

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS
II CONVENCION CIENTÍFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.



NOMBRE DEL SUB-EVENTO

II Conferencia Internacional de Desarrollo Energético Sostenible 2019

Título

Software de apoyo a la toma de decisiones en el diseño y operación en sistemas de cogeneración.

Title

Software to decision making support on design and operation of cogeneration systems

(A partir de aquí todo estará justificado, tamaño de letra Times New Roman, 1.5 de interlineado y 12 puntos.).

Dr.C Andrey Vinajera-Zamora¹, Pblo R. Roque-Díaz²

1- Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba. andreyvz@uclv.edu.cu

2- Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba. proque@uclv.edu.cu

Resumen:

En los esquemas de cogeneración o producción combinada de potencia y calor, incluyendo en ellos los llamados de trigeneración, su ventaja termodinámica, calculada mediante la economía de recursos energéticos primarios respecto a los esquemas tradicionales de suministro separado, se ve fuertemente influenciada por el grado de simultaneidad entre las gráficas de demanda temporales de electricidad, calor y refrigeración a ser satisfechas por el sistema tecnológico. A partir de procedimientos estadísticos puede pronosticarse dicho coeficiente de simultaneidad, y en base a consideraciones termoeconómicas, evaluar mediante el coeficiente de economía de energía primaria por cogeneración (CPES por su sigla en inglés) la conveniencia e impacto de decisiones operacionales o de diseño de estos esquemas logísticos que permitan mejorar el CPES. Se discute un procedimiento computacional (CPES v 1.0, desarrollado en Python 3.6) y su aplicación a un estudio de caso concreto. Se ilustran las potencialidades del procedimiento como herramienta auxiliar en la toma de decisiones.

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS
II CONVENCION CIENTÍFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

Abstract:

Palabras Clave: Termoeconomía; Simultaneidad; Gráficas de Demandas; Cogeneración

Keywords: Thermo-Economy; Simultaneity; Chart of Demands; Cogeneration

1. Introducción

Actualmente los combustibles fósiles proveen más de la mitad de la energía eléctrica consumida. Al mismo tiempo, constituyen una fuente finita de energía química que es liberada a través de las reacciones de combustión y transformada en energía térmica. En este proceso se destacan como aspectos negativos la reducción de los recursos disponibles y otros impactos al medio ambiente. Por tal motivo la aplicación de los principios del desarrollo sostenible conduce a la necesidad de reducir en lo posible la utilización de dichos recursos para la misma cantidad de efecto útil producido.

En tal sentido, juegan un papel fundamental los esquemas de cogeneración con el objetivo de minimizar el desaprovechamiento de la capacidad de conversión en trabajo que contiene el recurso a utilizar. No obstante, el ahorro de recursos que producen estas instalaciones depende de la configuración adoptada, de la magnitud y proporción en que los recursos energéticos son producidos por la instalación, y de las características del sistema.

En Cuba particularmente, la cogeneración se ha utilizado en la producción azucarera desde fines del siglo XIX y principios del XX. En los casos en que se produce simultáneamente potencia, calor y frío, suele llamársele trigeneración. El empleo de la cogeneración permite incrementar la eficiencia en el uso de la energía primaria y es una tecnología madura en la actualidad. La misma puede introducirse en industrias de proceso, hoteles, hospitales, y en general en toda instalación donde se demande potencia mecánica o eléctrica, energía térmica para calentamiento y servicios de refrigeración y /o climatización en cantidades comparables (del mismo orden de magnitud).

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

**PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS
II CONVENCION CIENTÍFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”**

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



En la actualidad existen numerosas instalaciones que resultan ser altas consumidoras de energía en forma de electricidad, calor y refrigeración. La composición de sus demandas energéticas frecuentemente se distribuye en tres partidas: energía eléctrica para refrigeración y climatización, que en este caso resulta de interés particular pues eventualmente puede ser sustituida por tecnologías de absorción; energía eléctrica para otros usos; y energía térmica para calentamiento. Estas y otras particularidades del abastecimiento energético se encuentran presentes en muchas industrias, y también en instalaciones de suministro energético a entidades productivas y de servicios de diferentes objetivos y capacidades e indican en primera instancia que puede resultar muy conveniente y económicamente viable la creación de un sistema de cogeneración que sea capaz de satisfacer estas necesidades energéticas con elevados indicadores de uso racional de la energía primaria.

