

# Evaluación exérgica para tecnologías aplicadas a fuentes no convencionales de energía

## Exergetic assessment for technologies applied to non-conventional energy sources

Edwin Monroy<sup>1</sup>, Kellys Rodríguez<sup>2</sup>, Marlon Bastidas<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Est. Ingeniería Ambiental, <sup>2</sup>Ingeniera Agroindustrial, <sup>1,2</sup>Facultad de Ingenierías y Tecnológica, Grupo de Energías Alternativas y Biomasa, Universidad Popular del Cesar, Valledupar, Colombia.

<sup>3</sup>Doctor en Ingeniería, Facultad de Ingenierías, Grupo de Desarrollo de Estudios y Tecnologías Ambientales del Carbono, Universidad de La Guajira, Riohacha, Colombia.

E-mail: marlonjoseb@uniguajira.edu.co

Recibido 27/11/2014  
Aceptado 30/10/2015

Cite this article as: E. Monroy, K. Rodríguez, M. Bastidas, "Exergetic assessment for technologies applied to non-conventional energy sources", Prospect, Vol 14, N° 1, 7-14, 2016.

### RESUMEN

Los principales esfuerzos para la evaluación de sistemas energéticos se han focalizado a tecnologías convencionales, especialmente para sistemas de conversión térmica; con metodologías ampliamente desarrolladas y resultados de interés para los investigadores del área y las comunidades consumidoras. Sin embargo, los sistemas emergentes de energía son especialmente obtenidos de sistemas no térmicos, aprovechando las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE) derivadas de recurso renovable con baja generación residual; es decir, se tiene una amplia metodología de evaluación energética pero no aplica a tecnologías que utilizan recursos renovables. En este trabajo, se muestra que hay un hilo conductor compatible para la evaluación de sistemas energéticos convencionales, los no convencionales e incluso híbridos. La metodología para evaluar sistemas térmicos parte de la exergía, propiedad energética que se produce de manera independiente al tipo de tecnología de conversión y el recurso energético primario; por lo tanto, fundamentalmente cabe la posibilidad de comparar mediante factores exergoeconómicos diferentes tipos de tecnologías de generación exérgica. El resultado principal apuntó a la construcción de un factor teórico que permite involucrar y comparar simultáneamente sistemas energéticos independientemente al recurso requerido. Este factor plantea indicadores de madurez de la tecnología con base en información externa al sistema, aplicada en un mismo entorno para la evaluación.

**Palabras clave:** Exergoeconomía; Sistemas energéticos; Factor exergoeconómico; Fuentes no convencionales de energía; Energía renovable.

### ABSTRACT

The main efforts for the energetic systems assessment have been focused to conventional technologies, especially for thermal energy systems; with methodologies extensively developed and important results for researchers of this area and the consumer communities. However, emergent energy systems are especially obtained from no thermal systems, taking advantage of Energy Non-conventional Sources (ENCS) derived from renewable resource with low residual generation; that means, there's a huge energetic assessment methodology but it doesn't apply for technologies which use renewable resources. This research shows there's a main topic in the conventional energetic systems assessment, the non-conventional and even hybrid systems. The methodology for assessing thermal systems comes from the exergy, which is generated of an independent way to the kind of conversion technology and the primary energetic resource; therefore exergoeconomic factors can be compared through different kinds of exergetic generation technology. The main result aimed at construction of a theoretical factor which let to involve and compare simultaneously energetic systems independently to the required resource. This factor proposes maturity indicators of the technology based on external information to the system, applied in a same contour for the assessment.

**Key words:** Exergoeconomy; Energy systems; Exergoeconomic factor; Not conventional sources of energy; Renewable energy.

## 1. INTRODUCCIÓN

La evaluación de los sistemas energéticos tiene su génesis teórica en la termodinámica, cuyo propósito básico es la conversión de energía calorífica en trabajo mecánico. El filósofo Rumford hizo las primeras alusiones sobre el efecto del calor y las vibraciones de las partículas para generar trabajo mecánico, pero fue Joule quien hizo estudios decisivos sobre la equivalencia entre estas dos formas de energía [1]. En adelante, el análisis de los sistemas energéticos se ha contextualizado en la termodinámica, a la cual se le han adherido conceptos nuevos y teorías emergentes como la termoeconomía (Exergoeconomía) [2].

