

Análisis exergetico en el ámbito educativo

Exergetic analysis in the educational field

Luis Gago¹, Nicolás Schpetter¹, Alejandro Mandrile¹ y Natalia Stark¹

¹Facultad de Ingeniería. Departamento de Ciencias Básicas. Universidad Nacional de La Pampa. Calle 110 esq. 9, (6360) General Pico, La Pampa. Argentina.

*E-mail: lgago2013@gmail.com

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

Resumen

La revisión sistemática del acervo bibliográfico y otras producciones relacionadas al análisis exergetico pone en evidencia la creciente utilización de este concepto en la comunidad científica. A esta herramienta termodinámica la encontramos asociada a otras dimensiones: al análisis de costos como exergo-economía, al ambiente como exergo-ecología o como emergía, a la búsqueda de indicadores que establezcan una métrica universal sobre la actividad humana y su relación con el ambiente, a la dispersión de los recursos minerales, a la producción de energías renovables, también a la dimensión social como exergía social. Sin embargo, permanece ignorada por la sociedad y peor aún por quienes tienen la responsabilidad de tomar decisiones. Este artículo se propone humildemente a contribuir con su difusión en el ámbito educativo, indagando sobre algunas estrategias que permitan su enseñanza en distintas realidades.

Palabras clave: Exergía; Ambiente; Educación.

Abstract

The systematic review of the bibliographic heritage and other productions related to exergetic analysis highlights the growing use of this concept in the scientific community. We find this thermodynamic tool associated with other dimensions: the analysis of costs as an exergo-economy, the environment as an exergo-ecology or as an emergy, the search for indicators that establish a universal metric on human activity and its relationship with the environment. environment, to the dispersion of mineral resources, to the production of renewable energies, also to the social dimension as social exergy. However, it remains ignored by society and even worse by those who have the responsibility to make decisions. This article humbly proposes to contribute to its dissemination in the educational field, inquiring about some strategies that allow its teaching in different realities.

Keywords: Exergy; Environment; Education.

I. INTRODUCCIÓN

El análisis exergetico es una herramienta basada en las leyes primera y segunda de la Termodinámica, que resulta adecuada para la evaluación de irreversibilidades y es particularmente útil en el estudio de sistemas que integran varios componentes, ya que los mismos pueden ser tratados independientemente, como si cada uno fuera un sistema abierto (Bejan, 1994). Con este método es posible evaluar las pérdidas de energía disponible de cada componente o parte de la instalación del sistema por separado mediante el concepto de destrucción de exergía. La exergía es la propiedad usada para determinar trabajo útil potencial máximo de una dada cantidad de energía de un sistema respecto a un estado denominado "estado muerto", hacia el cual iría dicho sistema realizando evoluciones teóricamente reversibles, de modo tal que alcanzadas las propiedades del estado muerto, el sistema queda imposibilitado de entregar exergía. Integrando al sistema y su entorno como un todo denominado universo, la Termodinámica nos enseña que la exergía siempre debe disminuir o a lo sumo permanecer constante en procesos

idealizados. Es importante comprender que la exergía no representa la cantidad de trabajo que puede producir un sistema en las actuales condiciones, más bien representa el límite superior de la cantidad de trabajo que un dispositivo podría producir sin violar ninguna de las leyes de la termodinámica (Çengel y Boles, 2012). El análisis exerético usa los principios de conservación de masa y energía, junto con la segunda ley de la termodinámica para el diseño y análisis de sistemas térmicos. Los procedimientos usados en este método permiten identificar lugar, tipo y magnitud real de las pérdidas que se producen (Moran y Shapiro, 1995). Es posible también comparar la obtención de una cierta cantidad de energía en función de la realmente disponible, para las condiciones del entorno en que se encuentra inmerso dicho proceso, lo cual nos conduce al concepto de eficiencia exerética. Surge además la idea de que la exergía “se destruye”, es decir, lo que no se aprovecha de lo disponible, se pierde.