2. Metodología

2.1 Marco teórico

La cogeneración se define como la producción conjunta, en proceso secuencial de potencia eléctrica (o mecánica) y energía térmica útil, a partir de la misma fuente primaria. Es precisamente este aprovechamiento de la energía térmica lo que hace posible un rendimiento global en la utilización de la energía muy elevado y a su vez un ahorro de energía primaria. En los sistemas de cogeneración, se reportan casos de aprovechamiento de hasta el 84% de la energía contenida en el combustible para la generación de energía eléctrica y calor a proceso (25-30% eléctrico y 59-54% térmico) (Lizarraga, 1999).

Una instalación de cogeneración recibe también el nombre de producción combinada de potencia y calor (CHP por las siglas de su denominación en inglés: Combined Heat and Power) según Rosen et al. (2005). En caso de que la instalación produzca además de potencia y calor, también refrigeración, se denomina esquema de trigeneración o producción combinada de refrigeración, calefacción y potencia (CCHP, por las siglas de su denominación en inglés: Combined Cooling, Heating and Power). En la actualidad prevalece la tendencia extendida a considerar ambos esquemas generales bajo la

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS
II CONVENCION CIENTÍFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

denominación única de cogeneración (CHP). Roque Díaz et al. (2008) presentaron el planteamiento general de la evaluación termoeconómica de sistemas complejos de CCHP. En la figura 1 se muestra un caso general de cogeneración donde EGE constituye el equipo generador de potencia, ERC el equipo recuperador de calor, RA, los refrigeradores por absorción; RCC, refrigeradores de ciclos de compresión y DAF, los dispositivos de acumulación de frío.

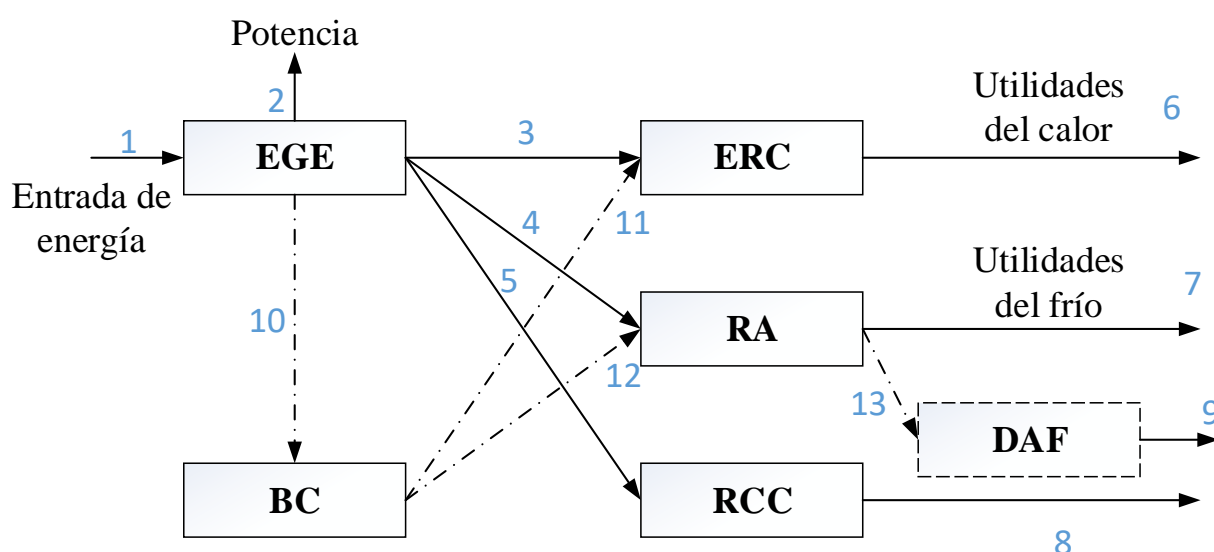


Figura 1. Diseño general de un Sistema CCHP complejo

Fuente: Roque Díaz et al. (2008)

El proyecto de estos sistemas pasa por la determinación de la dinámica de las demandas de servicios energéticos a lo largo del año, de la semana y de las horas del día, pues de ello depende la selección del equipamiento, sus capacidades y otras características que además permitirá guiar la eficiente operación del sistema una vez construido. También deberá caracterizar la variación con el tiempo de la demanda de energía eléctrica, calentamiento y refrigeración (refrigeración propiamente dicha y climatización) tanto los valores medios como los picos de máximos y mínimos así como su frecuencia de aparición (Roque Díaz et al, 2010).

