



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTAL DE CUBASOLAR

**REVISTA CIENTÍFICA de las
FUENTES RENOVABLES de ENERGÍA**

19



Tecnología de codigestión anaerobia: una alternativa para Cuba.....	1
Consumo eléctrico y capacidad de enfriamiento residencial empleando técnicas de inteligencia artificial.....	11
Consideraciones preliminares acerca de los sistemas de cogeneración para instalaciones hoteleras en condiciones cubanas de operación.....	21
Empleo de la energía solar para la cocción de alimentos.....	33
Estudio termoeconómico de sistemas de cogeneración para un central azucarero.....	41
Adición de residuos sólidos mineros para el incremento de la producción de biogás.....	54

Tecnología de codigestión anaerobia: una alternativa para Cuba

Anaerobic codigestion technology: an alternative for Cuba

*Dr. Deny Oliva Merencio e Ing. Ileana Pereda Reyes
Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER),
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba.
Tel.: (537) 2663637 y 2663754.
e-mail: deny@ceter.cujae.edu.cu*

Resumen

Existen varios residuos biodegradables, de diferentes orígenes, que tienen un potencial de producción de biogás relativamente bajo debido a su poco contenido de materia orgánica, comparados con otros tipos de residuos, además de su baja biodegradabilidad. La codigestión de residuos ganaderos y residuos orgánicos en sistemas de mezcla completa es una metodología exitosa a escala mundial. También, a escala mundial, se han combinado otras mezclas, logrando triplicar el potencial de producción. La principal ventaja de la codigestión está en aprovechar la sinergia de las mezclas y compensar carencias de cada uno de los sustratos por separado. Este trabajo recoge un compendio de la aplicación de esta tecnología, a nivel mundial, con el objetivo de mostrar su alta efectividad en el tratamiento de residuos sólidos biodegradables y ayudar a promover su empleo, principalmente en residuos poco aprovechados en Cuba. La aplicación de esta tecnología podría permitir el uso eficiente del biogás en la generación de energía eléctrica y su aporte a la red nacional en Cuba.

Palabras clave: Residuos sólidos biodegradables, digestión anaerobia, codigestión, biogás.

Abstract

There are several biodegradable residues from different sources that have a relatively low biogas potential due to their little content of organic matter, compared to other types of residues, in addition to its low biodegradation. Codigestion of cattle manure and organic residues in systems of complete mixture is a successful methodology at global scale. Other mixtures have been combined, achieving triplicating the production potential. The main advantage of the codigestion is in taking advantage of the synergy of the mixtures and compensating the limitations of each substrate. This paper is a compendium of the application of this technology at worldwide scale, with the purpose of showing its high effectiveness in the management of biodegradable solid residues. The application of this technology could enable the efficient use of biogas in the generation of electricity and its contribution to the national grid in Cuba.

Keywords: Solid biodegradable residues, anaerobic digestion, codigestion, biogas.

Introducción

Existen varios residuos biodegradables, de diferentes orígenes, que tienen un potencial de producción de biogás relativamente bajo debido a su bajo contenido de materia orgánica, comparados con otros tipos de residuos, además de su baja biodegradabilidad.

La codigestión de residuos ganaderos y residuos orgánicos de otros orígenes en sistemas de mezcla completa es una metodología exitosa a escala mundial. En este proceso se combinan varias mezclas de sustratos orgánicos biodegradables, logrando aumentar el potencial de producción de biogás por kilogramo de mezcla degradado. Existe un gran número de ejemplos donde se ha demostrado la efectividad de este proceso y donde la producción de biogás incluso se ha triplicado. La principal ventaja de la codigestión está en aprovechar la sinergia de las mezclas y compensar las carencias de cada uno de los sustratos por separado.

Este trabajo recoge un compendio de la aplicación de esta tecnología, a nivel mundial, con el objetivo de mostrar su alta efectividad para el tratamiento de residuos biodegradables y ayudar a promover su empleo, principalmente en residuos poco aprovechados en Cuba.

La aplicación de esta tecnología podría permitir el uso eficiente del biogás en la generación de energía eléctrica y su aporte a la red nacional en Cuba.

Residuos sólidos biodegradables en Cuba

En Cuba existe un enorme potencial de residuos sólidos biodegradables que está disponible para ser revalorado energéticamente y que actualmente no tienen ninguna utilidad.

Se pueden mencionar varios orígenes de este tipo de residuos, entre los que se encuentran residuos agrícolas, residuos de podas, residuos agroindustriales y residuos sólidos urbanos (RSU).

Según datos recopilados a partir de un estudio realizado en Cuba se tienen los siguientes potenciales de varios residuos sólidos (Tabla 1):

Tabla 1. Potencial disponible a partir de la generación de residuos sólidos en Cuba

	Bagazo de caña	Serrín de madera	Cáscara de arroz	Residuos de café	Residuos forestales	Residuos de coco	Leña
Total, Mm ³	6 950 522	11 784,3	14 821,1	1 342,4	532 788,2	206,9	1 797,7
%	92,51	0,16	0,20	0,02	7,09	0,00	0,02

Inventario Nacional de Fuentes de Energía Renovable [2005]

Todos estos residuos deben ser estudiados con relación al potencial de generación de biogás que pudieran tener. Como puede observarse en la Tabla 1, el bagazo sigue teniendo el peso mayoritario en el potencial de este tipo de residuo, con 92,5% de la biomasa disponible. Toda la biomasa que se menciona en dicha tabla puede considerarse como biodegradable.

Otra materia prima importante que tiene un amplio potencial no registrado en la tabla anterior son los residuos sólidos urbanos (RSU). Solo en la ciudad de La Habana, la capital de Cuba, se generan más de 1 500 m³ de RSU.

Codigestión de residuos orgánicos

La codigestión de residuos ganaderos y residuos orgánicos en sistemas de mezcla completa es una metodología exitosa, tanto en régimen termofílico como en el mesofílico [Brinkman, 1999]. La principal ventaja de la codigestión está en aprovechar la sinergia de las mezclas y compensar carencias de cada uno de los sustratos por separado.

En Dinamarca funcionan alrededor de 20 plantas centralizadas de producción de biogás desde los años ochenta, lo que ha posibilitado el tratamiento combinado de residuos ganaderos y residuos orgánicos procedentes de la industria alimentaria, de plantas depuradoras de aguas residuales urbanas, residuos de mataderos y la fracción orgánica de RSU [Angelidaki y Ahring, 1997a].

Los residuos urbanos e industriales suelen contener altas concentraciones de materia orgánica fácilmente degradable (lípidos, carbohidratos y proteínas), por lo que presentan un mayor potencial de producción de biogás que los residuos ganaderos, de 30 a 500 m³/t [Ahring *et al.*, 1992; Angelidaki y Ahring, 1997a; Bardiya *et al.*, 1996], mejorando la viabilidad económica de las plantas [Ahring *et al.*, 1992]. Sin embargo, estos residuos pueden presentar problemas para su digestión, como deficiencia en nutrientes necesarios para el desarrollo de los microorganismos anaerobios, baja alcalinidad o excesivo contenido en sólidos que provoque problemas mecánicos [Banks y Humphreys, 1998].

En el caso de los residuos ganaderos, y en concreto el purín de cerdo, el potencial de producción de biogás es relativamente bajo debido a su poco contenido de materia orgánica, comparados con otros tipos de residuos, y la baja biodegradabilidad de la materia orgánica. Sin embargo, estos residuos son una buena base para la codigestión porque generalmente presentan un contenido de agua más alto que la mayoría de los residuos industriales, una mayor capacidad tampón y aportan una amplia variedad de nutrientes necesarios para el crecimiento de los microorganismos anaerobios [Angelidaki y Ahring, 1997a].

En la figura 1 se muestra, de manera gráfica, el potencial de biogás de diferentes sustratos, lo que demuestra la viabilidad del proceso de codigestión para un mejor aprovechamiento de estos residuales.

Producción potencial de biogás

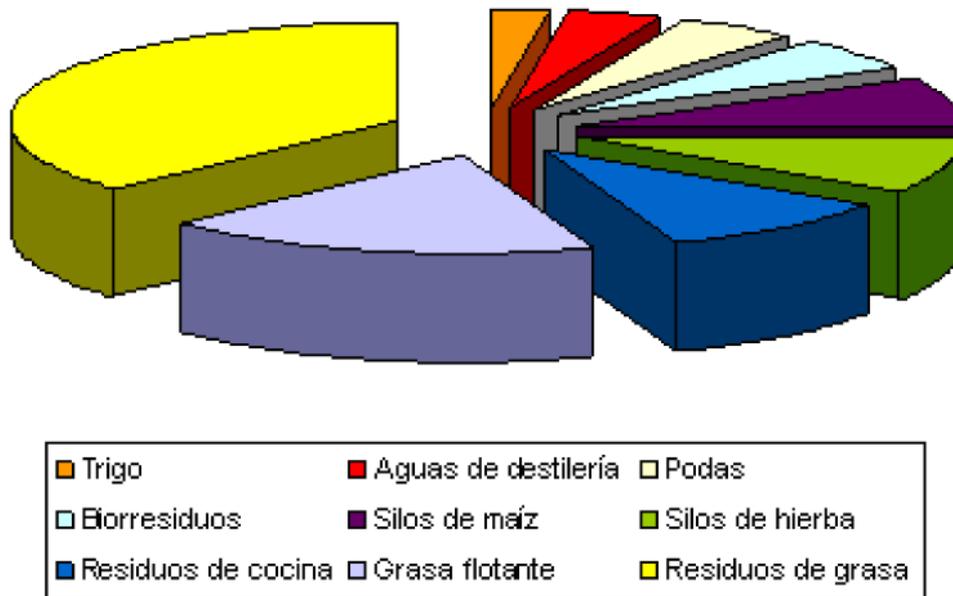


Fig. 1. Potencial de producción de biogás desde varios sustratos.

Se han encontrado buenos resultados para mezclas de varios tipos de residuos de industrias cárnicas y mataderos, ricos en grasas, consiguiendo altas producciones de metano, del orden de 47 m³/m³ de residuo introducido [Brinkman, 1999]. También ha dado buenos resultados la codigestión de lodos de depuradora y la fracción orgánica de residuos municipales, FORM [Di Palma *et al.*, 1999; Hamzawi *et al.*, 1998] y la mezcla de residuos sólidos urbanos (RSU), principalmente a base de restos de vegetales, y aguas residuales urbanas [Edelmann *et al.*, 1999], así como de lodos de depuradora y residuos de frutas y vegetales [Dinsdale *et al.*, 2000].

Los efectos beneficiosos de la introducción de mezclas de residuos ganaderos con residuos industriales se han puesto de manifiesto en plantas a escala real en varios países (Tabla 2).

Tabla 2. Ejemplo de plantas de codigestión a escala industrial

	Volumen del digestor, m ³	Co-sustratos	Aumento de la producción de biogás, %
Graz, Austria	3 x 4000	5-20% de lodo flotante del matadero de pollo	90-220
Schwechat, Austria	2 x 4500	15% de grasa de curtido	100-160

Tulln, Austria	620	4% de proteína	80
Rheda, Alemania	5000	18% de lodo flotante y contenido estomacal de ovino	60
Radeberg, Alemania	4600	27% varios	300
Samnaun, Suiza	600	5-28% de restos de comida	42-235

Diferentes tipos de residuos, principalmente de la industria agroalimentaria, se han testado ya como posibles cosustratos para la digestión de residuos ganaderos. A continuación se exponen algunos ejemplos (Tabla 3).

Tabla 3. Caracterización físico-química de varios sustratos

Parámetro	Purín	Residuo de pera	TDO
DQO, g/kg	80,92	453,0	1 090,4
ST, g/kg	79,16	354,0	916,96
SV, g/kg	58,4	346,5	362,62
pH	8,06	3,45	6,93
Alcalinidad total, g CaCO ₃ /L	10,55	0	0,95

TDO, tierras decolorantes de oliva.

Ahring *et al.* [1992] estudiaron la viabilidad de la codigestión de estiércol con residuos de la elaboración de piensos. Debido al alto contenido en nitrógeno de este producto, inicialmente se produce la inmediata inhibición del proceso de digestión, aunque finalmente los microorganismos son capaces de aclimatarse, disminuyendo la concentración de ácidos grasos volátiles y produciendo una alta y constante producción de biogás.

Diversos trabajos se han desarrollado teniendo como base la codigestión de estiércol bovino con tierras residuales procedentes del proceso de refinado de aceite, BBO (Bentonite Bound Oil). En general, la adición de este residuo a plantas a escala real produce una mayor estabilidad del proceso y un aumento en la producción de gas debido a la conversión en metano de la mayoría del carbono añadido, aunque no se observa una mejora en la tasa de conversión del estiércol en sí mismo.

La adición de BBO aumenta la producción de metano respecto a los sólidos volátiles añadidos, debido al mayor potencial de producción de biogás de la grasa contenida en la BBO que del estiércol, de 0,2 a 0,23 L de CH₄/gSV [Ahring *et al.*, 1992]. Una hipótesis planteada para explicar la mejora en la producción de metano es la disminución de problemas de inhibición por amonio, debido a la capacidad de adsorción superficial de este material.

La codigestión de alpechín, residuo acuoso de la producción de aceite de oliva virgen, y estiércol bovino hace posible el tratamiento del primero mediante digestión anaerobia. La fermentación de alpechín solo presenta problemas, debido a la alta concentración de compuestos tóxicos (polifenoles), o a la baja concentración de nutrientes esenciales (N) y baja alcalinidad. La codigestión aumenta, además, el índice de producción de biogás del estiércol [Angelidaki *et al.*, 1997]. La mezcla de alpechín y purín de cerdo ha mostrado buenos resultados en otros estudios, alcanzando niveles de degradación de DQO del orden del 65% [Schmidt *et al.*, 1999].

La mezcla de purín con lodos de depuradora, tanto en el rango termofílico como mesofílico, ha proporcionado resultados positivos [Wong, 1990; Flotats *et al.*, 1999]. Se han obtenido también resultados positivos al mezclar estiércol de bovino y residuos lignocelulósicos, hojas machacadas, paja de trigo, restos vegetales pretratados con hidróxido sódico [Dar y Tandon, 1987], así como la mezcla de purín con paja [Masciandaro *et al.*, 1994]. Con residuos de tomate mejora la digestión del estiércol [Trujillo *et al.*, 1993], así como la mezcla de residuos bovinos y residuos de frutas y verduras [Callaghan *et al.*, 1999].

Otros muchos residuos se exponen en la bibliografía como responsables de mejora de las producciones de biogás de los residuos ganaderos, tales como residuos de lechería [Gavala *et al.*, 1996; Desai y Madamwar, 1994; Desai *et al.*, 1994], y residuos de pescados y lodo de la industria cervecera [Callaghan *et al.*, 1999].

En general, la mezcla de residuos ganaderos de diferentes tipos de ganado puede mejorar la producción de metano debido, principalmente, al mayor aporte de sólidos orgánicos [Callaghan *et al.*, 1999], o a la dilución de algún efecto inhibitorio, como la concentración de amonio [Hansen *et al.*, 1998].

A pesar de los buenos resultados recogidos en la bibliografía, al mezclar diferentes tipos de residuos se corre el riesgo de introducción de sustancias tóxicas o inhibitorias para el proceso anaerobio, siendo preciso determinar la viabilidad de la mezcla, así como la proporción adecuada de cada sustrato, y la optimización de otros parámetros del proceso, como la temperatura, velocidad de carga, etc. Por otro lado, la introducción de sustratos altamente degradables, característica apreciada para mejorar la producción de gas, puede provocar problemas de sobrecargas orgánicas en el reactor y liberar compuestos inhibidores del crecimiento de los microorganismos.

Por ejemplo, el alto contenido en lípidos de algunos residuos industriales proporciona altos potenciales teóricos de producción de biogás, pero en función de la concentración y composición de ácidos grasos pueden resultar altamente tóxicos para el crecimiento microbiano [Galbraith *et al.*, 1971; Hanaki *et al.*, 1981; Koster y Cramer, 1987; Angelidaki y Ahring, 1992; Hwu *et al.*, 1997]. Es, por tanto, necesario realizar estudios de viabilidad de las mezclas, determinando la presencia de tóxicos o inhibidores que puedan invalidar el nuevo residuo como cosustrato.

Breve descripción tecnológica. Acercamiento a Cuba

La tecnología anaerobia es muy diversa. En el caso de la codigestión se trata de proyectos donde son necesarios otros sustratos para obtener una buena viabilidad económica. Otro motivo importante para la realización de estas instalaciones es la reducción drástica de malos olores y la obtención de subproductos de elevado valor, como el biofertilizante.

La decisión sobre una variante tecnológica u otra depende, principalmente, de las características del residual que se va a tratar. Para la codigestión se emplean básicamente, reactores como los que se muestran en la figura 2.

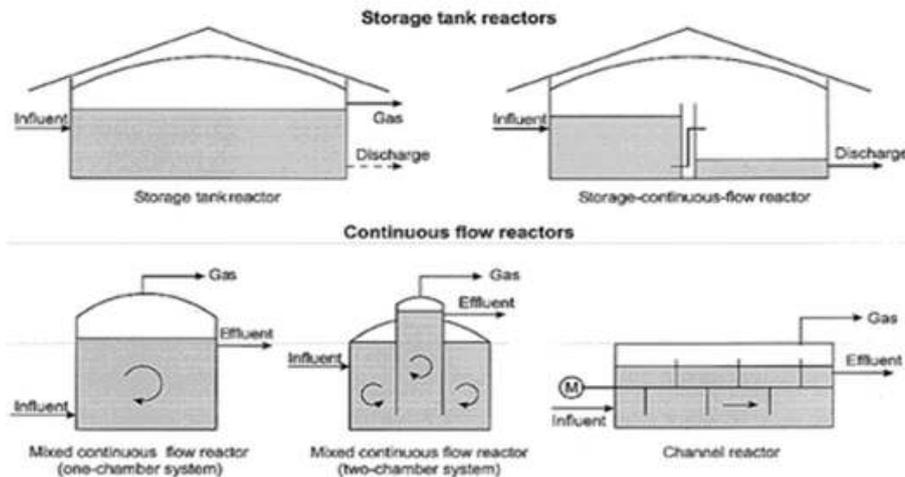


Fig. 2. Tipos de reactores anaerobios empleados en la codigestión de residuos [Weiland, 2000].

El esquema de una planta de codigestión sigue una serie de pasos típicos que se muestran en el diagrama de flujo de la figura 3. La necesidad de uno u otro, o todos, depende del tipo de sustrato que se ha de digerir.

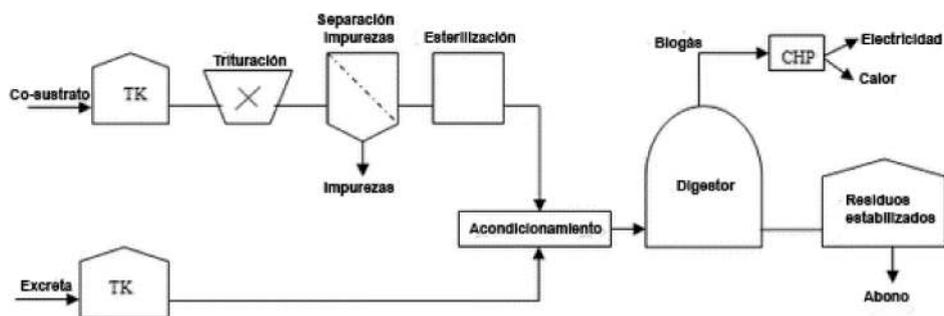


Fig. 3. Típico diagrama de flujo para la codigestión de residuos.

En Cuba no existe una práctica de la codigestión. La mayoría de los residuales orgánicos que podría ser tratado por esta vía, hoy se procesan de manera muy ineficiente y en una buena parte de ellos no existe siquiera el tratamiento mismo. La no disponibilidad de varios residuos orgánicos en el área donde se proyecta y ejecuta la construcción de los digestores anaerobios ampliamente difundidos en Cuba hace que la opción de la codigestión nunca aparezca.

La exploración y explotación, aún insuficiente a escala industrial, de la tecnología anaerobia para el tratamiento de los residuos altamente contaminantes que hoy se generan en grandes cantidades, hace que todavía Cuba se encuentre lejos de generalizar la experiencia que existe actualmente en el mundo y principalmente en Europa, en la aplicación del proceso de codigestión. Se hace necesario entonces realizar un estudio para conocer en cada caso las posibilidades técnicas y económicas que permitan aprovechar las bondades que brinda este proceso y alcanzar mayores eficiencias en el tratamiento anaerobio y la disposición final de los residuos orgánicos.

Conclusiones

La práctica de la codigestión en el tratamiento anaerobio de residuales es un proceso adecuado que permite alcanzar altas producciones de biogás sin el detrimento de la eficacia del proceso anaerobio. En el mundo existe una amplia experiencia en este tipo de proceso, lo que afirma su preferencia y continuo desarrollo.

Las tecnologías que se emplean en la codigestión no son extremadamente complejas, aunque no deben obviarse los problemas que pudieran generarse por toxicidad y sobrecargas en los digestores.

