

ARTÍCULOS

Optimización de sistemas mediante análisis exergonómico

System optimization through exergonomic analysis

Ofir Lailani Álvarez Benítez

ORCID: 0000-0001-5559-9063/ofir.alvarezb@uaem.edu.mx

Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAP), Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM)

Anilu Parrales Bahena

ORCID: 0000-0003-2972-7724/anilu.parralesb@gmail.com

Facultad de Ciencias Químicas e Ingenierías (FCQEI), Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM)

Arianna Parrales Bahena

ORCID: 0000-0001-8554-8777/arianna.parrales@uaem.mx

Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAP), Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM)

Armando Huicochea Rodríguez

ORCID: 0000-0002-4067-0143/huico_chea@uaem.mx

Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAP), Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM)

José Alfredo Hernández Pérez

ORCID: 0000-0002-2107-3044/alfredo@uaem.mx

Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (CIICAP), Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM)

RESUMEN

Durante los últimos años ha aumentado el consumo energético mundial de manera sobresaliente debido principalmente al crecimiento económico y poblacional. La energía, tanto a nivel internacional como nacional, se genera, en gran medida, mediante la transformación de hidrocarburos (energía no renovable) como el carbón, el petróleo y el gas. En conjunto con otras acciones, el uso de estos insumos desencadena la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), lo que a su vez provoca impactos negativos en el medio ambiente y la población.

PALABRAS CLAVE

exergonomía, sistemas energéticos, economía, energía, medio ambiente, termodinámica

ABSTRACT

In recent years, world energy consumption has increased considerably, mainly due to economic and population growth. As is well known, the generation of energy both internationally and nationally is obtained largely from the transformation of hydrocarbons (non-renewable energy), such as coal, oil or gas. The use of these supplies has triggered, together with other actions, the emission of greenhouse gases (GHG), which in turn has caused negative impacts on the environment and the population.

KEY WORDS

exergonomy, energy systems, economy, energy, environment, thermodynamics

El consumo energético mundial se ha incrementado de manera notable durante los últimos años, debido principalmente al crecimiento económico y poblacional. Como es sabido, la energía, tanto en el ámbito internacional como en el nacional, se genera en gran medida mediante la transformación de hidrocarburos (energía no renovable) como el carbón, el petróleo y el gas. El uso de estos insumos desencadena, en conjunto con otras acciones, la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), lo que a su vez provoca impactos negativos en el medio ambiente y la población (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2021).

En la actualidad, la mayoría de los países industrializados son los principales responsables de los altos niveles de emisiones de GEI en la atmósfera, pues el aumento en la producción y comercialización de bienes implica un incremento del consumo energético y, por lo tanto, también en los niveles de contaminación. Particularmente, los gobiernos de los países desarrollados sólo se enfocan en resolver aspectos económicos y políticos y dejan de lado la responsabilidad ambiental que adquieren por su consumo energético (ONU, 2021).

Por ello, la ONU propuso un plan de acción dirigido a los países miembros: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, cuyo objetivo 7 establece la necesidad de garantizar que la energía sea asequible y no contaminante. De esta forma fomenta la eficiencia energética y la innovación en tecnologías aplicadas a energías renovables para lograr que sean ecológicamente racionales (ONU, 2020).

Por su parte, la comunidad científica ha elaborado soluciones alternativas mediante el análisis de eficiencia de sistemas energéticos. Un ejemplo de ello es el estudio que incluye la aplicación del primer principio de la termodinámica, el cual enuncia que la energía no se crea ni se destruye, sino que únicamente se transforma. Según este principio, la energía perdida por el sistema es igual a la ganada por el entorno.

Sin embargo, para lograr la cuantificación de la energía útil dentro de los sistemas no basta con realizar análisis energéticos simples por medio de los cuales sólo se observe la cantidad de energía (primer principio de la termodinámica), sino que también es necesario conocer la calidad de ésta mediante el segundo principio de la termodinámica.

Este segundo principio afirma que, dentro de un sistema, la calidad de la energía varía desde un estado inicial cualquiera hasta un estado final, el cual sea coincidente con el ambiente que lo rodea o bien al que se haga referencia (degradación de energía). Además, este principio ofrece un margen suficiente para la mejora del sistema, por lo que ha demostrado ser una herramienta eficaz para la optimización de sistemas termodinámicos complejos (Velasco Callau et al., 2011).