Para explicar lo mencionado anteriormente, es importante tener en cuenta que un sistema energético evaluado desde el punto de vista de la termodinámica, permite establecer la cantidad ideal en la distribución de los flujos totales de energía (Primera Ley) con lo que se identifica pérdidas de energía; sin embargo, este análisis no es suficiente para estimar las magnitudes más significativas de las verdaderas ineficiencias termodinámicas-(VIT) y de los flujos de energía disponibles para producir trabajo, las cuales pueden ser estudiadas teniendo en cuenta las irreversibilidades del sistema (Segunda Ley) [2]. Las VIT están asociadas con los costos de los equipos, costos de operación y mantenimiento, por lo que los análisis de este orden, se han desarrollado dentro del contexto de la reducción de los costos y de las ineficiencias, simultáneamente [3]. A pesar que no se puede asegurar una reducción de costos mediante una reducción de ineficiencias, se ha encontrado que a través de metodologías para la optimización exérgica, los sistemas pueden alcanzar un punto de bajo costo de operación a una eficiencia razonable [4]. De esta manera, actualmente el análisis de un sistema energético se desarrolla bajo dos criterios fundamentales; en primer lugar los balances económicos que implica la generación de energía de alta calidad y en segundo lugar los factores que contribuyen a la formación de las VIT, teniendo en cuenta que estas últimas son derivadas de las irreversibilidades estudiadas desde el punto de vista de la Segunda Ley de la Termodinámica. La fusión de termodinámica y la economía dio origen a la termoeconomía, pero ha sido específicamente sobre la exergoeconomía donde se han hecho la mayor parte de los aportes metodológicos de la termoeconomía. El término exergoeconomía, proviene de la fusión entre la exergía y la economía, con lo que se busca estimar, a partir del análisis exérgico las VIT y los costos asociados a estas.

Por otra parte, a medida que emergen conceptos derivados de la termodinámica avanzada, se generan modelos energéticos más complejos que conllevan a desarrollar nuevas metodologías de análisis, evaluación y optimización de sistemas energéticos [5-7]. Los primeros métodos de optimización de sistemas energéticos se fundamentaron en el ensayo y error, luego se plantearon los multipli-

cadores de L'agrange y actualmente se ha recurrido a los algoritmos evolutivos [8-9].

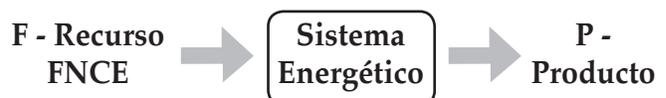
La combinación de la termodinámica y la economía han sido fundamentales para establecer que el principio básico de la evaluación de los sistemas energéticos no es la energía sino la exergía, porque a fin de cuenta, la energía tiene calidades diferentes, dependiendo del origen, mientras que la exergía (energía útil) es la finalidad de utilizar los diferentes tipos de tecnologías y es igual, independientemente de la calidad del recurso energético, es decir, que las necesidades energéticas (productos) conserva la calidad requerida y puede ser obtenido de diferentes fuentes de energía (recursos) [7]. En este orden de ideas, las FNCE también están orientadas a generar exergía con las mismas calidades que las fuentes convencionales, por lo tanto, se puede definir un hilo conductor para evaluar las FNCE a partir de las bases teóricas que se han ido construyendo a través de la historia para evaluar sistemas que tradicionalmente utilizan fuentes térmicas. Este trabajo, tiene como finalidad construir factores exergoeconómicos para evaluar FNCE a partir de los desarrollos provenientes de la evaluación de sistemas térmicos.

## 2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de los factores exergoeconómicos aplicados al FNCE se utilizó la información secundaria de las bases de datos más importantes, en la que se analizaron los aspectos de mayor relevancia para la evaluación de los sistemas energéticos. Un trabajo central para la metodología fue el realizado por Paulus y Tsatsaronis (2006), en el que incluyó en el análisis los valores de los precios de la exergía para evaluar los ingresos en un sistema energético convencional [10]. Los autores aplicaron el F-Principio, el cual consiste en desarrollar un sistema de ecuaciones lineales para calcular los costos exérgico unitarios de las corrientes que interconectan los equipos de un sistema térmico, con base en los costos del recurso (combustible-F) y los costos de los equipos utilizados [10-11]; y establecieron el homólogo para el producto o P-Principio, en cual permite establecer un sistema de ecuaciones lineales con base en el precio exérgico del producto (Trabajo Útil-P). Para explicar el P-Principio para FNCE se puede analizar la figura 1.

