

# APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS PARA EL MEJORAMIENTO DE SISTEMAS DE TRANSFORMACIÓN DE LA ENERGÍA EN FUNCIÓN DEL DESARROLLO SOSTENIBLE

**Unidad ejecutora principal:** Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales (CEETA). Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV). Santa Clara, VC. Cuba.

**Autor principal:** Pablo Romelio Roque Díaz <sup>(a)</sup>

**Otros autores:** Manuel Alejandro Rubio Rodríguez<sup>(a)</sup> ; Ángel Manuel Rubio González<sup>(a)</sup>; Idalberto Herrera Moya<sup>(a)</sup> ; Víctor Samuel Ocaña Guevara<sup>(a)</sup>; Reinaldo M. Martínez<sup>(a)</sup> ; losvani López Díaz<sup>(a)</sup> ; Michael FeitóCespón<sup>(c)</sup>; Pedro Sáez Santiago<sup>(e)</sup>; Raúl Alberto Pérez Bermúdez<sup>(a)</sup> ; Yipsy Roque Benito<sup>(g)</sup>; José Alberto dos Reis Parise<sup>(f)</sup>; Jesús Betancourt Mena<sup>(f)</sup>; Ricardo Grau Ávalo<sup>(b)</sup>; Margarita Lapido Rodríguez<sup>(d)</sup>; Mario A. Álvarez –Guerra Plasencia<sup>(d)</sup>; Juan Carlos Armas Valdés<sup>(d)</sup>; Julio Gómez Sarduy<sup>(d)</sup>; Jacques de Ruyck<sup>(h)</sup>; VijayKumarVerma<sup>(h)</sup>; SvanBram<sup>(h)</sup>; Juan Gabriel Fajardo Cuadro<sup>(i)</sup>; Bienvenido Sarria López<sup>(i)</sup>; Cándido Enrique Quintana Pérez<sup>(i)</sup>; J. J. Ruiz<sup>(k)</sup>; María del Pilar Dorado<sup>(k)</sup>; F. Cruz-Peragón<sup>(l)</sup>; Alexis Sagastume Gutiérrez<sup>(d)</sup>; Juan B. Cogollos Martínez<sup>(d)</sup>; Carlo Vandecasteele<sup>(m)</sup>; Vladimir Núñez Carballo<sup>(n)</sup>;

## Filiación

- (a) Centro de Estudios Energéticos y de Tecnologías Ambientales (CEETA). Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV)
- (b) Centro de Estudios Informáticos (CEI). Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV)
- (c) Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas (UCLV)
- (d) Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente (CEEMA). Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez (UCf)
- (e) Dirección Provincial de Villa Clara de Economía y Planificación. DPVC-MEP
- (f) Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC - Rio), RJ, Brasil
- (g) Centro Universitário Estadual da Zona Oeste (UEZO), Rio de Janeiro, RJ. Brasil
- (h) Universidad Libre de Bruselas (VUB). Bruselas, Bélgica.
- (i) Departamento de Ingeniería Mecánica, Grupo de Investigación en Energías (EOLITO), Universidad Tecnológica de Bolívar (UTB), Cartagena de Indias, Colombia.
- (j) Instituto Tecnológico de Santo Domingo, República Dominicana.
- (k) Departamento de Química Física y Termodinámica Aplicada, Edificio Leonardo da Vinci, Campus de Rabanales, Universidad de Córdoba, Campus de Excelencia Internacional Agroalimentario, ceiA3, España.
- (l) Departamento de Ingeniería Mecánica y de Minas, EPS, Universidad de Jaén, Campus Las Lagunillas s/n, 23071 Jaén, España.
- (m) Department of Chemical Engineering, University of Leuven, de Croylaan 46, B-3001 Heverlee, Bélgica.
- (n) Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente (CITMA). Dirección Provincial de Villa Clara.

**7 colaboradores:** Oscar Miguel Cruz Fonticiella. Ovidio Rodríguez Santos  
Alfredo Alejandro Leyva Céspedes  
Maida Bárbara Reyes Rodríguez  
María de los Ángeles García Hernández  
Sonia Ramírez López

Á

**Autor para la correspondencia:** Pablo R. Roque Díaz

**Dirección postal:** Calle 1ª # 2, e/ Línea y A, Brisas del Capiro, Santa Clara, VC.

**Fax:**No

**Correo electrónico:** [proque@uclv.edu.cu](mailto:proque@uclv.edu.cu)

### **Resumen.**

El suministro energético a instalaciones productivas, de servicios y a asentamientos humanos pasa por un adecuado proceso de proyección y evaluación de la viabilidad así como la capacidad de satisfacer las demandas de servicios energéticos. Mientras algunos sistemas de suministro trabajan por separado la satisfacción de dichos servicios, en años recientes se ha extendido los sistemas de poligeneración (cogeneración y trigeneración).