Una de las propiedades termodinámicas que nos ayuda en la optimización de procesos es la exergía, es decir, el cálculo del trabajo disponible que se puede obtener en un sistema dentro de un entorno definido. El análisis de la exergía ayuda a determinar no sólo los coeficientes de eficiencia en el desempeño de los sistemas, sino también las irreversibilidades de

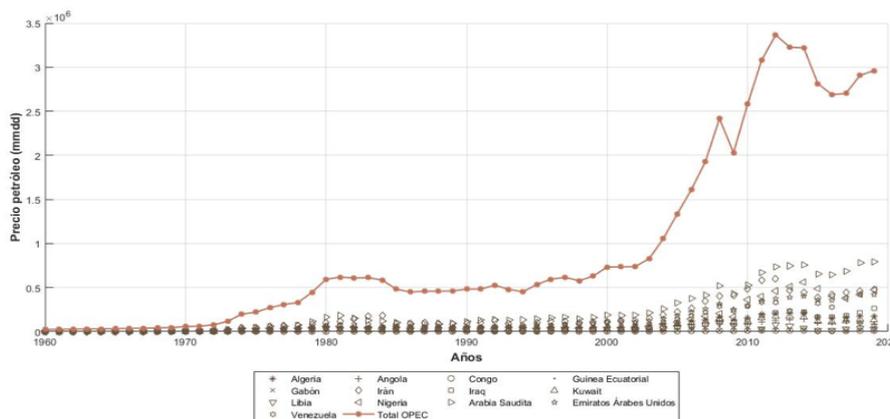
los componentes principales, con la finalidad de mejorar las condiciones de operación y de diseño o las configuraciones (Velasco Callau et al., 2011).

Hoy en día es posible asignar un valor económico a la energía descartada de un sistema, mediante un análisis costo-beneficio de su inversión. El impacto financiero derivado de la operación y eficiencia de los sistemas energéticos influye en la satisfacción de los requerimientos energéticos de la sociedad, al considerar un menor costo energético y ambiental posible. Los análisis que incluyen valores económicos permiten establecer si existe un mercado competitivo que minimice los costos generados pero que, a su vez, maximice los recursos y utilidades (Azqueta et al., 2007).

La asociación de la exergía a la economía se dio desde la década de 1980; no obstante, comenzó a tener relevancia durante la Joint European Thermodynamics Conference en Roma (1987), cuando Richard A. Gaggioli, Yehia M. El-Sayed y George Tsatsaronis realizaron un estudio referente a la construcción y el diseño de una central eléctrica. 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 exergonomía.

Es importante recordar que durante esta década el mundo sufría una crisis energética causada por el conflicto árabe-israelí, lo que implicó una reducción de producción petrolera (Ruiz Caro, 2001) y provocó que el precio de este recurso fuera un arma de negociación y de influencia de los países productores de hidrocarburos (figura 1).

Figura 1
Variación de precios de petróleo (1984-2019)



Fuente: Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés).

El término *exergonomía* se define como el costo de la unidad exergética expresado en unidades monetarias (Tsatsaronis y Pisa, 1994), el cual toma como base la producción o destrucción de exergía para otorgarle un valor a un proceso o sistema. Por consiguiente, el análisis exergonómico combina los principios básicos de la termodinámica y de la economía para determinar el costo de la exergía en un sistema.

Diversos autores han hecho análisis exergonómicos para optimizar diferentes sistemas de generación energética, como el desarrollado por Frangopoulos (1994), quien llevó a cabo la optimización técnica y económica de un sistema de cogeneración utilizando un algoritmo de programación no lineal.

Por su parte, Tsatsaronis y Pisa (1994) mejoraron un sistema de cogeneración simple que consistió en un proceso regenerativo de una turbina de gas y de un generador de vapor. En este estudio, por medio de modelos matemáticos, calcularon las relaciones entre la inversión de costos de los componentes y su operación.

Por otro lado, Von Spakovsky (1994) se ocupó de construir un modelo de un sistema energético que permitiría representar la economía interna del sistema, así como su comportamiento óptimo. Dicho modelo ocupaba el análisis funcional de ingeniería (*engineering functional analysis*), que descentralizaba la optimización o mejoramiento de los componentes y establecía que éstos se comportaran aisladamente con respecto al sistema.