**Figura 1.** Componentes de un sistema energético para FNCE.

**Figure 1.** Components of an energy system for unconventional energy sources.



Para los sistemas energéticos derivados de FNCE, se tiene en cuenta como corriente de entrada los recursos no convencionales, los cuales por lo general no generan residuos, por lo tanto en la figura 1, se aprecia que solo hay una corriente de entrada (F) y una corriente de salida (P), porque se supone que las FNCE no generan residuos (R) o flujos másicos con contenido energético no aprovechable, los cuales si son relevantes en los sistemas energéticos convencionales. Del balance exergético de la figura 1 y teniendo en cuenta el P-Principio se puede obtener el balance expresado en la Ec. (1).

$$c_F \dot{E}_F = c_P \dot{E}_P - Z_{SE} \quad (1)$$

Donde  $\dot{E}_F$  y  $\dot{E}_P$  [kJ/s] son los flujos de exergía del recurso (FNCE) y del producto (trabajo), respectivamente; mientras  $c_F$  [\$/kJ] es el costo exergético unitario del recurso,  $c_P$  [\$/kJ] es el costo unitario del producto y  $Z_{SE}$  [\$/s] es el flujo de costos de la tecnología utilizada incluyendo los costos de operación y mantenimiento, es decir, si la FNCE es eólica entonces sería el costo del (os) aerogenerador(es), la operación y el mantenimiento durante la vida útil [10]. Pero si el recurso es gratuito, entonces  $c_F$  es cero, por lo tanto  $c_P$  es igual a  $Z_{SE} / \dot{E}_P$

Por otra parte, los recursos del sistema FNCE son totalmente "gratuitos" y son aportados por el entorno (medio), mientras que los sistemas convencionales los recursos por lo general tienen un costo y posteriormente generan residuos que contaminan el entorno. Esto hace que el sistema FNCE sea atractivo y se hagan numerosos esfuerzos para madurar la tecnología y reducir los costos de la misma para que la generación mediante FNCE sea competitiva frente a los costos de generación con tecnologías convencionales. Sin embargo, el precio impuesto por la relación oferta-demanda para la energía útil es igual para todos los casos, suponiendo que estos se interconectan con el sistema nacional, de tal manera que los usuarios pagan las tarifas del mercado independientemente de la fuente de generación.

El hecho que los sistemas FNCE aprovechen recursos gratuitos hace difícil realizar evaluaciones tecnológicas a partir de los costos, por lo tanto la metodología empleada en este trabajo toma como parámetro fundamental los precios de la energía útil (producto) para hacer la evaluación y las comparaciones con los sistemas convencionales. Con la inclusión del precio, se puede tener una aproximación de la capacidad real y potencial de ingresos, cuando el sistema está operando.

Para ello se considera que los ingresos potenciales, que podrían denominarse de mejor manera como beneficios potenciales, dependen del funcionamiento del sistema y de la venta del producto en el mercado; es decir, la primera parte de estos ingresos depende del valor de la exergía en el mercado y la segunda parte, se obtendría de lo que

se deja de pagar por la exergía perdida y destruida si el sistema operara en condiciones ideales, por lo tanto los ingresos potenciales quedarían representados por la Ec. (2).

$$\dot{R}_{PT} = r_P \dot{E}_P + c_P (\dot{E}_L + \dot{E}_D) \quad (2)$$

En la Ec. (2)  $\dot{R}_{PT}$  representa los ingresos potenciales,  $r_P$  el precio exergético unitario y  $\dot{E}_L + \dot{E}_D$  es la suma de la exergía perdida y destruida durante el funcionamiento del sistema FNCE. El flujo de ingresos potenciales depende directamente de la exergía producida y el precio de la exergía en el mercado; pero también depende del estado y funcionamiento del sistema, esto es de la cantidad de exergía perdida y destruida, debido a que sería el ingreso que se dejaría de recibir por el pago de la exergía no aprovechable.