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS
II CONVENCION CIENTÍFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

La cogeneración es un instrumento clave para el ahorro económico y las reducciones de emisiones al medio ambiente. Ambos beneficios se basan en el ahorro de energía primaria obtenido por cogeneración. Según Chicco y Mancarella (2007) el ahorro de energía primaria por trigeneración (TPES) puede calcularse a través de la expresión (1) al considerar las demandas de energía eléctrica (W), calor (H) y de frío (C) donde F es el consumo de energía primaria por cogeneración y η_e^{SP} , η_t^{SP} y COP^{SP} representan la eficiencia eléctrica, la eficiencia térmica y el coeficiente de desempeño para la producción separada respectivamente. Teniendo en cuenta el criterio antes señalado en este caso de ahora en adelante será denominado CPES (Cogeneration Primary Energy Saving), y se aplicará tanto a los sistemas de cogeneración simples como a los de trigeneración.

$$CPES = TPES = 1 - \frac{F}{\frac{W}{\eta_e^{SP}} + \frac{H}{\eta_t^{SP}} + \frac{C}{\eta_e^{SP} * COP^{SP}}} \quad (1)$$

El grado de simultaneidad entre las demandas (ϕ) evalúa la mayor o menor coincidencia en el tiempo del servicio requerido independientemente de las diferencias entre las capacidades del equipamiento y se calcula a través de la expresión 2 donde γ_w y γ_H son el promedio de las demandas normalizadas y L el periodo de tiempo (Roque Díaz et al, 2009).

$$\phi_{W,H} = 1 - \frac{1}{L} \int_0^L |\gamma_w - \gamma_H| d\tau \quad (2)$$

Los valores de (ϕ) se encuentran entre 0 y 1, correspondiendo el valor 1 a las demandas cuyas gráficas tienen sus valores extremos para los mismos instantes de tiempo y el 0 para aquellas que no tienen ninguna coincidencia. Para un caso concreto, debe notarse que el valor del CPES depende no solo de la simultaneidad, sino de las magnitudes absolutas de las demandas. Sin embargo, es evidente que comparando demandas de igual magnitud, pero que tienen diferentes valores de ϕ es posible cuantificar el impacto de dicha variable sobre el desempeño termoeconómico del esquema logístico energético. Este análisis es de interés en la evaluación de un mismo sistema con diferentes gráficas de demanda o del impacto de diferentes capacidades nominales del equipamiento en la

**PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS
II CONVENCION CIENTÍFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”**

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



etapa de diseño. Esto puede incrementar la efectividad de la toma de decisiones y ampliar el alcance de los estudios de optimización.

Un caso de interés particular es el acomodo de cargas como medida de aumento de la eficiencia de la instalación ante carencias evidentes de simultaneidad, ya que este universo de decisiones suele ser de muy bajos costos por ser acciones de organización. Por esa razón constituyen medidas de elección en las primeras instancias en procesos de diagnóstico y perfeccionamiento de sistemas de cogeneración. Debe señalarse, sin embargo, que en este caso a diferencia de lo que ocurre en la práctica más frecuente de los sistemas de abastecimiento eléctrico resulta deseable acomodarlas para hacer coincidir los máximos de demanda de potencia, con los máximos de demandas de calor y refrigeración, obteniendo así los mayores valores del CPES. De manera similar pueden cuantificarse los impactos en el CPES de otras posibles acciones o decisiones como la acumulación, el cambio de la potencia nominal instalada, del número de unidades de un tipo (redundancia), etc.

En la literatura científica consultada se evidencia una gran cantidad de investigaciones enfocadas a lograr un mejor desempeño de esquemas de cogeneración mediante la utilización de otros combustibles (Colonna y Gabrielli, 2003; Lian et al, 2010; Temir y Bilge, 2004), a la optimización de los sistemas de cogeneración (Al-Sulaiman et al, 2011; Carvalho et al, 2011; Chicco y Mancarella, 2009) mediante el análisis u optimización termoeconómica (Al-Sulaiman et al, 2013; Lozano et al, 2009), a la planificación óptima (Chicco y Mancarella, 2005; Vespucci et al, 2013), al análisis tecno-económico (Braumakis et al, 2017), a la evaluación y análisis exergeconómica (Burbano et al, 2010; Noorpoor y Heidararabi, 2016), entre otras.

La cuestión de la simultaneidad de las demandas y su efecto cuantitativo sobre la eficiencia de la cogeneración ha sido insuficientemente abordada y en general se carece de efectivas herramientas de evaluación en la toma de decisiones tanto en la etapa de proyecto como durante la explotación de sistemas logísticos energéticos.

