



Exergoeconomía y sus implicaciones con la termodinámica

Exergoeconomics and its implications with thermodynamics

Autores

María Neyda Avila Bareño ^{1,2 *}

<https://orcid.org/0000-0003-2394-172X>

Zaria Gómez ¹

<https://orcid.org/0009-0000-8324-6329>

¹ Maestría del Programa Nacional de Formación Avanzada en Energía Eléctrica. Universidad Politécnica Territorial del Oeste de Sucre “Clodosbaldo Russian”. Cumaná, Venezuela.

² Universidad Politécnica Territorial del Estado de Trujillo “Mario Briceño Irragory”. Valera, Venezuela.

* Autor para correspondencia.
avilamarianeyda@gmail.com

Citacion sugerida: Avila, M. y Gómez, Z (2024). Exergoeconomía y sus implicaciones con la termodinámica. *Revista de investigaciones en energía, medio ambiente y tecnología. RIEMAT*, 9(1), pp. 34-42. <https://doi.org/10.33936/riemat.v9i1.6791>

Recibido: 14/05/2024
Aceptado: 14/05/2024
Publicado: 21/06/2024

Resumen

La exergoeconomía se presenta como un enfoque multidisciplinario que integra los principios de la termodinámica con herramientas económicas para evaluar y optimizar la eficiencia y sostenibilidad de los sistemas energéticos. Este estudio realiza una revisión sistemática de la literatura académica, para explorar la relación entre la exergoeconomía y la termodinámica, y sus aplicaciones prácticas en la gestión energética. Los resultados revelan una sólida integración de los principios termodinámicos en el análisis exergético, diversas aplicaciones en sectores industriales y sistemas de energía, y destacan tanto las oportunidades como los desafíos en la implementación de la exergoeconomía. A pesar de la complejidad de los cálculos y la falta de datos precisos, la relevancia de la exergoeconomía para la sostenibilidad energética es innegable. Se identifican direcciones futuras de investigación para mejorar las metodologías de análisis y ampliar la aplicación de la exergoeconomía en nuevos campos emergentes. Este trabajo subraya la importancia de una colaboración interdisciplinaria y un enfoque holístico para enfrentar los desafíos energéticos actuales y futuros.

Palabras clave: Exergoeconomía; Termodinámica; Eficiencia energética; Sostenibilidad Energética.

Abstract

Exergoeconomics is presented as a multidisciplinary approach that integrates the principles of thermodynamics with economic tools to evaluate and optimize the efficiency and sustainability of energy systems. This study conducts a systematic review of academic literature to explore the relationship between exergoeconomics and thermodynamics, and their practical applications in energy management. The results reveal a solid integration of thermodynamic principles in exergy analysis, diverse applications in industrial sectors and energy systems, and highlight both the opportunities and challenges in the implementation of exergoeconomics. Despite the complexity of calculations and the lack of precise data, the relevance of exergoeconomics for energy sustainability is undeniable. Future research directions are identified to improve analysis methodologies and expand the application of exergoeconomics in emerging fields. This work emphasizes the importance of interdisciplinary collaboration and a holistic approach to address current and future energy challenges.

Keywords: Exergoeconomics; Thermodynamics; Energy Efficiency; Energy Sustainability.





1. Introducción

La exergoeconomía emerge como un enfoque multidisciplinario que combina los principios de la termodinámica con herramientas económicas para evaluar la eficiencia y la sostenibilidad de los sistemas energéticos. Este enfoque se basa en la premisa de que la energía no solo debe ser cuantificada en términos de cantidad, sino también de calidad, considerando su capacidad para realizar trabajo útil. La exergía es un concepto termodinámico que ante distintas calidades de energía (según el Segundo Principio) permite trabajar únicamente sobre aquella porción de energía convertible en trabajo útil (Gago, et al., 2022).

El término de exergía se empezó a asociar con la economía en la década de 1980, pero no fue sino hasta finales de los ochenta cuando comenzó a tener relevancia al ser planteado durante la Joint European Thermodynamics Conference en Roma (1987), en este evento se expusieron investigaciones referente a la construcción y el diseño de una central eléctrica considerando criterios de exergoeconómicos, como parte de la problemática, los científicos identificaron que la incertidumbre en la variación de los precios del petróleo influye en gran medida en los análisis de los sistemas energéticos, por lo que consideraron apto vincular los términos de exergía y economía, con lo que se creó una nueva área de conocimiento: la exergoeconomía.

