



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTAL DE CUBASOLAR

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

2



Estado actual y desarrollo de la energía eólica en Cuba.....	1
Viabilidad social de los proyectos de electrificación fotovoltaica con miniredes en Cuba.....	10
Hacia una estrategia de cogeneración con biomasa.....	20
Escenarios de cambio climático para la energía solar y eólica durante el siglo XXI.....	29
Estudio de los Días-Grado con fines térmicos en Santa Clara.....	39
Biomasa torrada como sustituto de la madera.....	46
Obtención por vía electroquímica de electrodos composite sobre la base de níquel para el desprendimiento de hidrógeno.....	54
Biogás a partir de los efluentes de la pasteurización de la pulpa de café.....	58

Estado actual y desarrollo de la energía eólica en Cuba

Present stage and development of wind energy in Cuba

Conrado Moreno Figueredo
Centro de Estudios de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER)
ISPJAE, Calle 127 s-n., La Habana, Cuba.
Tel.: (537)205060
Fax: (537)272964
E-mail: conrado@ceter.ispjae.edu.cu
Guillermo Leiva Viamonte
ECOSOL SOLAR, COPEXTEL S.A.
Ave 31, La Habana, Cuba.
Leandro Matos Velunza
Unión Eléctrica (UNE)
Ave. Salvador Allende, La Habana, Cuba.

Resumen

En el trabajo se presenta una panorámica del estado actual de la energía eólica en Cuba. Se presentan, además, aspectos de interés de la política gubernamental y del programa estratégico de la energía eólica para el decenio del 2000 al 2010. De esta estrategia se deriva el proyecto del parque eólico de Cayo Coco que aquí se expone. El propósito principal de este proyecto es la instalación de un parque eólico acoplado a una red eléctrica local alimentada desde plantas de generación diesel en la pequeña isla conocida como Cayo Coco. Este proyecto demostrativo es el primer paso para la aplicación de sistemas híbridos eólico-diesel en pequeñas islas con desarrollo turístico. La primera fuente de electricidad en estos sitios proviene de plantas de generación diesel. Este proyecto plantea una alternativa a partir de una fuente de energía limpia. Dicho proyecto es apoyado por la Unión Eléctrica de Cuba. En el trabajo se presentan las características de este proyecto demostrativo y de otro proyecto de un parque eólico de 30 MW en Matanzas. Ambos se encuentran en etapa de negociación.

Palabras clave: energía eólica, sistema híbrido, energía limpia

Abstract

In this paper we present an overview of the present condition of wind power development in Cuba. Besides, other aspects of the governmental policies and the strategic program of wind power for the decade 2000 to the 2010 are presented. The Cayo Coco wind farm project, discussed in this paper, is part the strategy too. The main purpose of this project is the installation of a wind farm connected to the local electrical grid which is fed with diesel plants from Cayo Coco. This demonstrative project is the first step for the application of wind-diesel hybrid systems in small islands with tourism development. The first source of electricity in those sites is diesel generation plants. This project puts forward an alternative from a clean energy source. The project is backed up by the National Electric Utility. In this paper we present the characteristics of this

demonstrative project and another project of 30 MW wind farm in Matanzas. Both are in stage of negotiation.

Keywords: wind energy, hybrid system, clean energy

Introducción

La política energética cubana referida a la electricidad está dirigida a asegurar el suficiente suministro de esta energía acorde con el desarrollo energético esperado. En los últimos cinco años, el consumo energético en Cuba ha crecido establemente en la misma manera que la economía nacional ha recobrado su salud. La generación de electricidad se basa aún en el uso intensivo de los combustibles fósiles, pero la estructura de tal generación ha cambiado. Más de 50 % de toda la potencia es obtenida del llamado crudo nacional, un combustible barato que ha permitido a nuestra economía reducir la importación de petróleo, aunque pagando una cuota de daños al medioambiente. El pronóstico es alcanzar en los próximos cinco años 90 % de la generación de electricidad usando el petróleo nacional, pero también mejorando las tecnologías que reduzcan los impactos medioambientales asociados a su uso.

Cuba cree firmemente que el desarrollo y la aplicación de la potencia eólica, así como otras fuentes renovables de energía, son la clave para el futuro, no solo para nosotros, sino para todo el mundo. Una revisión de las oportunidades del uso de la potencia eólica en nuestro país, muestra que las principales oportunidades están en los sitios donde no hay red eléctrica, fenómeno común en áreas rurales de los países en desarrollo. Miles de sistemas aislados para el bombeo de agua operan en Cuba, pero el uso de pequeños sistemas aislados de energía eólica es limitado y prácticamente no existen.

Situación del uso y la comercialización de la energía renovable

En los últimos quince años, las condiciones básicas han sido creadas para impulsar el uso de algunas energías renovables como complemento al balance energético nacional y para la electrificación de objetivos aislados.

La industria azucarera ha usado tradicionalmente el bagazo (residuo sólido de la molienda de la caña de azúcar) como combustible renovable (en cada campaña millones de toneladas tienen que ser eliminadas) para generar vapor de proceso y complementariamente para generar electricidad para otros usos.

Cerca de 150 micro y mini plantas hidroeléctricas han sido instaladas, la mayoría de ellas entregan electricidad al Sistema Electroenergético Nacional (SEN) y otras suministran electricidad a pequeños poblados no conectados a la red eléctrica nacional. Mas de tres mil sistemas autónomos fotovoltaicos han sido montados para el suministro de consultorios médicos, escuelas, hospitales y centros sociales en áreas rurales no conectadas al SEN.

A pesar de que la Ley Eléctrica Cubana no estimula especialmente el uso y comercialización de las energías renovables, algunas regulaciones complementarias permiten a los productores independientes de energía vender electricidad a la red eléctrica nacional.

En el momento actual estas regulaciones benefician al Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INRH), que maneja y opera las micro y mini plantas hidroeléctricas, y al Ministerios de la Industria Azucarera (MINAZ), que maneja y opera más de 150 ingenios azucareros, algunas docenas de los cuales cogeneran electricidad.

Lo mencionado anteriormente se puede interpretar como un antecedente muy importante pues indica la posibilidad de que la Unión Eléctrica (UNE), que es propietaria y opera la SEN, acepte la compra de electricidad generada mediante energía eólica por productores independientes cubanos, ya sean estatales o privados o por asociaciones comerciales entre compañías cubanas y extranjeras, en estas regiones donde los pronósticos de la UNE indiquen que pueda aparecer déficit de generación, como son los casos de la región occidental y Cayo Coco.

La clave del éxito será encontrar un adecuado y razonable precio de venta, conveniente para ambas partes, considerando que aun no existen incentivos especiales y no se prevén subsidios que vengán a soportar las inversiones en potencia eólica, tanto de fuentes nacionales como extranjeras.

La política energética cubana actual y el uso de la potencia eólica y otras renovables

Como se estableció en la introducción, la política energética actual se pronuncia por un crecimiento continuo del uso del crudo nacional como fuente principal de combustible en las plantas termoeléctricas, que son responsables de más de 83 % de la generación de electricidad en Cuba. Se espera que el petróleo crudo nacional cubra 90 % del consumo de combustible dentro de los próximos cinco años, lo que permitirá al SEN generar electricidad a un costo menor que 0,04 USD/kWh. Para alcanzar exitosamente esta meta una intensiva modernización de las plantas termoeléctricas se lleva a cabo, lo que junto con el combustible barato pueden lograr estabilizar el suministro de electricidad a la red nacional.

La industria azucarera ha sido llamada a incrementar su participación en el balance energético nacional, mejorando principalmente su eficiencia en la generación de electricidad y añadiendo capacidades basadas en el uso del bagazo como combustible principal, una fuente renovable que suministra actualmente cerca de 10 % de la generación anual de electricidad a escala nacional, pero solamente en los cuatro o cinco meses que duran las zafras.

Existen limitaciones prácticas a los intentos de desarrollar el mercado de parques eólicos conectados a la red eléctrica. Las principales limitaciones para el desarrollo del mercado eólico en Cuba son:

- El costo de generación debe estar por debajo del costo evitado de la energía.
- El bajo costo de la electricidad convencional para el sector industrial.

- Gran disponibilidad de combustibles fósiles.
- No hay un programa nacional para el desarrollo de la energía eólica.

Una situación diferente se prevé para las nuevas áreas con desarrollo turístico, principalmente en los cayos de la costa norte, donde varios miles de habitaciones serán construidas en los próximos diez o quince años. Debido a su localización geográfica no es prácticamente factible unir estas áreas a la red nacional por lo que deberán instalarse sistemas eléctricos autónomos.

Donde el desarrollo turístico ya ha comenzado nuevas plantas diesel han sido instaladas, y la electricidad es muy cara (entre 0,09 y 0,11 *USD/kWh*); esto hace que la potencia eólica compita exitosamente. Lo anterior se confirma con la potencialidad del viento en estas regiones donde se alcanzan factores de capacidad mayores de 29 % en las zonas centrales, o de 31 % en las islas de la región centro-este, operando con turbinas eólicas de media y gran capacidad (mayores de 500 *kW*).

Como las soluciones más convenientes en estos casos son parques eólicos conectados a la red eléctrica local o los sistemas híbridos eólico-diesel desde el punto de vista económico y técnico, es necesario hacer un estudio para cada caso, pues las redes locales y las inversiones en cuanto a capacidades de generación tienen actualmente diferentes niveles de desarrollo.

De todas formas, el precio de la electricidad que se establezca es la clave del éxito junto con una política por parte de los tomadores de decisión que permita conformar una estrategia para el desarrollo de la potencia eólica. Se mantiene una falta de comprensión acerca de la potencialidad de esta fuente, una falta de confianza en la tecnología debido al conocimiento limitado de esta, y los problemas en la operación de los proyectos demostrativos aparecen como las mayores limitaciones para el desarrollo de esta estrategia.