Este concepto es mucho más conveniente que la “conservación” de la energía, que a veces puede tenerse pero no darse las condiciones para aprovecharla, y el de la “generación” de entropía que permite decir cuán irreversible es un proceso pero no da pistas acerca de qué variables deben mejorarse para su disminución. Una de las grandes ventajas del método exerético es que es aplicable a cada componente de un sistema por separado y permite así averiguar la eficiencia del mismo independientemente de los otros componentes. (Lucchini, Stoll, Garnica y Barral, 2013, p.1)

Desde el punto de vista de la exergía de una cierta energía, como estado muerto se considera el estado del sistema coincidente con las condiciones de presión y temperatura de la atmósfera ya que cesado el desequilibrio con la misma se pierde la posibilidad de producir trabajo. Pero también podemos encontrar otros estados de referencia, como el que plantea Valero (2022) al considerar la exergía correspondiente a la dispersión de los minerales disponibles en el planeta con un planeta imaginario llamado Thanatia, en el cual todos los minerales han resultado dispersados.

Cuando se piensa en energía, usualmente se la considera en términos de cantidad. Sin embargo, en un mundo con recursos limitados, la energía también debe ser valorada desde el punto de vista de la calidad, que es esencialmente una medida de su utilidad o su capacidad para realizar un trabajo. Y para dar cuenta de la calidad y no solo la cantidad de energía, se necesita pensar en términos de exergía.

Exergía es un concepto que ha logrado un extenso campo de aplicación. Más allá de las objeciones que se puedan encontrar en publicaciones y reuniones científicas y profesionales, como:

Ese tema no..., no es importante, (docente de cátedra, 1983)

Ambigüedad en la nomenclatura, (Mora Casal, 2015)

Redundancia respecto a otras propiedades, (Mora Casal, 2015)

Porqué complicar con exergía si con disponibilidad (Keenan, 1951) ya está bien... (asistente a Sief 8°, 2006)

Otros.

Este concepto recuperado por Rant en 1953 (García, 1984), lejos de caer en desuso ha logrado continuar su construcción y ser muy utilizado en esta última década. Realizada una revisión sistemática, nos sorprende la distribución mundial de investigadores, profesionales, estudiantes, que utilizan esta herramienta de análisis. También la diversidad de áreas en que se aplica. A este concepto que inicialmente aparece asociado a la energía térmica y sus posibilidades de producir trabajo se lo encuentra en el presente relacionado a distintas manifestaciones de la energía: encontramos relaciones con la energía química, cinética, potencial, eléctrica, lumínica. Y a múltiples procesos industriales. Ante el crecimiento de su campo de aplicación, podemos encontrar investigaciones que lo relacionan también a la generación de energías renovables, aplicando el análisis de exergía en procesos y dispositivos de captación solar, eólica, de biomasa, biocombustibles. También lo podemos encontrar asociado a la economía, como análisis exergo-económico (Cidade Cavalcanti, 2018), al cuidado del ambiente, como análisis exergo-ambiental o ecológico o de sustentabilidad (Cidade Cavalcanti, 2018), a la biología (Alvarez Hincapie y Velásquez Arredondo, 2013). Nos sorprende además hallarlo asociado a ramas del conocimiento impensadas desde nuestra formación tecnológica, como el área psicosocial de la comunicación, presentado como exergía social, con paralelos con funciones y propiedades Termodinámicas (entalpía: actividad asociada, entropía: densidad de información, temperatura absoluta: velocidad con que se intercambia la información, etc.) e incorporando a expresiones específicas como disergía (Starkermann, 1988)

La necesidad de establecer algún tipo de actuación sobre aquellas actividades humanas que conducen a la progresiva destrucción del ambiente, a la dispersión de los recursos minerales, al cambio climático, ha propiciado la búsqueda de indicadores adecuados. Así como la huella de emisiones de carbono y otros gases de efecto invernadero (Science Europe, 2016), el ecoindicador 99 (Goedkoop, 1999) (método para evaluar el impacto ambiental del ciclo de vida) (Fernández, 2015), emergia (Torres-Verzagas, 2019), desde el conocimiento termodinámico se ha propuesto la utilización de una métrica común internacional de eficiencia energética denominada *huella de destrucción de exergía*; también la *rareza exerética* como indicador para un uso óptimo de nuestros limitados recursos naturales (Science Europe, 2016).

El establecimiento de indicadores adecuados permite conocer la calidad de los procesos y la conveniencia o no de los mismos. Por ejemplo, lentamente la sociedad va asumiendo la conveniencia de reciclar, pero ¿conocemos algún indicador que demuestre hasta dónde resulta conveniente hacerlo?

Ante este panorama que permite asomarnos al conocimiento exergético se debe trabajar en procura de que se comience a pensar en exergía más que en energía (Science Europe, 2016).