En el caso que la Ec. (2) se divida por el factor  $r_P \dot{E}_P$ , se obtiene la Ec. 3, de la siguiente manera:

$$\frac{\dot{R}_{PT}}{r_P \dot{E}_P} = \frac{r_P \dot{E}_P}{r_P \dot{E}_P} + \frac{c_P}{r_P} \left( \frac{\dot{E}_L + \dot{E}_D}{\dot{E}_P} \right) \quad (3)$$

La Ec. 3 es una relación de los ingresos teóricos ( $\dot{R}_{PT}$ ) y los ingresos por la venta de la exergía en el mercado ( $r_P (\dot{E}_P)$ ), esto quiere decir que  $\dot{R}_{PT} \geq r_P (\dot{E}_P)$ . El factor entre paréntesis de la Ec. (3) se obtiene de la relación desarrollada por Bejan et. al (1996), en la que relaciona la eficiencia exergética ( $\epsilon$ ) con las exergías de un sistema, tal como se muestra en la Ec. (4) [3, 12].

$$\frac{1 - \epsilon}{\epsilon} = \frac{\dot{E}_L + \dot{E}_D}{\dot{E}_P} \quad (4)$$

El factor de la Ec. 4 es una representación del funcionamiento del sistema, que permite establecer las necesidades de mantenimiento cuando la eficiencia exergética está con valores por debajo a la eficiencia exergética normal del equipo. Para este trabajo, el factor de la Ec. 4, permite mantener el control de la eficiencia exergética en los niveles de funcionamiento señalados por las FNCE y los sistemas convencionales reportados en la literatura.

La Ec. 5 resulta de sustituir la Ec. 4 en la Ec. 3 y reorganizando los factores para obtener la eficiencia potencial de ingresos ( $\epsilon_{PI} = r_P (\dot{E}_P) / \dot{R}_{PT}$ ).

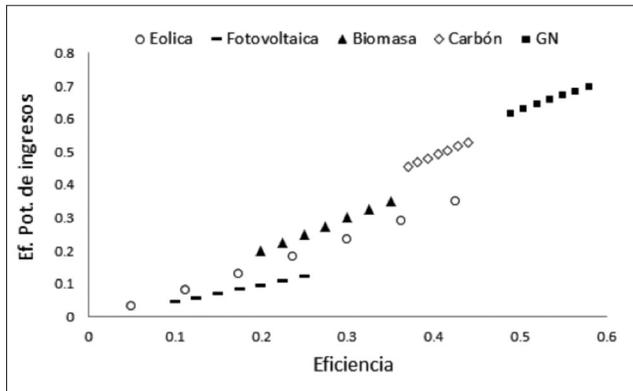
$$\epsilon_{PI} = \frac{1}{\left[ 1 + \frac{c_P}{r_P} \left( \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} \right) \right]} \quad (5)$$



unitario fijado en el rango y los costos exergéticos unitarios para cada tecnología, tomados de la tabla 1. La figura 3, muestra la variación de la eficiencia potencial de ingresos con respecto a las eficiencias exergética típicas de cada tecnología.