El potencial eólico

De acuerdo con el estudio *Evaluación del potencial eólico cubano* (de 1991 a 1998), detenido actualmente por falta de financiamiento, y el *Atlas eólico cubano preliminar*, la costa norte desde Villa Clara hasta Guantánamo es una región de altas velocidades del viento, donde por lo menos ocho zonas han sido identificadas con velocidades medias anuales superiores a 5,7 *m/s* a 10 *m* de altura. No obstante, el régimen de viento no es homogéneo y es fuertemente influenciado por condiciones locales, debido a la positiva interrelación entre los vientos alisios y las brisas locales, los eventos meteorológicos estacionales, tales como los frentes fríos provenientes de Norteamérica y otros que refuerzan el régimen de viento en la costa norte, fundamentalmente en la parte este.

Lo anteriormente mencionado, junto con las ventajas del paisaje y el uso limitado de la tierra, empleada fundamentalmente para la agricultura y el ganado, crean buenas condiciones para instalar entre 200 y 500 *MW* en la isla grande (de 5 a 12 %) de la capacidad de generación instalada actualmente por la SEN en dependencia del tamaño de las turbinas que se empleen.

El uso de la potencia eólica en los cayos de la costa norte también tiene un buen potencial y el mejor pronóstico para en un corto y medio término instalar parques eólicos conectados a la red, debido al excelente régimen de viento y las ya mencionadas condiciones para instalar parques eólicos y los altos costos de generación con la suficiente disponibilidad de terrenos.

Un pronóstico preliminar y parcial, considerando un escenario de crecimiento del turismo de 10 000 habitaciones en los cayos dentro de los próximos diez años, ó 40 *MW* de capacidad de generación distribuida, señala que la potencia eólica pudiera contribuir con no menos de 20 *MW* de capacidad de generación efectiva para una penetración de 50 % (equivalente a instalar no menos de 70 *MW*). En qué medida pudiera ser realista este escenario y cuáles son las verdaderas oportunidades de la energía eólica, son algunos de los aspectos a esclarecer por nuestros investigadores y especialistas en un corto tiempo, conjuntamente con la participación de compañías foráneas interesadas en invertir en el sector eléctrico cubano.

Implementación de la potencia eólica en Cuba

En 1999, una pequeña potencia eólica fue conectada al Sistema Electroenergético Nacional. Basado en tres años de evaluación del potencial eólico (de 1993 a 1996) y un soporte financiero de ONG´s europeas, la UNE (Unión Eléctrica) y el apoyo de la ONG cubana CUBASOLAR, un parque eólico conectado a la red de 2 x 225 *kW* fue desarrollado y puesto en marcha en mayo de 1999.

La capacidad original era de 1 *MW*, pero las limitaciones financieras llevaron a que se instalaran dos máquinas españolas ECOTECNIA 28/225, con 30 *m* de altura de torre e incluido 1 *MVA* de transformador y capacidades de control remoto que permitirán completar su capacidad original en el futuro. El parque eólico ha suministrado a la red alrededor de 998,5 *MWh/año*.

Con la experiencia de ingenieros de ECOTECNIA, un grupo de expertos cubanos desarrolló la ingeniería, la construcción, el ensamblaje en el terreno y la puesta en marcha. El grupo cubano recibió entrenamiento para operar la instalación.

Los datos operacionales de los primeros dos años muestran que las unidades se han comportado como se esperaba, en un régimen de viento con una velocidad media anual de 5,1 *m/s* a 10 *m* de altura, una *k* de Weibull igual a 2,4 y una *C* de 6,2 *m/s*. Con este régimen medio de viento se alcanzaron factores de capacidad mensuales de 22 %.

La capacidad total instalada de turbinas eólicas en Cuba ha permanecido constante e igual a 0,45 *MW*. Otros dos proyectos continúan en negociación.

La proyección es desarrollar por primera vez en Cuba dos proyectos comerciales de generación de electricidad por medio de energía eólica, implementando dos parques eólicos en dos regiones donde la UNE pronostica déficit futuro de electricidad, teniendo en cuenta que como consecuencia de una orientación gubernamental a favor de la conservación del medio ambiente

se ha tornado muy importante para introducir capacidades de generación basadas en tecnologías acordes con el medio ambiente, tanto en sistemas conectados al SEN como sistemas aislados en ecosistemas.

Los objetivos de estos dos proyectos son:

- Implementar antes de 2004 un parque de 30 *MW* conectado al SEN en el punto conocido como La Cumbre, cerca de la ciudad de Matanzas, a 100 *km* al Este de la Habana y a 40 *km* de la playa de Varadero, el principal polo turístico de Cuba.
- Instalar antes de 2005 un parque eólico de 6 *MW* conectado al sistema eléctrico autónomo en Cayo Coco, un polo turístico en desarrollo en el Norte de la provincia de Ciego de Ávila, que tiene un sistema de potencia aislado de la red basada en dos plantas eléctricas diesel, de 3,9 *MW* cada una, y que emplean fuel oil pesado y, además, varias plantas diesel de apoyo de 1 *MW*, de tecnología obsoleta.

Parque eólico de 30 *MW* en la provincia de Matanzas

La región occidental es la más poblada y con la mayor concentración industrial de Cuba, con los dos mayores polos turísticos de la nación: La Habana y la playa Varadero.

A pesar de que esta región tiene cuatro centros de generación con plantas termoeléctricas (una planta con 8 unidades en el Mariel 700 *MW* de potencia instalada, tres plantas en la ciudad de La Habana con más de 200 *MW*, una planta en Santa Cruz del Norte con 300 *MW* y una planta en la ciudad de Matanzas con una unidad de 330 *MW*), todas conectas al SEN por medio de tres líneas de transmisión de 220 *KV* y varias líneas de 110 *kV*, existe un importante déficit de energía en la región, un alto consumo específico de fuel oil y las unidades son de tecnologías obsoletas (excepto la planta de Matanzas), las que han sido mejoradas y parcialmente renovadas en los años recientes.

En los últimos años, el SEN ha cambiado progresivamente la estructura del consumo de fuel oil, sobre la base de quemar directamente el petróleo crudo nacional cuya refinación es difícil y cara. Se prevé que este combustible cubrirá más de 90 % de las necesidades de generación en los próximos años. A pesar de ser mucho más barato el uso del tradicional fuel oil pesado, lo que ha permitido reducir los costos de generación del *kWh*, este cambio produce un incremento de los costos de mantenimiento por el alto contenido de sulfuro, lo que a la vez causa la emisión de miles de toneladas de sustancias contaminantes a la atmósfera, suelos y aguas.

Las condiciones anteriormente descritas son favorables para promover la instalación de un parque eólico 30 *MW*, que contribuya con alrededor de 70 *GWh/año* (estimando un factor de capacidad de 27 %), que sustituye el consumo de casi 16 000 *ton/año* de fuel oil y evita la emisión de 37 000 *ton/año* de sustancias contaminantes.

El parque eólico pudiera estar integrado por turbinas de 750 *kW* (40 unidades), de 1 000 *kW* (30 unidades) o de 1 500 *kW* (20 unidades), dependiendo de los resultados del estudio de factibilidad que debe realizarse, donde algunos aspectos críticos deben tenerse en cuenta en la factibilidad, como la

disponibilidad y precios de la renta de las grúas y camiones de gran capacidad para trasladar los principales componentes de las máquinas, de acuerdo con sus dimensiones.

El parque eólico estaría distribuido a lo largo de uno o ambos lados de la Vía Blanca, la más importante autopista turística en Cuba, en la cima de una elevación de más de 100 *m* de altura por encima del nivel del mar, con una suave inclinación y donde las turbinas tendrían una excelente exposición a los vientos alisios prevalecientes del Noreste. Las máquinas pudieran estar dispuestas en cuatro, tres o dos filas, de acuerdo con la cantidad de unidades, siempre alineadas en filas del NNO al SSE.

El sitio preseleccionado tiene algunas irregularidades y una vegetación dominante de yerbas con aislados arbustos. La tierra se dedica por lo general a la ganadería, no hay poblados ni fábricas en los alrededores y está a 4 *km* de la ciudad de Matanzas, un importante puerto y centro industrial.

Por el Norte y por el Este, el sitio está muy bien expuesto a los vientos dominantes originados por la combinación de los vientos alisios del Noreste, con el refuerzo de las brisas marinas y un excelente accidente geográfico, el Valle de Yumurí, que se extiende al Sudoeste de la colina.

Parque eólico de 6 MW en Cayo Coco

Cayo Coco es uno de los más importantes polos turísticos en desarrollo en Cuba y posee un vertiginoso crecimiento con un impresionante aumento de la demanda eléctrica, por lo que se prevé que la capacidad total a instalar de sistemas de generación autónomos en la región (incluye Cayo Guillermo) alcanzará al menos 40 *MW* en el 2010.

La estrategia de desarrollo actual para el sistema de generación local está basada en la instalación de tres nuevas plantas diesel de potencia nominal de 3,9 *MW*, que usan fuel oil pesado (una de ellas ya se encuentra en operación en Cayo Coco; y otra, en Cayo Guillermo), la conexión de los sistemas autónomos de ambos cayos y el uso de la ya obsoleta planta diesel de 1 *MW* como unidad de apoyo.

El uso de las unidades que usan fuel oil pesado, más eficientes que las existentes, ha permitido reducir el costo de generación del *kWh* en ambos cayos, pero se incrementan las emisiones de gases contaminantes, al mismo tiempo que los sistemas no tienen unidades nuevas de media capacidad de potencia para operar en los picos de demanda en forma eficiente.