En Cuba se hace necesaria la difusión de las experiencias en la codigestión para su aplicación en aquellos lugares donde se pruebe que tiene una factibilidad técnica y económica y de esta forma ayudar a preservar el medio ambiente.

Bibliografía

- AHRING, B. K.; I. ANGELIDAKI Y K. JOHANSEN. «Anaerobic Treatment of Manure Together with Industrial Waste». *Water Science and Technology* 25 (7): 311-318, 1992.
- ANGELIDAKI, I. Y B. K. AHRING. «Anaerobic Digestion in Denmark. Past, Present and Future». III Curso de Ingeniería Ambiental, pp. 336-342, 1997a.
- ANGELIDAKI, I. Y B. K. AHRING. «Effects of Free Long Fatty Acids on Thermophilic Anaerobic Digestion». *Applied Microbiology and Biotechnology* 37 (6): 808-812, 1992.
- ANGELIDAKI, I.; L. ELLEGAARD Y B. K. AHRING. «Modelling Anaerobic Codigestion of Manure with Olive oil Mill Effluent». *Water Science and Technology* 36 (6-7): 263-269, 1997.
- BANKS, C. J. Y P. N. HUMPHREYS. «The Anaerobic Treatment of a Lignocellulosic Substrate Offering Little Natural pH Buffering Capacity». *Water Science and Technology* 38 (4-5): 29-35, 1998.
- BARDIYA, N.; D. SOMAYAJI Y S. KHANNA. «Biomethanation of Banana Peel and Pineapple Waste». *Bioresource Technology* 58, pp. 73-76, 1996.
- BRINKMAN, J. «Anaerobic Digestion of Mixed Waste Slurries from Kitchens, Slaughterhouses and Meat Processing Industries». *Proceedings of the II International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste*. Barcelona, pp. 190-191, 1999.

- CALLAGHAN, F. J.; D. A. J. WASE, K. THAYANITHY Y C. F. FORSTER. «Codigestion of Waste Organic Solids: Batch Studies», *Bioresource Technology* 37, pp. 117-122, 1999.
- DAR, G. H. Y S. M. TANDON. «Biogas Production from Pretreated Wheat Straw, Lantan Residue, Apple and Peach Leaf Litter with Cattle Dung», *Biological Wastes* 21, pp. 75-83, 1987.
- DESAI, M. Y D. MADAMWAR. «Anaerobic Digestion of a Mixture of Cheese Whey, Poultry Waste and Cattle Dung: A Study of the Use of Adsorbents to Improve Digester Performance», *Environmental Pollution* 86, pp. 337-340, 1994.
- DESAI, M.; V. PATEL Y D. MADAMWAR. «Effect of Temperature and Retention Time on Biomethanation of Cheese Whey-Poultry Waste-Cattle Dung». *Environmental Pollution* 83, pp. 311-315, 1994.
- DI PALMA, L.; F. MEDICI, C. MERLI Y E. PETRUCI. «Optimising Gas Production in the Anaerobic Codigestion of the Organic Fraction of Solid Waste from Markets». *Proceedings of the II International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste*. Barcelona, pp. 84-189, 1999.
- DINSDALE, R. M.; G. C. PREMIER, F. R. HAWKES Y D. L. HAWKES. «Two-Stage Anaerobic Codigestion of Waste Activated Sludge and Fruit/Vegetable Waste Using Inclined Tubular Digesters». *Bioresource Technology* 72, pp. 159-168, 2000.
- EDELMANN, W.; H. ENGELI Y M. GRADDENECKER. «Codigestion of Organic Solid Wastes and Wastewater». *Proceedings of the II International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste*. Barcelona, pp. 381-388, 1999.
- FLOTATS, X.; A. BONMATÍ, E. CAMPOS Y M. ANTÚNEZ. «Ensayos en discontinuo de codigestión anaerobia termofílica de purines de cerdo y lodos residuales». *Información tecnológica* 10 (1): 79-85, 1999.
- GALBRAITH, H.; T. B. MILLER, A. M. PATON Y J. K. THOMPSON. «Antibacterial Activity of Long Chain Fatty Acids and the Reversal with Calcium, Magnesium, Ergocalciferol y Colesterol». *Journal of applied Bacteriology* 34 (4): 803-813, 1971.
- GAVALA, H. N.; I. V. SKIADAS, N. A. BOZINIS Y G. LYBERATOS. «Anaerobic Codigestion of Agricultural Industries' Wastewaters». *Water Science and Technology* 34 (11): 67-75, 1996.
- HAMZAWI, N.; K. J. KENNEDY Y D. D. MCLEAN. «Anaerobic Digestion of Co-Mingled Municipal Solid Waste and Sewage Sludge». *Water Science and Technology* 38 (2): 127-132, 1998.
- Hanaki, K.; T. Matsuo y M. Nagase. «Mechanism of Inhibition Caused by Long-Chain Fatty Acids in Anaerobic Digestion Process». *Biotechnology and Bioengineering* 23, pp. 1591-1610, 1981.
- HANSEN, K.; I. ANGELIDAKI Y B. K. AHRING. «Anaerobic Digestion of Swine Manure: Inhibition by Ammonia». *Water Research* 32 (1): 5-12, 1998.
- HWU, C. S.; B. DONLON Y G. LETTINGA. «Acute Toxicity of Oleate to Acetate-Utilizing Methanogens in Mesophilic and Thermophilic Anaerobic Sludges», *Enzyme and Microbial Technology* 21, pp. 297-301, 1997.
- KOSTER, I. Y A. CRAMER. «Inhibition of Methanogenesis from Acetate in Granular Sludge by Long Chain Fatty Acids». *Applied and Environmental Microbiology* 53 (2): 403-409, 1987.

Masciandaro, G.; B. Ceccanti y C. García. «Anaerobic Digestion of Straw and Piggery Wastewaters: II. Optimization of the Process». *Agrochimica* 38 (3): 195-203, 1994.

Oficina Nacional de Estadísticas. *Inventario Nacional de Fuentes de Energía Renovables*. Enero-diciembre de 2004, La Habana, 2005.

SCHMIDT, J. E.; I. ANGELIDAKI Y B. K. AHRING. «Anaerobic Digestion of Olive Mill Effluents Together with Different Wastes». *Proceedings of the II International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste*. Barcelona, v. 2, pp. 180-183, 1999.

TRUJILLO, D.; J. F. PÉREZ Y F. J. CEBREROS. «Energy Recovery from Wastes. Anaerobic Digestion of Tomato Plant Mixed with Rabbit Wastes», *Bioresource Technology* 45, pp. 81-83, 1993.

WEILAND, P. «Anaerobic Waste Digestion in Germany- Status and Recent Development», *Biodegradation* 11, 415-421, 2000.

WONG, M. H. «Anaerobic Digestion of Pig Manure Mixed with Sewage Sludge», *Biological Wastes* 31, 223-230, 1990.

Consumo eléctrico y capacidad de enfriamiento residencial empleando técnicas de inteligencia artificial

Electricity consumption and residential cooling capacity using artificial intelligence techniques

*Carlos Pérez Tello**, *Marcos A. de Armas Teyra***,
*Héctor E. Campbell Ramírez**,

*Moisés Galindo Duarte** y *Marí Guadalupe Amado Moreno****

** Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, México.*

*** Centro de Estudios en Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos, Cuba.*

**** Instituto Tecnológico de Mexicali, México.*

Tel.: (52 686) 5664150.

e-mail: carlosperez@uabc.mx y marmas@ucf.edu.cu

Resumen

Mediante inteligencia artificial se obtuvo un modelo para determinar la capacidad de enfriamiento y el consumo eléctrico mensual para la temporada de verano de la vivienda residencial de una localidad, a partir de la resistencia térmica promedio de los materiales de muros y techo, el área acondicionada, la eficiencia energética estacional y las horas-grado características de la climatología local. Se utilizó información disponible para la tipología característica de la región de Mexicali, la cual se ha documentado ampliamente; sin embargo, la metodología utilizada es aplicable a una gran variedad de regiones con climas cálidos. Para este trabajo se dispuso de 519 casos específicos documentados mediante el simulador térmico desarrollado en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), que utiliza el método de Funciones de Transferencia de ASHRAE. En este estudio se aplicó una red neuronal artificial tipo radial para reproducir los casos compilados. El modelo obtenido presenta una desviación promedio entre los valores suministrados y los calculados de 0,52%. La desviación máxima no excedió 6%, y en 97,3% de los casos la desviación fue menor a 2% para el consumo eléctrico total del período de verano. Con este modelo puede estimarse con mucha confiabilidad el consumo mensual de una vivienda, así como la capacidad del equipo de climatización sin tener que recurrir a una compleja simulación térmica específica, lo que lo hace muy efectivo y fácil de usar.

Palabras clave: Consumo eléctrico residencial, capacidad de enfriamiento, Red neuronal artificial.

Abstract

By means of artificial intelligence techniques we obtained a model to determine the relationship between cooling capacity and monthly electricity consumption in the residential sector for the summer season in certain location taking into consideration the thermal average resistance of the materials of walls and roof, the air conditioned area, the seasonal energy efficiency and the hours-degree characteristic of the local meteorological conditions. We used the available information for the characteristic typology of the Mexicali region, which has been largely documented. However, the methodology used is applicable to a great variety of regions with warm climates. For this paper we had at our disposal 519 specific cases documented by means of the thermal simulator developed at the Institute of Engineering of the Autonomous University of Baja California (UABC, in Spanish), that uses the method of Transferential Functions from ASHRAE. In this study we applied a radial artificial neural network to reproduce the compiled cases. The model obtained presents a 0.52 % average deviation between the supplied values and the calculated ones. The maximum deviation did not exceed 6%, and in 97.3 % of the cases the deviation was less than 2 % for the total electricity consumption during the summer period. With this model it can be made a reliable estimation of the monthly consumption of electricity of a house, as well as the capacity of the air conditioning equipment without having to turn to a complex thermal simulation, which makes it very efficient and easy-to-use.

Keywords: Household consumption of electricity, cooling capacity, artificial neural network.

Introducción

Los habitantes de regiones de climas cálidos, pero en especial las de climas extremos, requieren por necesidad la utilización de sistemas de climatización y la adecuación térmica de los sistemas constructivos para mitigar el efecto del clima y obtener un determinado grado de confort en sus viviendas. En los países latinoamericanos es común encontrar serias deficiencias en el cumplimiento de la reglamentación de los sistemas constructivos con respecto al acondicionamiento térmico, o simplemente se ignora este aspecto como vía de lograr mayor eficiencia energética y menores costos. Por lo general, los edificios no residenciales se encuentran sujetos a normas y reglamentos que toman en cuenta ciertas características térmicas; sin embargo, la vivienda residencial no tiene el mismo trato, y en el caso de México su reglamentación depende de los gobiernos municipales o estatales. Es común en los nuevos desarrollos urbanísticos la utilización masiva e intensiva de materiales constructivos de bajo costo pero que no son los mejores desde el punto de vista del consumo energético o de confort. El block de concreto y el ladrillo son los más comunes para levantar muros, y el concreto en techos es el elemento primordial (Fig. 1).



Fig. 1. Construcción típica en Mexicali B.C., México.

Esto, a su vez, tiene su razón de ser, tales materiales son más duraderos y resisten mucho mejor el paso de vientos fuertes o de huracanes, característicos estos de ciertas regiones del Pacífico y del Caribe. No obstante, en localidades como la ciudad de Mexicali, capital del Estado de Baja California, en el extremo noroeste de México (Fig. 2), lugar donde la posibilidad de un huracán es muy remota, se emplean también tales materiales de manera intensa a pesar de que allí se registran temperaturas extremas durante ocho de los meses del año. En esta región el promedio de temperatura anual de 1990 a 2004 fue de 24,5 °C, lo que aparenta ser un clima ideal a primera vista; sin embargo, el promedio de temperatura de los meses de junio a septiembre es de 33,4 °C, con una media de temperatura extrema máxima de 48,8 °C y un valor récord de 51,1 °C en los últimos 15 años registrado el 28 de julio de 1995. Por su parte, el promedio de temperatura mínima extrema es de 1,8 °C y ocurre en diciembre y enero. La oscilación diurna de temperatura en verano puede ser de hasta 20 °C con un valor medio de 16 °C. La humedad relativa es generalmente baja con un promedio anual del 39,5%, mientras que para los meses de verano el promedio se ubica en 35,6%. Esto muestra el clima extremoso del municipio de Mexicali [Fuente: Departamento de Meteorología, UABC, 2005].



Fig. 2. Ubicación de Mexicali, B.C.

Por otra parte, en regiones con climas menos agresivos, pero con veranos prolongados como ocurre en ciudades y localidades tropicales, la oscilación diurna es menor y las temperaturas medias son cercanas a 27 y 28 °C con máximas extremas de 35 °C, como ocurre en Cienfuegos

o Trinidad en Cuba. En estas zonas el verano es crítico por las ganancias de calor debidas al asoleamiento de las edificaciones y a la práctica común de no utilizar elementos reflectivos o de aislamiento térmico. Para ambas condiciones climáticas, es importante disponer de una herramienta adecuada para estimar de forma efectiva y sencilla el consumo, la capacidad de climatización y los costos asociados al confort y el acondicionamiento climático de las instalaciones residenciales.

Antecedentes

En Mexicali se han realizado diversos estudios que caracterizan la tipología de vivienda [Romero, 1994], la eficiencia energética de unidades de aire acondicionado y consumo energético del sector residencial [Pérez *et al.*, 1996; Campbell y Pérez, 2003], el efecto de elementos de ahorro de energía en los sistemas constructivos [Pérez *et al.*, 2003; Campbell y Pérez, 2004; Campbell y Pérez, 2005] y del sistema eléctrico de Baja California [Campbell *et al.*, 2003]. Es conocido que en las regiones de clima cálido la climatización de espacios representa la mayor parte de la demanda y el consumo eléctricos en la época de verano. También es una práctica común el sobredimensionamiento de los equipos de climatización en prácticamente la totalidad de las instalaciones no sólo residenciales sino también en otros sectores [Pérez *et al.*, 1996; Valdés, 2006], lo que origina sobrecarga del sistema eléctrico en las horas punta y obliga a una mayor capacidad instalada para satisfacer dicha demanda.

Una de las preocupaciones desde el punto de vista de la planificación energética y los pronósticos de crecimiento de consumo y demanda ha sido conocer y caracterizar el comportamiento energético de los diferentes sectores, así como el dimensionamiento adecuado de los nuevos desarrollos urbanísticos en las ciudades. El sector residencial de Mexicali ha sido objeto de un estudio intenso a través de la simulación térmica validada con medición y monitoreo de campo promovido por iniciativa gubernamental o privada. No obstante, varias preguntas deben responderse a menudo como ¿cuánta energía eléctrica debe consumir una vivienda de «interés social»? o ¿de qué capacidad debo seleccionar mi equipo de aire acondicionado? Frecuentemente no es posible responder con rapidez a este tipo de interrogantes debido a que influyen el tamaño del espacio acondicionado, los materiales constructivos, la eficiencia energética del equipo, la ubicación geográfica de la localidad, la cantidad de electrodomésticos y ocupación del edificio o vivienda, los hábitos de los ocupantes o el ajuste del control de temperatura, si recibe asoleamiento directo, entre otros.

Generalmente debe usarse un simulador térmico para dar respuesta concreta a esas preguntas. En el Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California se desarrolló un simulador térmico para edificaciones basado en el método de funciones de transferencia de ASHRAE [McQuinston, 1992], el cual se ha utilizado desde 1995 con resultados equivalentes a los de otros simuladores comerciales similares. A partir de los resultados obtenidos con el simulador para el sector residencial de Mexicali se han recopilado y documentado aquellos que

son representativos de la tipología residencial de la región; al mismo tiempo se realizó la simulación de otros casos que complementaron los ya disponibles de manera que permitieran establecer una base de información con la cual aplicar técnicas de inteligencia artificial. El objetivo en este trabajo es generar un programa que sea capaz de adaptarse a esta base de datos, y en función de una entrada de variables muy sencilla para un tipo determinado de vivienda pueda responder rápida y confiablemente cuál sería el consumo eléctrico mensual, la capacidad del equipo de aire acondicionado y el consumo total de la temporada de verano. Con ello el usuario puede visualizar fácilmente su caso sin necesidad de recurrir a un simulador térmico, y sobre todo sin tener que ser un especialista técnico.

Metodología

Se seleccionaron 519 casos documentados por simulación para la región de Mexicali. Esta información se tomó de las fuentes citadas anteriormente y se realizaron corridas de simulación adicionales para completar un espectro más amplio de los factores significativos. Se consideraron como variables de entrada que caracterizan la vivienda las siguientes: área acondicionada, resistencia térmica promedio de los muros, resistencia térmica promedio del techo y la eficiencia energética estacional promedio del equipo de climatización. El clima local se caracterizó mediante las denominadas horas grado mensuales, con lo que se puede generalizar el método empleado, en cualquier región del mundo. Como variables de salida se tienen los consumos de electricidad mensuales de mayo a octubre y la capacidad adecuada de enfriamiento de la vivienda. Para ajustar el modelo de predicción se seleccionó una red neuronal artificial de tipo radial, como se muestra en la figura 3.

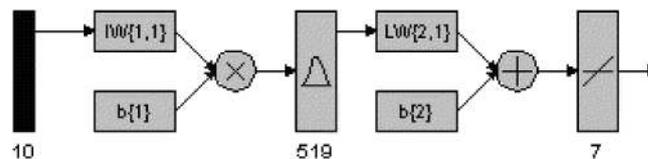


Fig. 3. Red neuronal artificial tipo radial.

La característica principal de este modelo es que permite ajustar con bastante precisión los resultados a partir de los datos de origen. De este modo se alimentaron al modelo diez variables de entrada: las horas grado mensuales de mayo a octubre, el área de la vivienda, la resistencia térmica promedio de los muros, la resistencia térmica promedio del techo y la eficiencia energética estacional promedio (SEER) de los 519 casos. En ellos se hallan representados viviendas de 45, 50, 80, 100, 120 y 150 m² de área climatizada; materiales de construcción como ladrillo común, block de concreto, materiales ligeros como *insulpanel* y *aislapanel* en muros; y concreto y madera con ático ventilado o sin él, vigueta y bovedilla, y *stud* metálico en techos. Se consideraron combinaciones de aislamiento térmico equivalente a la resistencia de 2,5 y hasta 5 cm de

poliestireno expandido, tanto en techo como en muros. Esto hace que sea representativa de la vivienda típica de la región, así como los tamaños de vivienda más comunes. Para facilitar el cálculo todos los valores de entrada como de salida se normalizaron de forma que se manejaron con valores entre 0 y 1. La matriz de resultados arroja el consumo eléctrico mensual, así como la capacidad adecuada de enfriamiento ajustada a las capacidades nominales disponibles en el mercado.

Resultados y discusión

La red neuronal utilizada se diseñó para aceptar las variables de entrada planificadas y brindar como resultado los consumos y la capacidad esperada. Para validar estadísticamente los resultados arrojados por la red se utilizó el criterio de desviación promedio expresada en tanto por ciento. La desviación media se define como

$$Desv = \frac{1}{n} \sum |x - \bar{x}| \quad (1)$$

que al estar expresada en tanto por ciento y con las variables normalizadas es posible una mejor visualización de la calidad del ajuste del modelo. En la figura 4 se muestran las desviaciones individuales para la totalidad de los puntos del consumo eléctrico total del verano entre los valores obtenidos por simulación y los calculados por el modelo.

La desviación media definida por (1) fue de 0,52%. La desviación estándar fue de 0,9% y la máxima no excedió $\pm 6\%$, y en 97,3% de los casos fue menor de 2% para el consumo eléctrico total del período de verano. Asimismo, se advierte en la figura 5 que las desviaciones son aleatorias, lo que indica la normalidad estadística de los resultados. En las figuras 6 y 7 se muestran las desviaciones individuales de los meses de agosto, el mes crítico del verano, y octubre, que aunque considerado de verano presenta características de transición en el clima y considerablemente menores necesidades de enfriamiento.

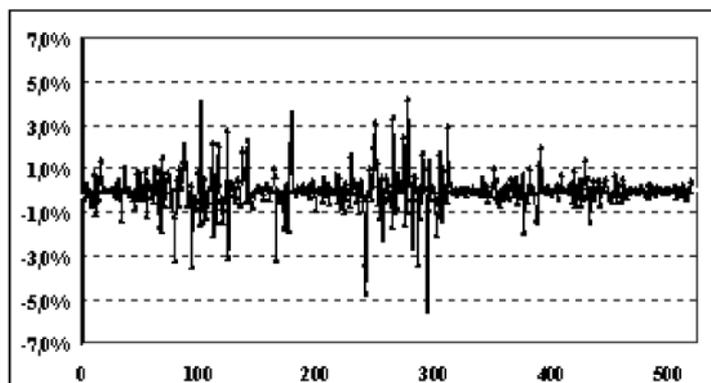
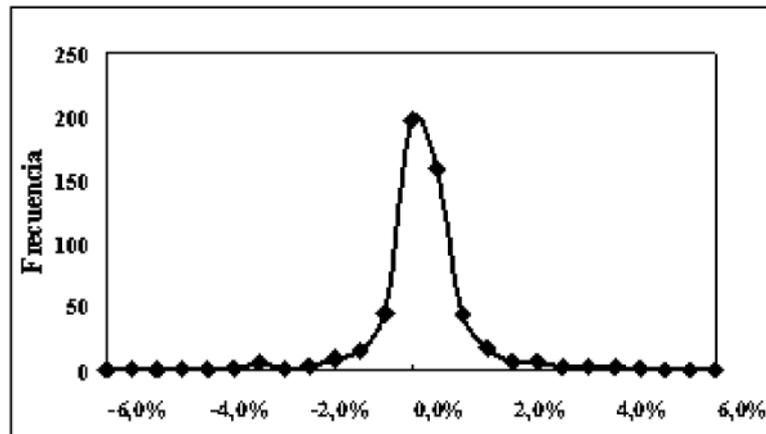


Fig. 4. Desviaciones en el consumo eléctrico total del verano.