Es esta toma de conciencia la que está permitiendo, además, comenzar a mudar desde una economía lineal basada en “tomar-hacer-desechar” responsable en gran medida del cambio climático y el agotamiento de los recursos, hacia una economía circular con ejes en la eliminación de residuos y contaminación, el mantener productos y materiales en uso, la regeneración de sistemas naturales (Albaladejo, Mirazo y Franco Henao, 2021).

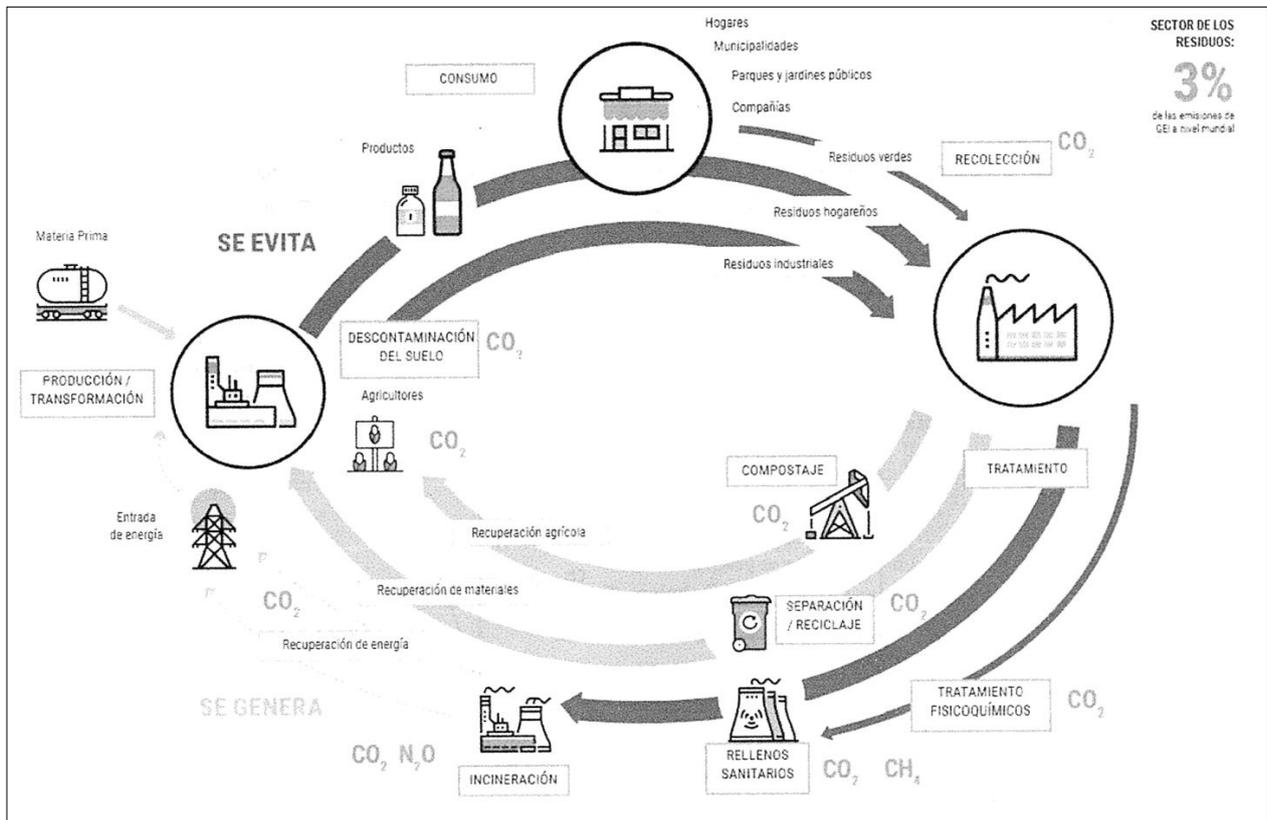


FIGURA 1: El gráfico muestra cómo lograr la transición a la economía circular. Fuente: ONU Medio Ambiente.