Adicionalmente, las principales atracciones turísticas de la pequeña isla son su medioambiente, con excelentes playas y una vegetación original muy bien conservada, junto a una gran diversidad de la fauna. Así, una de las principales directivas para su futuro desarrollo es preservar el medioambiente incluyendo la introducción de las fuentes renovables de energía en el balance general de energía.

Las condiciones descritas son favorables para promover la instalación de un parque eólico de 6 MW para contribuir con alrededor de 15 GWh/año (asumiendo un factor de capacidad de 29 %), desplazando un consumo de combustible de cerca de 3 450 ton/año de fuel oil, y evitando la emisión de 7 900 ton/año de sustancias contaminantes.

El primer problema es alcanzar una penetración del viento que no exceda 15 % de la potencia total a instalar en la región (40 MW), con un parque eólico de 6 MW que pudiera generar cerca de 5 % de la demanda total de energía para el 2010. Un estudio detallado del pronóstico de consumo y la generación en Cayo Coco pudiera llevar a la decisión de si es ventajoso y técnicamente factible la instalación de una mayor potencia eólica en el futuro o no.

El sitio candidato para instalar el parque eólico se ubica en el interior de la isleta, entre el área actual de desarrollo hotelero y la estación de potencia, a casi 4 km de la costa norte, dentro de la vegetación natural existente con una altura media de 6 m, y a la distancia de 500 m de la carretera más cercana, a lo largo de la cual corre una línea de distribución subterránea de 13 kV. El desarrollo tendría que hacerse con la mínima alteración de la vegetación, de forma tal que se preserven las condiciones originales. El parque estaría integrado por ocho unidades de 750 kW, o seis unidades de 1 000 kW, o cuatro de 1 500 kW, de acuerdo a los resultados del estudio de factibilidad que debe realizarse, la disponibilidad de grúas de alta capacidad y de camiones rastras para la transportación de los principales componentes de las máquinas, acorde con sus dimensiones. Las turbinas pudieran emplazarse tanto en una simple fila o dos filas en paralelo.

Conclusiones

Está claro que un nicho de oportunidad económico para la energía eólica ya existe en los escenarios de servicio público y comercial. El reto es establecer e implementar la estrategia apropiada para crear un conveniente mercado eólico.

Las condiciones básicas existen para empezar a desarrollar el mercado eólico cubano (el potencial eólico, el crecimiento de la demanda de energía, las capacidades técnicas y los expertos). Limitaciones financieras, los bajos costos de la electricidad convencional y la falta de un programa nacional para la potencia eólica en el desarrollo sustentable lo hacen aún inmaduro e impredecible. La participación de inversionistas extranjeros y un buen crédito se tornan los puntos claves para el futuro crecimiento del mercado. Los dos proyectos en negociación son una buena oportunidad para los inversionistas extranjeros.

La mejor oportunidad a menor plazo se localiza en los sistemas autónomos que suministran energía a instalaciones turísticas aisladas de la red eléctrica en los cayos, donde la potencia del viento competiría ventajosamente con el costo de la generación diesel, como en el proyecto de parque eólico en Cayo Coco.

Referencias

1. MORENO, C. ET AL. The Use of Wind Energy in Cuba, Proceedings of European Wind Energy Conference, Goteborg, Sweden, 1996.
2. MORENO, C. ET AL. El aerogenerador T7-10KW, Proceedings of Sustainable Applications for Tropical Island States, San Juan, Puerto Rico, 1999.
3. MORENO, C. ET AL. Proyecto eólico de Cabo Cruz, Technical Report, Havana, Cuba, 1999.
4. MORENO, C. ET AL. Status and further development of wind energy in Cuba, Proceedings of European Wind Energy Conference, Kassel, Germany, 2000.
5. LEIVA, G. ET AL. The 0,5 MW Demonstration Wind Farm in Turiguanó. First Technical Report on operation start up. Havana, 1999.
6. LEIVA, G. ET AL. Cayo Romano's Hybrid wind-diesel system. First Technical Report on operation start up. Havana, 2000.
7. LEIVA, G. ET AL. The Wind Power Assessment (1991-1998). Main results and future trends. Havana, 1999.
8. ECOSOL SOLAR, COPEXTEL S.A. Proposal for cooperation, Havana, Cuba, 2002.

Viabilidad social de los proyectos de electrificación fotovoltaica con miniredes en Cuba

Social Viability of Photovoltaic Electrification Projects with Minigrids in Cuba

*José R. Díaz López
Departamento de Física Aplicada.
Universidad de Oriente.
e-mail: jrdiaz@jrdl.uo.edu.cu
Dr. Jorge Joaquín Álvarez Fontanet
Especialista de 1er grado en Medicina General Integral.
Policlínica comunitaria Carlos J. Finlay.
Municipio Songo-La Maya.*

Resumen

La existencia en Cuba de una gran cantidad de pequeñas comunidades rurales constituye un importante potencial para la utilización de miniredes alimentadas con energía fotovoltaica para la electrificación en el futuro, pues con esta tecnología se logra una apreciable reducción de los costos de instalación, operación y mantenimiento. Sin embargo, el uso colectivo de un recurso limitado puede conducir a situaciones de conflicto, en las que algunos usuarios traten de consumir más en detrimento de los otros y resultar estados de baja carga en las baterías que conduzcan al colapso del sistema. Esto implica una mayor incidencia de los factores sociales sobre el éxito de los proyectos de electrificación con esta tecnología.

En el presente trabajo se realiza una primera aproximación al problema de cuáles son los factores sociales que más inciden en el éxito de los proyectos de electrificación fotovoltaica con miniredes en el contexto de la sociedad cubana actual, mediante el análisis de experiencias internacionales y un estudio de caso nacional. Sobre esta base se propone un algoritmo para la ejecución de los proyectos.

Abstract

The existence in Cuba of a great number of small rural communities constitutes an important potential for the use of with photovoltaic powered minigrids for electrification in the future as with this technology an appreciable reduction of the installation costs, operation and maintenance is achieved. However, the collective use of a limited resource can lead to conflict situations, in which some users might try to consume more in detriment of others and the result can be: low battery charges, which leads to the collapse of the system. This implies a greater incidence of the social factors on the success of the electrification projects with this technology.

A first approach to the problem is made on which are the social factors that more impact on the success of the photovoltaic electrification projects with minigrids within the context of the current Cuban society, by means of the analysis of international experiences and a national case study. Based on this, an algorithm for the execution of the projects is suggested.

Introducción

El acceso al servicio eléctrico es una de las mayores aspiraciones de la población rural cubana debido a su positiva influencia sobre las condiciones de vida [James, 2001 y Díaz López et al, 2001]. No obstante los esfuerzos realizados, y debido a las características topográficas y demográficas (baja densidad de población) en provincias como Santiago de Cuba, Guantánamo y Granma, la tasa de electrificación es mucho menor que la media nacional. Aunque la población sin este servicio no representa una fracción importante del total nacional (solamente alrededor de 4 %), ella constituye un sector estratégico para toda la sociedad, por lo que su electrificación sigue siendo un objetivo de alta importancia según lo demuestra el reciente programa nacional de electrificación de escuelas y consultorios médicos rurales emprendido por el estado cubano [Evaluación del Programa..., 1999]. Por otra parte, la generación local con grupos electrógenos diesel ha demostrado ser insostenible en lugares remotos y de difícil acceso.

Una alternativa que ha ido cobrando prestigio por su probada eficacia es el uso de las fuentes renovables de energía (FRE), entre las que ocupa un lugar destacado la fotovoltaica (FV), que posee la más alta adaptabilidad a las condiciones demográficas, geográficas y climáticas del país. Por esto, se considera que posee las mejores perspectivas para la electrificación rural de objetivos aislados en sentido general.

Aunque la introducción de los sistemas solares fotovoltaicos en Cuba se ha realizado hasta ahora principalmente en forma de sistemas autónomos descentralizados, debido al carácter altamente priorizado de los objetivos electrificados (consultorios del médico de familia y escuelas), la existencia en el país de una gran cantidad de pequeñas comunidades rurales (que constituyen potenciales objetivos para los próximos años), aconseja la generalización de los sistemas centralizados (generación local y distribución mediante una minired), con lo que se logra una apreciable reducción de los costos de instalación, operación y mantenimiento. Sin embargo, el natural aumento del consumo y la utilización colectiva de un recurso limitado (la electricidad solar fotovoltaica) puede llevar a situaciones de conflicto, en la que los usuarios menos cooperativos pueden tratar de aumentar sin límites su consumo en detrimento de los demás [Brucks et al, 2001]. La práctica ha demostrado que en ocasiones estas situaciones pueden llevar hasta el colapso del sistema si no se toman en cuenta desde la etapa de proyecto [Vallvé et al, 2001].

La gama de soluciones a tal problema se extiende desde una perspectiva únicamente tecnológica, con el uso de dispensadores inteligentes de energía [Nieuwenhout et al, 2001], hasta una perspectiva puramente social, mediante intervenciones directas en las comunidades. El uso de dispensadores constituye una solución tecnológicamente efectiva que eleva ligeramente los

costos, puede crear insatisfacciones y no contribuye a crear sentido de pertenencia, mientras que la solución puramente social, que utiliza y valoriza la organización y cultura de la población rural, requiere de un programa permanente de educación energética y de actividades que fortalezcan el espíritu colectivista y de cooperación comunitaria. La implementación de un proyecto de electrificación fotovoltaica (o híbrido) debe ser el resultado de un minucioso análisis de las condiciones socioeconómicas y culturales de la población, que aporte un adecuado balance entre ambas perspectivas.

Objetivos

Realizar una primera aproximación a la determinación de cuáles son los factores sociales que condicionan el éxito de los proyectos de electrificación rural mediante minirredes, mediante el análisis de algunas experiencias internacionales y nacionales, y proponer un algoritmo para la ejecución de proyectos de electrificación con esta tecnología en el país.