*Fig. 5. Distribución de las desviaciones.
Consumo eléctrico total del verano.*

Se advierte que agosto presenta un comportamiento muy similar al del total del verano, no así octubre, donde el modelo tiene las mayores desviaciones. Sin embargo, el promedio de la desviación media de octubre fue de 0,15%, donde 85% de los puntos tienen desviaciones individuales menores que 2%.

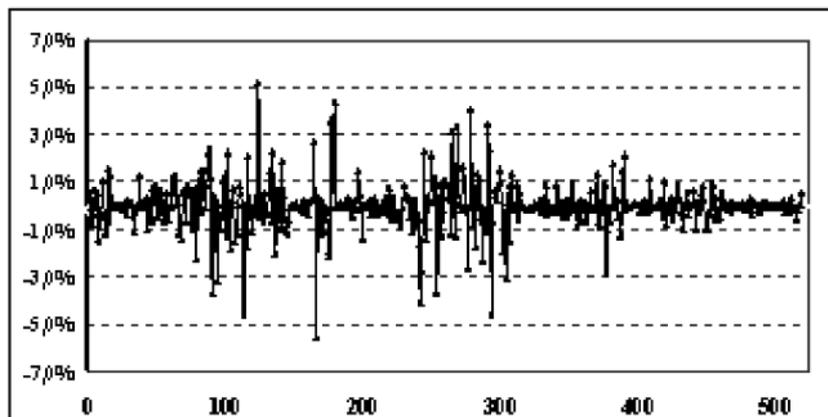


Fig. 6. Desviaciones en consumo eléctrico de agosto.

Además, el peso específico del consumo en este mes es menor comparado con el total del verano, por lo que la variación es compensada por el resto de los meses. Cuando se utiliza la simulación térmica para determinar consumo, demanda y carga de enfriamiento, 15% de desviación entre valores reales y calculados es aceptable, por lo que los resultados obtenidos con el modelo neuronal a partir de los datos obtenidos por simulación son más que satisfactorios.

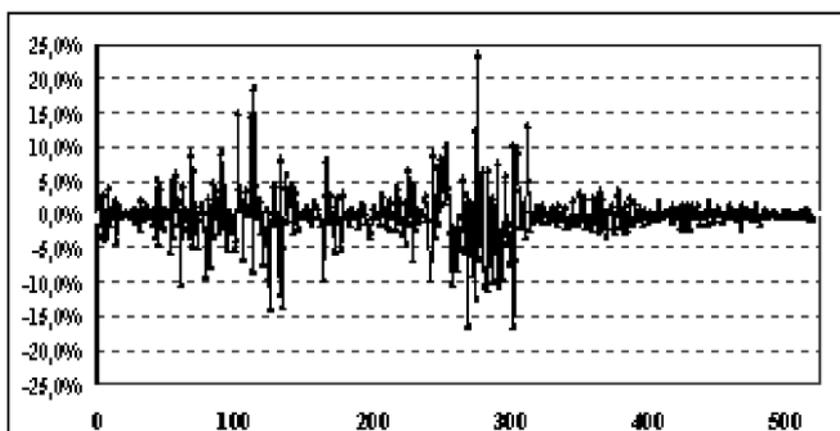


Fig. 7. Desviaciones en consumo eléctrico de octubre.

En la tabla 1 se muestra la desviación media en consumo obtenida con (1) para cada uno de los meses de verano. En la figura 8 se presentan las desviaciones para la capacidad de enfriamiento requerida en cada vivienda. Se observa que la respuesta del modelo es excelente, pues de los 519 casos, sólo 8 se desviaron del valor correcto, es decir, 1,5% no concordaron exactamente.

Tabla 1. Desviación media mensual observada para el consumo eléctrico

Mayo	0,62
Junio	0,52%
Julio	0,58%
Agosto	0,59%
Septiembre	0,51%
Octubre	2,28%
Total verano	0,51%

La capacidad del equipo no es una variable continua, sino que se ajusta a valores nominales disponibles en el mercado; esto es, 1,5, 2,0, 2,5, 3,0, 3,5, 4,0, 5,0 y 6,0 t de capacidad de enfriamiento. Por tanto, al programa se le especificó el criterio de seleccionar el valor más cercano a uno de los anteriormente anotados.

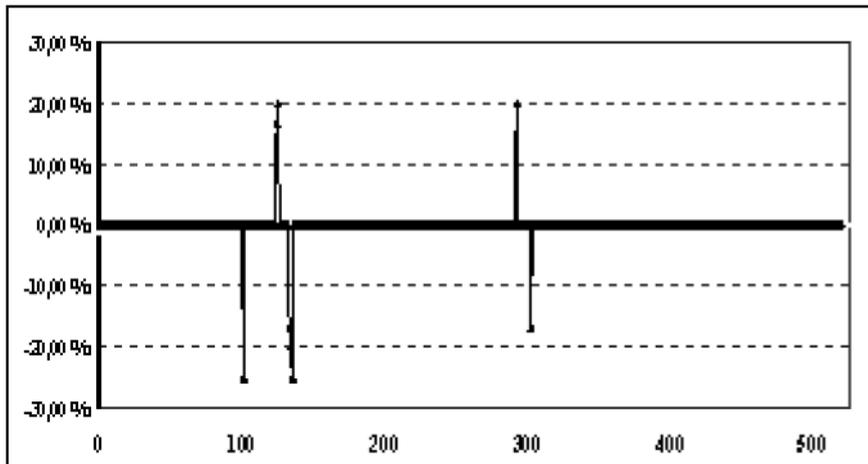


Fig. 8. Desviación en capacidad de enfriamiento.

A raíz de los resultados obtenidos se puede afirmar entonces que el modelo cumple su función de manera satisfactoria, dada la elevada no linealidad de las relaciones entre las variables involucradas. En este caso, para obtener un estimado del consumo mensual promedio de electricidad y la capacidad de enfriamiento necesaria de una vivienda en Mexicali sólo se requiere introducir como datos de entrada el área acondicionada, la resistencia térmica promedio de los muros y la resistencia térmica promedio del techo.

En estas dos últimas variables ya se ha incluido la tipología constructiva. La generalización del método de cálculo y el modelo a otras localidades del mundo es relativamente sencilla y puede lograrse con la información de horas grado de la región en cuestión, la cual se obtiene de registros históricos de temperatura ambiente.

Conclusiones

Para ajustar los datos de comportamiento energético del sector residencial de Mexicali previamente documentados se probó un modelo neuronal tipo radial que demostró un ajuste excelente en virtud de la complejidad del fenómeno analizado. Este tipo de red demostró ser la mejor para el caso, ya que la red neuronal de alimentación progresiva con aprendizaje supervisado de dos o varias capas probado inicialmente produjo resultados estadísticos insatisfactorios independientemente de las funciones de transferencia y el número de neuronas empleadas. Para este tipo de fenómenos complejos se encontró en la red radial un apoyo valioso para simplificar el cálculo de variables de interés, para un usuario no especialista y que no requiere de software complejo o especializado.

Es verdad que se requiere contar con información confiable disponible, pero a partir de ella el siguiente paso es sencillo. Con este modelo se responde rápidamente a las preguntas que durante tanto tiempo se han formulado a los especialistas en climatización y ahorro de energía acerca de cuánto debemos esperar consumir de electricidad mensualmente en nuestra vivienda y de qué capacidad debemos adquirir el equipo de aire

acondicionado si esta se localiza en una región con un clima cálido. La siguiente etapa del trabajo corresponderá a extender la utilización del modelo a diferentes ciudades de México y países del Caribe que permitan ampliar su aplicación a otros aspectos, como pronósticos de demanda, facturación y planificación energética no sólo residencial, sino también en otros sectores.

Bibliografía

CAMPBELL R. H. E. Y T. C. PÉREZ. «Análisis del comportamiento térmico de viviendas de interés social construidas por ARMOUR comparado con la construcción de bloque de concreto y techo de vigueta y bovedilla». Reporte Técnico, UABC, octubre de 2003.

———. «Análisis del comportamiento térmico de la placa de poliestireno colocado como material aislante en la parte interior de un techo». Reporte Técnico, UABC-CFE, 2004.

———. «Análisis del comportamiento térmico de viviendas de interés social construidas por Grupo MELO». Reporte Técnico, UABC, 2005.

CAMPBELL, R. H. E.; T. C. PÉREZ Y L. M. RIVAS. «Identificación y definición de la problemática del servicio eléctrico en Baja California». Reporte Técnico, UABC-CDEM, 2003.

MCQUINTSON. «Cooling and Heating Load Calculation Manual, American Society of Heating», Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Inc., 1992.

PÉREZ, T. C.; D. M. GALINDO, C. J. VILLA Y G. M. A. RAMÍREZ. «Evaluación de equipos de aire acondicionado, motores y refrigeradores para el sector doméstico de Mexicali, B.C». Reporte Técnico UABC-CFE, 1996.

PÉREZ, T. C.; R. H. E. CAMPBELL, M. M. G. AMADO Y L. A. WONG. «Normas de construcción para el ahorro y uso eficiente de la energía en la vivienda de Mexicali». Reporte Técnico 011-DR ISEP, 2003.

ROMERO, M. R. A. «La vivienda representativa de Mexicali: Caracterización física, social y lineamientos de adecuación ambiental». Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Baja California, México, 1994.

VALDÉS, U. R. «Estudio del sistema de climatización del Centro de Oftalmología del Hospital Clínico Quirúrgico Gustavo Aldereguía Lima». Tesis de Ingeniero Mecánico, Universidad de Cienfuegos, julio de 2006.

Consideraciones preliminares acerca de los sistemas de cogeneración para instalaciones hoteleras en condiciones cubanas de operación

Preliminary considerations about the cogeneration systems for hotel facilities under Cuban operation conditions

Julio Vaillant Rebollar, Guillermo Quesada Ramos** y Arnold Janssens****

** Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER, CUJAE), Cuba.*

*** Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGÍA), Cuba. *** Departamento de Arquitectura y Planificación Urbana, Universidad de Ghent, Bélgica.*

e-mail: vaillant1es@yahoo.es y jvaillant@ceter.cujae.edu.cu

La producción simultánea de dos o más tipos de energía útil, a partir de una única fuente de energía primaria conocida como cogeneración, es una buena técnica aplicada para lograr un uso racional de la energía. La utilización de las tecnologías y el concepto de cogeneración pueden producir ahorros de energía significativos cuando ambos productos, la electricidad y el calor se aprovechan. Cuando esto ocurre, la eficiencia global del sistema puede alcanzar 80% o incluso más. Tradicionalmente los sistemas de cogeneración se dimensionan de acuerdo con la gestión de la demanda de calor; sin embargo, este método no necesariamente debe aplicarse directamente y sin un previo análisis a sistemas que trabajan bajo condiciones tropicales de operación. El objetivo principal de este trabajo es exponer algunas consideraciones preliminares sobre los sistemas de la cogeneración para hoteles que trabajan bajo las condiciones tropicales de Cuba. Se muestra, además, la influencia en los resultados finales de la selección de la planta, que tiene el método de dimensionado del sistema de cogeneración que se utilice. En la actualidad el estudio de este tipo de tecnología reviste gran importancia teniendo en cuenta la aplicación en Cuba de una nueva estrategia de suministro de electricidad, basada en la generación distribuida en lugar del sistema tradicional de generación centralizada.

Palabras clave: Dimensionado de cogeneración, ahorro de energía primaria.

Abstract

The simultaneous production of two or more types of useful energy, from one primary energy source, is known as cogeneration. It is a good technique used to achieve a rational use of energy. The utilization of the technologies and concept of cogeneration can produce significant savings of energy when we take advantage of products, electricity and heat. When this happens, the global efficiency of the system can get up to 80% or even more. Traditionally the cogeneration systems are sized

according to the management of heat demand. However, this method should not necessarily be directly applicable and without a previous analysis to systems that work under tropical conditions of operation. The main objective of this paper is to describe some preliminary considerations on the cogeneration systems for hotels that run under the tropical conditions of Cuba. Besides, we show the influences in the final results of the selection of the plant, of the method of sizing of the cogeneration system that is used. Currently, the study of such technology has a great great importance taking into account the application in Cuba of a new strategy of electricity generation, based on distributed generation instead of the traditional system of centralized generation.

Keywords: Cogeneration sizing, saving of primary energy

Introducción

La cogeneración es la generación simultánea de calor y potencia aprovechables por el usuario final. Siempre incluye el generador eléctrico y un sistema de recuperación de calor. También es conocida como calor y potencia combinada (CHP), o trigeneración.

El interés en los sistemas de cogeneración ha fluctuado durante los años y ha evolucionado de forma diferente en Europa y en los Estados Unidos.

En los Estados Unidos la Ley de la Política de Regulación de las Utilidades Públicas de 1978 (PURPA) desempeñó un papel crítico en la cogeneración. En los Estados Unidos la capacidad instalada de menos de 10 GWe) en 1980 comenzó a incrementarse y llegó a 48 GWe en 1998 [DOE, 2003]. Mientras, como promedio, los países europeos obtienen la misma cantidad de su electricidad por medio de CHP que los Estados Unidos (9%). La figura 1 muestra el porcentaje de electricidad generada por los sistemas de cogeneración con respecto a la producción de electricidad nacional durante 1999 en varios países europeos y Estados Unidos [A Guide...].

Tanto por ciento de generación de electricidad con CHP con respecto a la generación nacional de electricidad

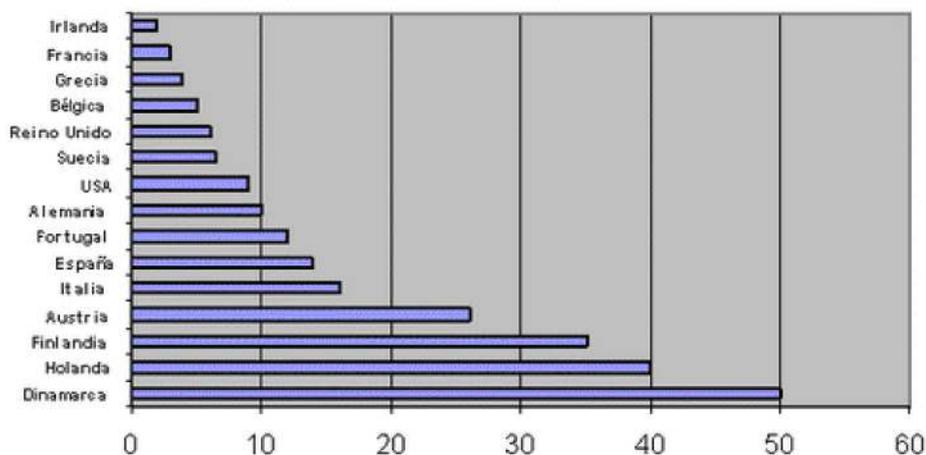


Fig. 1. Producción con CHP con respecto a la producción de electricidad nacional en países europeos y Estados Unidos.

(Fuente: www.cogen.org).

La cogeneración en Cuba es aplicada fundamentalmente en la industria azucarera y la del níquel; entre las dos sumaban 654 MW de capacidad instalada en el 2004, mientras la capacidad instalada en termoeléctricas tradicionales del sistema de generación centralizado era de 3 168 MW en el mismo año [Oficina..., 2005]. Con información extraída de la misma fuente [Oficina..., 2005], la figura 2 muestra el tanto por ciento de producción de electricidad nacional en Cuba, por varios tipos de generadores eléctricos en el 2004. Es necesario aclarar que en la actualidad la cantidad de electricidad generada por plantas de diésel o grupos electrógenos ha aumentado significativamente de 42 MW en el 2004 a 1 480 MW en el 2006 y alcanzará no menos de 1 700 MW para el 2008, como resultado de la aplicación de una nueva estrategia de suministro de electricidad basada en la generación distribuida en sustitución de la anterior concepción de generación centralizada.

Distribución de la generación de electricidad en Cuba en el 2004, por tipo de generador (GWh)

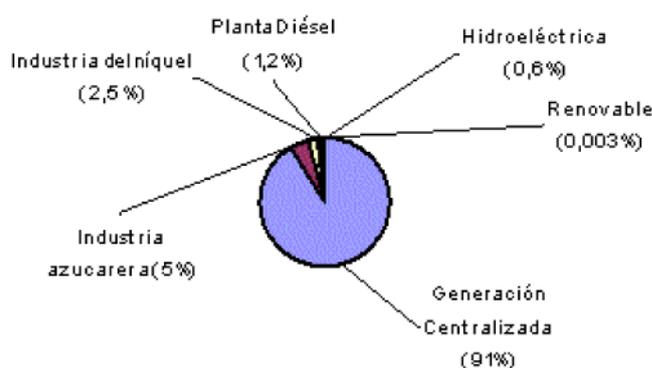


Fig. 2. Tanto por ciento de producción de electricidad en Cuba, por tipos de generadores eléctricos en 2004.

Como es posible ver en el gráfico de la figura 2, en el sector comercial no se aprovechan las potencialidades de la cogeneración. En el sector hotelero cubano las soluciones tecnológicas para cubrir las necesidades de electricidad, calor y frío se garantizan de manera independiente. Esta situación responde, entre otras razones, a que la experiencia de los especialistas, el dominio de los métodos de dimensionado, operación, mantenimiento, etc., en el caso de los sistemas tradicionales que satisfacen las demandas por separado es mayor que la que los especialistas tienen de los sistemas de cogeneración. Este trabajo presenta un caso de estudio donde se aplican diferentes métodos de dimensionado de sistemas de cogeneración en un hotel cubano.

Sistemas de cogeneración y condiciones de las demandas de energía a cubrir

Para introducir el tema de las diferencias de condiciones de operación de los sistemas y su influencia en el comportamiento de las demandas de calor y potencia en edificaciones se a hecho una comparación de la temperatura ambiente entre Cuba y algunos de los países con mas experiencia y capacida instalada de sistemas de cogeneración. En la figura 3 se muestra un gráfico en el que usando la información meteorológica del programa TRNSYS se ha hecho una comparación de la temperatura ambiente entre Cuba y algunos de los países con más experiencia y capacidad instalada de sistemas de cogeneración.

En el gráfico de la figura 3 se definen, claramente, dos comportamientos muy distintos. Uno de ellos, el de la temperatura ambiente en Cuba, siempre positivo y con poca diferencia entre invierno y verano. Mientras que por otro lado, el comportamiento de la temperatura ambiental del grupo de países con más experiencia y capacidad instalada de cogeneración tienen temperaturas por debajo de cero grado en invierno y se aprecia una marcada diferencia entre invierno y verano.

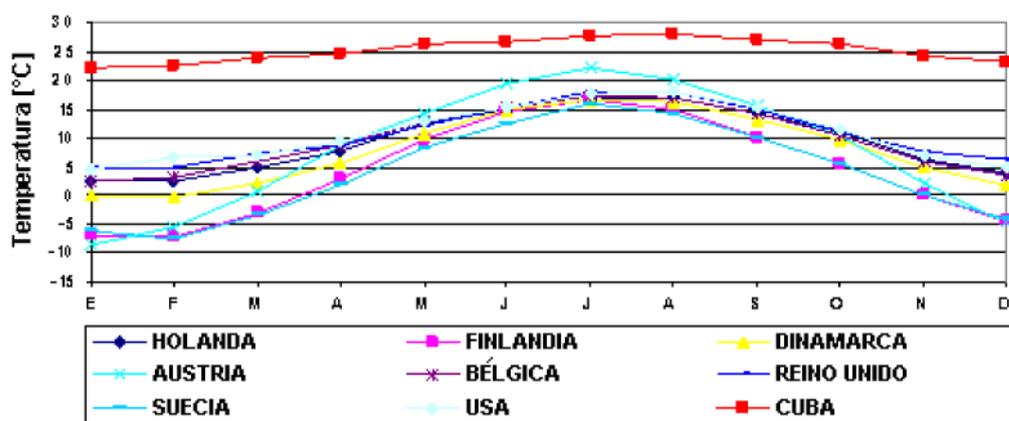


Fig. 3. Comparación de temperatura ambiente entre Cuba y algunos países con más experiencia y capacidad instalada de sistemas de cogeneración.