En otro estudio desarrollado por Valero et al. (1994) se utilizó como estrategia de mejora una teoría de costos exergéticos (TCE), en conjunto con variables exergonómicas. La TCE es una técnica de contabilidad de costos que permite identificar el costo de cada flujo dentro del sistema. El resultado de este trabajo aportó información valiosa acerca de la interacción entre los componentes. El desarrollo de la exergonomía continúa con nuevos análisis; algunos por destacar son los mostrados en la tabla 1 (ver p. 5).

Algunos de los sistemas de generación de energía con mayores aplicaciones de modelos exergonómicos son las plantas térmicas, los sistemas combinados y los sistemas de enfriamiento; sin embargo, todavía un área de oportunidad vigente es la posibilidad de utilizarlos en sistemas ecoindustriales, donde, además de evaluar el sistema tecnológica y económicamente, se pueda hacerlo con estudios de impacto ambiental. Aunado a ello, los estudios exergonómicos recientes también se han aplicado en áreas tan diversas como la arquitectura, aeronáutica y ciencia cognitiva, e incluso se ha utilizado la inteligencia artificial como herramienta auxiliar. Es una realidad que los análisis necesitarán de programas especiales para un mejor procesamiento de datos, pero sobre todo para tener una interfaz que permita evaluar sistemas con diferentes configuraciones y diversos combustibles.

Un ejemplo de su aplicación en la arquitectura son los análisis realizados para evaluar ciertas áreas de edificios y hospitales donde el uso eficiente de calderas es necesario, pues permite el ahorro de gas y de recursos financieros (Bautista y Soto, 2018). Asimismo, la

aplicación industrial propuesta por la empresa Airbus Operations GmbH permitió convertir la energía de las naves de forma eficiente, tanto económica como ecológica y tecnológicamente, por medio de un dispositivo que después fue patentado (God et al., 2012).

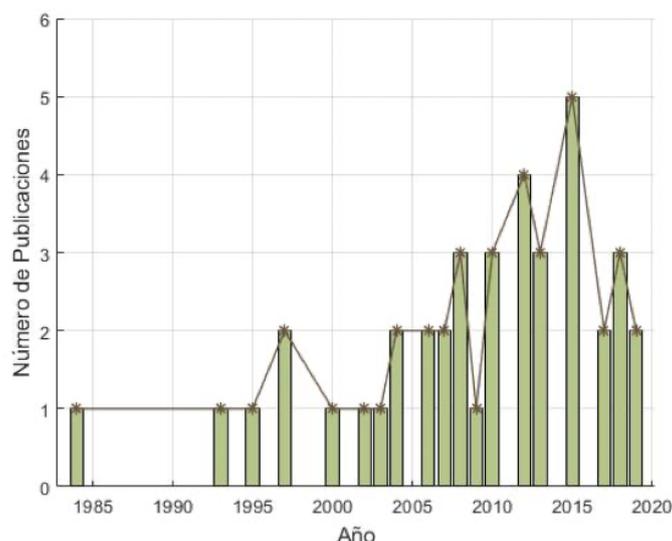
Tabla 1
Trabajos de análisis exergonómicos

Autor	Trabajo
Fals Acuña et al. (2010)	Se realizó un análisis exergonómico a una planta de cogeneración en una empresa azucarera. Se obtuvo una eficiencia exergética del 17%, con un costo termoeconómico de 0.55 €/s.
Baghernejad y Yaghoubi (2011)	Se aplicó un análisis termoeconómico usando algoritmos genéticos para la optimización de un sistema de energía solar de ciclo combinado. El resultado fue la optimización del sistema en un 11% y la unidad de costo eléctrico en un 13%.
Farshi et al. (2013)	Se analizaron tres sistemas de refrigeración por absorción de doble efecto con el fin de determinar la influencia de ciertos parámetros de operación sobre el costo de inversión del sistema.
Yildirim y Ozgener (2012)	Se calculó la eficiencia energética y exergética de una planta geotérmica. Asimismo, se determinó cuáles son los efectos de los fluidos utilizados, considerando los costos de inversión y los costos de mantenimiento.
Fazelpour y Morosuk (2014)	Se evaluaron los aspectos energéticos, exergéticos, económicos y exergoeconómicos de una máquina de refrigeración, lo cual ayudó a disminuir el costo total del producto final en un 14%.
Calise et al. (2016)	Se realizó un modelo de simulación dinámica para un sistema de poligeneración de energía geotérmica solar. El modelo muestra que la eficiencia de exergía varía entre 40 y 50% durante la recuperación de calor y de 16 a 20% durante el enfriamiento.
Aghbashlo et al. (2018)	Se hizo un análisis exergonómico a un motor DI de diésel monocilíndrico con diferentes combustibles y concentraciones de agua. El estudio determinó cuáles eran las composiciones de combustible y de operación óptimas en términos termodinámicos y económicos.
Aghbashlo et al. (2019)	Se llevó a cabo un análisis de rendimiento exergonómico de una planta municipal de residuos sólidos integrada con un sistema de biogás. Uno de los resultados indica que se debe minimizar el costo de inversión del digestor para obtener un mejor rendimiento exergoeconómico de la planta.

Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la figura 2, en 2015 se incrementó el número de publicaciones relacionadas con estudios de sistemas energéticos mediante análisis exergonómicos. Dicha tendencia se debe principalmente a que durante ese año entraron en vigor programas internacionales como la Agenda 2030, cuyo objetivo principal es mantener en buen estado las condiciones climatológicas del planeta.

Figura 2
Publicaciones sobre análisis exergonómicos



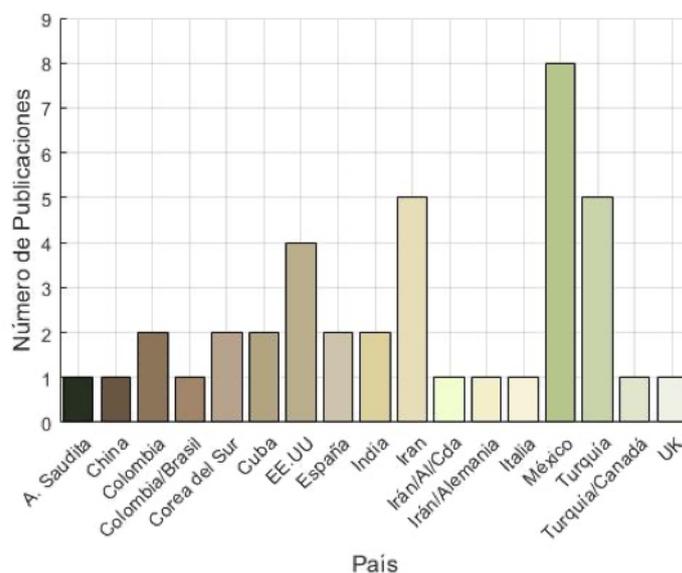
Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, el cumplimiento de los objetivos ambientales ocurre a un ritmo lento. La Unión Europea encabeza la lucha por este cumplimiento (figura 3) y se ha logrado que el bloque establezca políticas que regulen a las industrias en materia ambiental. Por otro lado, el continente americano no ha ratificado por completo su compromiso ambiental debido a que la región, liderada por Estados Unidos, se ve influenciada por satisfacer en primer lugar los requisitos de las industrias, dejando de lado los compromisos con el planeta.

Para llevar a cabo un análisis exergonómico a un sistema energético, Tsatsaronis y Pisa (1994) refieren que debe estar integrado por un análisis detallado de exergía, un análisis económico a nivel de cada componente que integra el sistema, el cálculo del costo de cada corriente —con ayuda de un método que determine el costo exergético— y la evaluación de cada componente de acuerdo con las variables exergonómicas que se consideren relevantes.

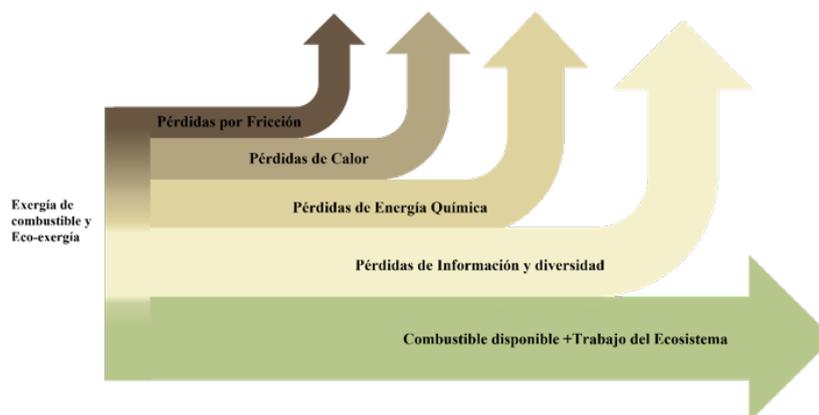
El análisis de exergía (figura 4, p. 7) considera, en detalle, la exergía destruida y perdida en cada componente, la exergía total suministrada en el sistema y la exergía total del sistema. Para llevar a cabo este cálculo es necesario realizar un balance exergético.