Metodología

Se realizó una revisión de la literatura especializada sobre el tema y se relacionaron, para su análisis y discusión, los factores señalados por los distintos autores, así como también un análisis de las experiencias cubanas de electrificación comunitaria utilizando entrevistas y las opiniones de algunos expertos. El criterio más importante para el análisis está basado en la idea, generalmente aceptada [Nieuwenhout et al, 2001], de que el éxito de un proyecto depende en gran medida de la correspondencia entre el paradigma de implementación y las condiciones institucionales, legales, socio económicas y culturales concretas locales y del país, así como de la ética de los profesionales involucrados [Schweizer-Ries et al, 2001]. A partir de este criterio, el análisis se realizó tomando en cuenta las características particulares de nuestro sistema social.

Para el análisis y comparación de los estudios de caso se empleó la clasificación propuesta en Vallvé y otros (2001):

Categoría	Variable	Valor cuantitativo
	Generación	Sólo un nivel por usuario (a) o más de uno (emergencia (b) o durante las horas de operación del respaldo (c)).
	Energía	Ilimitado por usuario (a), limitación mensual (b), limitación diaria (c) y otras opciones complementarias (acumulación de energía no consumida, etc. (d)).
	Fuente de energía	Aleatoria (sólo una fuente renovable (a)) o grupo electrógeno diario o estacionario (b ó c), o grupo electrógeno auxiliar.
Aspectos Económicos	Participación de los usuarios en el costo capital	Sin costo de conexión (a), similar a la red convencional (b), relacionado al costo capital y su estatus económico (c).
	Pago mensual por los usuarios	Inexistente (a), fijo (b), basado en el consumo a los precios de conexión a la red convencional (c), parcialmente adaptado a los costos de generación (d) y también

		adaptado a las fuentes de energía.
	Esquema de subsidio financiero	Subsidio al costo capital pero también sobre los costos de explotación (a), solamente en la inversión inicial (b), solamente a los costos de explotación (c) o ninguno (d).
Aspectos sociales	Experiencias previas de electrificación	Grupo electrógeno (a), red convencional (b), sistema FV híbrido autónomo (c) o ninguno (d).
	Cultura de uso eficiente de la energía	No contemplado (a), introducida mediante iluminación eficiente (b), generalmente todas las aplicaciones son eficientes (c).
Esquema de organización para la explotación	Entidad encargada del manejo del sistema	Ninguna (a), el gobierno u otra organización pública (b), una compañía privada (c) o los usuarios por sí mismos (d).

Resultados

En la literatura consultada [Vallvé et al, 2001; Nieuwenhout et al, 2001; Schweizer-Ries et al, 2001 y Lorenzo, 2000] se reconocen como factores que aseguran el éxito de los proyectos de electrificación rural a los siguientes:

*Aseguramiento de la calidad técnica. Este factor actúa como un pre-requisito.

*Esquema de explotación socio-técnico-económico (SOTEC) adecuado. Este esquema incluye el pago por el consumo energético en correspondencia con el estatus económico y el costo de explotación del sistema, el entrenamiento de los usuarios y de los técnicos locales en el uso eficiente y racional de la energía, en la operación correcta de la planta y en el mantenimiento primario, así como la limitación del consumo de energía de cada usuario. Esto último puede implementarse sobre la base de la estructura social y la moral comunitaria (en comunidades arraigadas y "frente a frente") o desde una perspectiva tecnológica con el uso de dispensadores de energía o metros contadores.

*Paradigma de implementación basado en una aproximación del sistema socio-tecnológico orientado al hombre (reconocimiento del carácter subjetivo de la apreciación de la realidad y del papel activo de todos y cada uno de los actores del proyecto).

*Compatibilidad entre la satisfacción de las expectativas de los destinatarios finales en el momento de instalación y su evolución temporal. Las expectativas, sobre todo las energéticas, aumentan generalmente con el tiempo. Los objetivos del proyecto deben tomar en cuenta estas circunstancias y formularse de manera que la tendencia sea compatible con lo que se instala.

*Balance adecuado entre los incentivos que garantice la formación de un fuerte sentido de pertenencia entre los destinatarios finales. Los incentivos del proyecto pueden ser de tipo económico (los usuarios pagan total o parcialmente las instalaciones en forma de créditos o por el servicio), sociales (las organizaciones comunitarias trabajan en la formación o el fortalecimiento de la conciencia colectivista) o una combinación de ambas.

*La perturbación social que representa la electrificación fotovoltaica en la comunidad debe ser mínima. Todo sistema organizado necesita de recursos externos para mantenerse y la forma particular que adopta la organización del sistema es la que le permite asimilar el recurso externo que lo mantiene. Cualquier cambio en el recurso externo constituye una perturbación a la que el sistema, inicialmente estable, responde modificando su organización para asimilar el nuevo recurso. La perturbación provoca un proceso transitorio (inestabilidad) que conduce a una nueva organización estable (cambio cualitativo), diferente de la inicial, o a la destrucción del sistema (rechazo al cambio). Esencialmente, que se llegue a uno u otro resultado está condicionado por la magnitud de la perturbación, de manera que cuanto mayor es ésta, también es mayor la probabilidad de destrucción y rechazo del nuevo recurso. Esto quiere decir que la electrificación será aceptada y asimilada con mayor probabilidad si logra la evolución del sistema sin provocar cambios sustanciales.

*Ausencia de "residuos" del viejo recurso no reciclados. Como residuo se entiende todo elemento, material o social, de la vieja estructura. La asimilación del nuevo recurso debe garantizar que estos elementos sean transformados (reciclados) para su reutilización en la nueva estructura, pues los que no lo sean actuarán como perturbaciones que provocan inestabilidad en ella.

Caso de estudio: Santa María de Loreto

Santa María de Loreto es un asentamiento rural perteneciente a la comunidad del mismo nombre (la comunidad posee otros dos asentamientos: uno electrificado parcialmente con un grupo electrógeno diesel y el otro no electrificado), que cuenta con 43 viviendas (156 habitantes). Se encuentra ubicado en la meseta llamada Sierra de los Ciegos, a 40 *km* al Este-Noreste de la ciudad de Santiago de Cuba y su población está dedicada principalmente a la cosecha de café y otros productos agrícolas. En 1997, como resultado de un donativo de la ONG austríaca Sol para Cuba y CUBASOLAR, se instaló una central fotovoltaica con una potencia pico de 11 *kW* para el suministro eléctrico (120 *VCA/60 Hz*) a las viviendas del asentamiento y otros objetivos económicos y sociales que antes tenían un servicio parcial (4 horas diarias) de un grupo electrógeno diesel en mal estado técnico.

Desde el comienzo de los trabajos toda la comunidad fue involucrada y se produjo una efectiva integración social de los técnicos instaladores, lo que fue aprovechado para transmitir los elementos esenciales de una cultura de ahorro y uso eficiente. También se capacitó al operador de la planta diesel para la operación de la nueva planta y su mantenimiento primario. A pesar de que la comunidad tiene un alto sentido de pertenencia, colectivismo y cooperación, se instalaron metros contadores de energía en 30 de los objetivos iniciales electrificados, que son leídos mensualmente para el pago por el servicio. Al resto de los objetivos se le realizó una estimación de la potencia de consumo, solución que fue negociada con los vecinos.

En el caso de Santa María de Loreto, se dan las siguientes circunstancias:

*El aseguramiento de la calidad corre a cargo de la División Fotovoltaica del Centro de Investigaciones de Energía Solar, sin financiamiento para la sustitución o reparación de componentes.

*El SOTEC empleado ha garantizado la correcta operación de la planta durante 4 años, y la organización social y la participación comunitaria han logrado mantenerla funcionando aun con graves daños ocasionados por descargas eléctricas. La reducción de la potencia de salida en la mitad ocasionó una disminución del consumo energético de sólo 75 % en los últimos 4 meses, gracias al acomodo de carga realizado por iniciativa propia.

*El proceso de implementación del proyecto se realizó, desde el inicio de los trabajos, sobre la base de la participación comunitaria donde se tomaron en cuenta todas las opiniones e ideas.

*La central FV se diseñó para satisfacer una demanda de 1,2 *kWh/día/vivienda* (en total 50 *kWh/día*), tomando en cuenta el incremento esperado en 10 años. Sin embargo, hasta diciembre del 2001 la demanda oscilaba aún alrededor de 50 % de su capacidad de generación. Por otra parte, la construcción modular de sus inversores garantiza la ampliación futura de la potencia de salida. Fallas provocadas por descargas atmosféricas en dos inversores limitaron la potencia a solamente 2 *kW*, lo que afecta la distribución y se refleja en que 85 % de los encuestados señalan la necesidad de mejoras o ampliaciones y 15 % consideran al sistema como provisional, aunque muy bueno.

*La encuesta demostró un gran sentido de colectivismo y cooperación en los tres asentamientos, como ya se ha señalado, lo que ha facilitado la formación de un gran sentido de pertenencia, reforzado por el pago de la electricidad consumida que se mide en cada vivienda con metros contadores, y el hecho de ser una comunidad con arraigo y estructuralmente ser "frente a frente", con líderes reconocidos y un buen nivel cultural que facilita las acciones de instrucción y capacitación en el ahorro y uso eficiente de la electricidad en relación con los principios básicos de funcionamiento de los sistemas FV. Asimismo, el ciento por ciento de los encuestados manifestó la disposición de hacer aportes para el mantenimiento y reparación, en correspondencia con su alto sentido de pertenencia.

