utiliza el fenómeno de radiación para explicar la diferencia de temperatura entre un automóvil y su entorno por las noches. Este fenómeno es complejo y para su explicación se ponen en juego habilidades de modelización de un nivel superior ya que requiere recurrir a efectos como la transparencia y reflexión de la radiación infrarroja. Solo dos de los tres estudiantes pudieron explicar correctamente este fenómeno. Estos mismos tres estudiantes son quienes no incorporan en su descripción el mecanismo de emisión de ondas electromagnéticas. A causa de esto, en la entrevista se les pidió dar *“un ejemplo más cotidiano en donde opere el mecanismo de radiación”* y tuvieron dificultades para hallar una respuesta, por lo que pensamos que en ellos se dio un aprendizaje más memorístico de este tema y no un aprendizaje significativo.

Pregunta 3

¿Qué es la termodinámica endorreversible y qué elementos nuevos incorpora?

En este caso, todos los estudiantes respondieron explicando la necesidad de introducir un motor teórico con un límite de rendimiento más próximo al de los motores reales. Todos ejemplificaron adecuadamente la manera de introducir una irreversibilidad utilizando una pared conductora entre el foco caliente y el motor, aunque algunos no explicitaron, en la respuesta escrita, cómo se introduce la irreversibilidad, pero cuando se les preguntó oralmente respondieron satisfactoriamente.

Uno de los estudiantes, sin embargo, en el escrito dio una definición precisa de motor endorreversible pero en su escrito encontramos indicios de que pensaba que el motor endorreversible era un motor real:

[...] el motor de Carnot es un motor muy alejado de la realidad por lo que los ingenieros tenían la necesidad de modificarlo [...] Así se creó una especie de motor que mejoraba el rendimiento de los motores anteriores, usando algunos principios de Carnot, pero no tan eficiente como el mismo.

Al indagarlo oralmente se constató que el estudiante pensaba que el motor endorreversible era un motor real. Esta concepción no se observó en los otros estudiantes, aunque no descartamos que exista y haya escapado a nuestra observación.

Solo dos de los estudiantes hacen referencia en el escrito a que el rendimiento del motor endorreversible se calcula para un valor máximo de potencia, esto indica que la mayoría de los estudiantes examinados no destaca la necesidad de estudiar motores que operen en tiempos finitos. Esto no quiere decir necesariamente que no lo consideren importante, pero pensamos que su falta de mención es un indicador de que en el material elaborado por nosotros no está lo suficientemente profundizado.

VI. CONCLUSIONES

Consideramos que los resultados obtenidos son positivos respecto de los logrados en el curso anterior, pero pensamos que aún hay varios aspectos para mejorar. Los puntos destacados a considerar en el rediseño de esta intervención y que surgieron del cuidadoso análisis de las evaluaciones y entrevistas son los siguientes:

1. Insistir en que el estado estacionario se da también en los procesos convectivos y radiativos.
2. Desarrollar con más detalles el tema de equilibrio local, introduciéndolo más temprano en el material escrito de la unidad de primer principio.
3. Insistir en el paralelismo, en el estado estacionario, entre la dinámica de fluidos y los procesos de transferencia de calor.
4. Ampliar los modelos explicativos de los fenómenos radiativos para dar cuenta de las dificultades detectadas en algunos estudiantes al responder la pregunta dos.
5. Modificar la secuencia didáctica para destacar el carácter teórico de los motores endorreversibles, cuyo rendimiento es un valor de referencia. A pesar de que el rendimiento de estos motores es más cercano al de algunas máquinas térmicas reales, su valor está en la simpleza del modelo con el que se introducen las irreversibilidades.
6. Profundizar el estudio de la potencia de los motores que operan en tiempos finitos.

El primer resultado de esta investigación muestra que estos puntos no han sido adecuadamente tratados tanto en el material didáctico elaborado como en las clases, por lo que constituye el primer insumo para el rediseño.

En una entrevista desestructurada con uno de estos estudiantes que asistía regularmente a clases y a los horarios de consulta, este nos confirmó, como habíamos observado durante la implementación de la intervención, que para el examen final había estudiado principalmente de los apuntes, que no tenía notas de clases y había consultado muy poco los libros de referencia. Esto nos alienta a prestar más atención a los ejemplos presentados en la elaboración de los materiales, a incluir comentarios sobre las experiencias de laboratorio y simulaciones empleadas en clases dentro de los mismos apuntes, dándoles a estos un formato de verdaderas unidades didácticas.

Finalmente, los comentarios de los evaluadores anónimos nos señalan un déficit en nuestro trabajo que se refiere a la necesidad de adoptar una definición de calor que contemple las discusiones epistemológicas más recientes sobre el tema y que evite reforzar en los estudiantes concepciones alternativas.

En la implementación de la intervención hemos utilizado una definición tradicional de calor que es la que emplean los textos especializados en termodinámica fuera del equilibrio (Lebon *et al.*, 2008), heredada de los libros de texto tradicionales de termodinámica del equilibrio, en la que se identifica al calor como una transferencia de energía de un sistema al otro, o en el interior de los sistemas, que se produce en virtud únicamente de una diferencia de temperaturas. Si bien este concepto emerge como "*la energía transferida por medios no mecánicos*" (Zemansky y Dittman, 1985), luego el concepto va cobrando otras dimensiones al introducir un modelo microscópico de los mecanismos por los que se da esta transferencia de energía, ya sea por conducción, convección o radiación.