Figura 3
Países referentes en materia de exergonomía



Fuente: Elaboración propia.

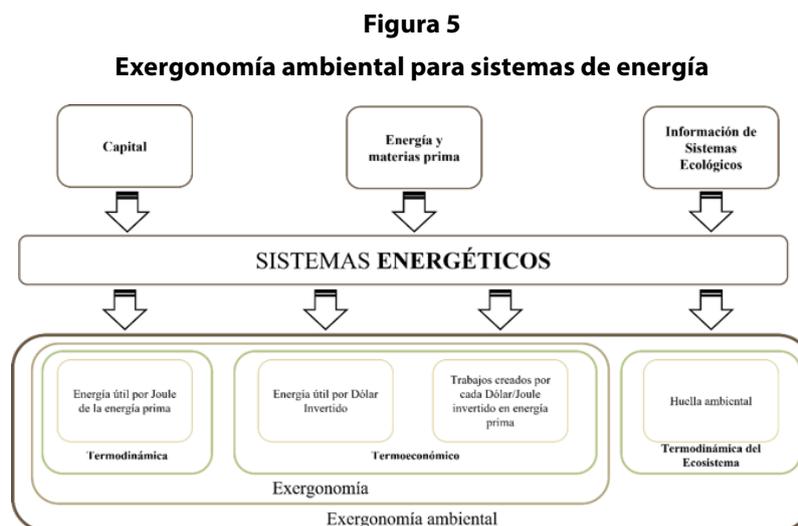
Figura 4
Diagrama de flujo exergético



Fuente: Golberg, 2015.

En lo que se refiere al aspecto económico (figura 5, p. 8), el costo puede ser calculado por medio de 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, ya sea física o química. El segundo divide la exergía física en exergía térmica y mecánica, lo que aumenta el número de

incógnitas en un sistema lineal de ecuaciones que se forma por las corrientes de flujo que hay en el sistema energético (Tsatsaronis y Pisa, 1994).



Fuente: Golberg, 2015.

En definitiva, los análisis exergonómicos son una herramienta necesaria para aumentar la optimización de los costos y mejorar el diseño tecnológico de los sistemas energéticos. Además, se vuelven reportes con información valiosa para la toma de decisiones de inversionistas e investigadores, ya que detallan el rendimiento energético del flujo, componentes y el sistema en general, lo que permite conocer y mejorar las inversiones que se requieren para un mejor funcionamiento o, en caso contrario, ubicar los puntos con mayor consumo financiero.

La exergonomía continúa siendo una disciplina en desarrollo, ya que aún no cuenta con un modelo estandarizado que permita simplificar la nomenclatura y los métodos de cálculo exergético. Particularmente, se sugiere que el área de ingeniería siga ocupando este tipo de análisis para reducir errores en el diseño e incrementar su entendimiento sobre los verdaderos impactos económicos que se producen por una deficiente evaluación energética.

Es necesario resaltar que en futuros proyectos energéticos se consideren evaluaciones exergonómicas con la finalidad de conocer las especificaciones técnicas y económicas necesarias para lograr maximizar la eficiencia energética y minimizar los costos de inversión de los sistemas.

Conclusiones

La economía es un aspecto importante para los sistemas energéticos, pues minimiza los costos de los componentes, analiza el impacto de los factores externos sobre el costo de los

recursos utilizados y otorga valor económico al trabajo útil (exergía) producido en el sistema principalmente.

Asimismo, la exergonomía permite optimizar el funcionamiento y rentabilidad de los sistemas energéticos desde un punto de vista tecnológico y económico. Aunado a ello, ofrece ventajas; por ejemplo, la maximización de la eficiencia exergética, diseños de plantas con puntos de operación óptimos, modificación de los componentes para obtener mejores rendimientos energéticos y análisis del comportamiento energético del sistema. Lo anterior hace que suscite interés como área de conocimiento.

Los análisis exergonómicos posibilitan detectar las ineficiencias de la calidad energética en los sistemas, lo cual ayuda a mejorar las condiciones de operación, diseño o configuraciones. Con el avance de las investigaciones en la exergonomía se podrán implementar nuevas herramientas que complementen dichos análisis para obtener mejores resultados en los sistemas.