*La existencia anterior de un grupo electrógeno diesel en el asentamiento y de su infraestructura, cuyos residuos fueron totalmente reciclados, contribuyó a minimizar la perturbación que ocasionó la planta solar sobre la estructura social.

Del análisis de los resultados obtenidos en el estudio de los índices, de los factores determinantes del modo y estilo de vida y las preguntas para determinar la satisfacción de expectativas y necesidades se puede afirmar que el proyecto de la central fotovoltaica de Santa María de Loreto es exitoso en sentido general y que las circunstancias descritas anteriormente pueden considerarse como "factores sociales de éxito".

Principales debilidades reconocidas:

- Aumento del consumo por degradación de la eficiencia de los equipos e incremento de su cantidad. Las luminarias de alta eficiencia, inicialmente instaladas, han ido saliendo de servicio y son sustituidas por bombillos incandescentes, que constituyen prácticamente la única opción de mercado al alcance de los usuarios.
- Falta de repuestos.

Principales fortalezas:

- Arraigo de la población y estructura "frente a frente".
- Adecuado esquema de explotación socio-técnica.
- Limitación en el consumo de energía de cada usuario.
- Pago de los usuarios por la cantidad de energía consumida.
- Entrenamiento del técnico local e información permanente a la comunidad.

Amenazas:

- Falta de financiamiento para el mantenimiento y reparación.

El método que se propone para la determinación de la viabilidad social de un proyecto de electrificación rural fotovoltaica en Cuba por la vía centralizada, tiene su núcleo central en el carácter necesario de tales factores, es decir, que para abordar un proyecto de electrificación fotovoltaica por la vía centralizada en una comunidad rural hay que comprobar previamente la presencia de las siguientes condiciones:

1. Arraigo comunitario y estructuración "frente a frente" [Verdecia, 1997].
2. Espíritu de colectivismo y cooperación comunitaria.
3. Existencia de líderes sociales reconocidos.
4. Existencia de personal capacitable.
5. Conocimientos básicos sobre energía solar fotovoltaica.
 - *Fundamentos y principales componentes.
 - *Limitaciones energéticas.
 - *Medidas de ahorro y uso eficiente de la energía.
6. Disposición real para las aportaciones de apoyo a la instalación, mantenimientos y reparaciones.
7. Compatibilidad con la expectativa energética.
8. Predisposición subjetiva favorable frente a la tecnología.

Estas condiciones deben ser comprobadas mediante intervenciones de diagnóstico en la comunidad, por vía de la encuesta y del intercambio directo.

En correspondencia con las fases del proceso descritas en otras experiencias [Schweizer-Ries et al, 2001 y Mosler, 2001], la viabilidad social forma parte de un conjunto de acciones sistematizadas en un algoritmo que incluye los aspectos tecnológicos, caracterización de la comunidad, promoción, análisis de impacto ambiental [Weitzenfeld, 1996], seguimiento y comprobación (Fig. 1).

Como se aprecia en el esquema de bloques de la figura 1, los proyectos se inician con la selección del lugar y el estudio de viabilidad técnica que incluye el prediseño (que puede incluir la simulación, selección global de componentes, estimación de costos y de impacto ambiental). Sus resultados deciden si se puede pasar o no a la fase del estudio de viabilidad social, con las intervenciones en la comunidad mediante encuestas y contactos directos, y la caracterización. Si el resultado de este estudio es negativo se pasa a la proyección y realización de una serie de acciones de formación y capacitación en la comunidad (en un período que puede ser más o menos largo), que termina con un nuevo estudio de viabilidad social. Si los resultados vuelven a ser negativos, entonces se declara el proyecto no viable. Si los resultados son positivos, se pasa a la fase de preparación social, diseño final (realización del proyecto tecnológico detallado), estudio de impacto ambiental y la instalación del sistema. En esta fase se comienza el entrenamiento y preparación del personal (operadores y grupos de usuarios interesados). El seguimiento y comprobación pueden tener objetivos de investigación o de rutina, lo que determina su contenido específico. En cualquier caso debe incluir tanto mediciones técnicas como sociales para los reajustes y correcciones.

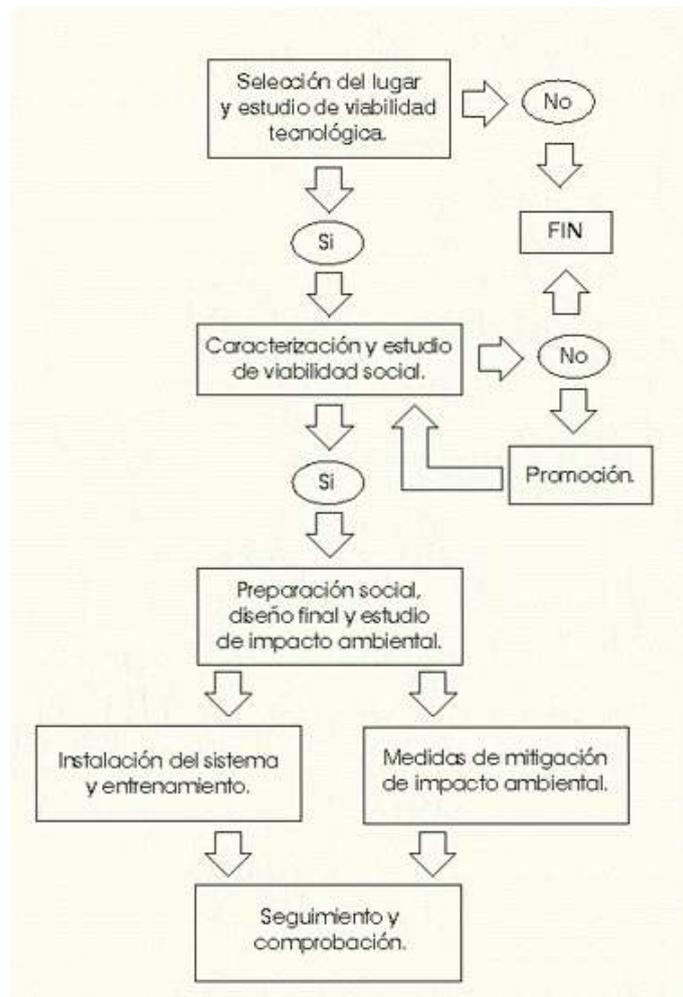


Fig. 1. Algoritmo propuesto para abordar proyectos de electrificación rural con minirredes.

Conclusiones

*La ejecución de los proyectos de electrificación rural con minirredes implica un importante componente social que es importante tomar en cuenta desde las fases más tempranas de su implementación. Esto sólo puede realizarse de manera exitosa desde una perspectiva sistémica (socio-técnico-económica) orientada al hombre.

*El éxito social de los proyectos está condicionado por la presencia de los ocho factores relacionados antes, los cuales deben ser comprobados mediante intervenciones de diagnóstico antes de abordar la ejecución de los proyectos.

*El análisis de algunas buenas prácticas de electrificación rural permitió descubrir algunas invariantes que han sido sistematizadas en un algoritmo, que se propone para abordar los proyectos.

Referencias

1. JAMES, B. The Impacts of Rural Electrification: Exploring the Silences. Energy & Development Research Centre. University of Cape Town. EDRC Report Series, 2001.
2. DÍAZ LÓPEZ, J. R. ET AL. *Lecciones del Programa de electrificación rural fotovoltaica en Cuba*, en II Simposio Internacional de Fuentes Renovables de Energía. Santiago de Cuba: nov., 2001.
3. Evaluación del Programa de electrificación fotovoltaica a casas consultorio del médico y enfermera de la familia en zonas montañosas rurales de difícil acceso de la República de Cuba. La Habana: Solidaridad para el Desarrollo y la Paz (SODEPAZ, ONG española) y Sociedad Cubana para la Promoción de la Fuentes Renovables de Energía y el Respeto Ambiental (CUBASOLAR), jun.-ago., 1999.
4. BRUCKS, W. M., H. J. MOSLER and A. L. M. JOYCE. *The Development of a Socio-Technical Simulation Tool to Enable Sustainable Community Use of a Photovoltaic Stand-Alone System*, in 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Munich: oct., 2001.
5. VALLVÉ, X., G. GAFAS, I. VOSSELER, A. MITJÁ, C. TORRA, S. IZQUIERDO, A. JOYCE, V. BLECUA, P. VEZIN, P. SCHWEIZER-RIES, C. CASPER y M. VÁZQUEZ. *Key Parameter for Quality Analysis of Multi-User Solar Hybrid Grids (MSGs)*, in 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Munich: Oct., 2001.
6. NIEUWENHOUT, E. D. J., A. VAN DIJK, P. E. LASSCHUIT, G. VAN ROEKEL, V. A. P. VAN DIJK, D. HIRSCH, H. ARRIAZA, M. HANKINS, B. D. SHARMA and H. WADE. *Experience with Solar Home Systems in Developing Countries*, in A Revieww. Prigress in Photovoltaics: Research and Applications. 2001, 9, 455-474.
7. SCHWEIZER-RIES, P., C. CASPER, R. DJUWITA, E. RAMÍREZ, and E. HIDALGO DE ÁVILA. *Social Interventions to Achieve Success with Off-Grid Village Power Supply Systems: Case Studies from Indonesia, Spain and Argentina*, in 17th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Munich: Oct., 2001.
8. LORENZO, EDUARDO. Aproximación a una metodología para abordar proyectos de electrificación rural fotovoltaica. Madrid: Instituto de Energía Solar. Ciudad Universitaria. Edición en CD de European Communities, 2000. ENERGIE.