Al integrar el análisis exergético con consideraciones económicas, esta disciplina proporciona una herramienta poderosa para optimizar el uso de la energía en una amplia gama de sistemas, desde procesos industriales hasta sistemas de generación de energía renovable (Moran et al., 2017; Bejan et al., 2016). La eficiencia energética es crucial en este contexto, ya que no solo se trata de minimizar el consumo de energía, sino de maximizar la utilidad de la energía disponible (Dincer y Rosen, 2013).

La exergoeconomía encuentra su fundamento en los principios de la termodinámica, en particular en la segunda ley de la termodinámica, que establece que la calidad de la energía tiende a degradarse con el tiempo. En la entropía se basa el concepto de exergía y describe cómo cambia la calidad de la energía cuando ella se transforma (Sánchez, 2020; Rosen y Koochi-Fayegh, 2016). Al aplicar estos principios al análisis de sistemas energéticos, la exergoeconomía permite identificar las fuentes de pérdidas exergéticas y evaluar su impacto económico.

Diversos autores han hecho análisis exergoeconómicos para optimizar diferentes sistemas de generación energética, desde el planteamiento para la optimización técnica y económica de sistema de los sistemas de cogeneración, empleando algoritmo de programación no lineal (Frangopoulos, 1994). Considerando también su utilización, en el análisis en sistema de cogeneración simple, en un proceso regenerativo de una turbina de gas, así como también, en un generador de vapor (Tsatsaronis y Pisa, 1994). Como también, ha sido propuesto este tipo de análisis paramétrico para evaluar los costos de operación, los coeficientes de operación y la eficiencia de la exergía en función de la temperatura ambiente, la temperatura de refrigeración, la eficiencia de compresión isoentrópica y la potencia de refrigeración. Los resultados demuestran que al comparar los costos de operación del producto del sistema, considerando el análisis con imputación del costo del desecho (Mora et al., 2019).

A partir de los señalamientos anteriores, se suscitaron numerosos avances en investigaciones y aplicación de la exergoeconomía, sin embargo, existe persisten incertidumbres y desafíos aún en este campo. En particular, se requiere una comprensión más profunda de las implicaciones de la exergoeconomía en relación con los principios termodinámicos, así como una evaluación crítica de su aplicabilidad en diferentes contextos.

La exergoeconomía ofrece un enfoque integral para evaluar la eficiencia energética y la sostenibilidad de los sistemas energéticos, integrando los principios de la termodinámica con consideraciones económicas. Este enfoque multidisciplinario no solo permite una evaluación detallada de la eficiencia de los sistemas energéticos, sino que también proporciona una base sólida para la optimización y mejora continua de estos sistemas. A pesar de los desafíos en su aplicación, como la complejidad de los cálculos exergéticos y la falta de datos precisos, la relevancia de la exergoeconomía para la sostenibilidad energética es innegable.

El presente estudio se propone revisar aspectos relevantes del conocimiento alcanzado en esta temática, tales como:

- Describir la relación entre la exergoeconomía y los principios de la termodinámica, analizando cómo se aplican estos principios en el análisis exergético y económico de sistemas energéticos, analizando las limitaciones y desafíos en la aplicación de la exergoeconomía
- Identificar las implicaciones prácticas de la exergoeconomía en la mejora de la eficiencia energética y la sostenibilidad, considerando su impacto en diferentes sectores industriales y sistemas energéticos.

Esta investigación busca presentar de forma más evidente la relación de la termodinámica y la exergoeconomía y, así como proporcionar perspectivas prácticas para su aplicación en la gestión energética y ambiental.