Varios autores han caracterizado la influencia de las variables climáticas en el comportamiento de las demandas de portadores energéticos en edificaciones [Vaillant, *et al.*, 2006]. En la figura 4 se muestra el comportamiento típico de los perfiles de calor y potencia en edificaciones localizadas en cualquiera de los países con más experiencia y capacidad instalada en sistemas de cogeneración. El grafico permite confirmar cómo durante el invierno la demanda de calor es dos y hasta tres veces superior que la demanda de potencia. También se puede verificar que la relación potencia-calor, la mayor parte del año es menor que la unidad debido a que generalmente el calor es mayor que la potencia.

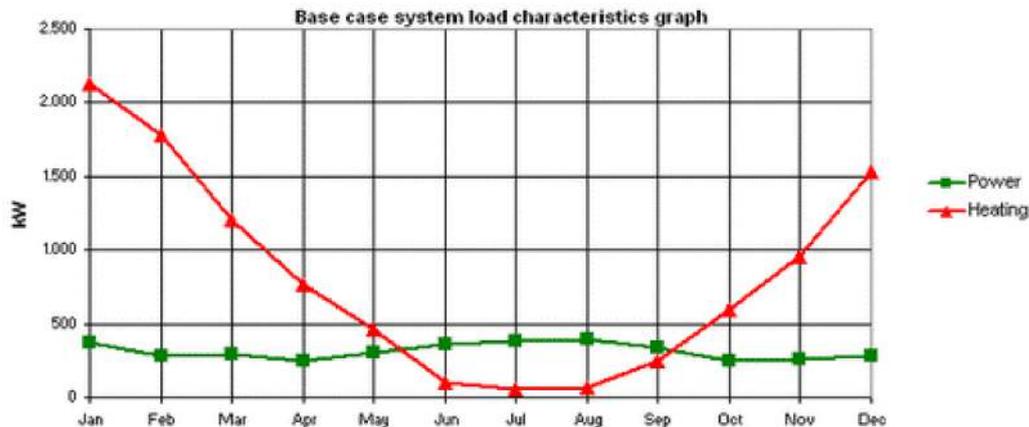


Fig. 4. Demandas típicas de potencia y calor en edificaciones localizadas en países con más experiencia en sistemas de cogeneración [Fuente: www.retscreen.net].

Por otro lado, el gráfico presentado en la figura 5 muestra un comportamiento típico de las demandas de calor y de potencia en un hotel cubano. Los perfiles aquí presentados son muy diferentes a los comportamientos de las demandas de potencia y calor presentados en la figura 4; para el caso de Cuba, el comportamiento típico de los perfiles de demandas de calor y potencia reflejan que existe muy poca diferencia entre los valores de las demandas en invierno y las de verano; o sea, que la influencia estacional no es tan significativa como sí ocurre en países con temperaturas invernales más bajas. Otra diferencia muy importante es que la demanda de calor es siempre menor que la demanda de potencia a lo largo de todo el año; por consiguiente, la relación potencia-calor siempre es mayor que la unidad.

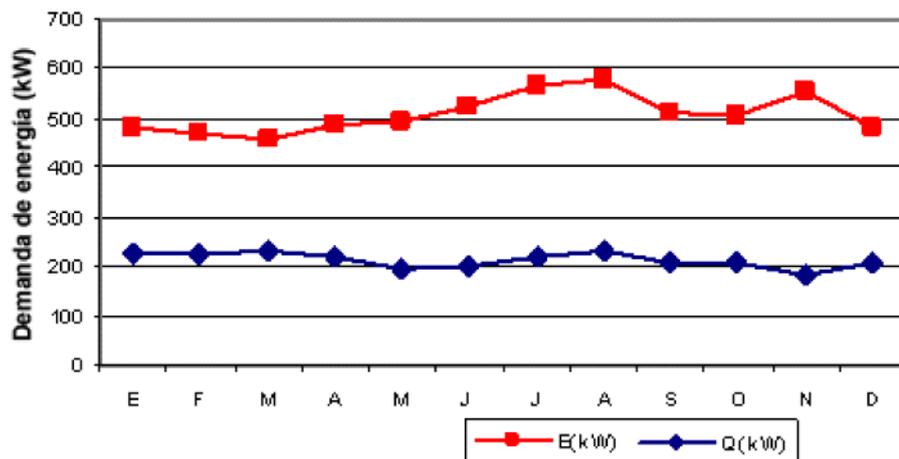


Fig. 5. Comportamiento típico de los perfiles de demandas de calor y potencia en instalaciones hoteleras cubanas.

La utilización de las tecnologías y el concepto de cogeneración pueden producir ahorros de energía significativos cuando ambos productos, la electricidad y el calor, se aprovechan. Cuando esto ocurre, la eficiencia global del sistema puede alcanzar un ochenta por ciento o incluso más.

En Cuba se han encontrado estudios que aplican fundamentalmente dos tipos de métodos de dimensionado de plantas de cogeneración. Uno de ellos usa como base para el dimensionado, la máxima demanda de climatización. Teniendo en cuenta que las cargas de térmicas a vencer en las condiciones tropicales de Cuba son elevadas, aplicar el método de dimensionado antes definido provoca que la capacidad a instalar de las plantas de cogeneración sea muy grande. Es conocido que valores altos de capacidad instalada se traducen en costos iniciales de la inversión, elevados. Otra dificultad relacionada con lo anterior es que la recuperación de la inversión se basa fundamentalmente en la venta a la red nacional de la electricidad sobrante, más que al funcionamiento óptimo del sistema.

Lo anterior provoca que debido a los precios actuales de venta de electricidad a la red nacional, el tiempo de recuperación de la inversión es elevado, generalmente por encima de los 12 años.

El otro método de dimensionado de plantas de cogeneración aplicado a sistemas trabajando en las condiciones cubanas de operación lo constituye el que es basado en la demanda máxima de potencia. El problema que presenta esta aplicación es que debido a que la instalación está dimensionada de acuerdo con la demanda máxima de potencia, durante la operación los sistemas tienen que trabajar aproximadamente 44% de las horas del año con valores de carga parcial por debajo de 70% de la capacidad nominal de los equipos, lo que se traduce en un incremento del consumo específico de energía primaria, reduciendo la eficiencia global de la instalación.

Análisis de los criterios de funcionamiento de sistemas de cogeneración

Muchos de los beneficios de los sistemas CHP vienen de la eficiencia relativamente alta de sistemas de cogeneración en comparación con otros sistemas. Aquí se introducen algunos de los parámetros termodinámicos conocidos para evaluar sistemas que cubren las demandas de calor y potencia con tecnologías de cogeneración.

En una planta de cogeneración con PE_c , como la demanda de energía primaria para el funcionamiento del sistema CHP, la eficiencia global también conocida como el factor de utilización de la energía (EUF) [Cardona y Piacentino, 2003; Lucas, 2000, y Rosen y Le, 1998], se designa como:

$$\eta_c = \frac{P_c + Q}{PE_c} \quad (1)$$

La eficiencia de utilización de combustible (FUE), también definido como la eficiencia térmica artificial (ATE). [Environmental...; Cardona y

Piacentino, 2003] es otro criterio de funcionamiento, que unido al anterior es utilizado para evaluar sistemas de cogeneración, el mismo es aceptado porque da una medida de la eficiencia térmica de la instalación, pero tiene la deficiencia de que da igual peso a los flujos de calores a diferentes temperaturas. Está dado por la expresión siguiente:

$$FUE = \frac{P_c}{PE_c - \frac{Q}{\eta_B}} \quad (2)$$

La razón de ahorro de energía primaria (FESR) [Gardner y Rogers, 1997; Cardona y Piacentino, 2003; Lucas, 2000, y Rosen y Le, 1998] también llamada como por ciento de ahorro de combustible (S), es una medida directa de la magnitud de ahorro de combustible; es decir, la magnitud de utilización de la energía primaria en un sistema de cogeneración es calculado por:

$$FESR = 1 - \frac{PE_c}{\frac{P_c}{\eta_M} + \frac{Q}{\eta_B}} \quad (3)$$

La eficiencia exérgica [Gardner y Rogers, 1997; Cardona y Piacentino, 2003; Lucas, 2000; Rosen y Le, 1998, y Smith y Few, 2001] que es usada para evaluar sistemas de cogeneración pero también los sistemas convencionales de generación de calor y potencia por vía separada, toma en cuenta la diferencia de calidad de la energía (potencia y calor), con el parámetro exergía. Este criterio es considerado satisfactorio.

Definición de diferentes vías posibles a utilizar en el dimensionado de sistema de cogeneración para edificaciones

En la selección, e incluso en el dimensionado de sistemas de cogeneración para edificaciones, pueden valorarse varias alternativas de solución. El esquema que más abajo se muestra expone los elementos que en sentido general pueden influir en la determinación de la mejor solución. Representa la interrelación existente entre las tecnologías posibles a emplear, los escenarios posibles de operación, así como la configuración desde el punto de vista tecnológico en que se decida estructurar los diferentes equipos posibles a utilizar.

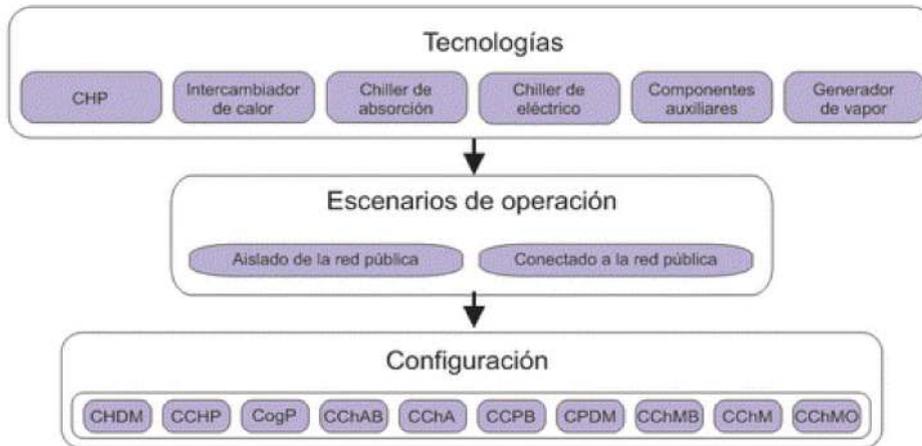


Fig. 6. Aspectos que se deben tomar en cuenta en una correcta selección y dimensionado de sistema de cogeneración para edificaciones.

Todos los métodos de dimensionado están basados en la curva acumulativa de frecuencia de la energía demandada [Cardona y Piacentino, 2003], que en función del método, dicha curva será de calor, potencia, frío o una combinación de estas. Seguidamente se presenta en la tabla 1, una breve descripción de cada método de dimensionado.

Tabla 1. Métodos posibles a utilizar en el dimensionado de sistemas de cogeneración para edificaciones

Acrónimo	Métodos para dimensionar el sistema de cogeneración
CHDM	De acuerdo con el método tradicional de gestión de la demanda térmica.
CPDM	De acuerdo con la gestión de la demanda de potencia.
CogP	De acuerdo con la potencia máxima demandada.
CChA	De acuerdo con la demanda máxima de climatización, incluyendo la demanda típica de calor.
CChAB	De acuerdo a la demanda máxima de climatización, sin incluir la demanda típica de calor.
CCHP	De acuerdo al método tradicional de gestión de la demanda térmica, pero sumando el calor demandado por el sistema de absorción.
CCPB	De acuerdo a la gestión de demanda de climatización, sin incluir la demanda típica de calor.
CChM	De acuerdo con el punto máximo de equilibrio triple de generación de potencia, calor y frío.
CChMB	De acuerdo con el punto máximo de equilibrio de generación de potencia y frío.
CChMO	De acuerdo a la gestión del punto de equilibrio triple de generación de potencia, calor y frío.

La figura 7 muestra los resultados obtenidos al aplicar cada uno de los métodos antes descritos a una misma instalación. Como caso de estudio se escogió un hotel cubano, que opera por tanto en condiciones tropicales. Dicho hotel cuenta con más de 200 habitaciones y una demanda máxima de potencia de 906 kW, así como 570 kW de demanda máxima de calor y 566 TR de máxima demanda de climatización. Para todas las demandas se contó con datos horario de un año, lo que permitió la elaboración de la curva acumulativa de frecuencia de cada una de las demandas y la aplicación de cada uno de los métodos de dimensionado antes mencionado.

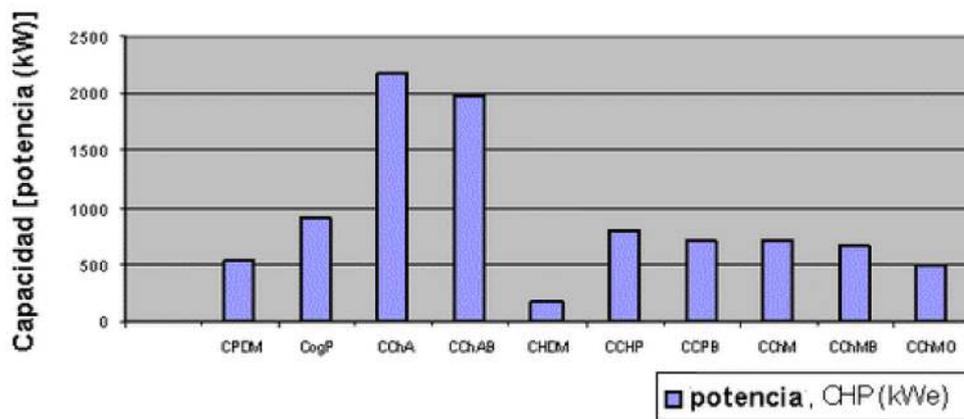


Fig. 7. Capacidad instalada de sistemas de cogeneración para un hotel, utilizando diferentes métodos para realizar el dimensionado.

El gráfico de la figura 7 muestra claramente el grado de influencia en el tamaño de la planta de cogeneración, que tiene la elección del método escogido para dimensionar. Con el caso de estudio analizado se demuestra cómo para un mismo hotel, o sea, las mismas condiciones de demandas, en función del método de dimensionado empleado se obtienen valores de capacidad a instalar de significativa diferencia. Como muestra el gráfico estas capacidades se mueven en una gama de valores desde 170 kWe hasta 2174 kWe del sistema de cogeneración, dependiendo, por supuesto, de los aspectos presentados en el esquema de la figura 6, que muestra que en algunos casos será necesario comprar cierta cantidad de energía de la red pública, mientras que en otros casos la instalación de cogeneración aportará la energía sobrante a dicha red.

Por otro lado, en la figura 8 se muestran las capacidades a instalar de las enfriadoras de absorción y eléctricas en función del método empleado. El gráfico muestra cómo en algunas variantes toda la demanda de frío se cubre con enfriadoras eléctricas y en otras con enfriadoras de absorción. También muestra que existen casos donde la demanda de frío se cubre con una combinación de los dos tipos de enfriadoras.

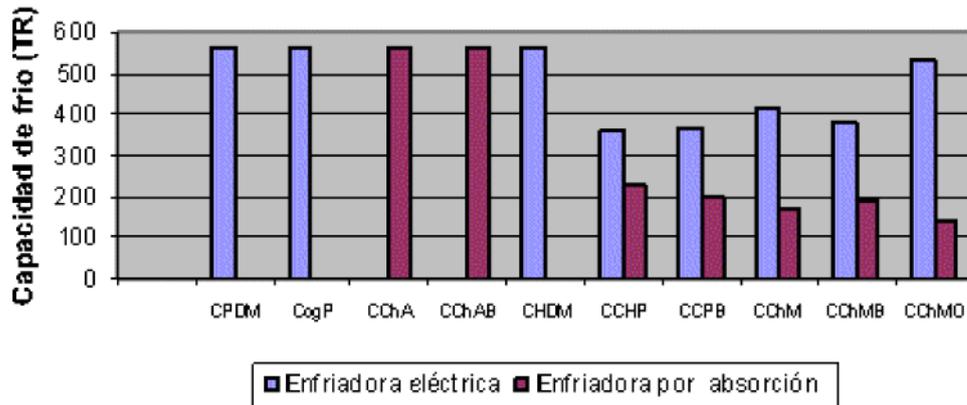


Fig. 8. Capacidad instalada de enfriadoras eléctricas y de absorción para un hotel, utilizando diferentes métodos para realizar el dimensionado.

No se ha presentado aquí la valoración de los múltiples aspectos que puedan incidir en la selección de un sistema de cogeneración. Dentro de estos aspectos pudieran destacarse los de carácter económico, que de acuerdo con la factibilidad de la aplicación de los resultados propuestos pueden excluir de hecho algún método de dimensionado. Sin embargo, lo expresado hasta aquí demuestra la importancia y el impacto que tiene una correcta elección del método de dimensionado, el cual, sin dudas, influye significativamente en los resultados que se obtienen en análisis que se realizan a continuación de esta etapa, como es el caso de la selección, la simulación de la operación del sistema y los estudios económicos.

Conclusiones

Varios criterios de funcionamiento de sistemas de cogeneración fueron presentados, así como los resultados de la aplicación de los diferentes métodos de dimensionado a un caso de estudio, a partir de datos de demandas previamente obtenidos de la instalación hotelera. Se analizó el método tradicional de dimensionado de plantas de cogeneración, basado en la gestión de la demanda de calor. Se definieron otros métodos posibles a emplear con el mismo fin de realizar el dimensionado de una planta de cogeneración.

Como se pudo apreciar, en las instalaciones hoteleras cubanas la razón potencia-calor puede alcanzar valores mayores que dos durante todo el año. Es necesario tomar en cuenta también que en las instalaciones ubicadas en Cuba operan bajo condiciones tropicales, por lo que los valores de demanda de climatización son elevados; esto implica que serán los sistemas de trigeneración los que ofrecerán un mayor aprovechamiento de la energía primaria, lo cual redundará en un ahorro de combustible, una reducción de los costos y una disminución del impacto ambiental con respecto a la utilización de otras tecnologías.

En el trabajo se presenta cómo en el análisis realizado a un mismo hotel, o sea, las mismas condiciones de demandas, en función del método de dimensionado empleado se obtienen valores de capacidad a instalar de significativa diferencia, que se mueven en una gama de valores desde 170 kWe hasta 2 174 kWe del sistema de cogeneración.

Se demostró la importancia y el impacto que tiene una correcta elección del método de dimensionado; el cual, sin dudas, influye significativamente en los resultados que se obtienen en los análisis que se realizan a continuación de esta etapa, como es el caso de la selección, la simulación de la operación del sistema y los estudios económicos.

Nomenclatura

P : Potencia, kW.

η : Eficiencia energética.

PE : Energía primaria, kW.

Q : Calor, kW.

Subíndices

e : Eléctrica.

q : Calor.

C : Cogeneración.

pp : Planta convencional de potencia.

B : Generador de vapor.

Bibliografía

A Guide to Cogeneration. [http://: www.cogen.org](http://www.cogen.org).

CARDONA, E. Y A. PIACENTINO. «A Methodology for Sizing a Trigeneration Plant in Mediterranean Areas». *Appl. Therm. Eng.* 23, pp. 1665-1680, 2003.

DOE. «Cogeneration or Combined Heat and Power, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy». US Department of Energy, 2003, <http://www.sciencedirect.com>.

Environmental Protection Agency Combined Heat and Power Partnership. *Catalogue of CHP Technologies*.

GARDNER, D. T. Y J. S. ROGERS. «Joint Planning of Combined Heat-and-Power and Electric Power Systems: An Efficient Model Formulation». *Eur. J. Oper. Res.* 102 (1): 58-72, 1997.

HERNÁNDEZ-SANTOYO, J. Y A. SANCHEZ-CIFUENTES. «Trigeneration: An Alternative for Energy Savings». *Appl. Energ.* 76, pp.19-27, 2003.

LAHDELMA, R. Y H. HAKONEN. «An Efficient Linear-Programming Algorithm for Combined Heat-and-Power Production». *Eur. J. Oper. Res.* 148, pp.141-151, 2003.

Lucas, K. «On Thermodynamics of Cogeneration». *Int. J. Therm. Sci.* 39, pp.1039-1046, 2000.

Oficina Nacional de Estadística. *Anuario Estadístico de Cuba 2004*. La Habana: 2005.

ROSEN, M. A. Y M. N. LE. «Thermodynamic Assessment of the Components Comprising an Integrated System for Cogeneration and District Heating and Cooling». *Proc. ASME Advanced Energy Systems*

Division. AES-vol. 38, ASME, New York, 1998, pp. 3-11.

SMITH, M. A. Y P. C. FEW. «Second Law Analysis of an Experimental Domestic Scale Cogeneration Plant Incorporating a Heat Pump». *Applied Thermal Engineering* 21, 93-110, 2001. www.elsevier.com

VAILLANT, J.; G. QUESADA, A. JANSSENS Y M. DE PAEPE. «Simulation of Heat and Power Demands Using Analytical Models for Building in Tropical Areas», 7th International Conference on System Simulation in Buildings, Liège, 2006.

Empleo de la energía solar para la cocción de alimentos

The use of solar energy for cooking food

*Eduardo A. Rincón Mejía y Álvaro E. Lentz Herrea
Universidad Autónoma de la Ciudad de México,
San Lorenzo 290, Col. del Valle, 03100 México, DF.
e-mail: rinconsolar@hotmail.com*

Resumen

Se presentan hornos y comales solares de alto rendimiento diseñados y construidos en México, con los que es posible cocinar cualquier alimento, aun en temporada de lluvias. Los hornos están diseñados para operar alrededor de 120 °C para que ningún alimento se pueda quemar, para que los nutrientes se conserven y para que la comida quede más sabrosa. En el caso de los comales, con ellos se alcanzan temperaturas de operación superiores a 250 °C, con las que se pueden freír y preparar tortillas, quesadillas y otros alimentos de origen prehispánico, pero también *hot cake*, hamburguesas, carnes a la parrilla, etcétera.