9. VERDECIA, SILVIA. Conferencia sobre Análisis de la situación de salud. Santiago de Cuba: Policlínico docente Josué País, dic., 1997.
10. MOSLER, H. J. Curso internacional de formación: electrificación rural mediante minirredes con generación solar híbrida. Quito: 27-29 nov., 2001.
11. WEITZENFELD, HENRYK. Manual básico sobre evaluación del impacto en el ambiente y la salud de acciones proyectadas. Metepec: Centro Panamericano de Ecología Humana y la Salud, División de Salud y Ambiente, OPS, OMS, segunda edición, 1996.

Hacia una estrategia de cogeneración con biomasa

Towards a Biomass Cogeneration strategy

Jorge T. Lodos Fernández y Gilberto Font Pimentel
Ministerio del Azúcar
E-mail: lodos@minaz.minaz.cma.net

Resumen

Los resultados de la evaluación técnico-económica comparativa entre la generación de electricidad de combustible fósil en termoeléctricas convencionales y de biomasa en fábricas de azúcar, demuestran las ventajas de la biomasa. El costo de operación, cuando se usa intensiva y extensivamente la misma, es inferior a 3 *c/kwh*, mientras que con combustible fósil es mayor de 4 *c/kwh* y con un componente en divisas porcentualmente superior. Es imprescindible tomar en consideración la parte de la inversión total que se vincula a la producción de azúcar y realizar el análisis financiero sobre las mismas bases, tanto para la generación a partir de biomasa como a partir de combustible fósil. En estas condiciones el costo total del *kwh* obtenido de biomasa es inferior al costo evitado del similar producido de combustible fósil. La estrategia de generación exige definir los complejos agroindustriales en condiciones de producir eficientemente azúcar y derivados en zafras largas, sobre la base de que la inversión más atractiva es la que sustituye calderas y/o turbos por obsolescencia técnica o por su valor residual de uso en otras fábricas de azúcar. Debe promoverse la mayor potencia alcanzable y el mayor período de cogeneración con biomasa. En esas condiciones las inversiones son tan grandes y estratégicas que será necesaria la participación de capital y tecnología nacionales y extranjeros.

Abstract

The results of the comparative technical-economic evaluation of the electricity generation of fossil fuel in conventional thermal power plants and biomass in sugar mills demonstrate the advantages of biomass. The operating cost, when biomass is used intensively and extensively, is lower than 3 *c/kWh*, while with fossil fuel it is higher than 4 *c/kWh*, and with a percentally higher component in foreign currency. It is indispensable to consider the part of the total investment that is linked to the sugar production, and to carry out the financial analysis on the same bases, both for the generation from biomass and from fossil fuel. Under these conditions, the total cost of the obtained *kWh* of biomass is inferior to the avoided cost of the *kWh* obtained from fossil fuel. The generation strategy calls for a definition of the agroindustrial complexes in conditions of efficiently producing sugar and sugar derivatives in long harvests; on the basis that the most attractive investment is the one that substitutes boilers and/or turbos owing to either technical obsolescence or its residual value of use in other sugar mills. The highest attainable power and the longest period of cogeneration with

biomass should be promoted. Under those conditions, investments are so huge and strategic that participation of national and foreign currency and technology will be necessary.

Introducción

Sin lugar a dudas, la agroindustria azucarera tiene una gran potencialidad como generadora de biomasa: cada 100 *TM* de caña procesada produce de 10 a 12 *TM* de azúcar, de 25 a 30 *TM* de bagazo y quedan en el campo de 10 a 20 *TM* de residuos agrícolas, de los cuales de 5 a 7 *TM* se colectan como paja en los centros de acopio. Una operación termoenergética medianamente eficiente entrega de 10 a 15 % de bagazo sobrante; una operación eficiente eleva esta cifra de 30 a 40 % y más.

Igualmente importante es la potencialidad de la industria azucarera de producir energía eléctrica, al estar obligada a reducir la presión del vapor de sus calderas para poderlo utilizar en calentar los productos azucareros. Hacer esto con turbogeneradores le permite producir simultáneamente electricidad como subproducto. Sin embargo, históricamente la industria no ha tenido interés en ser termoenergéticamente eficiente. Esto se debe al riesgo de disponer de cantidades importantes de bagazo sobrante que no es capaz de asimilar. Por ello las fábricas de azúcar en todo el mundo se diseñaron sin aislamiento, con calderas que generan a baja presión y esquemas gastadores de vapor. La tarea de los diseñadores era balancear la generación y el consumo de vapor, sin que hubiera bagazo sobrante.

Cuba no se escapa a esa realidad con cerca de 800 calderas con eficiencia promedio de 65 % y varias decenas de años de operación, al igual que los más de 400 turbos que se les asocian, con una capacidad de generación de algo más de 800 *MW*. El índice de generación promedio actual es 23 *kWh/TMcaña*, con un máximo de 45 *kWh/TMcaña*. En el proceso se consumen casi 500 *kg* de vapor de baja presión por *TM* de caña procesada, lo que refleja su baja eficiencia [Lippman et al, 1997].

Tabla 1. Potencialidad de la industria azucarera cubana.

Presión de caldera		Electricidad generada <i>kWh/TMcaña</i>	Observaciones
<i>kg/cm²</i>	psi		
11	150	10	76 CAI, molida 32 %, pequeños
18	250	20-25	68 CAI, molida 54 %, 22 tándem eléctricos
28	400	35-45	12 CAI, molida 13 %, grandes tándem eléctricos
40-60	550-850	hasta 100	Se operan en forma similar a lo actual
>60	>850	100-150	Exigen agua especial y alta automatización
Ciclo combinado		300-500	Exigen pirólisis/gasificación y turbinas de gas

Por otro lado, la necesidad de superar la obsolescencia técnica ofrece la oportunidad de hacerlo con la mayor eficiencia termoenergética posible, aprovechando las ventajas de cogenerar con biomasa. Así, junto con la modernización de la industria que eleva su eficiencia y reduce el costo de producción, se podría incrementar la generación actual en varias veces; independizar parte de la producción de energía del país, de precios y combustibles externos; disminuir la contaminación ambiental, pues la biomasa casi no contiene azufre ni nitrógeno y devuelve a la atmósfera el dióxido de carbono que absorbió la planta, mientras que el fuel-oil lo incrementa en 3 veces su peso; y reducir pérdidas de transmisión, al entregar la energía directamente a la red.

La generación de biomasa tiene como desventaja la necesidad de otro combustible para poder operar todo el año y, sobre todo, capital adicional por su menor economía de escala y para enfrentar las inversiones de modernización de la fábrica y recolección de biomasa. Estos últimos aspectos hacen que los productores de electricidad a partir de combustibles fósiles se cuestionen la conveniencia económica de producir electricidad de biomasa. El objetivo de este trabajo es analizar técnico-económicamente escenarios de producción de electricidad de biomasa y de combustible fósil, contribuir a esclarecer los factores que influyen en los costos en cada caso y recomendar una estrategia de desarrollo para la cogeneración a partir de biomasa para la industria azucarera.

Materiales y métodos

Se estudiaron dos escenarios fundamentales: *reposición y adición*. En el primero se sustituyen las calderas y/o turbogeneradores (o los existentes aún están en buen estado y se reutilizan en otro lugar) y se moderniza la fábrica de azúcar por necesidad de zafra. Sólo se le carga a la inversión de generación eléctrica propiamente dicha, lo que hay que gastar adicionalmente a las necesidades del proceso azucarero, que se ha considerado es la mitad de la inversión en modernizar la fábrica, el total del almacenamiento de bagazo y de 35 a 40 % del gasto en calderas (por ser de mayor presión de trabajo) y en turbogeneradores (por ser de extracción-condensación).

En el escenario adición se instalan calderas y/o turbogeneradores de condensación adicionales para generar solamente de biomasa (o de vapor) sobrante. La nueva inversión tiene que ser recuperada totalmente con la venta de electricidad. Se ha considerado una pérdida de 5,5 % de bagazo cuando se quema en zafra, y 11 % cuando se almacena para quemarse fuera de ella. Se analiza también el uso intensivo del bagazo (MAX W), quemándolo todo en zafra y en uso extensivo (MAX BIO), quemando biomasa todo el tiempo. En este caso la potencia de generación es menor y prácticamente la mitad de la primera alternativa.

Se discute también hasta cuánto reducir el consumo de vapor en proceso y elevar la eficiencia de las calderas y el índice de generación de electricidad, la recolección de paja y bagazo de otras fábricas, desarrollar variedades de caña energéticas y la contaminación medioambiental, desde un punto de vista técnico-económico, relacionándolos con la producción de electricidad de

combustible fósil en bases similares, y tomándolos como elementos para conformar una estrategia de producción de electricidad de biomasa de la caña de azúcar.

Resultados

Se estudia el caso de una fábrica de 7000 *tcpd* (1 *MMTMcaña/zafra*) optimizada para lograr el máximo de bagazo sobrante, que cogenera 5 meses en zafra (3600 *h*) y genera 6 fuera de ella (4400 *h*) con bagazo sobrante propio, o con crudo nativo mezclado a 60 atm de presión. La fábrica entrega el bagazo y el condensado por el vapor y la electricidad que consume, y se cobra el bagazo fuera de zafra al costo (\$5/TM) y el crudo nativo mezclado (1400 *cps*) a \$42/TM, precio utilizado usualmente en los análisis de la UNE.

Tabla 2. La generación de biomasa.