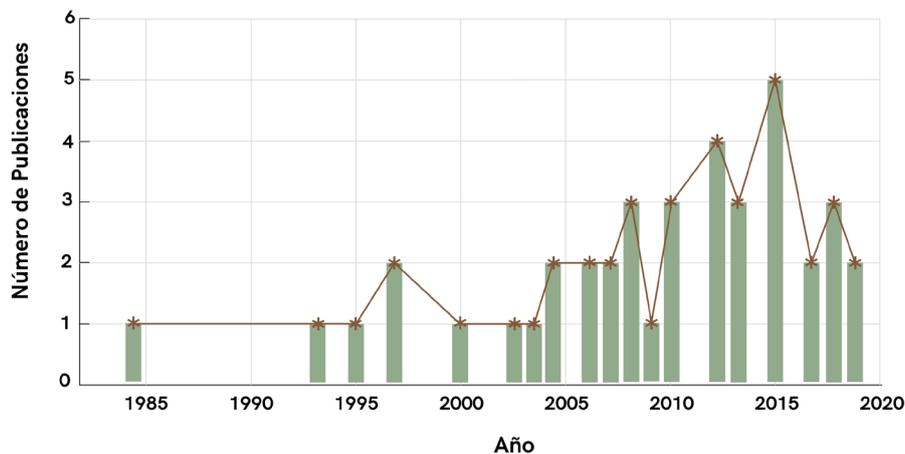
2. Materiales y Métodos

La Agenda 2030 de la ONU, con su enfoque en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), ha impulsado significativamente la investigación y aplicación de métodos de análisis exergonómico. El objetivo de asegurar un acceso asequible, confiable, sostenible y moderno a la energía para todos (ODS 7) ha motivado el desarrollo de metodologías avanzadas que optimicen la eficiencia energética y reduzcan los costos asociados (Araújo et al., 2023). Esto ha generado un marco favorable para la promoción de la exergoeconomía como una herramienta vital en la planificación y gestión de sistemas energéticos sostenibles (Martinez y Leal Filho, 2021).

Se ha observado un aumento en el número de publicaciones relacionadas con estudios de sistemas energéticos mediante análisis exergonómicos, tal como se presenta en la figura 1. Esta tendencia se debe principalmente a la implementación de programas internacionales, como la Agenda 2030, cuyo objetivo principal es preservar las condiciones climáticas del planeta.

Figura 1

Publicaciones sobre análisis exergoeconómicos



Fuente: Álvarez et al. (2022)

Este estudio se basó en una revisión sistemática de artículos académicos, libros y otras fuentes relevantes en el campo. La revisión sistemática siguió las directrices propuestas por PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para asegurar una metodología rigurosa y reproducible (Moher et al., 2009).

Para la selección de la literatura, se llevó a cabo una búsqueda sistemática en bases de datos académicas como Google Scholar, ScienceDirect y IEEE Xplore utilizando términos clave relacionados con la exergoeconomía, la termodinámica y la eficiencia energética. Los términos de búsqueda incluyeron “exergoeconomy,”



“thermodynamics,” “energy efficiency,” y “exergy analysis.”

Para garantizar la calidad y la fiabilidad de los estudios seleccionados, se consideraron las normas y directrices de la IEEE, especialmente aquellas relacionadas con la evaluación de la eficiencia energética y la sostenibilidad. Por ejemplo, la norma IEEE 1012-2017 proporciona un marco sólido para la verificación y validación de sistemas energéticos, asegurando la precisión y reproducibilidad de los resultados (IEEE Standards Association, 2017). La metodología aplicada incluyó:

- Identificación de Estudios Relevantes
- Evaluación de la Calidad de los Estudios
- Análisis Exergético
- Análisis Económico
- Comparación y Síntesis de Resultados

3. Resultados y Discusión

Los resultados de la revisión sistemática de la literatura sobre exergoeconomía y sus implicaciones con la termodinámica revelan hallazgos significativos que se pueden agrupar en las siguientes categorías:

Integración de Principios Termodinámicos en la Exergoeconomía:

Los estudios revisados muestran una sólida integración de los principios de la termodinámica en el marco conceptual de la exergoeconomía. En particular, el análisis exergético se fundamenta en los conceptos de exergía y entropía, derivados de la segunda ley de la termodinámica. La exergía, al cuantificar la calidad de la energía, permite un análisis más detallado y preciso de la eficiencia energética en comparación con el análisis energético tradicional (Bejan, Tsatsaronis, y Moran, 2016).

El segundo principio de la termodinámica establece que, dentro de un sistema, la calidad de la energía tiende a disminuir desde un estado inicial hasta alcanzar un estado final que coincide con el entorno circundante o el estado de referencia (degradación de energía). Este principio proporciona un margen considerable para la mejora del sistema, demostrando ser una excelente herramienta para la optimización de sistemas termodinámicos simples y complejos (Velasco Callau et al., 2011).

Este enfoque permite identificar y cuantificar las pérdidas de energía en forma de irreversibilidades termodinámicas, lo cual es esencial para la mejora de la eficiencia energética de los sistemas.