**Figura 3.** Variación de la eficiencia potencial de ingresos con la eficiencia de sistemas de generación.

**Figure 3.** Variation of the income potential efficiency with the generation systems efficiency.

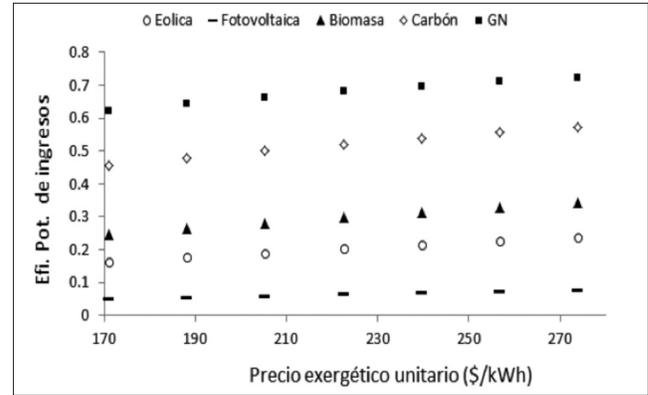


Fuente: autores

La tecnología de gas natural presenta mayor eficiencia potencial de ingresos para todos los rangos de datos tomado de la tabla 1, siendo una de las razones de este efecto los mejores valores de eficiencia exergética, lo que da cuenta de una madurez de estos sistemas, al igual que la tecnología para carbón. Entre las FNCE evaluadas, la tecnología fotovoltaica requiere mayores esfuerzos para mejorar la eficiencia exergética y por ende la eficiencia potencial de ingresos, mientras que la tecnología de biomasa está cercana a los sistemas convencionales, sin embargo, requiere algún esfuerzo para hacerla competitiva y no como una alternativa para reducir las emisiones al medio. No obstante, la evaluación de la eficiencia potencial de ingresos debido a la variación de las eficiencias típicas de las tecnologías es suficiente para sacar conclusiones globales; por lo tanto, se analiza su comportamiento con la variación del precio exergético unitario, tal como se muestra en la figura 4.

**Figura 4.** Variación de la eficiencia potencial de ingresos con el precio exergético unitario en un escenario de precios colombiano.

**Figure 4.** Variation of the income potential efficiency with the unit exergetic price in a stage of colombian prices.



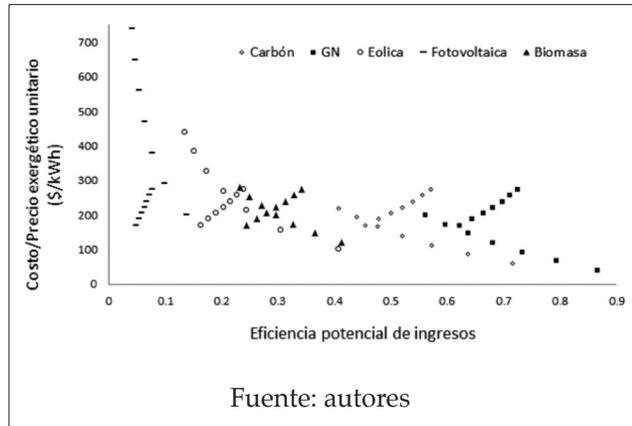
Fuente: autores

La eficiencia potencial de ingresos es aproximadamente constante para todas las tecnologías a diferentes precios exergéticos unitarios, esto es una muestra que la mejora de la eficiencia exergética de las FNCE tiene mayor efecto en la eficiencia potencial de ingresos, que la ofrecida por el aumento en el precio exergético unitario; adicionalmente, se considera que el precio exergético unitario es una condición externa a los sistemas y afecta a todas las tecnologías con la misma intensidad, es decir, que un aumento en el precio aumentaría el ingreso de las FNCE, pero también lo haría para sistemas convencionales.

Otro aspecto importante de análisis es el comportamiento de la eficiencia potencial de ingresos considerando simultáneamente los rangos de costos y precios exergéticos unitarios para eficiencias exergéticas típicas de las diferentes tecnologías. En la figura 5, se muestra las líneas del precio exergético unitario inclinados hacia la derecha, es decir, con pendiente positiva, el caso contrario ocurre para el costo exergético unitario que tiene pendiente negativa para todas las tecnologías.

**Figura 5.** Eficiencia Potencial de Ingresos para sistemas energéticos con relación al costo y precio exérgico unitario.

**Figure 5.** Variation of the Income Potential efficiency for energy systems in relation to the cost and price unit exergetic.



En la figura 5, se muestra que la eficiencia potencial de ingresos tiene rangos similares tanto para el costo y el precio exérgico unitario en cada una de las tecnologías evaluadas, lo que significa que la madurez de las FNCE deben enfocarse en el mejoramiento de las tecnologías utilizadas, empleando materiales de bajo costo y en escenarios con recursos favorables para alcanzar los niveles potenciales de ingresos de los sistemas convencionales. Los sistemas convencionales tienen los rangos del precio exérgico unitario por encima de los rangos de costos exérgicos unitarios, presentando un margen importante en la obtención de ingresos. Para las FNCE, en la biomasa las líneas de costos y precios exérgicos se cruzan en la mitad aproximadamente, lo que indica que esta tecnología ha avanzado y se acerca a los niveles de competitividad de los sistemas convencionales; para la fotovoltaica y la eólica las líneas de costo exérgico unitario están por encima de las líneas de precio exérgico unitario, por lo tanto, se nota que las tecnologías no son lo suficientemente fuertes para competir en condiciones normales con la biomasa y con los sistemas convencionales.