Indicador	Escenarios							
	Reposición				Adición			
	MAX BIO		MAX W		MAX BIO		MAX W	
Biomasa total, TM	270000		270000		135000		135000	
Pérdidas	30000		15000		15000		15000	
Biomasa Neta, TM	240000		255000		120000		120000	
En zafra	120000		255000		60000		120000	
Fuera de zafra	120000		0		60000		0	
2do Combustible, TM	0		50000		0		24000	
Potencia, MW	15		32		7,5		15	
Electricidad, MMWh	120		256		60		120	
Consumida	40		52		4		8	
En fábrica	32		32		0		0	
En termoeléctrica	8		20		4		8	
Vendida	80		204		56		112	
Inversión total, MM	30		43		20		28	
Inversión electr., MM	12		17		20		28	
En fábrica	2 (1)		2 (1)		2		2	
En calderas y turbos	26 (9)		41(16)		17		26	
En biomasa	2 (2)		0		1		0	
Costo electricidad	<i>mil\$</i>	<i>c/kWh</i>	<i>mil \$</i>	<i>c/kWh</i>	<i>mil \$</i>	<i>c/kWh</i>	<i>mil \$</i>	<i>c/kWh</i>
Biomasa	600	0,75	0	0	300	0,54	0	0
2do Combustible	0	0	2100	1,03	0	0	1008	0,90
Salarios	50	0,06	50	0,03	50	0,09	50	0,04
Mantenimiento, 2 %	240	0,30	340	0,17	400	0,71	560	0,50
Otros	100	0,13	200	0,10	100	0,18	100	0,09
Costo producción	990	1,24	2690	1,33	810	1,52	1658	1,53
Amortización 25 años	480	0,60	680	0,33	800	1,43	1120	1,00
Costo de operación	1590	1,84	3540	1,66	1710	2,95	3058	2,53

Independientemente de que las cifras de las tablas 2 y 3 puedan variar dentro de determinados rangos de acuerdo con cada caso concreto, las tendencias que ellas manifiestan ilustran las ventajas de la generación de electricidad a partir de biomasa, sobre todo cuando se comparte la inversión en generación

de vapor y electricidad con la producción de azúcar. Quedan como reservas la reducción de los costos de operación de la fábrica de azúcar (y por consiguiente del azúcar) por no operar el área de generación de vapor y electricidad, la posibilidad de incrementar la potencia de generación con biomasa sobrante de otros orígenes, la de cogenerar el mayor tiempo posible por tener fábricas de derivados anexas y la valoración económica del efecto de la contaminación atmosférica del combustible fósil.

Tabla 3. Comparación de escenarios.

Indicador	Escenarios				Termoeléctrica convencional
	Reposición		Adición		
	MAX BIO	MAX W	MAX BIO	MAX W	
Biomasa (zafra) <i>TM</i>	120000	255000	60000	120000	0
Biomasa (no zafra) <i>TM</i>	120000	0	60000	0	
Combustible fósil, <i>TM</i>	0	50000	0	24000	180000
Potencia, MW	15	32	7,5	15	100
Electric. vendida, <i>MMWh</i>	80	204	56	112	720
Inversión total, MM	30	43	20	28	100
Inversión eléct., MM	12	17			
Calderas/turbos nuevos	Sí				
Cogeneración	Sí		No		No
Costo operación, <i>c/kWh</i>	menos de 2		menos de 3		más de 4-4.5*
en divisas, <i>USc/kWh</i>	menos de 1		menos de 1,5		más de 3,5
Inversión total, <i>\$/kWh</i>	800	530	2600	1800	1000
Rentabilidad	alta		menos alta		-
Contaminación atmosf.	0	50 %	0	50 %	100 %
Competencia vs. UNE	muy fácil		fácil		-

**En las unidades menos eficientes el costo se eleva en 25 % llegando de 5 a 5,5 c/kWh y más. El llamado costo evitado, que incluye también los costos financieros de una nueva capacidad de generación eficiente, puede llegar a 4,8 c/kWh y más dependiendo de si es una ampliación o no.*

Discusión

¿Cómo se comparan los escenarios? Según las tablas 2 y 3, el escenario reposición es más ventajoso que adición, y ambos son superiores al de combustible fósil.

¿Hasta cuánto reducir el consumo de vapor del proceso? Varios autores consideran que es logvable menos de 38 % alcanzado por el ICINAZ, y en la

remolacha es usual 30 % [Wunsch, 1998], lo que exige equipos de proceso adecuados, en particular evaporadores, donde existen desarrollos cubanos. Parece razonable plantearse reducir el consumo de vapor en proceso hasta 35 %.

¿Hasta cuánto elevar la eficiencia en la generación del vapor? La tecnología comercial existente llega de 85 a 90 % con calderas de 100 *TM/h* y más. Existen tecnologías, aún no comerciales con bagazo, que superan esta cifra y deben seguirse de cerca [SIDEK, 1995]. Toda nueva inversión debe tener una eficiencia de más del 85 % y la más alta capacidad logable.

¿Hasta cuánto elevar el índice de generación de electricidad? La generación a presiones de 40 a 60 *atm.* (hasta 100 *kWh/TMcaña*) está disponible y es asimilable sin cambios importantes en las tecnologías azucarera y termoenergética cubanas actuales. Generar a más de 60 *atm.* (100-200 *kWh/TMcaña*) exige una cultura de producción y un nivel de inversión elevados, que deben ser analizados e introducidos cuidadosamente. La gasificación y la pirólisis de biomasa en ciclo combinado (más de 300 *kWh/TMcaña*) están en desarrollo, aunque podrían estar disponibles en los próximos 3-5 años [Larsen, 1993]. Por tanto, la reposición de turbos y calderas debe ser hecha para presiones de 60 *atm.*, hay que prepararse para alguna experiencia controlada con presiones superiores, y debe seguirse de cerca, para introducirla en el momento oportuno, el desarrollo de la tecnología de pirólisis / gasificación / ciclo combinado.

¿Recolectar paja? No existe un sistema comercial establecido. El costo actual de la paja puesta en la fábrica es de unos \$20/*TM*, la inversión es del orden de \$50/*TM*, y compite con la caña en su transportación, excepto que los centros de limpieza estén al lado de las fábricas de azúcar [Larson, 1993]. De aquí se concluye que aún no es rentable la manipulación y transportación de la paja con fines termoenergéticos de centros de acopio distantes de las fábricas de azúcar.

¿Recolectar bagazo sobrante de otras fábricas? Existe experiencia comercial limitada en coleccionar, compactar y transportar bagazo. Su costo sería inferior a \$10/*TM*, y la inversión menor de \$50/*TM* [Larson, 1993]. Adicionalmente, mejoraría la eficiencia de la fábrica de azúcar. Esto refuerza la opción de destinar fábricas de azúcar a tributarias de bagazo y capacitar en su procesamiento.

¿Caña energética? Ha habido experiencias de moler caña con contenidos de paja incrementados, donde los resultados del balance entre el incremento de energía y las pérdidas en transportación y eficiencia fabril no han sido concluyentes. También se trata de desarrollar variedades con altos rendimientos y contenidos de fibra, donde ya se obtienen resultados muy alentadores [Mastrapa, 1999]. Ambas experiencias tienen importancia estratégica y deben seguirse de cerca, así como llevar a cabo los estudios técnico-económicos necesarios que permitan precisar en qué casos la caña energética pueda tener resultados económicos aceptables.

¿Maximizar el período en que se usa la biomasa? En el caso extremo esto significaría que la capacidad de generación de vapor instalada (y la de electricidad asociada) sería la que permitiera operar la fábrica de azúcar y preservar la cantidad de bagazo necesario para operar en el período de no zafra. Se logra la menor contaminación ambiental, pero con un mayor costo financiero y de depreciación, y un menor índice para la inversión por su baja economía de escala (Ver MAX BIO en las tablas 2 y 3).

¿Maximizar la potencia de generación? En el caso extremo esto significaría que la capacidad de generación de vapor que se instalaría en la fábrica de azúcar (y la de electricidad asociada) sería al menos la correspondiente al total del bagazo que se produjera. La biomasa sólo se utilizaría en zafra, y el resto del tiempo se utilizaría combustible fósil con una eficiencia inferior a la de las termoeléctricas convencionales. La contaminación ambiental es mayor, el costo de producción del kWh es algo menor, con menores costos financieros y de depreciación (lo que mejora el costo de operación) y un índice para la inversión más favorable por su mejor economía de escala (Ver MAX W en las tablas 2 y 3).

¿Cuál es el valor de la contaminación ambiental? Se puede estimar como el valor de la tonelada de dióxido de carbono que se evite lanzar a la atmósfera, que pasará de 2 a 3 USD/TM hoy, a varias veces más en los próximos años [SRP, 1998], y que muchos países reflejan en su legislación en forma de multas a la generación de combustibles fósiles y/o primas o incentivos a la de biomasa. Algo similar sucederá con la emisión de óxidos de nitrógeno y azufre de los combustibles fósiles, que valorizarán aún más a la biomasa que no los posee. Cada megawatt-hora obtenido de biomasa salva cerca de una tonelada de dióxido de carbono .

¿Cuál es el costo del kwh? Hay que señalar que frecuentemente se establece una comparación desigual entre el precio total del kWh de biomasa y el costo en divisas del kWh de combustible fósil, que se calculan sobre diferentes bases. Esto significa que al kWh de biomasa se le incluyen, por ejemplo, costos financieros de repago de préstamos y de sus intereses en condiciones más onerosas, retornos sobre el capital social superiores, plazos de recuperación de la inversión inferiores, que afectan sensiblemente su economía.

Tabla 4. Costos adicionales del kWh de combustible fósil. En condiciones similares a las consideradas para la biomasa.