Aplicaciones Prácticas en la Gestión Energética:

Se identificaron diversas aplicaciones prácticas de la exergoeconomía en la gestión energética de sistemas complejos. Ejemplos destacados incluyen:

Plantas de Generación de Energía: La exergoeconomía ha sido utilizada para evaluar y optimizar el desempeño de plantas de energía térmica, incluyendo plantas de ciclo combinado y plantas de energía renovable. Los análisis exergéticos permiten identificar ineficiencias específicas dentro del ciclo de generación y proponer mejoras que pueden reducir las pérdidas exergéticas y aumentar la eficiencia global (Rosen y Dincer, 2003).

Procesos Industriales: En procesos industriales, como la fabricación de productos químicos y la refinación de petróleo, la exergoeconomía se ha aplicado para analizar el uso de la energía y el impacto económico de las pérdidas exergéticas. Por ejemplo, en la industria del cemento, la exergoeconomía ha ayudado a identificar oportunidades para la recuperación de calor residual y la optimización del uso de combustible (Atmaca y Yumrutas, 2014).

Sistemas de Climatización: En sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC), la exergoeconomía permite un análisis detallado de la eficiencia del sistema y la identificación de mejoras potenciales. Por ejemplo, el análisis exergético de sistemas de bomba de calor puede revelar ineficiencias que no son evidentes en un análisis energético convencional, permitiendo así la optimización del diseño y operación del sistema (Hepbasli, 2012).

Las directrices establecidas por la IEEE para la evaluación de la eficiencia energética y la sostenibilidad proporcionan un marco sólido para estas aplicaciones (IEEE Standards Association, 2017). Estas normas aseguran que los análisis sean consistentes y comparables, facilitando la adopción de mejores prácticas en diferentes sectores.

Desafíos y Limitaciones:

A pesar de sus beneficios, se destacaron varios desafíos y limitaciones en la aplicación de la exergoeconomía:

Complejidad de los Cálculos Exergéticos: Los cálculos exergéticos pueden ser complejos y requieren una comprensión profunda de los principios termodinámicos y la capacidad para modelar sistemas energéticos detalladamente. Esta complejidad puede ser una barrera para la adopción generalizada de la exergoeconomía en la industria y otros campos.

Falta de Datos Precisos: La precisión de los análisis exergéticos depende en gran medida de la calidad de los datos disponibles. La falta de datos precisos sobre las propiedades termodinámicas de los materiales y los flujos de energía puede limitar la exactitud de los resultados del análisis exergético. Esto es particularmente problemático en sistemas complejos donde las propiedades pueden variar significativamente con las condiciones operativas (Caliskan, Dincer, y Agelin-Chaab, 2020; Zhang et al., 2019).

Integración de Nuevas Tecnologías: La implementación de tecnologías emergentes, como las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en el análisis exergético, puede presentar desafíos debido a la necesidad de desarrollar nuevos métodos y herramientas para la recopilación y análisis de datos. La integración de estas tecnologías requiere una inversión significativa en infraestructura y capacitación, lo cual puede ser una barrera adicional (Reistad y Bakken, 2021).

Dificultad para Integrar Aspectos Económicos: La evaluación del impacto económico de las pérdidas exergéticas requiere no solo un análisis técnico detallado, sino también un conocimiento profundo de los costos operativos y de capital asociados con los sistemas energéticos. La norma IEEE 1547-2018 sobre la interoperabilidad de los sistemas de energía distribuidos subraya la importancia de contar con datos precisos y metodologías estandarizadas para la evaluación y mejora de la eficiencia energética (IEEE Standards Association, 2018).

Importancia de la Integración de la Termodinámica y la Economía:

Los hallazgos destacan la importancia de integrar los principios termodinámicos con consideraciones económicas para una evaluación completa de la eficiencia energética. La exergoeconomía proporciona un marco sólido para esta integración al cuantificar no solo la cantidad, sino también la calidad de la energía. Esta integración permite identificar oportunidades para mejorar la eficiencia energética y reducir los costos operativos en una variedad de sistemas energéticos.

Por ejemplo, en una planta de generación de energía, el análisis exergético puede revelar que una parte significativa de la energía térmica se pierde debido a irreversibilidades en los procesos de combustión y transferencia de calor. Al cuantificar estas pérdidas en términos económicos, es posible evaluar la viabilidad de diferentes estrategias para reducir las irreversibilidades, como la implementación de tecnologías de recuperación de calor o la optimización de los procesos de combustión.