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

**PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS
II CONVENCION CIENTÍFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”**

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



El presente trabajo tiene como objetivo crear un software que a través de la determinación del efecto de deterioro de la eficiencia provocado por falta de coincidencia temporal de las demandas y del impacto conseguido por las correspondientes medidas correctoras facilita la evaluación y optimización de proyectos logísticos, en particular los que se basan en los principios de la cogeneración y de sus estrategias de operación una vez puestos en marcha.

3. Resultados y discusión

Descripción del software CPES v1.0

El programa elaborado procesa una base de datos discretos representando la sucesión de las demandas de potencia eléctrica, $W = f(\tau)$; calor, $H = f(\tau)$ y refrigeración (y climatización), $C = f(\tau)$, en intervalos de tiempo regulares (horas, días, meses o años) representado por t (figura 2). Como resultado de dicho procesamiento se determinan los valores de CPES a través de la ecuación (1) para cada uno de los intervalos t , según los valores de demandas, la potencia instalada y la producción separada (figura 3). Aunque el software calcula el CPES para cualquier instante de tiempo τ , se recomienda utilizar los anteriormente abordados ya que resulta poco operativo el proceso de toma de decisiones si se calcula el CPES para cada minuto (o segundo). Estos casos serían más viables si el software operara automáticamente algún dispositivo en tiempo real, lo cual constituye una de las limitaciones actuales de este. Al mismo tiempo, el software determina el valor de los coeficientes de simultaneidad ϕ correspondientes mediante la ecuación (2) en las variantes: potencia eléctrica vs calor, vs refrigeración (y climatización) y vs calor y refrigeración. También determina las cantidades de energía primaria consumidas para cada intervalo: para el abastecimiento en régimen de cogeneración y en generación separada, de donde se calculan los valores pretéritos o pronosticados, según el caso, del CPES.

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”

DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

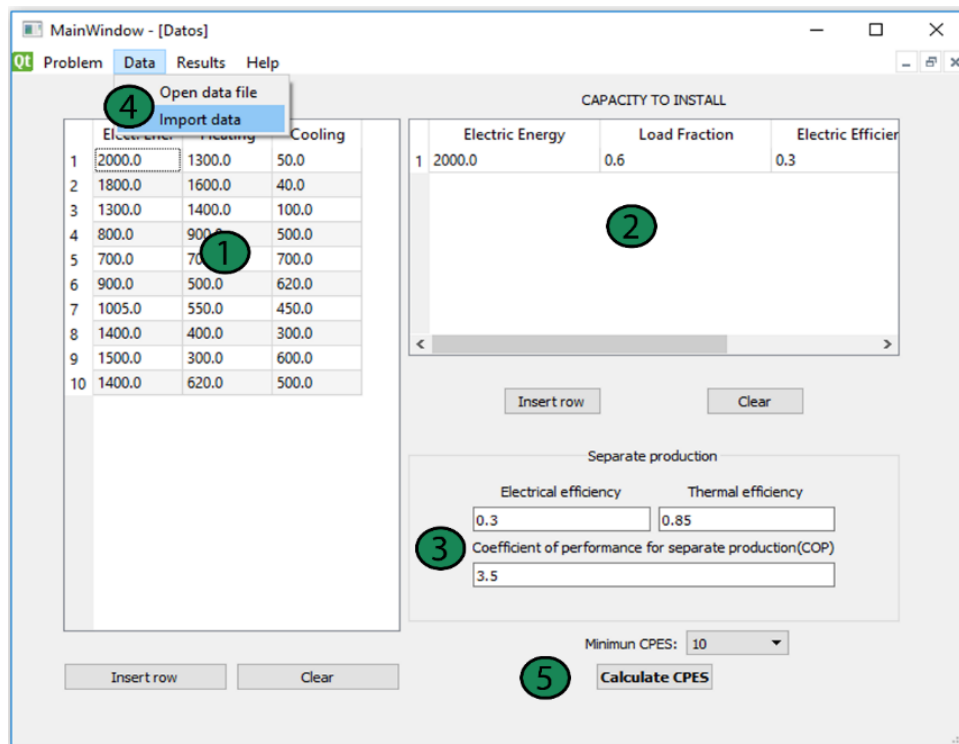


Figura 2. Datos para el cálculo del CPES.