Desde el rol que nos ocupe: educadores, investigadores, estudiantes, debemos instar a divulgadores, políticos, ciudadanos en general a comenzar a considerar la energía y los limitados recursos naturales sobre la base de la exergía, entendiendo que:

- mide la calidad de la energía y los recursos;
- a través de la huella de destrucción de exergía promueve mejoras en la eficiencia industrial;
- ofrece una métrica común internacional de eficiencia energética;
- la aplicación de la rareza exergética promueve un uso óptimo de nuestros limitados recursos minerales;
- debe ser integrada a la política, la ley, la educación y la práctica cotidiana.

Como exergía no es un concepto innato a nuestro conocimiento, se lo debe construir con gradualidad, y es en el sistema educativo donde se deben sentar las bases para la apropiación del concepto. Si se analizan las escasas comunicaciones sobre energía que aparecen en los medios de masivos de difusión, es posible observar que se trata a la energía como una rareza o apenas un asunto tarifario y poca o ninguna referencia aparece respecto a su calidad.

Es por eso que consideramos al ámbito educativo el sitio adecuado donde sentar las bases para la apropiación del concepto. Aunque algunos especialistas lo propongan como un concepto de postgrado, en este trabajo se propone que el concepto de exergía debe comenzar a ser construido desde la escuela. De otra manera, seguirán transitando por el sistema educativo promociones de estudiantes que no han adquirido una adecuada dimensión de la problemática energética y la realidad ambiental. ¿Exergía en la escuela? se preguntan Kranjc y Razpet (2017), sí en coincidencia con ellos, planteamos exergía en la escuela (tal es su conclusión).

A. Estrategias y recomendaciones

Aunque los materiales curriculares no hagan referencia expresa, consideramos que en la escuela secundaria se lo puede comenzar a trabajar, quizás desde la Física de 4.º y 5.º año cuando ya es esperable que los estudiantes dispongan de conocimientos previos sobre materia y energía, al menos por haber transitado espacios como Físico-Química. Para este fin, no hace falta recurrir a la complejidad de las fórmulas y funciones termodinámicas. En cualquier caso, un acercamiento conceptual cualitativo sería suficiente. En igual sentido, se podría incursionar en la descripción de recursos como diagramas de flujo de exergía estilo Sankey o Grassman, en el concepto de eficiencia y en indicadores de destrucción de exergía y dispersión de recursos minerales. En las escuelas de formación técnica: mecánica, electromecánica, construcciones, etc., sí se podría aspirar a un mayor acercamiento dado que disponen de Termodinámica como espacio curricular, donde se hace expresa referencia a los balances de masa, de energía, calor, trabajo, energía interna, entalpía, y se introduce someramente la idea de entropía, segundo principio y máquina térmica (Ministerio de Educación La Pampa, 2022).

Desde nuestra experiencia, al comenzar con las tareas destinadas a explorar los saberes previos con que los estudiantes inician un curso de Termodinámica de 3.º año en el nivel universitario, comprobamos inmediatamente la existencia de nociones de conservación de la masa y la energía, pero un desconocimiento generalizado sobre el concepto de calidad y disponibilidad de la energía (exergía).

Para tal fin, seleccionamos algunas propuestas de implementación para:

A.1. El nivel universitario

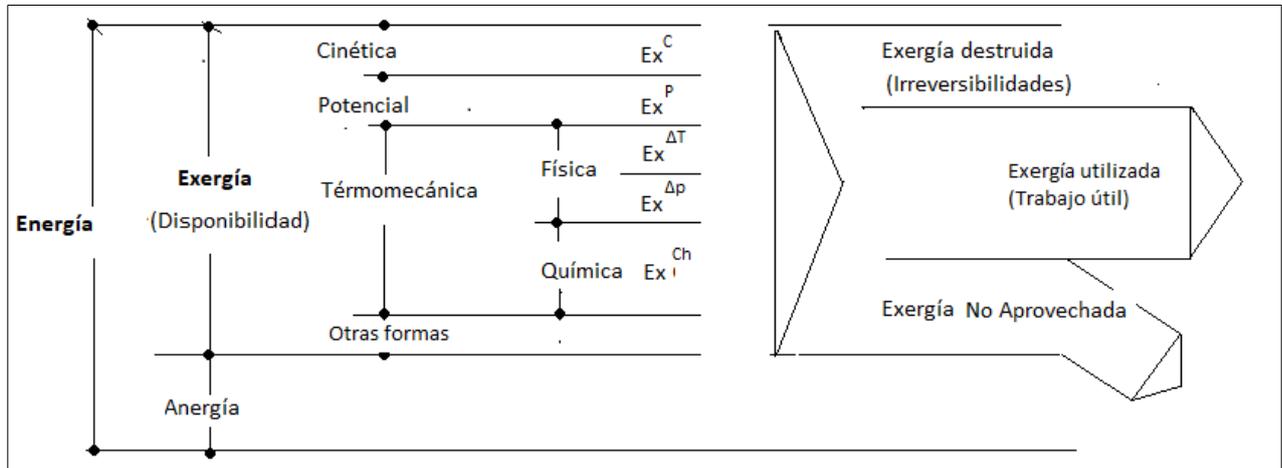


FIGURA 2: Parcelas de Exergía. Fuente: Adaptado de Cidade Cavalcanti, (2018).

Básicamente, en un curso de Termodinámica técnica, la determinación de la exergía física se realiza recurriendo a las funciones que aportaron Gouy y Darrieus a finales del siglo XIX (García, 1984). Para procesos de otra naturaleza se han desarrollado otras expresiones que no mostramos aquí.

La exergía de flujo por unidad de masa para un volumen de control (Çengel y Boles, 2006) es:

$$e_x = (h - h_0) - T_0 \cdot (s - s_0) + \frac{v^2}{2} + g \cdot z$$

Donde h es la entalpía, h_0 es la entalpía en el estado muerto, T_0 es la temperatura absoluta en el estado muerto, s es la entropía, s_0 es la entropía en estado muerto, v es la velocidad del fluido, g es la aceleración de la gravedad, z es la altura del punto donde se está aplicando la ecuación medida desde el nivel de referencia más bajo.

Para un sistema cerrado, la exergía por unidad de masa se calcula mediante:

$$e_x = (u - u_0) + P \cdot (V - V_0) - T_0 \cdot (s - s_0) + \frac{v^2}{2} + g \cdot z$$

Donde u es la energía interna, u_0 es la energía interna referida al estado muerto, P es la presión, V es el volumen del sistema y V_0 es el volumen en condiciones del estado muerto.

Pudiendo adicionarse en ambos casos otras manifestaciones: como exergía química en caso de ocurrir reacciones.

La eficiencia exergética de los distintos procesos o dispositivos, sin especificar criterios: Gaggiloli, Rieckert, etc. se puede determinar mediante la siguiente relación:

$$\eta_{Ex} = \frac{\text{Exergía aprovechada}}{\text{Exergía que ingresa al sistema en estudio}}$$

Si se la relaciona con el diagrama anterior, es el cociente entre la salida (der.) y la entrada de exergía (izq.).

Un texto directivo puede contribuir al planteo de las cuestiones de carácter teórico, y al acercamiento de situaciones problemáticas resueltas y a resolver, junto a propuestas de carácter abierto, de reflexión y de investigación. Y en la medida de lo posible el acceso a la práctica de laboratorio, según la oferta posible dentro del ámbito de la institución.

Una práctica que resulta particularmente esclarecedora es la introducción de diagramas de flujo estilo Sankey o de Grassman. Construidos manteniendo una escala apropiada los distintos grosores de línea representarán la magnitud de cada flujo de exergía. Mientras el estudiante no domine su técnica, hemos observado que aún no ha logrado una adecuada apropiación del concepto.