Para realizar un análisis exergoeconómico de un sistema energético, los autores consultados coinciden en que es esencial integrar varios componentes clave: un análisis detallado de la exergía, un análisis económico de cada componente del sistema, el cálculo del costo de cada flujo mediante un método que determine el costo exergético, y la evaluación de cada componente según las variables exergoeconómicas relevantes. El análisis de exergía, se considera aspecto de la exergía destruida y perdida en cada componente, la exergía total suministrada al sistema y la exergía total del sistema. Para llevar a cabo este cálculo, el cual es necesario, si se precisa alcanzar un balance exergético. A continuación se presenta en la figura 2, como se puede valorar



los flujo exergéticos.

Figura 2

Diagrama de flujo exergético



Fuente: Golberg (2005)

Desafíos y Oportunidades:

Se discuten los desafíos identificados en la aplicación de la exergoeconomía, como la complejidad de los cálculos y la falta de datos. A medida que emergen conceptos derivados de la termodinámica avanzada, se generan modelos energéticos más complejos que conllevan a desarrollar metodologías de análisis, evaluación y optimización de sistemas. Un área prometedora es el uso de tecnologías de la información y la comunicación (TIC) para mejorar la recopilación y análisis de datos. Por ejemplo, el uso de sensores avanzados y sistemas de monitoreo en tiempo real puede proporcionar datos más precisos y detallados sobre el rendimiento de los sistemas energéticos. (Caliskan, Dincer, y Agelin-Chaab, 2020).

Relevancia para la Sostenibilidad Energética:

La exergoeconomía no solo permite evaluar la eficiencia de los sistemas actuales, sino que también proporciona una base sólida para el diseño de sistemas energéticos del futuro que sean más sostenibles y resilientes. Por ejemplo, en el diseño de sistemas de energía renovable, como parques eólicos y plantas solares, la exergoeconomía puede ayudar a optimizar la integración de diferentes tecnologías y mejorar la eficiencia global del sistema. Al cuantificar las pérdidas exergéticas en cada etapa del proceso de conversión de energía, es posible identificar las áreas donde se pueden realizar mejoras y diseñar sistemas que minimicen estas pérdidas.

En lo que se refiere al aspecto económico, tal como se presenta en la figura 3, el costo puede ser calculado mediante dos métodos de costeo de exergía: el de costo promedio y el de costo específico. El primero asigna un valor promedio a cada unidad de exergía. El segundo divide la exergía física en exergía térmica y mecánica.

Los análisis exergoeconómicos son fundamentales para optimizar los costos y mejorar el diseño tecnológico de los sistemas energéticos. Estos análisis proporcionan informes con información valiosa para la toma de decisiones de inversionistas e investigadores, detallando el rendimiento energético de los flujos, componentes y del sistema en general. Además, al identificar puntos de mayor consumo financiero, los

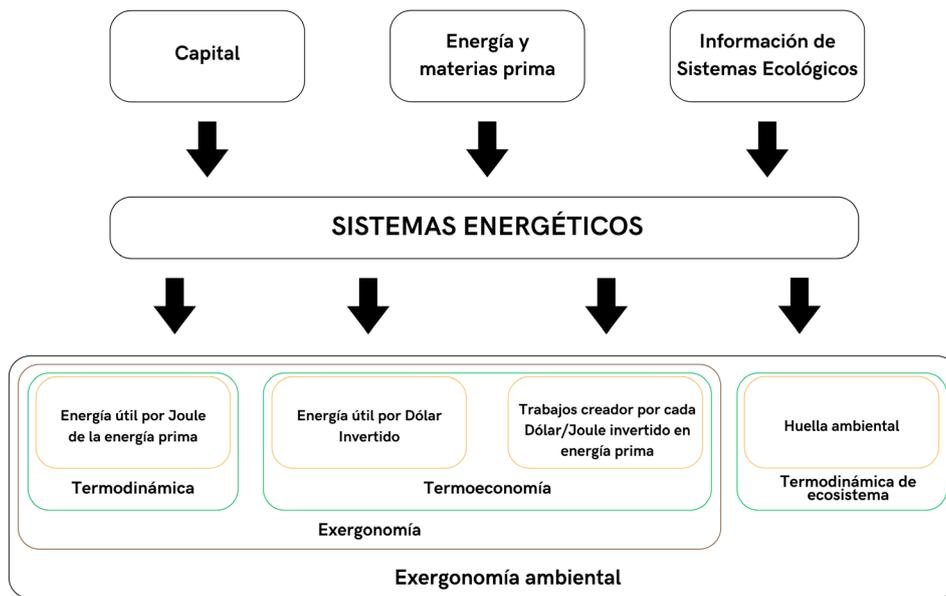
análisis exergoeconómicos contribuyen significativamente a la sostenibilidad energética, permitiendo desarrollar estrategias más eficientes y económicamente viables para la gestión energética.