Palabras clave: Cocinas solares, hornos solares, concentrador solar multicompuesto, CMC.

Abstract

In this paper we present high performance solar ovens designed and made in Mexico, which can be used to cook any type of food even during the rainy season. The ovens are designed to operate around 120 °C so food doesn't burn, nutrients keep in good condition and food is tastier. In the case of "comales" it can be obtained temperatures as high as 250 °C, suitable to fry and prepare tortillas, quesadillas and other foods of pre-Hispanic origin, but also *hot cake*, hamburgers, grilled meats, etcetera.

Keywords: Solar cooker, solar ovens, multi-compound solar concentrator, CMC

Introducción

Alrededor de 28 millones de mexicanos comen alimentos guisados con leña, aprovechada por lo general de manera insustentable, lo que contribuye en ocasiones a la deforestación. A nivel mundial son unos dos mil millones de personas las que se alimentan con comida cocinada con leña por no tener un energético alternativo, y el resto de la gente consume alimentos cocinados con gas LP o gas natural. Cientos de personas se accidentan cada año por quemaduras, intoxicaciones o explosiones.

El continente africano depende de la madera y el carbón de leña para la cocina y la calefacción domésticas. En el 2000, casi 470 millones de toneladas de madera fueron consumidas en hogares del África Subsahariana en forma de leña y carbón vegetal, ¡más madera «per cápita» que en cualquier otra región en el mundo! Cerca de dos millones de personas, principalmente mujeres y niños, mueren prematuramente cada año en el planeta, de enfermedades respiratorias causadas por la polución de tales fuegos (quemadas). Algunos estudios plantean que el humo de fuego de madera usada para cocinar causará aproximadamente 10 millones de muertes prematuras entre mujeres y niños hacia el 2030 en África, y descargarán al medio ambiente unos 7 mil millones de toneladas de carbono en forma de gases de efecto invernadero para el 2050, alrededor del seis por ciento del total esperado para el continente.

Este problema puede ser resuelto, y esos millones de muertes pueden evitarse si se emplean cocinas solares de alto desempeño, como las que se presentan en este artículo.

Cabe hacer mención que en Internet es posible encontrar decenas de modelos comerciales o para autoconstrucción de cocinas solares, y se han establecido redes mundiales para su promoción; sin embargo, la gran mayoría de ellas presentan inconvenientes, como fugas luminosas y destellos que pueden dañar la vista, bajo rendimiento en temporada de lluvias, exceso de tiempo requerido para la cocción de muchos alimentos, corta duración de las cocinas, etcétera. Estos inconvenientes no existen en los hornos ni en los comales solares Tolokatsin.

Los hornos solares Tolokatsin

El nombre es una palabra Nahuatl que significa «toluqueñita», por haber sido diseñadas en Toluca, capital del estado de México. Estos hornos constan de un concentrador multicompuesto CMC de ocho espejos, distribuidos en cuatro pares, como se muestra en la figura 1. El horno en sí es un recipiente hermético cilíndrico que se calienta por la luz concentrada proveniente del CMC.

Dentro del horno se coloca un recipiente de acero inoxidable en donde se pone cualquier alimento horneable, que puede ser pan, carne., verduras, leguminosas, etc. Este recipiente puede tener subdivisiones para preparar simultáneamente varios guisos. Ahora bien, el alimento no se quema, pues la temperatura no sobrepasa los 140 °C; de hecho están diseñados para operar a temperaturas medias de 120 °C, en días bien soleados. Por ser hermético y esterilizador, mientras no sea abierto, los alimentos pueden conservarse durante días sin necesidad de refrigeración. Además, los alimentos se pueden colocar dentro del horno antes de que amanezca, y abrirse a la hora que uno desee comer (al mediodía, por la tarde, por la noche) y los alimentos quedarán más sabrosos y nutritivos.

Los comales solares Tolokatsin

Los comales solares Tolokatsin consisten en una plancha horizontal (de acero inoxidable o de barro cocido) que se calienta principalmente desde abajo con radiación solar concentrada proveniente de un concentrador multicompuesto que generalmente tiene 11 o 15 espejos (Tolokatsin 1 o 2). Solamente dos o cuatro de los espejos son curvos y todos los demás son planos, de modo que se pueden manufacturar muy fácilmente en casa o en un pequeño taller.

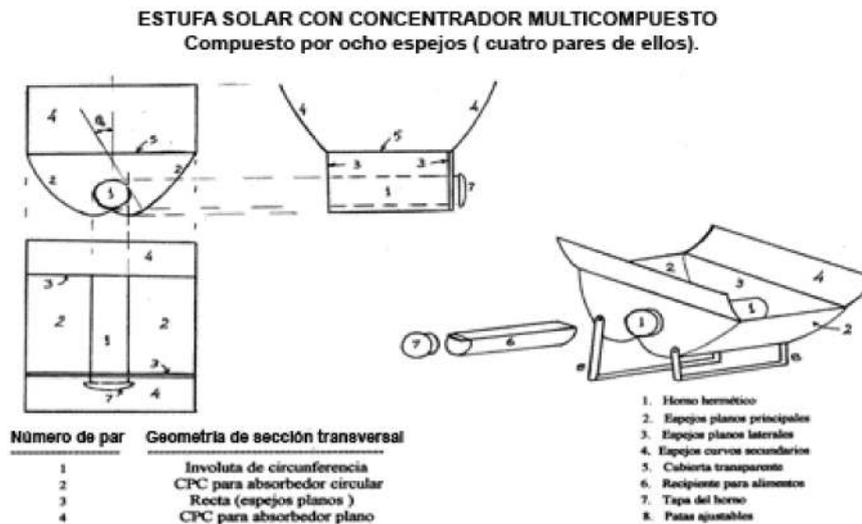


Fig. 1. Horno solar Tolokatsin 1.



Fig. 2. Hornos solares Tolokatsin 1 de 12 litros de capacidad, empleados en una comida solar para más de 260 comensales.

Para un ángulo de aceptación 15° , el cual permite concentrar la luz solar durante casi una hora sin necesidad de seguir al Sol, se pueden alcanzar temperaturas cercanas a 200°C , suficientemente altas para freír y tostar. La figura 3 muestra al primer comal Tolokatsin que fue dado a conocer en la Semana Nacional de Energía Solar celebrada en 1999 en Morelia. Nótese que todos los rayos inciden, sin fugas, por debajo de la plancha, permitiendo un excelente calentamiento y buen desempeño.

El principio de operación de estos comales ha sido publicado en diversos artículos técnicos. Se han diseñado versiones avanzadas de estos comales, algunos de ellos emplean puros espejos curvos; otros usan sólo espejos planos, dependiendo de la aplicación que se les desee dar. El modelo Tolokatsin 2 fue presentado por primera vez en Vigo, España, en el Congreso Iberoamericano de Energía Solar celebrado en 2004. Más aún, se han desarrollado sistemas comal solar-refrigerador solar por absorción acoplados empleando el modelo Tolokatsin 3, de modo que el calor de desecho para freír alimentos se emplea como fuente de calor para el generador del sistema de refrigeración. Este sistema sirvió como tema de la tesis doctoral de un estudiante de Querétaro.

Cocción de alimentos

Muchos de los platillos requieren de varias etapas de cocimiento de algunos de sus ingredientes, como verduras y tomate para la realización de salsas, carnes de pollo, res, pescado o cerdo. Otro ejemplo son las pastas, como el espagueti, los fideos, tallarines, etc., los cuales se pueden cocer o precocer en la estufa solar en su elaboración. Algunos de estos platillos puede ser preparados inicialmente en la estufa solar para realizar su posterior integración o terminar su elaboración en un comal solar Tolokatsin, ya que freír en aceite no es posible realizarlo en este tipo de hornos, pero sí en un comal solar.



Fig. 3. El primer comal solar Tolokatsin 1, construido en 1999.

Otros platillos se pueden elaborar introduciendo la totalidad de sus ingredientes para poner a hervir al calor de una estufa solar y para lo cual se recomienda ampliamente su uso. Ciertamente muchos de estos platillos requieren de una etapa previa de elaboración, como el picado, el macerado y su integración, como sucede en la preparación de tamales. Aquí se refiere a las etapas previas de cocimiento.

Alimentos con varias etapas de cocimiento

En la tabla 1 se presenta una lista de los platillos y las etapas de cocimiento de algunos de éstos que han sido preparados en una estufa solar.

Tabla 1. Lista de platillos y etapas de cocimiento previas

Platillo	Cocimiento
Espagueti en salsa de jitomate	1. Jitomates
	2. La pasta
Sopa de verduras con pastas	1. Las verduras
	2. La pasta
Puré de papa o papillas	La papa o las verduras
Ensalada rusa	Todas las verduras

En el caso de la ensalada rusa se cuecen las verduras y posteriormente el pollo; se puede obtener el caldo de pollo para ser utilizado en otro platillo. En otro caso, si la cantidad es poca, se pueden cocer todos los ingredientes al mismo tiempo para su posterior integración.

Ejemplo 1: Espagueti con salsa de jitomate. Para la elaboración de este platillo se requiere preparar una salsa de jitomate, por lo que los tomates pueden ser cocidos en la estufa solar y posteriormente elaborar la salsa. A continuación se pone la pasta en la estufa solar para darle el punto de cocción, y para finalizar se añade el espagueti. Como en éste y otros platillos que utilizan pastas se sugiere cocer los ingredientes de la salsa, en este caso los jitomates, con abundante agua, y una vez que el jitomate se haya cocido, hay que retirarlo y poner la pasta en el agua caliente, agregar un poco de aceite para evitar que se peguen entre sí, y además mover un poco al introducirlos para separarlos y retirar cuando esté cocida la pasta para integrarlo a la salsa.

Ejemplo 2: Puré de papa. Para la elaboración del puré se requiere el cocimiento previo de la papa, el cual se puede hacer en la estufa solar para posteriormente realizar la elaboración del puré. En la figura 4 se muestran las papas ya cocidas en la estufa solar.

Existen otros platillos, como cremas y sopas, que se hacen con verduras previamente cocidas en la estufa solar.

Alimentos con una sola etapa de cocimiento

La tabla 2 presenta una lista de los platillos preparados en una estufa solar en una sola etapa, introduciendo todos sus ingredientes desde el inicio para obtener el platillo listo para servir.

Ejemplo 3: Sopa de verduras. En la elaboración de esta sopa se lavan muy bien las verduras, se cortan y se añaden los condimentos y sal al gusto, se ponen en la estufa solar con caldo de pollo, también se pueden añadir piezas de pollo y se dejan cocer, obteniéndose la sopa lista para servir.

Tabla 2. Lista de platillos guisados en una sola etapa de cocción

Sopa de verduras	Pancita
Carne en caldo	Mixiotes
Caldo de pollo	Barbacoa
Tamales	Verduras cocidas
Cochinita Pibil	Frijoles
Caldo de pescado	Flanes
Caldo tlalpeño	Pasteles
Conejos en chileajo	Strudel de manzana



Fig. 4. Cocimiento de papas en la estufa solar.

Tabla 3. Valores de irradiación diaria global, promedio mensual

Mes	Irradiación, MJ/m ²
Enero	15,8638
Febrero	18,3636
Marzo	20,3058
Abril	20,4201
Mayo	20,108
Junio	18,6573
Julio	17,922
Agosto	17,795
Septiembre	17,1862

Octubre	16,0618
Noviembre	15,2652
Diciembre	13,83
Anual	17,6482

Tabla 4. Tiempos de cocción de diferentes alimentos en una estufa solar a plena carga, con cielo despejado

Alimento	Tiempo (horas)
Papa	2
Zanahoria	2
Carne de cerdo	3
Carne de pollo	2
Sopa de verdura	3
Frijoles	4
Flan	2
Pescados	1
Pan	2
Barbacoas	4

Tiempos de cocción

Los tiempos de cocción dependerán de la energía captada por la estufa solar, por lo que en días seminublados se requerirá de mayor tiempo, mientras que con cielo despejado ocurrirá lo contrario. La cantidad de alimento que se introduzca dentro del horno y la temperatura ambiente también desempeñan un papel importante, aunque el principal es con mucho la irradiación solar, que en nuestro país resulta suficientemente grande, como puede verse claramente en la tabla 3;; en ella se presentan los valores de la irradiación global diaria promediada mensual y anualmente en la ciudad México [Estrada y Almanza, 2005]. La tabla 4 muestra los tiempos de cocción para algunos alimentos comunes.

Conclusiones y recomendaciones

Se han desarrollado hornos y comales solares con los que es posible guisar cualquier alimento en casi todos los días del año. Los comales solares desarrollados son muy eficaces. Pueden ser usados no solo para freír o tostar, sino también como colector solar en otras aplicaciones, como la refrigeración y el secado. Son dispositivos eficientes, económicos y fáciles de construir, sobre todo si se emplean solamente espejos planos, como en el modelo Tolokatsin 3.

Estos hornos y comales solares resultan ideales para su aplicación en el ecoturismo. Las estufas solares son hoy en día una opción viable para la elaboración de gran número de platillos, ya que se puede con ellas lograr la cocción de una gran variedad de alimentos.

El uso de la estufa solar puede ser complementario al de la estufa de alcohol o biogás, en la que se pueden cocer verduras o carnes para después sazónarlos o terminar su elaboración.

Todo platillo posee un orden en su elaboración, por lo que aquellos que tengan etapas previas de cocimiento pueden realizarse sin dificultad y algunos ingredientes pueden cocerse de manera simultánea separándolos o de manera conjunta.

Cocinar con una estufa solar solamente requiere modificar las costumbres del modo tradicional de cocinar y de una planeación previa en la elaboración del platillo dependiendo de los alimentos que se requieran cocer.

Se recomienda colocar los alimentos dentro del horno en las primeras horas de la mañana, sobre todo en temporada de lluvias, para asegurar que se cuezan antes de que se nuble el cielo.

Bibliografía

Página en Internet de Solar Cookers International:

<http://solarcooking.org/plans.htm>

RINCÓN, E. Y F. OSORIO. «Los hornos y los comales solares Tolokatsin». *Memorias XXVI Semana Nacional de Energía Solar*, 11-15 noviembre, Chetumal, pp. 269-276, ANES, México, 2002.

RINCÓN, E. Y F. OSORIO. «A Novel Solar Hot-Plate for Cooking». *Proceedings of ISES Millennium Solar Forum 2000*, 17-21 Sep. pp. 211-214, ISES-ANES, México, 2000.

RINCÓN, E., *et al.* «El nuevo comal solar Tolokatsin II». *Libro de Actas del XII Congreso Ibérico y VII Congreso Iberoamericano de Energía Solar*, 14-18 sep., pp. 613-618, AEES, Vigo, España, 2004.

RINCÓN, E. *et al.* «El aprovechamiento de las fuentes renovables de energía en los desarrollos turísticos del Caribe». *Memoria XXIX Semana Nacional de Energía Solar*, 4-8 oct., Tuxtla Gtz, ANES, México, 2005.

LENTZ, A. Y E. RINCÓN. «Experiencias en cocción de alimentos con una estufa solar tipo CMC». *Memoria XXX Semana Nacional de Energía Solar*, Veracruz, 4-8 oct., 2006. (En prensa).

ESTRADA, V. Y R. ALMANZA. *Irradiaciones global, directa y difusa en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal para la República Mexicana*. Series del Instituto de Ingeniería, Investigación y Desarrollo SID/646, UNAM, México, 2005.

Estudio termoeconómico de sistemas de cogeneración para un central azucarero

Thermal economic study of cogeneration systems for a sugar cane processing plant

Oswaldo Núñez Bosch y Luis Oliva Ruiz***

** Departamento de Ciencias Básicas, Facultad Agroforestal de Montaña, Centro Universitario de Guantánamo, Cuba.*

*** Centro de Estudios de Eficiencia Energética, Facultad de Mecánica, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.
Teléfonos: (53121) 94323 y 94181.
e-mail: osvaldo@fam.cug.co.cu*

Resumen

En el siguiente trabajo se realiza el análisis de cuatro esquemas térmicos de cogeneración para el Complejo agroindustrial azucarero Argeo Martínez en la provincia de Guantánamo. Se determinaron los índices e indicadores energéticos de los sistemas de cogeneración, las variantes C y D presentan los mejores consumos específicos de combustible con valores respectivos de 1,0 y 0,87 kg/kWh cuando emplean residuos forestales. La generación de energía eléctrica anual para estas variantes representan 24,7 y 33,5%, respectivamente, del consumo total en la provincia. Se realizó un estudio financiero donde las utilidades netas que se obtienen del proyecto al aplicar la variante D es de 3,4 veces mayor al monto de la inversión inicial, con un tiempo de recuperación de la inversión de 2,7 años. Esta alternativa presenta además el menor costo en la producción de electricidad con un valor de 3,16 ¢/kWh, considerando como combustible la biomasa forestal. La aplicación de las alternativas C y D pueden representar un ahorro neto al país de 9,44 y 15,3 US\$/MWh, respectivamente al considerar que sus producciones anuales de electricidad se realizan con petróleo. Se determinaron los costos exergoeconómicos y termoeconómicos de las variantes que emplean turbinas de condensación. Finalmente, se brindan algunas conclusiones y recomendaciones teniendo en cuenta los resultados del estudio.

Palabras clave: Exergía, termoeconomía, cogeneración.

Abstract

In the following paper we carry out the thermal analysis of four schemes of cogeneration for the sugar cane processing plant Argeo Martínez in the province of Guantanamo. The energy indexes and indicators of the cogeneration system were determined; the variants C and D present the best specific fuel consumptions with respective values of 1.0 and 0.87 kg/kWh when they use forest residues. The yearly electricity generation for these variants represents 24.7 and 33.5% respectively of the total consumption of the province. A financial study of the project was carried out and the net profits obtained when variant D is applied are 3.4 times larger than the initial

investment, with a payback time of 2.7 years. This alternative is got the smaller cost in the production of electricity, 3.16 ¢/kWh, when the fuel is forest biomass. With the application of the alternatives C and D the country can get a net saving of 9.44 and 15.3 US\$/MWh respectively, when considering annual production of electricity from oil in both cases. The exergy-economic and thermal-economic costs of the variants that use condensation turbines were determined. Finally, we offer some conclusions and recommendations taking into account the results of the study.

Keywords: Exergy, thermo-economics, cogeneration.

Introducción

La generación de electricidad en los centrales azucareros para su comercialización es un aspecto que adquiere una mayor relevancia en el contexto de la situación energética actual. Para Cuba la distribución de las fábricas de azúcar a lo largo del territorio nacional constituye una ventaja que no debe ser subestimada atendiendo a la posibilidad de generar, de forma descentralizada, una parte apreciable de la demanda eléctrica del territorio donde se encuentra enclavada la planta generadora; por ejemplo, de acuerdo con estudios realizados en el país se puede producir 15% de la demanda eléctrica anual a partir del uso del bagazo y otros biocombustibles empleando tecnologías modernas de conversión de la biomasa. El uso del bagazo brinda una ventaja adicional relacionada con la protección del medio ambiente, dado el carácter renovable de esta fuente energética.

La tendencia al crecimiento del precio del petróleo en el mercado internacional acentúa aún más la impostergable necesidad para Cuba de transferir y desarrollar tecnologías para el uso eficiente de los biocombustibles en la industria azucarera con vistas a la generación de electricidad como vía de diversificar las producciones en el sector. El aumento del precio del azúcar en más de 80% en los últimos meses no debe constituir una barrera que limite la generación ampliada de electricidad en el sector azucarero, debido a las fluctuaciones que históricamente ha tenido el precio del azúcar.

Resulta obvio que la modernización de la infraestructura energética de los centrales azucareros dirigida a lograr producciones sostenidas de electricidad durante el año debe transitar por un riguroso estudio económico, tomando como base el diagnóstico y optimización de los diferentes subsistemas de transformación de la energía por los cuales está compuesta la planta de cogeneración. La evaluación y análisis de estos sistemas de cogeneración conviene realizarlos a partir del segundo principio de la Termodinámica, la ley más verosímil de la naturaleza que afecta a todo proceso ya sea físico, económico, biológico y social, que expresa la no existencia de procesos naturales que se desarrollen reversiblemente. El segundo principio nos permite cuantificar la mayor o menor irreversibilidad de los procesos a través de la función exérgica [Valero y Lozano, 1994].

Algunos autores emplean la expresión de análisis termoeconómico para describir la combinación convencional del análisis energético y el económico tratados independientemente. Recientemente el término exergoeconómico fue propuesto por Tsatsaronis 1984, mediante la unión de la palabra exergía

[Rana, 1956] y economía, para una más precisa caracterización de esta combinación y especificar que no se trata de un análisis energético por la primera Ley de la Termodinámica, sino de un análisis exergetico.