Referencias

- Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Khalife, E., Shojaei, T. R. y Dadak, A. (2018). Exergoeconomic analysis of a DI diesel engine fueled with diesel/biodiesel (B5) emulsions containing aqueous nano cerium oxide. *Energy*, 149, 967-978. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.02.082>
- Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., Soltanian, S., Ghanavati, H. y Dadak, A. (2019). Comprehensive exergoeconomic analysis of a municipal solid waste digestion plant equipped with a biogas genset. *Waste Management*, 87, 485-498. [10.1016/j.wasman.2019.02.029](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.02.029)
- Azqueta, D., Alviar, M., Domínguez, L. y O’Ryan, R. (2007). *Introducción a la economía ambiental*. McGraw Hill.
- Baghernejad, A. y Yaghoubi, M. (2011). Exergoeconomic analysis and optimization of an Integrated Solar Combined Cycle System (ISCCS) using genetic algorithm. *Energy Conversion and Management*, 52(5), 2193-2203. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.12.019>
- Bautista Culquipoma, M. A. y Soto Chirinos, G. A. (2018). *Termoeconomía del reemplazo de combustible diésel-2 por glp en la caldera menor del Hospital Regional Docente las Mercedes-Chiclayo* [tesis de ingeniería]. Universidad Señor de Sipán.
- Calise, F., d’Accadia, M. D., Macaluso, A., Piacentino, A. y Vanoli, L. (2016). Exergetic and exergoeconomic analysis of a novel hybrid solar-geothermal polygeneration system producing energy and water. *Energy Conversion and Management*, 115, 200-220. [10.1016/j.enconman.2016.02.029](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.029)
- Fals Acuña, M. M., Loret de Mola López, M. A. y Alonso Cervantes, D. (2010). Análisis exergoeconómico de la planta de cogeneración de la empresa azucarera “Carlos Manuel de Céspedes”. *Centro Azúcar*, 37(3), 11-17.

- Farshi, L. G., Mahmoudi, S. M. S., Rosen, M. A., Yari, M. y Amidpour, M. (2013). Exergoeconomic analysis of double effect absorption refrigeration systems. *Energy Conversion and Management*, 65, 13-25. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2012.07.019>
- Fazelpour, F. y Morosuk, T. (2014). Exergoeconomic analysis of carbon dioxide transcritical refrigeration machines. *International Journal of Refrigeration*, 38, 128-139. [10.1016/j.ijrefrig.2013.09.016](https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.09.016)
- Frangopoulos, C. A. (1994). Application of the thermoeconomic functional approach to the CGAM problem. *Energy*, 19(3), 323-342. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(94\)90114-7](https://doi.org/10.1016/0360-5442(94)90114-7)
- God, R., Kurz, C. y Westenberger, A. (2012). Patente no. PCT/EP2011/000275. Oficina Europea de Patentes.
- 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>
- Organización de las Naciones Unidas (2020). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2020*. https://unstats.un.org/sdgs/report/2020/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2020_Spanish.pdf
- Organización de las Naciones Unidas (2021). *¿Qué es el Protocolo de Kyoto?* https://unfccc.int/es/kyoto_protocol
- Ruiz Caro, A. (2001). *El papel de la OPEP en el comportamiento del mercado petrolero internacional*. Cepal (serie Recursos naturales e infraestructura). https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/6372/1/S0103287_es.pdf
- Tsatsaronis, G. y Pisa, J. (1994). Exergoeconomic evaluation and optimization of energy systems. Application to the CGAM problem. *Energy*, 19(3), 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, J., Frangopoulos, C. y Von Spakovsky, M. R. (1994). CGAM problem: Definition and conventional solution. *Energy*, 19(3), 279-286. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(94\)90112-0](https://doi.org/10.1016/0360-5442(94)90112-0)
- Velasco Callau, C., Martínez Gracia, A. y Gómez Martín, T. (2011). *Termodinámica Técnica II. Termodinámica aplicada a instalaciones térmicas*. Prensas Universitarias de Zaragoza.
- Von Spakovsky, M. R. (1994). Application of engineering functional analysis to the analysis and optimization of the CGAM problem. *Energy*, 19(3), 343-364. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(94\)90115-5](https://doi.org/10.1016/0360-5442(94)90115-5)
- Yildirim, D. y Ozgener, L. (2012). Thermodynamics and exergoeconomic analysis of geothermal power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(8), 6438-6454. [10.1016/j.rser.2012.07.024](https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.07.024)