Direcciones Futuras de Investigación:

La exergonomía, aún en desarrollo, carece de un modelo estandarizado que simplifique la nomenclatura y los métodos de cálculo exergético. Se sugiere que el área de ingeniería continúe utilizando este tipo de análisis para reducir errores en el diseño y comprender mejor los impactos económicos de una evaluación energética deficiente. Es crucial que futuros proyectos energéticos incluyan evaluaciones exergonómicas para maximizar la eficiencia energética y minimizar los costos de inversión.

Figura 1

Publicaciones sobre análisis exergoeconómicos



Fuente: Golberg (2015)

Las investigaciones futuras deben centrarse en mejorar las técnicas de análisis exergético, integrar aspectos ambientales en el análisis económico y aplicar la exergoeconomía en nuevos campos como la gestión de residuos y la movilidad sostenible. También es necesario desarrollar metodologías que permitan una mejor cuantificación de las incertidumbres en los cálculos exergéticos y económicos. Otra área prometedora es la creación de herramientas de software que faciliten los análisis exergéticos y económicos, automatizando los cálculos complejos y haciendo la exergoeconomía más accesible para ingenieros y otros profesionales del sector energético.

Mejorar la recopilación de datos y la precisión de los cálculos exergéticos es esencial para una implementación más amplia y efectiva. La creación de bases de datos exhaustivas sobre las propiedades termodinámicas de los materiales y los flujos de energía, junto con métodos estandarizados para la recopilación y análisis de datos, contribuirán significativamente a la precisión y utilidad de los análisis exergéticos. Además, explorar la aplicación de la exergoeconomía en campos emergentes como la economía circular y la gestión de recursos naturales puede proporcionar valiosos insights para optimizar el uso de recursos y minimizar los impactos ambientales, creando sistemas más sostenibles y resilientes (Álvarez et al., 2022; Caliskan et al., 2020; Reistad y Bakken, 2021).

Los análisis exergonómicos permiten detectar ineficiencias en la calidad energética de los sistemas, mejorando las condiciones de operación, diseño o configuración. Con el avance de las investigaciones en la exergonomía, se podrán implementar nuevas herramientas que complementen estos análisis para obtener mejores resultados en los sistemas (Álvarez et al., 2022; Martinez y Leal Filho, 2021).



4. Conclusiones

La termodinámica juega un papel fundamental en el incremento de la eficiencia energética al establecer los límites teóricos de los procesos de conversión de energía. Los principios termodinámicos ayudan a identificar las fuentes de pérdida de energía y a diseñar sistemas que minimizan estas pérdidas, lo cual es esencial para la optimización exergética. La integración de estos principios con análisis económicos permite una evaluación más completa y precisa de los sistemas energéticos, destacando áreas donde se puede mejorar la eficiencia y reducir los costos.

La aplicación efectiva de la exergoeconomía requiere una estrecha colaboración entre ingenieros, economistas y otros expertos en energía. La integración de diferentes disciplinas y la adopción de un enfoque holístico son cruciales para abordar los complejos desafíos energéticos actuales.

Se requiere una investigación continua para superar los desafíos existentes y aprovechar todo el potencial de la exergoeconomía en la búsqueda de un futuro energético más sostenible. Las futuras investigaciones deben centrarse en desarrollar metodologías más accesibles y estandarizadas para el análisis exergético y en explorar nuevas aplicaciones de la exergoeconomía en diversos sectores. Además, es esencial mejorar la recopilación de datos y la precisión de los cálculos exergéticos para facilitar una implementación más amplia y efectiva.