El método exergoeconómico o termoeconómico de análisis de sistemas energéticos se sustenta en el segundo principio de la Termodinámica y tiene como propósito, para un sistema térmico dado, obtener un balance entre el gasto de los costos capitales (amortización, recuperación de la inversión, mantenimientos, salarios, etc.) y los costos de la exergía (pérdidas por irreversibilidades externas e internas), de manera tal que el costo de producción del sistema sea el menor posible [Campos y Santos, 1998]. Los referidos conceptos se aplican en el presente trabajo con el objetivo de seleccionar un esquema de cogeneración óptimo para un central azucarero de la provincia de Guantánamo, con vistas a generar electricidad durante todo el año. Para ello se consideraron cuatro esquemas térmicos teniendo en cuenta el esquema base de la fábrica y se evaluó el uso múltiple de biomasa (bagazo, paja y leña). Se tuvo en cuenta el aumento de los parámetros del vapor para una de las alternativas atendiendo a las características de la caldera, y consecuentemente se consideró el tratamiento del agua de alimentar.

Metodología

Para el estudio se definieron cuatro alternativas para la producción ampliada de electricidad en el central; las principales características de estas variantes se definen en la tabla 1.

Tabla 1. Datos utilizados para realizar el cálculo de los esquemas de cogeneración

Descripción	Alternativas			
	A	B	C	D
Presión del vapor, MPa	1,9	1,9	1,9	2,8
Temperatura, °C	320	320	320	420
Flujo de vapor, t/h	70	70	92,81	102,21
Potencia eléctrica, MW	1,5	4,5	9,5	13,5
Poder calórico bajo, kJ/kg	7 667,0 [Beatón y Silva, 1991]			
Bagazo (50%) ²	17 000,0			
Paja (12%) ²	14 300,0			
Leña (30%) ²				

1Flujo de vapor calculado a partir de los consumos de las turbinas.

2Se refiere al contenido de humedad del combustible.

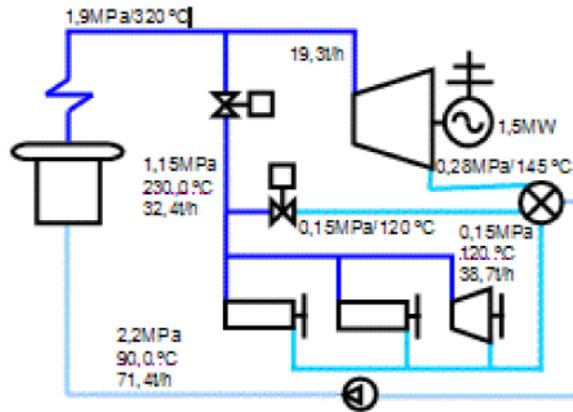


Fig. 1. Esquema térmico de cogeneración para la alternativa A.

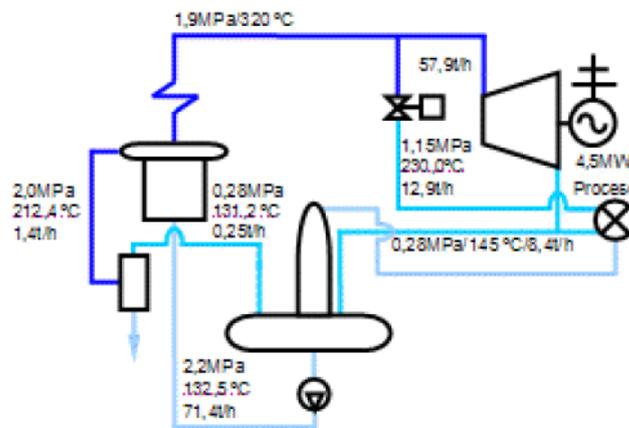


Fig. 2. Esquema térmico de cogeneración para la alternativa B.

La figura 1 corresponde a la alternativa A del esquema de cogeneración considerando su conexión al Sistema Electroenergético Nacional (SEN). El sistema está compuesto por la caldera RETAL de 60 t/h de generación de vapor, una turbina de contrapresión de 1,5 MW de potencia, el sistema de reducción y enfriamiento y las máquinas del tándem. La figura 2 corresponde a la alternativa B. El esquema está compuesto por la caldera RETAL, dos turbinas de contrapresión (la del esquema anterior y otra de 3 MW) para una potencia total instalada de 4,5 MW; completan el esquema un expansor de purga y el desaireador. Se consideró, además, la electrificación del tándem.

La alternativa C se muestra en la figura 3; posee las mismas características que la configuración anterior, excepto que a esta se le incorpora una turbina de condensación con extracciones de 5 MW, elevando así la capacidad de generación total hasta los 9,5 MW. En la figura 4 se representa la alternativa D, su configuración es similar a la alternativa C, con la diferencia de que la turbina de condensación con extracciones posee una potencia de 9 MW, para un total de 13,5 MW. En esta variante los parámetros del vapor se tomaron iguales a 2,8 MPa de presión y temperatura de 420 °C a diferencia de las variantes anteriores, que son de 1,9 MPa y 320 °C.

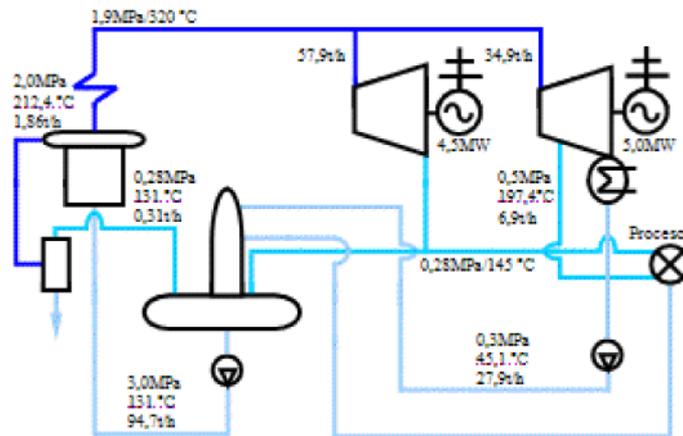


Fig. 3. Esquema térmico de cogeneración para la alternativa C.

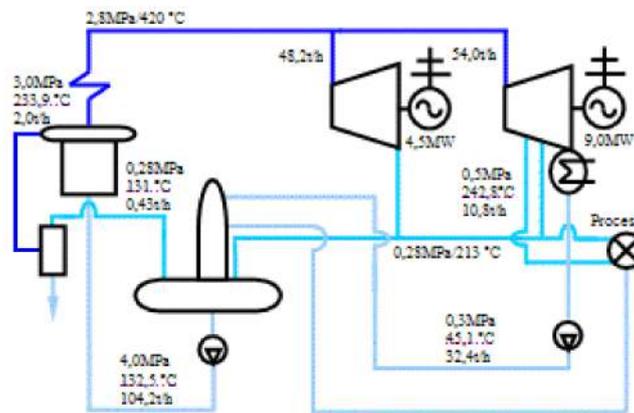


Fig. 4. Esquema térmico de cogeneración para la alternativa D.

El cálculo de los índices energéticos de los esquemas de cogeneración se realizó teniendo en cuenta los estados del vapor en las etapas de la turbina y la producción de vapor y consumo de combustible en la caldera. Se tomaron como datos de partida los parámetros del vapor a la entrada de la turbina y los rendimientos de estas de acuerdo con la literatura consultada [Brazzale, 2000].

La disponibilidad anual de bagazo se determinó teniendo en cuenta la cantidad de caña que se prevé procesar en el futuro (de acuerdo con las proyecciones futuras se prevé procesar más de 17 millones de arrobas de caña por zafra), asumiendo para ello 28% de bagazo en caña; en el caso de la paja el dato fue tomado de las inspecciones de consultoría realizadas por especialistas nacionales e internacionales [Calvo, 1994], los cuales estiman que es posible acopiar alrededor de 17 000 toneladas de este residuo anualmente en los cuatro centros de acopio con que cuenta el CAI.

El consumo anual de leña se determinó tomando en cuenta el tiempo que es necesario emplear este combustible cuando las reservas de bagazo y paja se han agotado; es decir, la explotación de la instalación durante el período de

zafra se realiza utilizando el bagazo y la paja, y en algunos casos (variantes A y B) se tiene en cuenta el tiempo que utiliza la maquinaria con los excedentes de estos combustibles para así poder calcular en el resto del año el consumo de leña. Para cada alternativa se determinaron los consumos específicos de vapor y combustible, además de otros índices e indicadores, según la literatura consultada [Barbosa y Silva, 1994; Barreda y Llagostera, 1996; Beeharry, 1996, y Horlock, 1997].

Para la evaluación financiera de las alternativas se definieron los precios del equipamiento que es necesario incorporar para lograr la generación de electricidad proyectada [Calvo, 1994]. Se asumió una tasa de interés de 6% y vida útil de los activos de 20 años (las tasas de interés se tomaron de acuerdo con lo estipulado por el Banco Nacional de Cuba. La vida útil de los activos se consideró atendiendo a lo establecido para la rama energética), para la determinación del VAN y otros indicadores económicos. El análisis de sensibilidad se realizó con tasas de interés de 8 y 12%, para diferentes valores de venta de la energía eléctrica (entre 30 y 70 US\$/MWh) y precios de adquisición del combustible entre 13 y 31 US\$/t. El procedimiento metodológico utilizado se tomó de la literatura [Barreda, 1995; Beeharry, 1996, y Brazzale, 2000].

Para el estudio exergoeconómico se estableció el ambiente de referencia a 298,15 K y 0,1 MPa. Conocidas las propiedades y flujos del vapor y el agua en los diferentes puntos de los esquemas de cogeneración se determinaron sus exergías, los costos exergéticos y termoeconómicos. De igual manera se procedió para el resto de los flujos, es decir, para los gases, el combustible y la energía eléctrica. En sentido general se aplicó la metodología de la literatura [Ahern, 1980; Andrade, Gallo y Azucena, 1997; Beatón y Silva, 1991, y Calvo, 1994].

Análisis de los resultados

Estudio económico de las alternativas

Las variantes A y B poseen un alto aprovechamiento de la energía liberada por el combustible con valores respectivos de 72 y 81% (Tabla 2); si embargo, en el primer caso la eficiencia en la producción de energía eléctrica es baja (20%); esto es consecuencia de la alta carga térmica generada en la caldera para producir apenas 1,5 MW de electricidad, es decir, gran parte de la energía térmica del vapor se disipa en el sistema de reducción y enfriamiento al llevar los parámetros del vapor a los valores que requiere el proceso.

Tabla 2. Índices e indicadores de los esquemas de cogeneración

Descripción	U/M	Alternativas			
		A	B	C	D
Excedente de energía eléctrica en zafra	MW	0,46	2,25	7,25	10,25
Excedente de electricidad en tiempo inactivo	MW	0,82	3,82	8,82	11,82

Consumo específico de combustible: Bagazo Paja Leña	kg/kWhe	2,32	0,51	1,89	1,63
		1,05	0,23	0,85	0,73
		1,24	0,27	1,0	0,87
Índice de generación de vapor: Bagazo Paja Leña	kgv/kgc	2,26	2,43	2,28	2,1
		5,0	5,40	5,0	4,7
		3,71	4,53	4,3	3,9
Índice de generación de electricidad	kWh/tc	18,42	55,50	116,7	165,80
Factor de utilización de la energía	%	72	81	52	54,2
Eficiencia en la producción de electricidad	%	20	22,1	24,8	29,0
Entrega anual de electricidad	MWh	5 792,7	22 912,9	65 935,7	89 695,7

El consumo específico de vapor en la turbina tiene una clara ventaja para las variantes C y D, según se muestra en la tabla 2, quedando evidenciado que la elevación de los parámetros del vapor (2,8 MPa y 420 °C) contribuye a mejorar los consumos específicos; nótese que para generar 1 kWh en la variante D solo se consume 0,87 kg de leña a diferencia de la variante C, donde este valor alcanza 1,0 kg/kWh.

La producción de electricidad por tonelada de caña es alta para las variantes C y D; aunque inferior resulta este valor para la variante B (55,5 kWh/tc) es muy superior a la media nacional (25 kWh/tc). Respecto a este indicador se destaca el de la variante D con 165,8 kWh/tc; este resultado se corresponde con la tecnología, que según la literatura [Barreda y Llagostera, 1996] está en el rango para turbinas de condensación con extracciones. En la literatura refieren además que se pueden alcanzar producciones de más de 250 kWh/tc cuando se emplean ciclos combinados con turbinas a gas.

El alto índice de generación de vapor obtenido con paja se debe a su alto poder calórico, lo que le permite tener ventajas en comparación con la leña y el bagazo. En el caso del índice de generación de electricidad los resultados muestran un aumento notable en comparación con el esquema base, motivado por el incremento en la producción de energía eléctrica concebida para el resto de las variantes. Las entregas anuales de electricidad, que pueden lograrse en las variantes C y D, representan 24,7 y 33,5%, respectivamente, del consumo en la provincia (según los datos de la Organización Básica Eléctrica (OBE); en la provincia de Guantánamo el consumo de energía eléctrica al cierre del 2005 fue de 26 7404,2 MWh) (Tabla 2); de esto se infiere que Guantánamo puede

lograr una autosuficiencia energética a mediano plazo a partir de proyectos que promuevan el uso de las fuentes renovables de energía con que cuenta el territorio.

La alternativa D posee los mejores indicadores económicos a pesar de tener la mayor inversión, la cual puede recuperarse en un plazo de 2,7 años, el costo de producción de la energía eléctrica para esta variante es de 3,16 ¢/kWh, extraordinariamente inferior al costo de producción de una central termoeléctrica convencional. Las utilidades netas que se obtienen del proyecto después de su vida útil son de tres y 3,4 veces mayor al monto total de la inversión para las variantes C y D respectivamente; esto constituye una ventaja para poder modernizar la maquinaria e incrementar paulatinamente la potencia instalada y las utilidades. Para las alternativas A y B los indicadores económicos resultan desfavorables; por ejemplo, en el primer caso no se obtiene saldo acumulado positivo, por lo que el capital no se recupera en toda la vida útil de la tecnología y en la B el tiempo de recuperación de la inversión rebasa lo estipulado para el sector azucarero.

Las figuras 5 y 6 reflejan la variación del valor actual neto (VAN) para diferentes precios de adquisición del combustible y de venta de la energía eléctrica, considerando una tasa de interés de 8%.

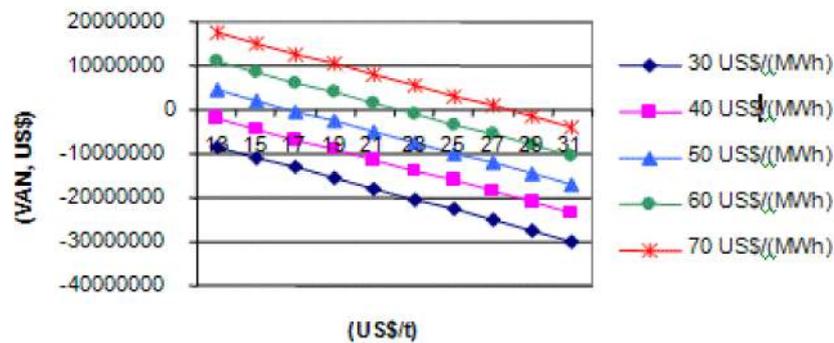


Fig. 5. Variación del VAN respecto al precio del combustible (leña) y la energía eléctrica para la variante C. Tasa de interés: 8%, Inversión: 495 US\$/(kWh).

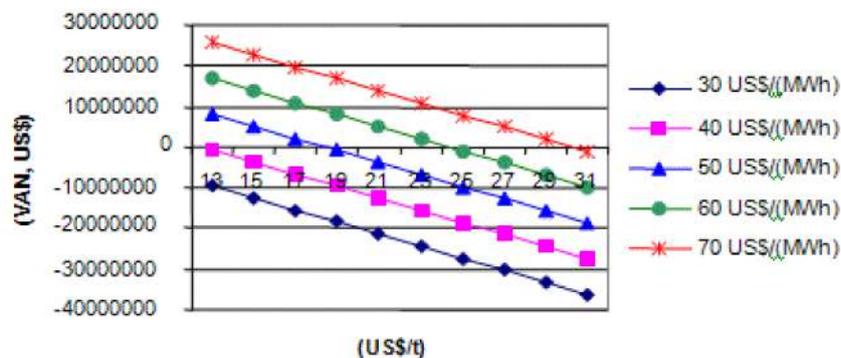


Fig. 6. Variación del VAN respecto al precio del combustible (leña) y la energía eléctrica para la variante D. Tasa de interés: 8%, Inversión: 459 US\$/(kWh).

La producción sostenida de electricidad, con precios de venta entre 30 y 40 USD/MWh, para las variantes C y D considerando además una tasa de interés de 8% sobre el préstamo, no se justifica atendiendo a que no se obtienen utilidades netas, según muestran las figuras 5 y 6. A partir de 50 US\$/MWh y precio del combustible inferior a los 16,2 US\$/t es que comienza a rendir beneficios netos el proyecto para la variante C; para la D el comportamiento es similar, a diferencia de que el precio de la leña es un poco mayor (18,2 US\$/t). Para un precio de venta de la electricidad de 50 US\$/MWh y al menor costo de adquisición de la leña no se justifica el proyecto para la variante C, atendiendo a que el tiempo de reembolso del capital a invertir es de 5 años y de 4,2 años para la alternativa D, superior en ambos casos al límite máximo que se exige en el sector azucarero, que es de 3 años.

Los resultados más atractivos se obtienen entre 55 y 70 US\$/MWh, precio de la energía eléctrica, lo cual puede propiciar la compra del combustible a un precio más elevado a la Empresa Forestal Integral (EFI) y así esta puede tener un mayor incentivo en lo que respecta a la explotación de sus bosques y al suministro estable de la materia prima (leña). Para la alternativa C es posible pagar hasta 19 US\$/t, cuando la venta de la electricidad se realiza a un precio de 70 US\$/MWh; para un precio inferior, es decir, 60 US\$/MWh la leña se debe pagar hasta 13 US\$/t o a un menor precio (Fig. 5), ya que para 15 US\$/t el tiempo de recuperación de la inversión es de 3,4 años; este último resultado demuestra que el proyecto es sensible al aumento de la tasa de interés en 2% si se toman como base los cálculos realizados para los cuales se asumió una tasa de 6%. Un aumento de la tasa de interés en 2% no provoca la invalidación del proyecto para la alternativa D (Fig. 6), al compararlo con los resultados de la metodología aplicada en la cual se consideró un precio de compra de la leña de 15 US\$/t y de venta de la electricidad de 60 US\$/MWh.

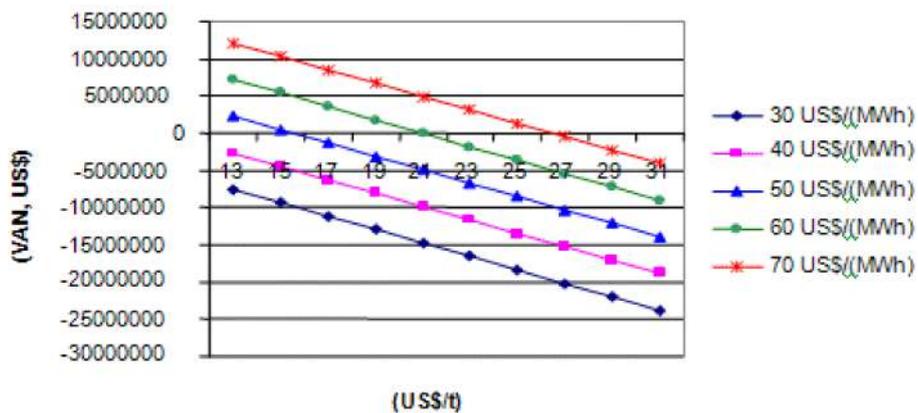


Fig. 7. Variación del VAN respecto al precio del combustible (leña) y la energía eléctrica para la variante C. Tasa de interés: 12%, Inversión: 495 US\$/(kWh).

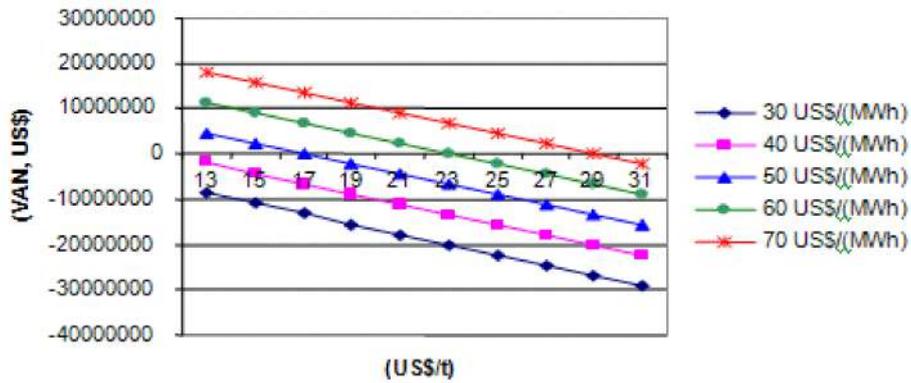


Fig. 8. Variación del VAN respecto al precio del combustible (leña) y la energía eléctrica para la variante D. Tasa de interés: 12%, Inversión: 459 US\$/(kWh).