No siempre una más elevada eficiencia termodinámica corresponde a una mayor racionalidad, pues puede que un proyecto muy eficiente consume menores cantidades de energía primaria que otro, pero de un portador energético más caro o con una tecnología más costosa y el proyecto menos eficiente, resulta el más racional.

El problema a resolver consiste en decidir las alternativas que dan por resultado un menor costo unitario exergoeconómico y ambiental del producto para el que se requiere el servicio energético.

Los objetivos de trabajo, que son concretos y particulares para cada proyecto o caso, se resumen en general en la definición de la estructura física óptima que permita cumplir las exigencias del proyecto con los menores costos unitarios e impactos ambientales y otros, (optimización estructural), y las decisiones de operación en correspondencia con las demandas temporales de los servicios energéticos requeridos (optimización operacional). La presente propuesta fundamenta los aportes de los autores en la aplicación de herramientas termoeconómicas en el campo de los estudios de oportunidad, prefactibilidad y factibilidad de proyectos de logística energética, en diferentes esferas de actividad, tanto productivas como de los servicios. Constituye una versión ampliada y actualizada de una propuesta presentada en el 2014 con el título EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL DESEMPEÑO Y LA SOSTENIBILIDAD MEDIANTE MÉTODOS TERMOECONÓMICOS EN SISTEMAS DE SUMINISTRO DE ENERGÍA, propuesta que recibió el premio Academia de Ciencias de Cuba de la provincia de Villa Clara (se adjunta copia del documento acreditativo). La versión ahora presentada no ha recibido premios nacionales, y difiere de la mencionada en que enfatiza los resultados y experiencias obtenidas en la aplicación de las herramientas de análisis termoeconómicos a casos concretos de relevancia en la práctica social de la gestión energética y ambiental, convenientemente avalados por los introductores.

## Comunicación corta

### **TÍTULO: APLICACIÓN DE HERRAMIENTAS PARA EL MEJORAMIENTO DE SISTEMAS DE TRANSFORMACIÓN DE LA ENERGÍA EN FUNCIÓN DEL DESARROLLO SOSTENIBLE.**

Roque Díaz, P.R., Rubio Rodríguez, M.A., Rubio González, A.M., Herrera Moya, I., Ocaña Guevara V.S., López Díaz, I., Sáez Santiago, P., Pérez Bermúdez, R.A., Roque Benito, Y., Parise, J.A., Betancourt Mena, J., Grau Ávalo, R., Lapido Rodríguez, M., Armas Valdés, J. C., Gómez Sarduy J., de Ruyck, J., Verma, V.K., Bram, S., Fajardo Cuadro, J.G., Sarria López, B., Quintana Pérez, C.E., Ruiz Sánchez, J.J., Dorado Pérez, M.P., CruzPeragón, F., Sagastume Gutiérrez, A., Cogollos Martínez, J.B., Vandecasteele, C., Martínez R.M., Núñez V.

### **ANTECEDENTES**

El suministro energético a instalaciones productivas, de servicios y a asentamientos humanos pasa por un adecuado proceso de proyección y evaluación de la viabilidad así como la capacidad de satisfacer durante su vida útil las demandas de servicios energéticos: potencia eléctrica, refrigeración y calentamiento. Mientras algunos sistemas de suministro trabajan por separado la satisfacción de dichos servicios, en años recientes se ha extendido la utilización de sistemas combinados de suministro, (sistemas de poligeneración que incluyen los de cogeneración y trigeneración).

La viabilidad de un proyecto concreto debe ser demostrada sin lugar a dudas para cada caso, que generalmente se desempeñan de manera muy diferente unos de otros.

Es frecuente la paradoja de que no siempre una más elevada eficiencia termodinámica corresponde a una mayor racionalidad, pues puede que para producir el mismo resultado final, un proyecto muy eficiente consume menores cantidades de energía primaria que otro, pero de un portador energético más caro o utilizando una tecnología más costosa. El balance final favorecerá al proyecto más termodinámicamente ineficiente, que resulta termoeconómicamente más racional.