5. Referencias bibliográficas

- Araújo, M. R., Monteiro, A. S., Teixeira, E. S., Baez, R. N., y Costa, B. P. (2023, November). Metodologia de Gestão de Contratos de Energia: Estudo de Caso em uma Empresa de Saneamento. In 2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON) . 696-701. DOI : 10.1109/INDUSCON58041.2023.10374619
- Álvarez Benítez, O. L., Parrales Bahena, A., Parrales Bahena, A., Huicochea Rodríguez, A., y Hernández Pérez, J. A. (2022). Optimización de sistemas mediante análisis exergonómico. *Inventio, la génesis de la cultura universitaria en Morelos*, 17(43), 1-10. <https://doi.org/10.30973/inventio/2021.17.43/>
- Bejan, A., Tsatsaronis, G., y Moran, M. (2016). *Thermal Design and Optimization*. John Wiley y Sons.
- Caliskan et al., 2020. Thermodynamic and exergoeconomic analyses of a novel integrated energy system for sustainable buildings. *Energy Conversion and Management*, 211, 112765. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112765>
- Dincer, I., y Rosen, M. A. (2013). *Exergy: Energy, Environment, and Sustainable Development*. Elsevier. <https://acortar.link/Xb1rnL>
- Frangopoulos, C. A. (1994). Application of the thermoeconomic functional approach to the CGAM problem. *Energy*, 19, 323-342. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(94\)90114-7](https://doi.org/10.1016/0360-5442(94)90114-7)
- Gago, L., Schpetter, N., Mandrile, A., y Stark, N. (2022). Exergo Economía: Análisis exergético para el estudio de energías renovables y el ambiente. E-ISSN 2683-9237
- Golberg, A. (2015). Environmental exergonomics for sustainable design and analysis of energy systems. *Energy*, 88, 314-321. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.05.053>
- IEEE Standards Association. (2017). IEEE Standard for System, Software, and Hardware Verification and Validation. IEEE Std 1012-2017. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2017.7929195>
- IEEE Standards Association. (2018). IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces. IEEE Std 1547-2018. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2018.8332112>

- Martinez, E., y Leal Filho, W. (2021). The Role of Sustainable Energy in Achieving the Sustainable Development Goals: The SDG7 Nexus. *Sustainability*, 13(7), 3874. <https://doi.org/10.3390/su13073874>
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., y Bailey, M. B. (2017). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics* (9th ed.). John Wiley y Sons.
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., y Altman, D. G. (2009). Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement. *PLoS Med*, 6 (7), e1000097. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Monroy, E., Rodríguez, K., y Bastidas, M. (2016). Evaluación exergética para tecnologías aplicadas a fuentes no convencionales de energía. <https://doi.org/10.15665/rp.v14i1.645>
- Mora, I. E. H., Leyte, R. L., Blancas, A. E. B., Arenas, T. L., Méndez, H. D. L., y PEREYRA, M. S. (2019). Análisis exergoeconómico de un ciclo de refrigeración por compresión de vapor incluyendo el costo de imputación por la formación del residuo. *Dyna*, 86(208), 336-345. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/73299>
- Reistad, G., y Bakken, B. (2021). Exploring the role of ICT in energy systems: A comprehensive review and outlook. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111080. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111080>
- Rosen, M. A., y Koochi-Fayegh, S. (2016). *Exergy: Energy, Environment, and Sustainable Development* (2nd ed.). Elsevier.
- Sánchez, A. (2020). Análisis de la productividad en la industria alimenticia con base en una metodología desarrollada y fundamentada en la exergoeconomía y la exergía social. Recuperado de <https://unal.edu.co/19409834.2020.pdf>.
- Tsatsaronis, G., y Pisa, G. J. (1994). Exergoeconomic evaluation and optimization of energy systems. Application to the CGAM problem. *Energy*, 19, 287-321. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(94\)90113-9](https://doi.org/10.1016/0360-5442(94)90113-9)
- Valero, A., Lozano, M. A., Serra, L., Tsatsaronis, G., Pisa, C., Frangopoulos, C. A., y Von Spakovsky, M. R. (1994). CGAM problem: Definition and conventional solution. *Energy*, 19, 279-286. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(94\)90112-0](https://doi.org/10.1016/0360-5442(94)90112-0)
- Velasco Callau, A., Martínez Gracia, T., y Gómez Martín, T. (2011). *Termodinámica aplicada a instalaciones térmicas. Termodinámica Técnica II. Termodinámica aplicada a instalaciones térmicas: 2011.*
- Wang, J., He, Y., y Yang, Y. (2015). Advances in exergy analysis and energy efficiency improvement of industrial processes. *Applied Energy*, 151, 99-113. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.04.070>
- Zhang, X., y Xu, X. (2018). Exergoeconomic analysis of renewable energy systems: An updated review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1823-1835. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.248>