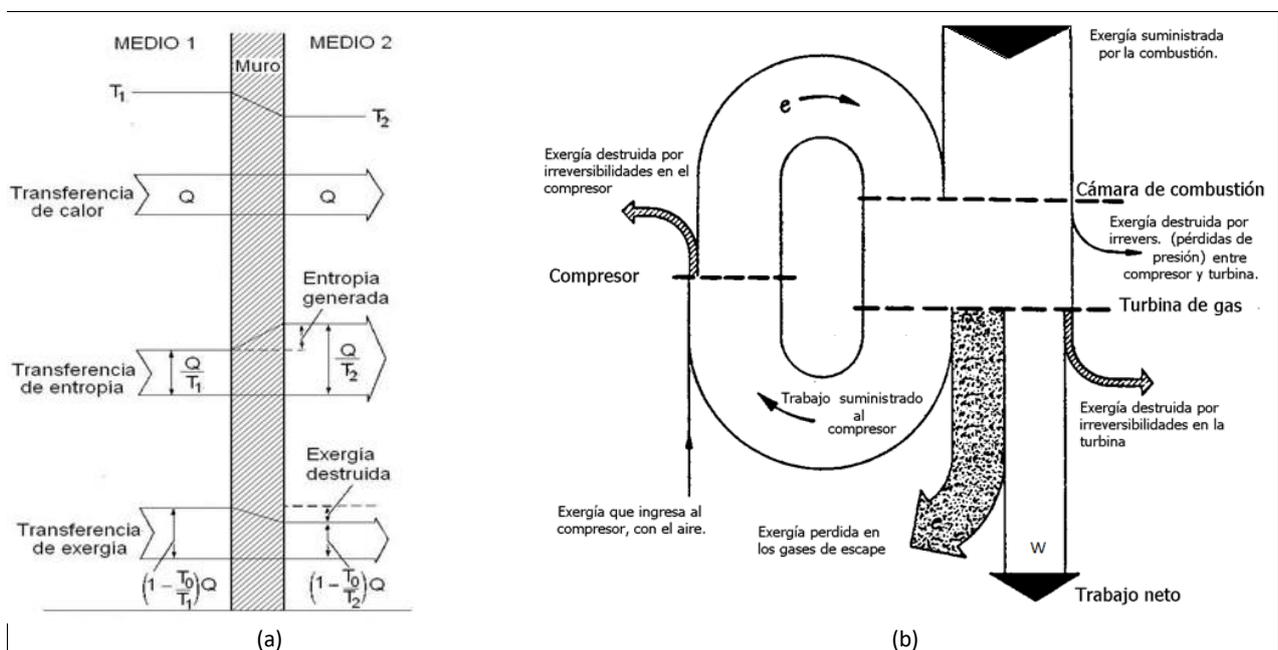


FIGURA 3: a) Grassman correspondiente a la transferencia y destrucción de exergía durante un proceso de transferencia de calor debida a una diferencia finita de temperatura b) Sankey de un ciclo Joule Brayton irreversible. Fuente: Diagramas con adaptaciones propias a) (Cengel y Boles, 2006) b) (Baehr, 1965).

Nuestra experiencia desarrollando cursos de Termodinámica en carreras de Ingeniería Electromecánica, Electromecánica con orientación en automatización industrial, Industrial nos da evidencia de que aquellos estudiantes que demuestran un cierto manejo de las cuestiones relacionadas a exergía y eficiencia han tenido mayores logros en la comprensión del potencial de trabajo real de la energía, de la calidad de la energía, de cómo la energía y la entropía están conectadas entre sí, de cuestiones asociadas a la generación de entropía e irreversibilidades, antecedentes necesarios para referirnos a la destrucción de exergía y la eficiencia. La propia devolución que hacen algunos estudiantes en diálogos informales o cuando se los indagó mediante técnicas de investigación-acción (Gago, 2000) indica que les confiere una mirada más crítica a la hora de realizar el estudio de sistemas más complejos, como ciclos termodinámicos, procesos de climatización, criogenia; y al aplicarlos en trabajos basados en proyectos.

Por otra parte, si las características de grupo y los tiempos lo permiten, hay muchos ejemplos disponibles en la literatura donde el análisis de exergía se combina con métodos de optimización en Matlab, EES, Aspen HYSYS/One u otros softwares, que se pueden usar como motivación. Una práctica adecuada en el laboratorio también puede motivar a los estudiantes a poner en práctica esos conocimientos. Por ejemplo: determinar la curva de rendimiento exergético o la destrucción de exergía de un ventilador centrífugo operando en diferentes estados de carga, hallar la eficiencia exergética de una bomba de calor disponible y otras.

A.2. El nivel secundario técnico

Se pueden aplicar estrategias similares recurriendo a resoluciones conceptuales y de baja complejidad en el cálculo, donde no aparezcan combinaciones de dispositivos. Por ejemplo, analizar los flujos presentados en el muro ilustrado anteriormente, una máquina térmica de Carnot y una real, una turbina de gas ideal reversible (ideal) frente a otra irreversible, un intercambiador de calor, entre otros.

A.3. El nivel secundario no especializado

El abordaje en este caso se podría realizar lateralmente mediante situaciones como las planteadas por situaciones de la vida cotidiana que aunque no plantean directamente el concepto como exergía, si introducen la idea de calidad o de disponibilidad. Seleccionamos los siguientes ejemplos adaptados de Farshid Zabihian, (2015):

Ejemplo 1.