El aumento de la tasa de interés hasta 12% provoca un estrechamiento del rango de valores en el cual deben moverse los precios de venta de la energía eléctrica para que resulte rentable el proyecto. De acuerdo con las figuras 7 y 8 los precios de venta deben encontrarse entre 60 y 70 US\$/MWh, para considerar viable el proyecto en una u otra variante (C y D). Para los precios de venta más bajos será necesario optar por un costo de adquisición de la leña inferior a los 15 US\$/t, mientras que a precios cercanos o igual a los 70 US\$/MWh se pueden erogar 21 US\$ por cada tonelada de leña si seleccionamos la alternativa D; en el caso de la variante C el importe sería hasta 19 US\$/t. Como se aprecia en las figuras anteriores para los precios de 30, 40 y 50 US\$/MWh no resulta económicamente factible ninguna de las alternativas, por muy bajo que sean los precios en la compra del combustible.

Evaluación exergética de las alternativas

De los resultados del balance exergético se puede apreciar que el elemento con mayor irreversibilidad es la caldera para las dos variantes (C y D) con valores respectivos de 92,9 y 92,4% de la exergía total que se destruye en cada instalación. Esto se debe a la elevada diferencia de temperatura en que se produce la transferencia de calor de los gases producto de la combustión y el agua que se calienta y evapora, y al propio proceso de combustión que es en sí un gran generador de irreversibilidades. Las irreversibilidades en la turbina de condensación ocupan el segundo lugar en cuanto a magnitud en cada una de las instalaciones estudiadas (Tabla 3).

Tabla 3. Eficiencia exergética de los subsistemas para las alternativas C y D

Nº	Subsistemas	Alternativa C			Alternativa D		
		Fuel, kW	Producto, kW	e, %	Fuel, kW	Producto, kW	e, %
A	Generador de vapor	101 053,8	24 914,9	24,7	121 204,5	32 073,84	26,46
B	Expansor de purga	95,1	54,79	57,61	124,78	76	60,91
C	Turbina /contrapresión	6 179,31	4 500	58,7	6 673,2	3 500,0	52,34

D	Turbina /condensación	8 912,47	5 000	56,1	13 917,21	9 000	64,7
E	Bomba /condensado	3,3	0,02	0,61	3,57	0,03	0,84
F	Proceso	9 949,14	7 063,9	71,0	11 560,73	8 511,87	73,62
G	Desaireador	764,04	492,17	64,42	864,25	533,34	61,71
H	Bomba /alimentación	111,7	29,14	26,09	153,4	34,03	22,18
	Total	100 703,8	15 689,9	15,58	120 844,5	21 004,9	17,38

La variante D presenta una eficiencia exergética (grado de perfección termodinámico) mayor que la C con un valor de 17,38%, es decir, el aprovechamiento de la exergía total disponible es más intenso. La principal causa que motiva este comportamiento se debe a que los parámetros del vapor en la variante D son mayores que en la C, situación que contribuye a disminuir las irreversibilidades en los procesos de transformación de la energía (Tabla 3).

3.3. Evaluación termoeconómica de las alternativas

El análisis de los costos exergoeconómicos de los flujos permite apreciar que el costo exergético del producto de la caldera es 2,21 veces el costo del *fuel*. Esto es consecuencia de la generación de grandes irreversibilidades en este elemento. Los costos termoeconómicos del *fuel* y el *producto* no presentan variaciones apreciables, fundamentalmente para la variante D, lo cual evidencia la utilidad de la cogeneración, que produciendo electricidad no provoca un incremento importante en los costos.

El costo exergoeconómico de los flujos de electricidad son los de mayor cuantía, estos resultados son lógicos, ya que la energía eléctrica es el producto más acabado. Para las dos alternativas analizadas no se producen variaciones apreciables de los costos termoeconómicos cuando no se tienen en cuenta los costos de amortización, operación y mantenimiento ($Z^* = 0$) (Tablas 4 y 5), lo cual demuestra que en el funcionamiento diario de la planta el costo del combustible (*fuel*) es el que mayor influencia tiene sobre el costo de producción. El costo termoeconómico en el subsistema generador de vapor resulta el más apreciable, entre 46 y 50% del total para el *fuel* y el *producto*, debido a la influencia del combustible como flujo determinante en los costos.

Tabla 4. Costos termoeconómicos de la alternativa C

Subsistemas	Costo termo económico del <i>fuel</i> , pf, ϕ/s	Costo termo económico del <i>fuel</i> , p*f $Z = 0$, ϕ/s	Costo termo económico del <i>proa</i> , pP, ϕ/s	Costo termo económico del <i>proa</i> , p*P $Z = 0$, ϕ/s
Generador de vapor	9,2307	9,1803	10,5607	8,8203
Expansor de purga	0,056	0,0453	0,0609	0,0453
Turbina/contrapresión	2,681 8	2,3179	2,9659	2,3179
Turbina/condensación	3,9601	3,4004	4,48	3,4003

Bomba/condensado	0,0022	0,0017	0,0076	0,0017
Proceso	4,3179	3,732	5,1379	3,732
Desaireador	0,3687	0,3113	0,3957	0,3114
Bomba/alimentación	0,0736	0,0575	0,09	0,0575

Tabla 5. Costos termoeconómicos de la alternativa D

Subsistemas	Costo termo económico del fuel, pf, ϕ/s	Costo termo económico del fuel, p*f Z = 0, ϕ/s	Costo termo económico del proa., pP, ϕ/s	Costo termo económico del prod., p*P Z = 0, ϕ/s
Generador de vapor	10,8707	10,8235	12,2206	10,8235
Expansor de purga	0,0694	0,057	0,0747	0,057
Turbina/contrapresión	2,6032	2,2932	2,8832	2,2933
Turbina/condensación	5,5518	4,864	6,2519	4,864
Bomba/condensado	0,0023	0,0018	0,0079	0,0018
Proceso	4,5098	3,9729	5,3298	3,9729
Desaireador	0,3822	0,3279	0,4102	0,328
Bomba/alimentación	0,0983	0,0782	0,1153	0,0782

El costo termoeconómico de producción de la energía eléctrica para la variante D resulta ligeramente inferior a la C ($0,4 \phi/kWh < 0,42 \phi/kWh$), hecho que corrobora la ventaja de utilizar altos parámetros del vapor para la generación de potencia. Como se aprecia este costo representa 13,3% del costo de la energía eléctrica ($3,16 \phi/kWh$) calculada a partir del primer principio de la Termodinámica en el epígrafe 3.1, lo cual demuestra la validez del Segundo Principio al considerar que solo una parte de la energía puede ser convertida en trabajo útil. En la variante C el costo exergético unitario se incrementa 2,54 veces para producir simultáneamente energía eléctrica y calor; sin embargo, en la variante D este resultado es menor con valor de 2,12 veces.

Conclusiones

1. El esquema de cogeneración D presenta los mejores índices e indicadores, tanto técnicos como económicos; la aplicación del mismo permitiría lograr una utilidad neta de 18,2 millones de MLC con una tasa de interés de 6% en toda la vida útil del proyecto. El reembolso del capital necesario ($\$5\,234\,000$ MLC) para costear esta inversión se recupera en 2,7 años.
2. La tasa de interés máxima que se le puede pagar al financista, para las configuraciones C o D, es de 12% atendiendo a que el precio de la energía eléctrica para esta condición debe ser de 60 US\$/MWh, para así considerar un precio estimado de la leña entre 15 y 19 US\$/t.
3. El costo de producción de la energía eléctrica en la variante D ($3,16 \phi/kWh$) resulta competitivo con el de las instalaciones termoeléctricas existentes, considerando para ello el uso de la biomasa forestal como combustible, que es de por sí la más costosa si lo comparamos con el del bagazo o la paja.

4. La variante D presenta una eficiencia exergética (grado de perfección termodinámico) mayor que la C, con un valor de 18,38%; es decir, el aprovechamiento de la exergía total disponible se produce con menos irreversibilidades. La principal causa que motiva este comportamiento se debe a que los parámetros del vapor en la variante D son mayores que en la C, situación que contribuye a disminuir las irreversibilidades en los procesos de transformación de la energía.

5. Para las alternativas C y D no se producen variaciones apreciables de los costos termoeconómicos cuando no se tienen en cuenta los costos de amortización, operación y mantenimiento ($Z^* = 0$), lo cual demuestra que en el funcionamiento diario de la planta el costo del combustible (fuel) es el que mayor influencia tiene sobre el costo de producción.

Bibliografía

- AHERN, J. E. *Exergy Method of Energy Systems Analysis*. John Wiley & Sons, New York, 1980.
- ANDRADE, E.; W. GALLO Y S. AZUCENA. «Avaliação Exergética e Termoeconomica de um Sistema de Cogeração de Industria Petroquímica», III Conferencia Iberoamericana de Ingeniería Mecánica, ciudad de La Habana, 1997.
- BARBOSA, L. Y E. SILVA. «Posibilidades de incremento da geração de electricidade pelo sector sucro-alcooleiro no estado de Sao Paulo». II Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, UNICAMP, 12-14 de diciembre, pp. 421-425, 1994.
- BARREDA, E. R. Y J. Llagostera. *Evaluación de alternativas de cogeneración en centrales azucareros cubanos*. UNICAMP, Brasil, 1996.
- BARREDA, R. «Avaliação Termoeconómica do Sistema de Cogeração da Usina Vale do Rosario». Tesis de Doctorado. UNICAMP, Brasil, 1999.
- BEATÓN, P. Y E. SILVA. *Pruebas de balance térmico en calderas para bagazo*. ISPJAM, Santiago de Cuba, 1991.
- BEEHARRY, R. «Extended Sugarcane Biomass Utilization for Exportable Electricity Production in Mauritius». *Energy*, 1996.
- BRAZZALE, R. «Cogeneration in Australia». *Cogeneration and On-Site Power Production*, v. 1, No. 5, September-October, pp. 61-63, United Kingdom, 2000.
- CALVO, A. «Valoración exergética de la industria azucarera: La cogeneración». *Ingeniería Energética*, v. XV, No. 3, pp. 3-16, ciudad de La Habana, 1994.
- CAMPOS, J. C. Y L. SANTOS. «La Termoeconomía como herramienta para la explotación en las plantas industriales». IV Conferencia del CETA, Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, 1998.
- HORLOCK, J. H. «Cogeneration-Combined Heat and Power (CHP)». *Thermodynamics and Economics*. MALABAR, Florida, USA, 1997.
- KNIGHT, B. Y A. WESTWOOD. «Global Growth. The World Biomass Market». *Renewable Energy World*. v. 1, No 1, January-February, pp. 118-127, United Kingdom, 2005.
- NÚÑEZ, O. *et al.* *Consumo y flujos de combustibles forestales en los sectores residencial, pequeño industrial y alimenticio estatal de la provincia de Guantánamo, Cuba*. Informe técnico del proyecto TCP/FAO/CUB/8925(A), Guantánamo, 2001.
- SIMS, H. Y K. RICHARDS. «Bioenergy for the Global Community». *Renewable Energy World*, v. 1, No 1, January-February, pp. 128-133, United Kingdom, 2004.
- VALERO, A. Y M. LOZANO. *Curso de Termoeconomía*. España: Centro Politécnico Superior de Ingenieros, Universidad de Zaragoza, 1994.

Adición de residuos sólidos mineros para el incremento de la producción de biogás

Addition of solid mining residues for the increment of the production of biogas

Ing. Ileana Pereda Reyes, Ing. Ramón Chao** y Dr. Deny Oliva Merencio**

** Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), Marianao, La Habana, Cuba.*

*** Instituto de Investigaciones Porcinas. Gaveta Postal No1. Punta Brava 19200. Ciudad de La Habana, Cuba.*

e-mail: ipereda@ceter.cujae.edu.cu

Resumen

En el presente trabajo se expone el estudio experimental realizado en un digester de 15 m³ de capacidad, operando en semicontinuo, para registrar y confirmar el papel de los residuos sólidos mineros (Cola) de la industria cubana de extracción del níquel. El efecto de la adición de Cola sobre este sistema anaerobio fue analizado a través de la evolución de su producción de biogás. Se midió la cantidad de biogás producido antes de comenzar la adición de la Cola, durante la adición de la misma y después de terminar con esta práctica. Para realizar este estudio se utilizó residual porcino proveniente de una granja de más de cien cerdos. Se adicionó Cola a razón de 5 mg por cada litro de residual alimentado al reactor. La media histórica de eficiencia en la eliminación de la demanda química de oxígeno es de 72% y pasó a 92% por la adición de la Cola. El incremento en la producción de biogás por día fue de aproximadamente 5 m³, para todo el período de adición de Cola al reactor. Los valores promedio en la producción de biogás diaria de este reactor, en los períodos de no adición de Cola, coinciden con la media de producción.

Palabras clave: Digestión anaerobia, micronutrientes, biogás.

Abstract

In the present paper we expose the experimental study accomplished in a biogas digester of 15 m³ capacity, operating in a semi-batch regime, in order to register and confirm the role of adding solid mining residues of the Cuban industry of extraction and processing of nickel. The effect of the addition of solid mining residues on the anaerobic digestion was analyzed through the evolution of its biogas production. The quantity of biogas produced was measured in three moments, before, during the addition of solid mining residues and after the end of that practice. In order to accomplish this study it was used manure from a small pig farm of over one hundred pigs. The proportion of solid mining residues added was 5 mg per liter of manure introduced in the reactor. The historical mean efficiency in the elimination of the chemical oxygen demand was 72 % and got 92 % with the addition of the solid mining residues. The increment

in the biogas production per day was to approximately 5 m³, for the whole period of addition of solid mining residues into the reactor. The mean values in the daily production of biogas in this reactor, in the periods of no addition of solid mining residues, coincide with the average of production.

Keywords: Anaerobic digestion, micronutrients, biogas.

Introducción

En el análisis de la información relativa de la digestión anaerobia se puede constatar que un mejor conocimiento de las bases termodinámicas, microbiológicas y cinéticas del proceso anaerobio facilita el diseño de equipos que pueden competir con otras técnicas alternativas, especialmente en el caso de tratamiento de vertidos de alta carga, como es el caso de los residuos ganaderos [Wheatley *et al.*, 1999, Ryhiner *et al.*, 1993; Jih y Huang, 1994; Farhan *et al.*, 1997; Holst *et al.*, 1997; Lettinga *et al.*, 1997; Pérez *et al.*, 1998].

La digestión anaerobia permite transformar la materia orgánica en dióxido de carbono y metano (biogás), aprovechándose de forma directa o mediante cogeneración. Dicho proceso involucra un conjunto de reacciones que transcurren en serie o serie-paralelo, asociadas al metabolismo de numerosos microorganismos, intermediarios necesarios para transformar la materia orgánica compleja en sustratos simples fermentables por las bacterias metanogénicas.

El tratamiento anaerobio de residuales, por ser un proceso biológico, requiere no sólo de los llamados macronutrientes (N, P, K, S, Ca y Mg), sino también de los denominados micronutrientes (Fe, Ni, Co, Mn, Zn, Mo y Cu) y factores estimulantes al proceso, los cuales en cantidades muy pequeñas (trazas), son esenciales para el óptimo desarrollo de los microorganismos.

La adición de diferentes elementos metálicos con vistas a mejorar el proceso anaerobio, tanto en su arrancada o en momentos de estrés, ha venido incrementándose en los últimos tiempos, existiendo bases teóricas bien fundamentadas para la realización de esta práctica.

En trabajos previos, mencionados anteriormente, se han obtenido una serie de resultados que pueden ser considerados trascendentales para el trabajo que aquí se presenta, los cuales se pueden resumir en que:

- Algunos metales son considerados elementos obligatorios en el proceso anaerobio (Fe, Ni, Co).
- Existe necesidad de agentes estimulantes y catalizadores al proceso de digestión anaerobia.
- Se conoce del efecto positivo que se tiene al emplear Fe en residuales con alto contenido de sulfatos.
- Los procesos anaerobios a escala industrial demoran mucho tiempo para llegar a operar en condiciones estables (de seis meses a un año).
- Para garantizar estimular los procesos anaerobios, tanto a nivel de laboratorio como a escala industrial, se emplean sales comerciales que se deben aplicar de forma limitada.

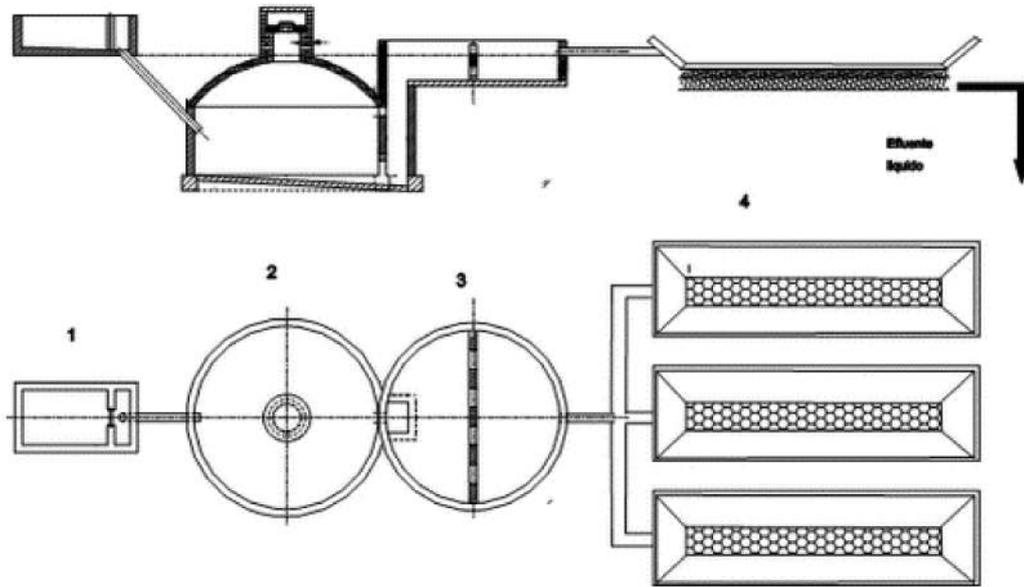
Cuba dispone de uno de los yacimientos de níquel y cobalto más importante del mundo, respaldado por una alta producción, de la que se generan residuos mineros conocidos como Colas. Estas Colas tienen elevado contenido de algunos metales que resultan imprescindibles para las bacterias productoras de metano, que son los microorganismos más importantes en el proceso anaerobio [Espinosa *et al.*, 1995; Kida *et al.*, 1991 y 2001; Lin *et al.* 1992 y 1993; Osuna *et al.*, 2003; Pavlostathis, 1991; Sánchez-Hernández, 1994; Speece *et al.*, 1983; Zhang *et al.*, 2003].

En virtud de los resultados obtenidos por Pereda *et al.* [2006], trabajando con Cola a nivel de laboratorio se decidió estudiar el efecto de la adición de la Cola en un digestor de escala semiindustrial, que estuviera en funcionamiento y cuyo principio de operación permitiera la confirmación de los resultados expuestos en el trabajo mencionado.

Descripción de la instalación

Desde hace varios años el Instituto de Investigaciones Porcinas (IIP), ha desarrollado su propia tecnología anaerobia, basada fundamentalmente en innovaciones a los digestores convencionales chinos de cúpula fija. Estos diseños han sido instalados en varios lugares del país y del Caribe. También se han montado varios de estos reactores en áreas de ese Instituto para el tratamiento de los residuales que se generan en varias granjas de cerdos que se estudian con fines veterinarios.

Para el estudio que se expone en este capítulo del trabajo se escogió un digestor anaerobio que trata el residual proveniente de una de estas naves con un sistema tecnológico de ciclo completo de 10 cerdas reproductoras y toda su descendencia (100-117 cabezas totales). Este digestor es de cúpula fija de 15 m³ y trabaja con un TRH de 20 días. El biogás se recolecta en una bolsa de polietileno fijada al terreno mediante un sello hidráulico. El efluente procedente del digestor, se deposita en el lecho de secado para la separación de la fracción líquida y sólida y el secado posterior de esta última por medio de la energía solar durante 15 días (Fig. 1).



*Fig. 1. Sistema de tratamiento de residual porcino digester-lecho de secado.
1. Tanque de carga. 2. Digestor de cúpula fija. 3. Tanque de compensación.
4. Lechos de secado.*

El lecho de secado está compuesto por divisiones que tienen un área de $5,2 \text{ m}^2$ cada una incluyendo 1 m^2 de área de filtro, el cual consta de una rejilla de aluminio en su parte inferior para la evacuación del líquido, encima de la cual se colocó una capa de piedra $\frac{3}{4}$ pulgadas de 25 cm de espesor y a continuación arena lavada con un espesor de 15 cm.

Este digester se seleccionó debido a que sus condiciones operacionales son similares a las estudiadas a nivel de laboratorio, como son:

- La alimentación del digester se realizó una vez a la semana.
- La única agitación se produce por la entrada de la alimentación.
- En los períodos entre alimentación funciona como un reactor discontinuo.
- El intervalo de temperatura de trabajo es mesofílico.
- Alto contenido de nitrógeno en el residual a tratar.
- Residual con alta carga contaminante.

Metodología

Para observar el efecto positivo de la adición de la Cola en este digester se tomó como parámetro de referencia la producción de biogás generada cada 24 h. Se estudió la evolución del biogás producido en 6 TRH consecutivos. Se empleó para la medición un contador de gas acoplado a su sistema de recolección.