Brookes y Etkina (2015) en su investigación acerca de la importancia del lenguaje en el razonamiento de los estudiantes sobre el calor en procesos de termodinámica del equilibrio, señalan que el enfoque con el que los estudiantes resuelven problemas está relacionado con la forma en que definen la palabra calor. Muestran además que la tendencia de estos a razonar de manera inapropiada considerando al calor como si fuera una función de estado está vinculada al uso de metáforas del calor como sustancia o como forma de energía. Estas metáforas omnipresentes en los libros de texto dificultan para los estudiantes la distinción sutil entre energía en tránsito y otras formas de energía, reforzando concepciones alternativas. El uso de las metáforas para los conceptos como calor y entropía, sin embargo, no es un tema que deba considerarse cerrado ya que, como señalan Jeppsson, Haglund y Amin (2015), el buen uso de metáforas conceptuales es un indicador de la formación de estructuras cognitivas de un considerable grado de experticia.

En vistas de lo comentado, y dado que el enfoque con el que debe adoptarse una definición de calor en un curso básico es un tema aún de debate, incluso dentro de nuestra institución, hemos decidido en esta investigación trabajar con la definición de calor tradicional, independientemente de nuestra posición en dicho debate, pero no descartamos adoptar una definición diferente con fines educativos en futuras iteraciones.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Maximiliano Ramos por su colaboración en la implementación de estas intervenciones, a Alberto Jardón por sus opiniones sobre el manuscrito y a Roberto Laura, cuyos aportes teóricos sobre termodinámica fuera del equilibrio nos permitieron llevar adelante esta investigación.

REFERENCIAS

- Barab, S., y Squire, K. (2004). Design-Based Research: Putting a Stake in the Ground. *Journal of the Learning Sciences*, 13(1), 1-14. doi: [10.1207/s15327809jls1301_1](https://doi.org/10.1207/s15327809jls1301_1)
- Bittencourt, E. (2007). *Thermodynamics of Irreversible Processes and the Teaching of Thermodynamics in Chemical Engineering*. Presentado en 5th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, 29 de Mayo-1 de Junio, Tampico, México.
- Brookes, D. T., y Etkina, E. (2015). The importance of language in students' reasoning about heat in thermodynamic processes. *International journal of science education*, 37(5-6), 759-779. doi: [10.1080/09500693.2015.1025246](https://doi.org/10.1080/09500693.2015.1025246)
- Duit, R. (1984). Learning the energy concept in school—Empirical results from The Philippines and West Germany. *Physics Education*, 19(2), 59-66. doi: [10.1088/0031-9120/19/2/306](https://doi.org/10.1088/0031-9120/19/2/306)
- Hoffmann, K. H. (2008). An introduction to endoreversible thermodynamics. *Atti Della Accademia Peloritana Dei Pericolanti - Classe Di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali*, 86(S1), Article S1. doi: [10.1478/C1S0801011](https://doi.org/10.1478/C1S0801011)
- Jeppsson, F., Haglund, J., y Amin, T. G. (2015). Varying use of conceptual metaphors across levels of expertise in thermodynamics. *International Journal of Science Education*, 37(5-6), 780-805. doi: [10.1080/09500693.2015.1025247](https://doi.org/10.1080/09500693.2015.1025247)
- Kleidon, A. (2010). A basic introduction to the thermodynamics of the Earth system far from equilibrium and maximum entropy production. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365(1545), 1303-1315. doi: [10.1098/rstb.2009.0310](https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0310)
- Kondepudi, D., y Prigogine, I. (1998). *Modern thermodynamics: From heat engines to dissipative structures*. West Sussex, Inglaterra: John Wiley & Sons.
- Lebon, G., Jou, D., y Casas-Vázquez, J. (2008). *Understanding non-equilibrium thermodynamics: Foundations, applications, frontiers*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Leff, H. S. (2012). Removing the Mystery of Entropy and Thermodynamics—Part IV. *The Physics Teacher*, 50(4), 215-217. doi: [10.1119/1.3694071](https://doi.org/10.1119/1.3694071)
- Middleton, J., Gorard, S., Taylor, C., y Bannan-Ritland, B. (2008). The “Compleat” Design Experiment: From Soup to Nuts. En A. Kelly, R. Lesh y J. Baek (Eds.), *Handbook of Design Research Methods in Education*. Nueva York: Routledge.
- Plomp, T. (2007). Educational design research: An introduction. En T. Plomp y N. Nieveen (Eds.), *An Introduction to Educational Design-based research* (9-33). SLO Netherlands institute for curriculum development.
- Sears, F. W., y Zemansky, M. W. (1981). *Física General (5ta ed.)*. Madrid: Aguilar.
- Silva, C., y Evangelista, I. (2021, diciembre 3). *Simulación numérica de un sistema térmico en un curso introductorio de termodinámica*. Presentado en VII Jornada de Experiencias Innovadoras en Educación en la FCEIA, Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina. doi: [10.13140/RG.2.2.16150.22081](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16150.22081)
- Solbes, J., y Tarín, F. (2008). Generalizando el concepto de energía y su conservación. *Didáctica de las Ciencias Experimentales y Sociales*. doi: [10.7203/dces..2415](https://doi.org/10.7203/dces..2415)
- Velasco, N., Gandolfo, N., y Buteler, L. (2021). La investigación basada en el diseño: Una revisión en educación en física en Argentina. *Revista de Enseñanza de la Física*, 33, 629-635.
- Zemansky, M. W., y Dittman, R. H. (1985). *Calor y Termodinámica (6ta ed.)*. México: McGraw-Hill.