Un escenario que reúna las condiciones para que las FNCE sea competitiva frente a las tecnologías convencionales, en la actualidad es poco probable; por lo tanto, es importante plantear evaluaciones de las FNCE incluyendo aspectos ambientales, como la inclusión del mercado de bonos de carbono, la producción energética con cero emisiones y la inclusión de subsidios e incentivos tributarios para la financiación de proyectos de FNCE.

Con la Ec. 5 se puede determinar que para la generación con eólica a los niveles potenciales de ingresos similares de energía convencional, es necesario que se cumplan varios criterios, principalmente que se den las condiciones de velocidad del viento sostenible

para que se alcance el mayor rendimiento de los aerogeneradores con eficiencias exérgicas por encima del 40% y que los costos exérgicos sean el valor mínimo presentado en la tabla 1 (\$100/kWh), lo cual solo ocurre para producción a gran escala.

#### 4. CONCLUSIONES

- En primera instancia, los sistemas FNCE están en desventaja con respecto a los sistemas convencionales debido a que el precio de la energía eléctrica en la bolsa se establece por las variaciones que se presentan en los procesos de generación hidráulica y térmica, teniendo en cuenta que estos son los principales alimentadores al interconectado nacional. Los sistemas FNCE están madurando su tecnología para bajar los costos de generación, mientras que son empleados en Zonas No Interconectadas (ZNI) en sistemas independientes con miras a la producción energética limpia.

- Para que los sistemas FNCE sean competitivos se requiere que haya escenarios de favorabilidad y se utilicen sistemas de gran tamaño para bajar los costos exérgicos unitarios de generación, por ejemplo los sistemas eólicos para que sean competitivos requieren mantener la eficiencia exérgica por encima del 40% y bajar los costos exérgicos unitarios hasta \$100/kWh. Los sistemas FNCE tienen la ventaja que no generan contaminación de material particulado ni gases de efecto invernadero, por lo que el pago que deben hacer al medio ambiente es mínimo, contrario a las tecnologías convencionales que emplean recursos fósiles o materiales radioactivos, los cuales deben pagar al medio ambiente. No obstante, el medio ambiente no tiene capacidad de exigir los recursos por ser contaminada, pero intenta mantener el equilibrio manifestando cambios climáticos globales que afectan a la humanidad.

- No es sencillo evaluar sistemas FNCE debido a que son tecnologías emergentes que requieren mayores desarrollos para ser competitivas frente a los sistemas convencionales, por eso es importante desarrollar factores exergoeconómicos, ampliamente empleados para evaluar fuentes energéticas de origen térmico [21-22]. Los factores exergoeconómicos se basan en la generación de exergía (energía útil/electricidad), el cual es un producto de cualquier sistema energético, independientemente del origen del recurso y la tecnología utilizada; por lo tanto, aplicando estos factores, es posible comparar de manera simultánea los sistemas con fuentes convencionales de energía con las FNCE en un mismo escenario, con la posibilidad de establecer que tanto ha avanzado el desarrollo tecnológico de estas tecnologías para que puedan ser competitivas.

- Por otra parte, es importante establecer la manera de evaluar los costos que se deben pagar al medio por la