Imagine que hay dos profesores, el Sr. X y la Sra. Y, impartiendo el mismo curso, p.e. Termodinámica. Al final del período, ambas clases terminan con la calificación promedio B en el curso. ¿Qué profesor hizo un mejor trabajo?

Si nos limitamos a mirar los resultados finales y los consideramos como el parámetro para evaluar el desempeño de los profesores, entonces ambos profesores están haciendo un trabajo igualmente bueno (¡o malo!). Este enfoque se asemeja a la primera ley del análisis de la termodinámica o el análisis de la energía.

Pero como puede notar, esta comparación no es realmente justa porque los antecedentes de los estudiantes al comienzo de la clase no se tienen en cuenta. Si sabemos que el grado medio de aprobación de la clase que enseña el Sr. X en los últimos dos años ha sido B y el grado medio de aprobación de la clase que enseña la Sra. Y en el mismo período ha sido C, entonces la comparación será totalmente diferente. Si tenemos en cuenta los antecedentes de los estudiantes en cada clase, nos damos cuenta de que la profesora Y ha sido capaz de mejorar las calificaciones de los estudiantes en su clase de promedio C a B, mientras que el profesor X solo mantuvo las calificaciones de los estudiantes en B. Por lo tanto, en esta evaluación, donde tomamos en cuenta la calidad de los estudiantes asignados a cada profesor, así como las calificaciones finales, la Sra. Y está haciendo mucho mejor trabajo. Este enfoque es la segunda ley de la termodinámica, la exergía o el análisis de disponibilidad.

Después de este ejemplo preliminar, se pueden formular algunas preguntas más técnicas que serán bases para los otros ejemplos. Estas preguntas están relacionadas con algunas de las aplicaciones del análisis de exergía y están diseñadas para dar una apariencia tangible a la idea abstracta del análisis de exergía.

Ejemplo 2.

Estás construyendo tu nueva casa y estás tratando de decidir la fuente de calefacción para tu casa. Tus opciones son: a) Electricidad, b) Gas natural (o cualquier otro combustible fósil), c) Vapor a 500°C, d) Vapor a 50°C.

¿Cuál es tu elección? ¿Basado en consideraciones puramente económicas? ¿Basado en consideraciones económicas y ambientales?

Por otra parte, si se buscan recursos en la Web, es posible acceder a publicaciones con adaptaciones adecuadas para el nivel. Ejemplo de ello puede ser *Energía, Exergía y Emergía ¿Qué son y en qué se diferencian?* una amena descripción presentada en un canal de YouTube de Ingeniería y Química fácil (2021).

CONCLUSIONES

No toda la energía posee la misma calidad, los recursos minerales se dispersan cada vez más. Se debe tomar conciencia de su finitud. Integramos una sociedad cada vez más urgida de concientizar a sus semejantes sobre los efectos que la acción humana produce sobre su hábitat y sus gravísimas consecuencias. Nuestra investigación nos permite concluir que el concepto de exergía, tienen el potencial para hacerlo. Así lo prueba el uso creciente en las últimas décadas. Pero debemos “arrancarlo” del campo netamente profesional y divulgarlo masivamente en procura de que cada vez haya más personas que lo hagan propio. Y para eso coincidimos en que se debe aprovechar mejor al sistema educativo dado el potencial multiplicador que posee. Hemos propuesto aquí algunas estrategias de implementación, a la espera de que otras se sigan comunicando. Observamos que la incorporación del concepto de exergía posibilita una visión más amplia y una mayor comprensión del significado de la energía, de la primera y segunda ley de la termodinámica y su interrelación. Pero el dominio de esta herramienta de análisis también deberá ser competencia de políticos, legisladores, divulgadores y población en general.