La alimentación básica de los cerdos se mantuvo invariable. Se tomaron muestras esporádicamente para la medición de algunos parámetros característicos del residual tanto en el afluente y como en el efluente (SV, DQO y pH).

Se añadió al digestor 5 mg de Cola, por cada litro de alimentación, por ser esta la dosis óptima encontrada para las condiciones de estudio a nivel de laboratorio.

De los 6 TRH estudiados, el primero se corresponde con los primeros 20 días sin la adición de la Cola, y el último TRH se corresponde con el comportamiento del reactor después de detenerle la adición de Cola. Se realizó un seguimiento por 4 TRH consecutivos añadiendo Cola al digestor.

Resultados y discusión

Antecedentes del digestor

Para tener una primera aproximación del efecto positivo de la adición de la Cola y comparar los resultados que se fueron obteniendo fue necesario revisar la «historia» del digestor bajo estudio.

A continuación se muestra la Tabla 1, donde se resumen las características promedio del residual y el comportamiento histórico de los parámetros principales del reactor [Chao *et al.*, 2000].

Tabla 1. Características históricas de la operación del digestor

	SV, %	DQO, mg/L	pH
Entrada al digestor	5,15	65 107	6,69
Salida del digestor	1,40	18 092	7,18
Eficiencia, %	73	72	-

Efecto de la adición de la Cola

En la tabla 2 se exponen los resultados de la medición de algunos parámetros fundamentales del residual y del comportamiento del proceso anaerobio durante los 4 TRH correspondientes a la adición de la Cola en el reactor bajo estudio.

Tabla 2. Características del residual antes y después de ser digerido, durante el período de adición de la Cola

	SV, %	DQO, mg/L	pH
Entrada al digestor	4,33	28 949,25	7,45
Salida del digestor	0,225	1 193,1	7,14
Eficiencia, %	94,8	95,9	-

Como puede observarse, existe un incremento notable en la eficiencia de eliminación, tanto de la demanda química de oxígeno como en los sólidos volátiles contenidos en el sistema.

En la figura 2 se evidencia nítidamente el aumento de la cantidad de biogás producido durante los períodos de TRH en los que se añadió Cola al digestor, con relación a los períodos correspondientes a antes de comenzar dicha adición y después de detener esa práctica.

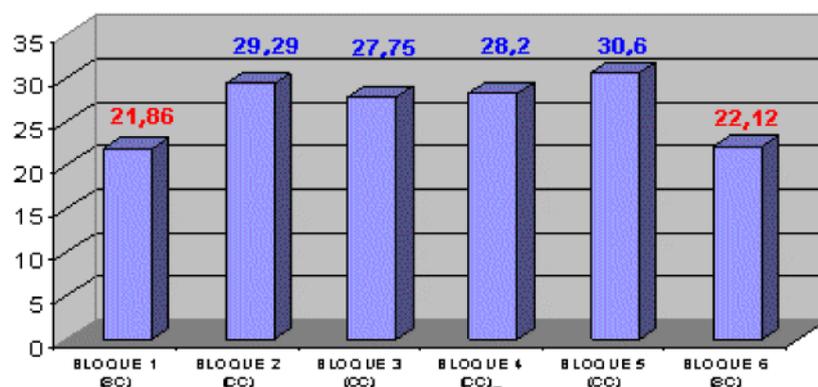


Fig. 2. Producción de biogás diaria promedio por bloques de TRH durante el período experimental (SC- sin adición de Cola, CC- con adición de Cola).

También se aprecia que se llega a obtener, como mínimo, más de 5 m³ adicionales de biogás diario, a partir del suministro de Cola al reactor. Este resultado amplía el espectro de uso de la Cola para sistemas que tratan este tipo de residual. Es posible que una de las causas del incremento ostensible en la producción de biogás, desde la adición de la Cola, radique en un desbalance de micronutrientes en el residual.

Análisis estadístico

Para validar la experimentación realizada en el reactor de cúpula fija de 15 m³ del IIP se recurrió al análisis estadístico para demostrar la confiabilidad de lo obtenido en esta etapa.

Se estudiaron los datos que se habían registrado antes (BLOQUE 1) y después de la adición de la Cola (BLOQUE 6), y se sometieron al análisis estadístico comparativo, medias y desviaciones estándar, para determinar si existían diferencias significativas entre ellos.

El análisis comparativo de las medias se llevó a cabo a través de la t de Student, y la de las desviaciones estándar mediante la F de Fisher, con 95% de confianza para ambas pruebas. Los resultados se pueden observar en la tabla 3; muestran que no hay diferencias significativas entre las medias de cada bloque. Lo mismo ocurre para las desviaciones estándar correspondientes a los bloques analizados (Tabla 3).

Tabla 3. Resultados del análisis estadístico entre BLOQUE 1 y BLOQUE 6 mediante comparación de medias y de desviaciones estándar

Comparación	BLOQUE 1	BLOQUE 6
Medias (asumiendo varianzas iguales; -1,9458 +/-6,11385 [-8,05965 ; 4,16805])	20,1745 +/-6,56938 [13,6051; 26,7439]	22,1203 +/- 3,00908 [19,1112; 25,1294]
Desviaciones estándar	7,8579 [5,19544; 15,993]	4,20639 [2,89331; 7,67923]

Estos resultados indican que se pueden analizar los dos bloques sin adición de Cola (1 y 6) como un solo bloque para su comparación con los correspondientes al período de adición de Cola.

Posteriormente se realizó el análisis estadístico comparativo entre los bloques sin Cola (BLOQUES 1 y 6) y los bloques con adición de Cola (BLOQUES 2, 3, 4 y 5). Un resumen estadístico de los resultados de esta comparación se muestra en la tabla 4. Para determinar estadísticamente si había diferencias significativas entre las medias y las desviaciones estándar se desarrolló un procedimiento similar.

La comparación entre las medias se realizó con una confianza de 95% y se obtuvo que hubiera diferencias significativas entre los datos recogidos sin la adición de la Cola, BLOQUE 1,6 y los recogidos durante la adición de la Cola, BLOQUE 2, 3, 4 y 5 (Tabla 4). De forma similar se operó en el estudio comparativo entre las desviaciones estándar con una confianza de 95%, obteniéndose que no había diferencias significativas entre éstas (Tabla 4).

Tabla 4. Resultados del análisis estadístico entre BLOQUE 1-6 y BLOQUE 2-3-4-5 mediante comparación de medias y de desviaciones estándar

Comparación	BLOQUE 1-6	BLOQUE 2-3-4-5
Medias (asumiendo varianzas iguales; -5,59095 +/-4,06631 [-9,65726; -1,52465])	21,2555 +/- 2,9747 [18,2808; 24,2302]	26,8465 +/- 2,34541 [24,501; 29,1919]
Desviaciones estándar	5,98182 [4,48868; 8,96761]	7,71444 [6,37385; 9,77439]

Mediante el análisis estadístico realizado se puede concluir que los resultados de la experimentación desarrollada en el sistema semicontinuo son confiables y representativos. Queda validado estadísticamente que el empleo de la Cola arroja diferencias significativas en el comportamiento del sistema anaerobio estudiado.

Valoración económica

En este apartado se pretende tener un acercamiento a las ventajas económicas del uso de las Colas como suministradoras de nutrientes en el tratamiento anaerobio de residuales. Como el presente trabajo se ciñó al estudio básico del efecto de la adición de Cola al proceso de digestión anaerobia, se debe continuar investigando el tema antes de poder dar un valor definitivo en cuanto al potencial económico que éstas pueden representar a nivel industrial.

Esta aproximación económica se realizará a partir de las dos variantes, hasta ahora identificadas por el alcance limitado y el estado inicial de esta investigación, que introducen un efecto económico positivo por el uso de la Cola en sistemas anaerobios, los cuales son:

1. Sustitución de sales minerales comerciales que suministran nutrientes esenciales a este tipo de sistemas y que son añadidas como práctica mundial.

2. Incremento de la producción de biogás en sistemas anaerobios convencionales que evidencian desbalance de nutrientes, los cuales serían aportados a través de la Cola. En el caso de la primera variante de efecto económico positivo se tomará como ejemplo la planta de tratamiento de aguas residuales y residuos sólidos de la fábrica FRIWEIKA, dedicada a la fabricación de productos a partir de la papa, ubicada Alemania. Esta planta trata diariamente 100 toneladas de residual en un reactor tipo UASB de 3 600 m³ de capacidad. En ella se consume diariamente una solución de sales minerales, tributaria de nutrientes, suministrada por una firma británica que no tiene competencia en Alemania, y se añade a razón de 1,5 L/d. El costo de esta solución es de 25€/L. Se conoce que el consumo de la solución de sales minerales es de 1,5 L/d y que la planta opera los 360d/a, entonces el costo por la compra de dicha solución es de 13 500€/a (~15 300 CUC/a).

En el futuro de Cuba, el tratamiento anaerobio de aguas residuales debe alcanzar una aplicación más amplia a nivel industrial, sobre todo en industrias generadoras de residuales complejos y altamente contaminante. El biogás producido a este nivel debe tener un valor agregado que consiste en la posibilidad de generación de energía eléctrica a partir de éste. En este punto, la opción de suministrar micronutrientes para el buen balance de los sistemas anaerobios, a través de la Cola, evitaría la compra de soluciones como la que utiliza actualmente la planta de tratamiento anteriormente comentada.

En esta valoración cabe destacar que la sustitución de dichas sales, se realizaría por un polvo homogéneo que actualmente es un residuo de la industria de la extracción del Ni y el Co, cuya utilización implicaría costos mínimos asociados a su recogida y transportación.

La otra arista en la valoración económica radica en la posibilidad del aumento de la producción de biogás en plantas convencionales existentes –como el caso bajo estudio y expuesto en este trabajo–, las cuales fueron diseñadas y construidas para una producción de biogás diaria menor y con un aproximado de 70% en la eliminación de la DQO. Estas plantas podrían lograr, añadiendo Cola para un correcto balance de nutrientes en la alimentación de las mismas, una mayor eficiencia en la eliminación de la DQO (más de 90%).

Muchas son las aplicaciones de 1 m³ de biogás, tal como se muestra en la figura 3. Desde el punto de vista económico es plausible el aporte que daría a la recuperación de la inversión de una planta de tratamiento anaerobio, de cualquier envergadura, disponer de una cantidad de biogás extra.

Tal como se obtuvo en el caso estudiado, diariamente se generan como mínimo 5 m³ más de biogás de los que históricamente producía el digester analizado. Teniendo en cuenta que el valor calórico del biogás (60% de CH₄ y 40 de CO₂) es de 21,4 MJ/m³, se pueden realizar algunas propuestas de impacto económico sencillo, pero gráfico (Tabla 5).

Tabla 5. Propuestas de impacto económico por aumento de biogás generado en digestor estudiado

	Equivalencia por m ³	Costo asociado	Impacto por 5 m ³
Sustituyendo diésel	0,5 L de diésel	0,3 CUC/L	0,75 CUC/d
Generando electricidad	6,25 kWe	0,09 CUC/kWh	2,8 CUC/d

Si el biodigestor trabaja a razón de 360 d/a, y sólo por el incremento de la producción de biogás por el empleo de la Cola, se pueden obtener efectos económicos del orden de:

- 270 CUC/a sustituyendo el diésel.
- 1 008 CUC/a si se genera electricidad.

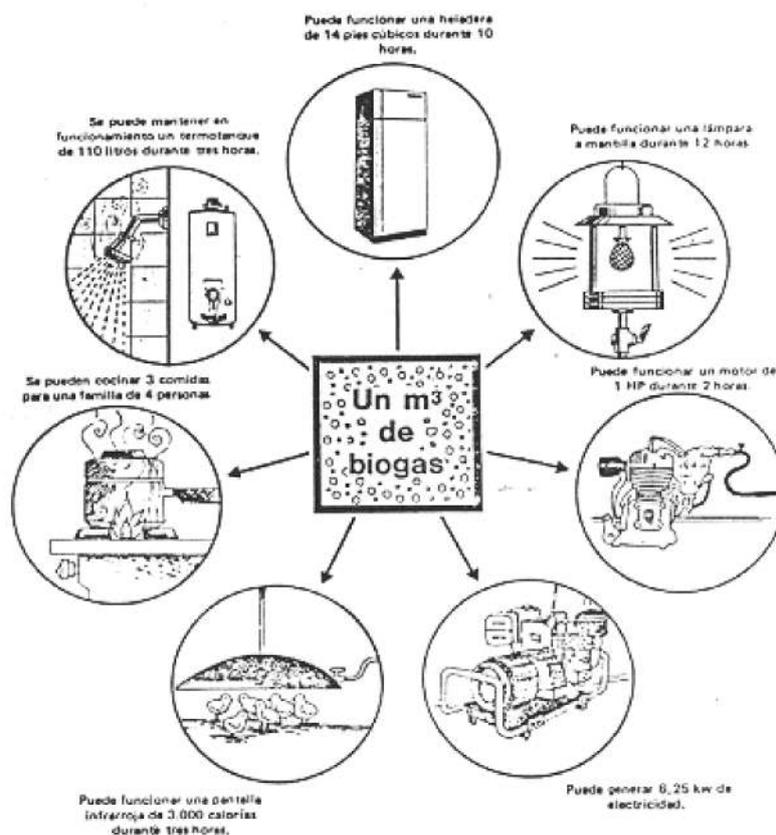


Fig. 3. Diferentes aplicaciones de 1 m³ de biogás (Tomado de Manual para la producción de biogás, Jorge A. Hilbert).

Es conocido que en Cuba existen más de 500 biodigestores convencionales cuyas eficiencias son relativamente bajas si se comparan con reactores de tecnologías más avanzadas. Suponiendo el empleo de la Cola en estos digestores a lo largo de todo el país, se obtendría una contribución económica importante.

Por otra parte, cabe señalar que el empleo de la Cola puede traer otras ventajas aparejadas:

1. Disminución del tiempo de arrancada de reactores de tercera generación que se implementaran en Cuba, principalmente en la industria azucarera.
2. Alta eliminación de la carga contaminante del efluente y disminución de los costos en los procesos de postratamiento.
3. Generación de un valor de uso para la Cola (actualmente material de desecho).

Conclusiones

Se estudió el efecto de la adición de la Cola en sistemas operando en semicontinuo. Después del análisis de los resultados se puede concluir que:

- Al comparar los niveles de eliminación de la DQO en los datos históricos (72-73%) con los obtenidos durante el período de adición de la Cola (94-96%) se puede confirmar el efecto positivo de esta práctica en este tipo de sistema para las condiciones de operación estudiadas.
- El aumento considerable en la producción de biogás en el reactor durante el período de adición de la Cola, corrobora que ésta es capaz de suministrar nutrientes esenciales para el buen desempeño del proceso de digestión anaerobia en general.
- Los resultados obtenidos en este capítulo son estadísticamente confiables y representativos. Se validó que el empleo de la Cola arroja diferencias significativas en el comportamiento del sistema anaerobio estudiado.
- Es posible obtener efectos económicos positivos a partir de la adición de la Cola como sustituta de sales comerciales minerales existentes en el mercado; y por el incremento de la producción de biogás obtenido por el empleo de tales residuos sólidos mineros.

Bibliografía

- ESPINOSA, A.; L. ROSAS, K. ILANGOVA Y A. NOYOLA. «Effect of Trace Metals on the Anaerobic Degradation of Volatile Fatty Acids in Molasses Stillage». *Water Science and Technology* 32, (12): 121-129, 1995.
- FARHAN, M. H.; P. H. CHINHONG, J. D. KEENAN Y W. K. SHIEH. «Performance of Anaerobic Reactors During Pseudo-Steady-State Operation». *Journal. Chem. Tech. Biotech.* 69 (1): 45-57, 1997.
- HOLST, T. C.; A. TRUC Y R. PUJOL. «Anaerobic Fluidized Beds: Ten Years of Industrial Experience». *Wat. Sci. Tech.* 36 (6/7): 415-422, 1997.
- JIH, C.-G. Y J.-S. HUANG. «Effect of Biofilm Thickness Distribution on Substrate-Inhibited Kinetics», *Wat. Res.* 28 (4): 967-973, 1994.
- KIDA, K.; N. MORIMURA, N. ABEA Y Y. SONODA. «Biological treatment of Shochu distillery wastewater». *Proc. Bioch.* 30, 125-132, 1995.
- KIDA, K.; T. SHIGEMATSU, J. KIJIMA, M. NUMAGUCHI, Y. MOCHINAGA, N. ABE Y S. MORIMURA. «Influence of Ni²⁺ and Co²⁺ on Methanogenic Activity and the Amounts of Coenzymes Involved in Methanogenesis», *Journal of Bioscience and Bioengineering* 91 (6): 590-595, 2001.
- LETTINGA, G.; J. FIELD, J. VAN LIER, G. ZEEMAN Y L. POL. «Advanced Anaerobic Wastewater Treatment in the Near Future». *Wat. Sci. Tech.* 35 (10): 5-12, 1997.

- LIN, C-Y. «Effect of Heavy Metals on Acidogenesis in Anaerobic Digestion», *Water Research*, 27 (1): 147-152, january, 1993.
- LIN, C-Y. «Effect of Heavy Metals on Volatile Fatty Acid Degradation in Anaerobic Digestion». *Water Research* 26 (2): 177-183, february, 1992.
- OSUNA, M. B.; J. IZA, M. ZANDVOORT Y P. N. L. LENS. «Essential metal depletion in an anaerobic reactor». *Water Science and Technology* 48 (6) 1–8, IWA Publishing, 2003.
- PAVLOSTATHIS, S. G. «Kinetics of Anaerobic Treatment: A Critical Review». *Critical Reviews in Environmental Control* 21 (5-6): 411-490, 1991.
- PÉREZ, M.; L. I. ROMERO Y D. SALES. «Comparative Performance of High Rate Anaerobic Thermophilic Technologies Treating Industrial Wastewater». *Wat. Res.* 32 (3): 559-564, 1998.
- RYHINER, G. B.; E. HEINZLE Y I. J. DUNN. «Modeling and Simulation of Anaerobic Wastewater Treatment and its Application to Control Design: Case Whey». *Biotechnol. Progress* 9 (3): 332-343, 1993.
- SÁNCHEZ-HERNÁNDEZ, E. P. «Effect of Pyrite Addition on Anaerobic Digestion». *Bioresource Technology* 47 (2): 189-190, 1994.
- SPEECE, R. E.; G. F. PARKIN Y D. GALLAGHER. «Nickel Stimulation of Anaerobic Digestion». *Water Research* 17 (6): 677-683, 1983.
- WHEATLEY, A. D.; K. A. JOHNSON Y C. I. WINSTANLEY. «The Reliability of Anaerobic Digestion for the Treatment of Food Processing Effluents». *Anaerobic Digestion, IAWPRC*, pp. 135-146. 1999.
- ZHANG Y.; Z. ZHANG, K SUZUKI Y T. MAEKAWA. «Uptake and Mass Balance of Trace Metals for Methane Producing Bacteria». *Biomass and Bioenergy* 25 (4): 427-433, 2003.

Eco Solar es una publicación científica electrónica trimestral para los especialistas de las fuentes renovables de energía. Se dedica a la promoción de temas relacionados con la energética, las energías alternativas, la física ambiental, la arquitectura bioclimática, el impacto sobre el medio ambiente la educación ambiental, la termoconversión, la eficiencia energética, y las energías de origen hidráulico, fotovoltaico, eólico, solar, biomasa y ciencias relacionadas.

DIRECTOR GENERAL:

Dr. Luis Bérriz Pérez.

DIRECTOR:

Lic. Manuel Álvarez
González.

EDITOR:

Lic. Alejandro Montecinos
Larrosa.

CORRECCIÓN:

M Sc. Roberto Manzano
Díaz.

Ing. Jorge Santamarina

DISEÑO ELECTRÓNICO:

D.I. Antonio Romillo Polaino.

TRADUCCIÓN:

Lic. Lázaro O´Farril Lazo.

CONSEJO ASESOR:

Dr. Luis Hernández (Energía fotovoltaica)

Dr. Conrado Moreno Figueredo (Energía
eólica)

Lic. Bruno Henríquez Pérez (Física
ambiental)

Dr. Jorge Luis Paretas (Energía hidráulica)

Dr. Dania González Couret (Arquitectura
bioclimática)

Dr. Jorge Guardado (Biomasa)

Dr. Sergio Corp Linares (Energía solar
térmica)

Lic. Leonor Turtós Carbonell (Impacto
ambiental)

Lic. Alejandro Montecinos Larrosa (Energía
humana)

Lic. Ricardo Bérriz Valle (Educación
ambiental)



**SOCIEDAD CUBANA PARA LA PROMOCIÓN
DE LAS FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA Y EL RESPETO
AMBIENTAL**

Calle 20 no. 4113, esquina a 47, Miramar, Playa,
Ciudad de La Habana, Cuba. Código Postal: 11300.

Teléfono: (537) 205-9949.

Apartado postal: 6611, CP: 10600, Ciudad de La Habana, Cuba.

e-mail: editora@cubasolar.cu

<http://www.cubasolar.cu>