**El problema a resolver consiste**, en todos los casos, en decidir aquellas alternativas tecnológicas, organizativas, operacionales o de otros tipos que dan por resultado un menor costo unitario exergoeconómico y ambiental del producto o de los productos finales de la instalación, en forma de servicios energéticos como potencia eléctrica o mecánica, calentamiento o refrigeración, o el producto o servicio brindado para el que se requiere el servicio energético.

**Los objetivos de trabajo**, que son concretos y particulares para cada proyecto o caso, se resumen en general en la definición de la estructura física óptima -tecnologías,

capacidades, disposición espacial, microlocalización- que permita cumplir las exigencias del proyecto con los menores costos unitarios de inversión, mantenimiento, impactos ambientales y otros, (optimización estructural), y las decisiones en cuanto a la operación en correspondencia con las demandas temporales de los servicios energéticos requeridos (optimización operacional). La teoría del costo exergético y otras herramientas de la termoeconomía, como el análisis del ciclo de vida (LCA) y su variante exergética (ELCA) proporcionan un rico arsenal de procedimientos, cuya aplicación constituye el objetivo general de la propuesta, que se ejemplifican en casos concretos relacionados más adelante.

La presente propuesta fundamenta los aportes de los autores en la aplicación de herramientas termoeconómicas en el campo de los estudios de oportunidad, prefactibilidad y factibilidad de proyectos de logística energética, en diferentes esferas de actividad, tanto productivas como de los servicios. Constituye una versión ampliada y actualizada de una propuesta presentada en el 2014 con el título EVALUACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL DESEMPEÑO Y LA SOSTENIBILIDAD MEDIANTE MÉTODOS TERMOECONÓMICOS EN SISTEMAS DE SUMINISTRO DE ENERGÍA, propuesta que recibió el premio Academia de Ciencias de Cuba de la provincia de Villa Clara (se adjunta copia del documento acreditativo). La versión ahora presentada no ha recibido premios nacionales, y difiere de la mencionada en que enfatiza los resultados y experiencias obtenidas en la aplicación de las herramientas de análisis termoeconómicos a casos concretos de relevancia en la práctica social de la gestión energética y ambiental, convenientemente avalados por los introductores.

## **DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES RESULTADOS**

### **El problema general del suministro energético. Planteamiento.**

*Uno de los aportes fundamentales originales del trabajo presentado lo es un planteamiento novedoso del problema general de los sistemas complejos de suministro de servicios energéticos para la aplicación racional de los procedimientos termoeconómicos. El planteamiento se basa en la representación topológica del sistema por el esquema funcional o su equivalente matricial lo que permite la aplicación directa de los principales procedimientos en los que se basan los métodos termoeconómicos, a saber, los balances de masas, energías, exergías y costos exergéticos y exergoeconómicos, la estimación de los coeficientes estructurales y los procedimientos de optimización estructural y operacional [1, 5].*

### **Métodos originales de evaluación de la simultaneidad de las gráficas temporales de demanda de potencia, calor y refrigeración.**

Los sistemas de suministro por poligeneración consisten en unificar en un único esquema la satisfacción de necesidades de potencia, calefacción y, eventualmente,

también refrigeración, utilizando las pérdidas de energía asociadas ineludiblemente a la generación de potencia eléctrica para sustituir energía primaria (combustible) requerida para las necesidades de calor. En casos en que las demandas son comparables entre sí pero están desfasadas en el tiempo poco o nada se consigue como ventaja termodinámica. Es por ello que los estudios de viabilidad pasan inevitablemente por la predicción del grado de simultaneidad que han de tener las gráficas de demandas de potencia, calefacción y refrigeración.

*El grado de simultaneidad de dos funciones temporales cualesquiera sometidas a análisis es evaluado mediante dos procedimientos originales de los autores, uno que se basa en la comparación de series discretas de mediciones y el otro basado en la comparación de funciones continuas para el procesamiento on line de las funciones de demanda durante la operación. Estas funciones permiten evaluar en términos termoeconómicos los costos en que se incurre al deteriorarse la simultaneidad entre las demandas [3].*