REFERENCIAS

- Albaladejo, M., Mirazo, P. y Franco Henao, L. (2021). *La economía circular: un modelo económico que lleva al crecimiento y al empleo sin comprometer el medio ambiente*. ONU. Recuperado de <https://news.un.org/es/story/2021/03/1490082#:~:text=La economía circular>
- Alvarez Hincapie, C. y Velásquez Arredondo, H. (2013). *Exergía en sistemas biológicos: Aproximación holística para el estudio de ecosistemas y el manejo ambiental*. *Rev. Producción+Limpia* [online] 8(2), 106-127.
- Baehr, H. (1965). *Tratado Moderno de Termodinámica*. Barcelona, España: Montesó.
- Bejan, A. (1994). *Entropy generation through heat and fluid flow*. New York, USA: Wiley Interscience.
- Cidade Cavalcanti E. (2018). *Análise exergoeconômica e exergoambiental*. Brasil: Editora Blucher.
- Çengel, Y. y Boles, M. (2012). *Termodinámica*. (7th ed). Mc Graw-Hill.
- Farshid Zabihian. (2015). *Educating Undergraduate Mechanical Engineering Students about Exergy Analysis*. Recuperado de <file:///D:/2022/Termodinamica%202022/Proyecto/Exergy%20teaching/educating-undergraduate-mechanical-engineering-students-about-exergy-analysis.pdf>
- Fernández, A. (2015). *Análisis del Ciclo de Vida*. Recuperado de <http://www.fernandezantonio.com.ar/Documentos/Analisis%20Ciclo%20de%20Vida%20GA%202016.pdf>
- Gago, L. (2000). *Aprendizaje Significativo de los Principios de Termodinámica en el ámbito de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Pampa*. Tesis de maestría. España: Departamento de Didáctica, Universidad de Barcelona.
- García C. (1984). *Termodinámica Técnica*. (3.ª ed.) Argentina: Alina.
- Goedkoop, M., Eftting, S. y Collignon, M. (1999). *Eco-indicador '99*. Recuperado de https://proyectaryproducir.com.ar/public_html/Seminarios_Posgrado/Herramientas/Eco%20indicador%2099%20ca.pdf
- Ingeniería y Química fácil. (2021). *Energía, Exergía y Emergía ¿Qué son y en qué se diferencian?* Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=Dpy209D9XxM>
- Keenan, J. H. (1951). *Availability and Irreversibility in Thermodynamics*. *British Journal of Applied Physics*, 2, 183-192. <https://doi.org/10.1088/0508-3443/2/7/302>
- Kranjc T. y Razpet N. (2017). *Exergy in School?* *Scientia in education*, 8 (special Issue), 214–222. <https://doi.org/10.14712/18047106.746>
- Lucchini, J., Stoll, R., Garnica, J. y Barral, J. (2013). Análisis exerético de un sistema de calentamiento de agua cuyo colector posee inercia térmica, *ASADES Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 17, 08 37-08 45.
- Ministerio de Educación La Pampa. (2022). *Materiales Curriculares*. Recuperado de https://repositorio.lapampa.edu.ar/repositorio/repositorio/materiales_curriculares/
- Mora Casal (2015). Crítica del concepto de Exergía. *Ingeniería*, 25(1) <http://dx.doi.org/10.15517/ri.v25i1.14926>
- Morán M. y Shapiro H. (2006). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* (5.ª ed.). Jhon Wiley and Sons.
- Science Europe. (2016). *'In a Resource-constrained World: Think Exergy, not Energy'*. DOI: 10.5281/ZENODO.5060173
- Starkermann, R. (1988). Social entropy, enthalpy, exergy and disergy in examples, *Science Direct Mathematical and Computer Modelling*, 10(6), 409-418 [https://doi.org/10.1016/0895-7177\(88\)90030-1](https://doi.org/10.1016/0895-7177(88)90030-1)

Torres-Verzagas, B., Leyva-Galán, Á. y del Pozo-Rodríguez, P. (2019). *Energía: generalidades, apuntes, y ejemplos de utilidad, como herramienta para evaluar la sostenibilidad*. Recuperado de <http://ediciones.inca.edu.cu>

Valero Delgado, A. (2022). *Transitando hacia Thanatia. Límites minerales de la transición ecológica*. Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=q-f8Gogjoqg>

APÉNDICE

NOMENCLATURA

e_x = Exergía por unidad de masa. [J]

s = Entropía. [J/(kg °K)]

T = Temperatura. [°K]

v = Velocidad. [m/s]

\dot{E}_x = Flujo exergético. [W]

g = Gravedad. [m/s²]

u = Energía interna. [J/kg]

h = Entalpía. [J/kg]

\dot{e}_x = Flujo exergético por unidad de masa. [W]

m = Masa. [kg]

V = Volumen. [m³] \dot{m} = Flujo másico. [kg/s]

P = Presión. [N/m²]

Subíndice

0 = referencia al estado muerto