contaminación derivada de la generación con combustibles fósiles, así como aquellos que utilizan las tecnologías convencionales de generación para la obtención de utilidades, haciendo los cálculos económicos, que actualmente representan con valor cero a los gases que van al medio ambiente.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la División de Investigación de la Universidad Popular del Cesar y Colciencias por aportar recursos para el desarrollo de este trabajo. Al Centro de Investigación de la Universidad de La Guajira por brindar la asesoría necesaria y permitir acceder a información de FNCE en zonas del departamento de La Guajira. Finalmente le agradecemos muy especialmente a la estudiante Liseth Carolina Gutiérrez Quiroz y el Semillero de Investigación del Grupo de Energías Alternativas y Biomasa por su colaboración para llevar a feliz término este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] L. García, *De la Máquina de Vapor al Cero Absoluto*, España: Fondo de Cultura Económica de España, 2011.
- [2] B.S. Yilbas, H. Ali, "Thermoelectric generator performance analysis: Influence of pin tapering on the first and second law efficiencies", *Energy Conversion and Management*, 100, 138–146, 2015.
- [3] M. Mehrpooyaa, H. Ansarinasab, "Exergoeconomic evaluation of single mixed refrigerant natural gas liquefaction processes", *Energy Conversion and Management*, 99, 400–413, 2015.
- [4] E. Açikkalpa, C. T. Yucerb, A. Hepbaslic, T. H. Karakocd, "Advanced low exergoeconomic (ALEXERGO) assessment of a building along with its heating system at various stages", *Energy and Buildings*, 87 (1), 66–73, 2015.
- [5] R. Dong, Y. Yu, Z. Zhang, "Simultaneous optimization of integrated heat, mass and pressure exchange network using exergoeconomic method", *Applied Energy*, 136 (31), 1098–1109, 2014.
- [6] M. A. Abido, "Multiobjective Particle Swarm Optimization for Environmental/Economic Dispatch Problem", *Electric Power Systems Research*, 79, 1105–1113, 2009.
- [7] F. A. Boyaghchi, P. Heidarnjad, "Thermoeconomic assessment and multi objective optimization of a solar micro CCHP based on Organic Rankine Cycle for domestic application", *Energy Conversion and Management*, 97, 224–234, 2015.
- [8] R. Padilha, H. Santos, M. Colaço, M. Cruz, "Single and Multi-Objective Optimization of a Cogeneration System Using Hybrid Algorithms", *Heat Transfer Engineering*, 30 (1), 37 – 41, 2009.
- [9] P. K. Sahoo, "Exergoeconomic Analysis and Optimization of a Cogeneration System Using Evolutionary Programming", *Applied Thermal Engineering*, 28 (13), 1580 – 1588, 2008.
- [10] D. Paulus, G. Tsatsaronis, "Auxiliary Equations for the Determination of Specific Exergy Revenues", *Energy*, 31, 3235 – 3247, 2006.
- [11] I. Baldvinsson, T. Nakata, "A comparative exergy and exergoeconomic analysis of a residential heat supply system paradigm of Japan and local source based district heating system using SPECO (specific exergy cost) method", *Energy*, 74 (1), 537–554, 2014.
- [12] M. J. Bastidas, R. Bermúdez, G. P. Jaramillo, F. Chejne, "Optimización Termoeconómica y Ambiental usando Algoritmos Genéticos Multiobjetivo", *Información Tecnológica*, 21(4), 35 – 44, 2010.
- [13] L. Romero Lozano, *Organización y Supervisión del Aprovisionamiento y Montaje de Instalaciones de Energía Eólica*, Madrid: Ediciones Paraninfo, 2012.
- [14] <http://www.xm.com.co/Pages/Home.aspx>. (Consultado septiembre de 2015).
- [15] [http://www.nordex-online.com/fileadmin/MEDIA/Produktinfos/EN/Nordex\\_N60\\_EN.pdf](http://www.nordex-online.com/fileadmin/MEDIA/Produktinfos/EN/Nordex_N60_EN.pdf) (Consultado septiembre de 2015).
- [16] <http://www.ewh.ieee.org/soc/pes/spain/sabuga11.pdf> (Consultado septiembre de 2015).
- [17] N. Proenza, E. Blanco, D. Travieso, J. Roberts, J. Santana, J. Silveira, "Biomass gasification for combined heat and power generation in the Cuban context: Energetic and economic analysis", *Applied Thermal Engineering*, 90, 1-12, 2015.
- [18] J. Wang, T. Mao. "Cost allocation and sensitivity analysis of multi-products from biomass gasification combined cooling heating and power system based on the exergoeconomic methodology", *Energy Conversion and Management*, 105, 230-239, 2015.
- [19] J. Ferichola. *Caracterización de módulos fotovoltaicos con dispositivo portátil*. Tesis de Pregrado, Universidad Carlos III. Madrid. España. 2009.
- [20] D. Lezcano, *Estudio exergético para identificar y evaluar potencialidades en energías renovables en el territorio colombiano, para planeamiento energético*

en periodos futuros. Tesis de Maestría. Universidad Nacional. Medellin. 2011.

[21] M. A. Alkana, A. Keçebaşb, N. Yamankaradenizc, "Exergoeconomic analysis of a district heating system for geothermal energy using specific exergy cost

method", *Energy*, 60 (1), 426–434, 2013.

[22] W. De Queiroz, "Exergoeconomic methodology applied to energy efficiency analysis of industrial power Transformers", *International Journal of Electrical Power & Energy System*, 53, 348–356, 2013.