### **Ejemplos de aplicación.**

Los campos de aplicación de estos procedimientos son en realidad ilimitados. *En la literatura publicada por los autores se presentan varios ejemplos concretos que ilustran los modos de evaluación termoeconómica, los procedimientos de modelación y optimización y los beneficios que pueden ser alcanzados en su aplicación. Entre ellos se cuentan: evaluación de alternativas de esquemas de poligeneración para instalaciones hospitalarias; optimización termoeconómica de esquemas complejos generalizados de suministro de energía mediante poligeneración[1, 5]; optimización termoeconómica del circuito intermedio en un sistema centralizado de refrigeración todo agua[2]; definición y evaluación termoeconómica de indicadores de sostenibilidad del suministro de energía[4,7,8]; evaluación termoeconómica de sostenibilidad y nocividad de políticas energéticas locales y nacionales[8]; relevancia termoeconómica de variables de optimización en el proceso de gasificación de biomasa; evaluación de potencial de sostenibilidad y modelación de matrices energéticas con enfoque de ciclo de vida [4,6,7]; estudios de oportunidad de un sistema logístico energético basado en esquemas de poligeneración para el hospital provincial Arnaldo Milián Castro de Santa Clara; estudio comparativo termoeconómico y de consideraciones técnicas sobre la conveniencia del empleo de presión de vapor de 67 ó 100 bar para la construcción de centrales bioeléctricas en Cuba a solicitud del Grupo Nacional de Expertos de AZCUBA; estudio termoeconómico de los espacios acondicionados de una embarcación fluvial, aplicando las herramientas termoeconómicas[11, 12]; estudio del comportamiento de combustibles basados en mezclas de diesel con biodiesel obtenido de residuos del procesamiento industrial de la oliva analizando el desempeño de motores de combustión interna de encendido por compresión[9, 10]; estudio termoeconómico de la producción de cal por calcinación de piedra caliza [13, 14].*

## Referencias bibliográficas.

1. Roque Díaz, P. et al. Thermo-economic assessment and optimization of a multi-engine, multi-heat-pump CCHP system. 21st International Conference (ECOS 2008).
2. Armas Valdés J. C., et al. Optimización termoeconómica de sistemas de climatización por agua helada a partir de técnicas de inteligencia artificial. Ingenierías. Vol. XI, No. 40, pp. 22 - 33 (§)
3. Roque Díaz, P. et al. Mathematical method for simultaneity assessment of time dependent energy demand functions for complex trigeneration (CCHP) systems. International Conference (ECOS 2009).
4. Rubio Rodríguez, M. A., et al. Strategy for sustainable matrix conversion based on exergy life cycle analysis: A case study. 23rd International Conference (ECOS 2010).
5. Roque Díaz, P. et al. Thermo-economic assessment of a multi-engine, multi-heat-pump CCHP (combined cooling, heating and power generation) system: A case study. Energy. Vol. 35, 9, 2010, 3540-3550. (\*)
6. Rubio Rodríguez MA. et al. An LCA based indicator for evaluation of alternative energy routes. Applied Energy Vol. 88, 3 2011, 630 – 635, (\*)
7. Rubio Rodríguez, M. A. et al. Life cycle modeling of energy matrix scenarios, Belgian power and partial heat mixes as case study. Applied Energy 107 (2013) 329–337. (\*)
8. Herrera I. et al. Environmental impact of decentralized power generation in Santa Clara City, Cuba: An integrated assessment based on technological and human health risk indicators. Applied Energy 109 (2013) 24–35 (\*)
9. López I. et al. Effect of the use of olive–pomace oil biodiesel/diesel fuel blends in a compression ignition engine: Preliminary exergy analysis. Energy Conversion and Management 85 (2014) 227–233 (\*)
10. López losvaniet al. Multiple response optimizations to reduce exhaust emissions and fuel consumption of a diesel engine fuelled with olive pomace oil methyl ester/diesel fuel blends. 28th International Conference (ECOS 2015)
11. Fajardo J. et al. Thermo-economic indicators of air conditioning in a river ship to change the configuration of their thermal insulation. Proceedings ASME 2014, Volume 6B: Energy, Conference Proceedings Citation Index- Science (CPCI-S) (\*)
12. Fajardo J. et al. Estudio exergético del espacio climatizado en una embarcación fluvial. Ingeniería Energética, Vol. XXXVI, 2/2015, p.127-135. (§)
13. Alexis Sagastume Gutiérrez, et al. Exergy-based indicators to evaluate the possibilities to reduce fuel consumption in lime production. Energy Vol.36 (2011) 2820-2827. (\*)
14. Alexis Sagastume Gutiérrez, et al. Energy and exergy assessments of a lime shaft kiln. Applied Thermal Engineering 51 (2013) 273-280. ISSN 1359-4311 (\*)

(\*)Web of Science; (§) Bases de datos reconocidas.