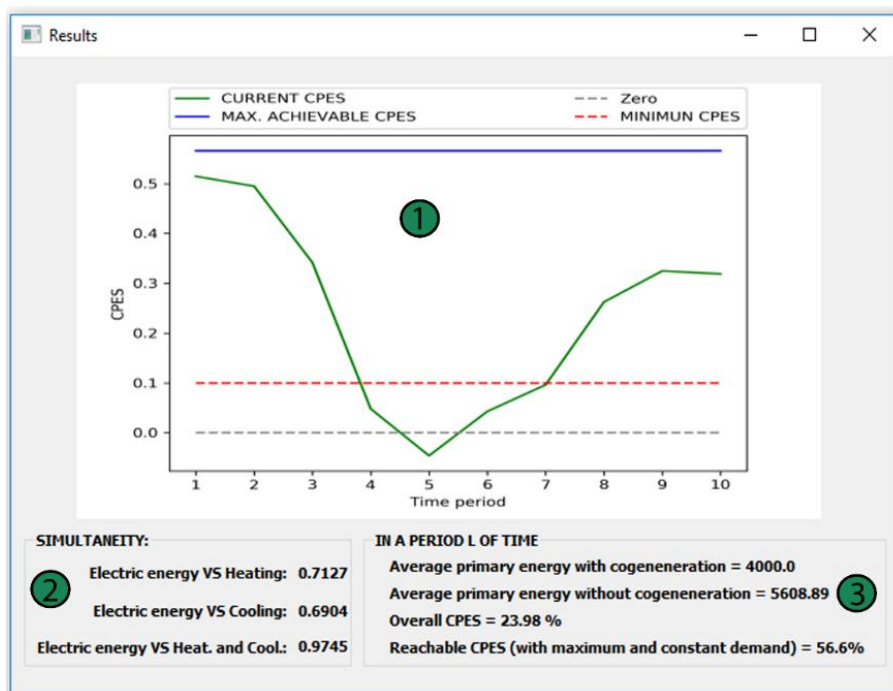


Figura 2. Ventana de resultado del software CPES v1.0

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

**PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS
II CONVENCION CIENTÍFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”**

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



El problema de la confección y actualización de dicha base de datos en el caso de un sistema en operación, o de su predicción para escenarios futuros en la etapa de proyección, resulta de importancia clave en este asunto, aunque no se aborda directamente en el presente trabajo. Apenas resulta de interés en este caso cuantificar los consumos de energía primaria requeridos para esos fines por la instalación de cogeneración y por comparación con los consumos del caso base, en que se satisfacen iguales demandas con el esquema separado, determinar, si existen, los márgenes de ahorro de energía primaria en forma de fracción (CPES).

4. Conclusiones

1. Siendo la cogeneración una operación de transformación energética multiobjetivo que se realiza en una única instalación y con una única fuente primaria, su eficiencia depende en primera instancia de la simultaneidad de utilización de los productos energéticos obtenidos y por consiguiente de la de las demandas de dichos productos. El procedimiento propuesto de evaluar la eficiencia mediante el coeficiente CPES determina objetivamente el impacto termoeconómico de la cogeneración y su dependencia de los coeficientes de simultaneidad de las demandas de potencia, calor y refrigeración.
2. El software elaborado CPES realiza el procesamiento estadístico específico para estimar los coeficientes de simultaneidad de las bases de datos o gráficas de demandas disponibles en la evaluación de sistemas en funcionamiento o su pronóstico en las etapas de proyecto, además de los cálculos de los propios valores de la variable CPES, lo que facilita la toma de decisiones tanto de diseño como de operación encaminadas a la elevación de la eficiencia de la cogeneración y su impacto en los consumos de energía primaria para la obtención de los servicios energéticos demandados.
3. Con demandas de alto grado de simultaneidad (ϕ cercano a la unidad) se consiguen los mayores valores del CPES, mientras que cuando $\phi \rightarrow 0$ el valor de CPES puede llegar a desaparecer completamente y eventualmente cambiar de signo, lo que apunta al

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS
II CONVENCIÓN CIENTÍFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

hecho de que en ese caso la cogeneración resulta más ineficiente que la generación separada.

4. Teniendo en cuenta que la simultaneidad de las demandas es un factor que normalmente no puede ser modificado por el suministrador de servicios energéticos sino que depende completamente del usuario y sus necesidades, el análisis propuesto de simultaneidad proporciona una vía de compensar deficiencias de simultaneidad inevitables, con decisiones racionales conducentes a mitigar su efecto sobre el costo de las ineficiencias del servicio energético brindado, cuantificando los impactos termoeconómico y ecológico por economía de energía primaria.

5. Referencias bibliográficas

1. Al-Sulaiman, F. A., Dincer, I., & Hamdullahpur, F. (2011). Exergy modeling of a new solar driven trigeneration system. *Solar Energy*.
2. Al-Sulaiman, F. A., Dincer, I., & Hamdullahpur, F. (2013). Thermoeconomic optimization of three trigeneration systems using organic Rankine cycles: Part II - Applications. *Energy Conversion and Management*.
3. Braimakis, K., Thimo, A., & Karellas, S. (2017). Techno-economic analysis and comparison of an ORC-VCC biomass-solar hybrid trigeneration system and a PV driven heat pump. *J. Energy Eng.*
4. Burbano, J. C., Pellegrini, L. F., & De Oliveira, S. (2010). Exergoeconomic analysis of tetra-combined trigeneration systems. In *Proceedings of the 23rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation, and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS 2010*.
5. Carvalho, M., Serra, L. M., & Lozano, M. A. (2011). Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints. *Energy*.
6. Chicco, G., & Mancarella, P. (2005). Planning aspects and performance indicators for small-scale trigeneration plants. *2005 International Conference on Future Power Systems*.
7. Chicco, G., & Mancarella, P. (2007). Trigeneration primary energy saving evaluation

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS
II CONVENCION CIENTIFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”



DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.

- for energy planning and policy development. *Energy Policy*, 35(12), 6132–6144.
8. Chicco, G., & Mancarella, P. (2009). Matrix modelling of small-scale trigeneration systems and application to operational optimization. *Energy*.
 9. Colonna, P., & Gabrielli, S. (2003). Industrial trigeneration using ammonia-water absorption refrigeration systems (AAR). *Applied Thermal Engineering*.
 10. Gluesenkamp, K., Hwang, Y., & Radermacher, R. (2013). High efficiency micro trigeneration systems. *Applied Thermal Engineering*, 50(2), 1480–1486.
 11. Lian, Z. T., Chua, K. J., & Chou, S. K. (2010). A thermoeconomic analysis of biomass energy for trigeneration. *Applied Energy*.
 12. Lizarraga, J. M. S. (1999). *Cogeneración: aspectos termodinámicos, tecnológicos y económicos*. Servicio editorial Universidad País Vasco.
 13. Lozano, M. A., Carvalho, M., Ramos, J. C., & Serra, L. M. (2009). Thermoeconomic analysis of simple trigeneration systems. *International Journal of Thermodynamics*.
 14. Noorpoor, A. R., & Heidararabi, S. (2016). Exergoeconomic assessment, parametric study and optimization of a novel solar trigeneration system. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*.
 15. Roque Díaz, P., Benito, Y. R., & Parise, J. A. R. (2008). Thermoeconomic assessment and optimization of a multiengine, multi-heat-pump CCHP system. *ECOS 2008 - Proceedings of the 21st International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*, 299–306.
 16. Roque Díaz, P., Benito, Y. R., & Parise, J. A. R. (2010). Thermoeconomic assessment of a multi-engine, multi-heat-pump CCHP (combined cooling, heating and power generation) system - A case study. *Energy* 35 (2010) 3540 -3550.
 17. Roque Díaz, P., Betancourt Mena, J., Grau Ábalo, R., Benito, Y. R., & Parise, J. A. (2009). Mathematical method for simultaneity assessment of time dependent energy demand functions for complex trigeneration (cchp) systems. In *22nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization Simulation and Environmental Impact of Energy Systems* (pp. 595–604). Brazil.

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu

**PLANTILLA OFICIAL PARA LA PRESENTACIÓN DE TRABAJOS
II CONVENCION CIENTÍFICA INTERNACIONAL
“II CCI UCLV 2019”**

**DEL 23 AL 30 DE JUNIO DEL 2019.
CAYOS DE VILLA CLARA. CUBA.**



18. Rosen, M., Le, M., & Dincer, I. (2005). Efficiency analysis of a cogeneration and district energy system. *Applied Thermal Engineering*, 25(2005), 147–159.
19. Temir, G., & Bilge, D. (2004). Thermo-economic analysis of a trigeneration system. *Applied Thermal Engineering*.
20. Vespucci, M. T., Zigrino, S., Bazzocchi, F., & Gelmini, A. (2013). Optimal planning and economic evaluation of trigeneration districts. In *International Series in Operations Research and Management Science*.

Información de contacto
convencionuclv@uclv.cu
www.uclv.edu.cu