Indicador	Magnitud
Base de cálculo	Potencia anual 1 kW
Tiempo de trabajo, horas	8,000
Consumo propio y pérdidas	10 %
Electricidad exportable	7,200 kWh
Inversión específica, USD/kW	1000
Capital social (30 %)	300 USD
Deuda inicial (70 %)	700 USD
Años de gracia	2

Plazo repago de la deuda	5 años		10 años	
Costo total del dinero	12 %		12 %	
Deuda con intereses capitalizados	868 USD		868 USD	
Año productivo	1	5	1	10
Costo financiero, <i>c/kWh</i>	3,9	2,7	2,7	1,4
Retorno capital social (15 %)	0,6	0,6	0,6	0,6
Costo adicional al costo de operación, <i>c/kWh</i>	4,5	3,3	3,3	2,0
Costo adicional en 25 años, <i>c/kWh</i>	0,8		0,6	
Costo total evitado en 25 años, <i>c/kWh</i>				
Termoeléctrica de fósil	5,1		4,9	
Reposición de biomasa: MAXBIO	2,6		2,5	
Reposición de biomasa: MAX W	2,2		2,1	
Adición de biomasa: MAX BIO	4,9		4,9	
Adición de biomasa: MAX W	3,8		3,8	

En la tabla 4 se ilustran algunas de estas situaciones y se concluye que el costo total del *kWh* de biomasa es en todos los casos inferior al del similar obtenido de combustible fósil en termoeléctricas tradicionales (excepto quizás para la adición de una inversión nueva con uso único de biomasa), siempre que se discriminen las inversiones azucareras del total y se utilicen las mismas bases de cálculo en ambos casos. Se ponen también en evidencia las ventajas económicas de trabajar a la mayor potencia de generación posible en una fábrica de azúcar dada, sin excluir que se pueda trabajar algún tiempo adicional fuera de zafra con biomasa de otras fábricas cercanas tributarias. Cuando el análisis se remite al componente en divisas del costo, las ventajas se hacen evidentes en todos los casos, aun trabajando con crudo nativo de menor precio que un combustible fósil importado.

En otras palabras, aun sin considerar las ventajas debidas a la no contaminación o a la menor distancia de suministro, siempre se pueden encontrar condiciones productivas en que la cogeneración-generación de electricidad a partir de biomasa sea más económica que su equivalente de combustible fósil.

Conclusiones

La discusión anterior permite establecer que el costo de producción del *kWh* de biomasa es inferior al producido de combustible fósil, y que la inversión también es menor si se considera su participación en la producción de azúcar. A partir de esto es posible delinear una estrategia de generación eléctrica de biomasa azucarera, cuyos elementos serían:

1. Seleccionar fábricas con potencial de caña y de incremento de eficiencia.
2. Definir, de ellas, aquellas donde haya que sustituir las calderas y/o los turbos, que serán las cogeneradoras de electricidad, y ordenarlas por la magnitud de sustitución.
3. Definir, de las fábricas con potencial, aquellas donde no haya que sustituir las calderas y turbos, que serán las tributarias, y ordenarlas según su entrega de bagazo sobrante.

4. Reducir el consumo de vapor al máximo, y en la producción de azúcar a menos de 38 %.
5. Preparar condiciones en las fábricas tributarias para manipular, compactar y almacenar el bagazo sobrante, para su envío a las fábricas cogeneradoras.
6. Priorizar, de las fábricas cogeneradoras, las que tengan mayor capacidad de cogenerar, en particular por poseer fábricas de derivados anexas.
7. Instalar en las fábricas cogeneradoras calderas con eficiencia 85 % y 40-60 atm de presión, al menos, y turbos de extracción-condensación.
8. Analizar cuidadosamente los esquemas que sólo generen todo el año.
9. Trabajar fuera de zafra en las cogeneradoras con bagazo sobrante de fábricas tributarias.
10. Analizar el uso de la paja de centros de limpieza cercanos.
11. Instalar, siempre que sea posible, fábricas de derivados anexas a fábricas cogeneradoras.
12. No invertir buscando sólo más electricidad, sino también azúcar a menor costo.
13. Apoyar el desarrollo de esquemas y equipos de evaporación, de la generación a más de 60 atm., de la pirólisis y gasificación de biomasa, y de la caña energética.
14. Materializar la ventaja de no contaminar el medio ambiente de la biomasa, en una legislación que premie por no contaminar y/o multe a los que lo hagan.
15. Las inversiones requeridas son tan grandes y estratégicas, que será necesaria la participación de capital y tecnología nacionales y extranjeros.
16. Integrar los programas de desarrollo eléctrico del MINAZ y la UNE.

Referencias

1. LIPPMAN, R. ET AL. *Biomass conversion in Cuba*, en Sugar y Azúcar. Septiembre, 1997. p 36.
2. WUNSCH, H. *Energy saving possibilities in the sugar industry*, en Sugar y Azúcar. Enero, 1998. p 31.
3. SIDEC. Estudio de factibilidad del Proyecto CUB G41-95.
4. LARSEN, E. The potencial for sugarcane-based electric power in Cuba. Princeton University, 1994.
5. LARSON, E. *Technology for electricity and fuels from biomass*, en Annu. Rev. Energy Environ. 18:567-630, 1993.
6. MASTRAPA, R. Misión de trabajo a la Isla Reunión. MINAZ, noviembre, 1999.
7. SRP. Biomass power generation in Cuba. The Willis Consulting Group, julio, 1998.

Escenarios de cambio climático para la energía solar y eólica durante el siglo XXI

Climate Change Scenarios for Solar and Wind Energy during XXI Century

*Aramís Fonte Hernández
Investigador Auxiliar del Centro Meteorológico de Camagüey.
E-mail: aramis@met.cmw.inf.cu
Roger E. Rivero Vega
Investigador Auxiliar del Centro Meteorológico de Camagüey
Roger R. Rivero Jaspe
Aspirante a Investigador del Centro Meteorológico de Camagüey*

Resumen

La disponibilidad de energía eólica y solar en una localidad cualquiera depende de factores climáticos específicos, aún sin tomar en cuenta el efecto de las variables climáticas sobre la eficiencia de los procesos de transformación de energía. Esto sucede porque el potencial de energía eólica depende del cubo de la velocidad del viento y de la estratificación vertical de este en la superficie, mientras que el potencial de energía solar global y las condiciones climáticas que definen el balance de radiación depende no solo de la intensidad, sino de la naturaleza de las superficies y la interacción de estas. Si bien hace sólo diez años las proyecciones de desarrollo de la energía solar y eólica podían asumir que las condiciones climáticas medias de una localidad estaban definidas de una vez y por todas, ya en la última década quedó establecido que el clima global y local está cambiando a consecuencia del forzamiento radiativo de la atmósfera por los gases de efecto invernadero que se han producido a partir de la revolución industrial.

Este cambio climático modificará la velocidad del viento y su estructura vertical, así como la radiación solar global y el balance de radiación, alterando por tanto los potenciales disponibles de energía solar y eólica de modo continuo durante el siglo XXI. En el presente trabajo se discuten los escenarios de cambio climático para la velocidad del viento y la radiación solar en la región centro-oriental de Cuba durante el presente siglo, obtenidos mediante modelos numéricos acoplados de circulación general océano/atmósfera, y la repercusión que tales cambios tendrán sobre los potenciales de energía solar y eólica en esta región. Dentro de los aspectos que es necesario señalar, resalta el de la originalidad de este trabajo, ya que es la primera vez que se realiza este tipo de análisis para alguna región de nuestro país.

Abstract

Solar and wind energy availability, in any place, depends of specific climatic factors even without considering the consequences of climatic variables on the

efficiency of energy conversion processes. This is so because wind power potential depends on the cube of wind speed and its vertical distribution near the earth surface, while the solar energy potential depends of climatic conditions which determines the global solar radiation intensity, and of the exposed surface and radiative properties of the atmosphere that determine the radiation balance. Although major changes in climate began only 10-20 ten years ago, the scope of solar and wind energy development should take into consideration that average climatic conditions in a specific place are definitive rather than temporary. Already in the last decade it was determined that the Global Climate and the Local Climate, are changing as a consequence of the atmospheric radiative forcing caused by the increment in atmospheric concentrations of greenhouse gases that have been taking place since the beginning of the Industrial Revolution.

This climate change will modify the speed of wind and its vertical distribution, as well as the global solar radiation, atmospheric long wave counterradiation and the radiation budget, altering continually the available potential of solar and wind energy during the XXI century. In the present work, the climate change scenarios for wind speed and solar radiation in the central and eastern Cuban region for the present century and the repercussion that such changes will have on the potential of solar and wind energy in this area are discussed. These scenarios were obtained through numerical coupled ocean-atmosphere general circulation models. Among the aspects that it is necessary to point out stand out the originality of this work, since it is the first time that this kind of analysis is carried out for any region of our country.

Introducción

Entre los retos más importantes que la humanidad tiene que enfrentar actualmente se encuentran los problemas asociados al denominado *cambio climático*, no solo por el grado de complejidad y variedad de problemas, sino porque su alcance y solución requieren aunar esfuerzos de la comunidad científica internacional y de los gobiernos de todos los países debido a la extensión y variedad de estos, que en muchos casos serán de naturaleza irreversible, poniendo en peligro la existencia de la vida en nuestro planeta. Los problemas derivados de este denominado cambio climático se encuentran fuertemente asociados a la débil racional actividad del hombre, ya que entre sus principales causas se encuentra el acelerado y desmedido desarrollo industrial durante los siglos XIX y XX, que han conllevado a la destrucción de la capa de ozono, con su correspondiente aumento de la radiación solar, así como al efecto invernadero, que conducen al recalentamiento atmosférico, y que constituyen la esencia de los *cambios globales*, que generan una sorprendente cantidad de impactos sobre cada uno de los sectores y tópicos que conforman el entorno de la actividad humana sobre el planeta, y que requieren de la realización de los denominados *estudios de impacto* para detectar cuáles serán los problemas que nos afectarán y en qué nivel, lo cual evidentemente resulta insuficiente a lo que el hombre realmente necesita, por lo que esto deriva hacia otros campos tales como la elaboración de *medidas de mitigación y medidas de adaptación* para cada uno de los sectores y tópicos que se afectarán. Dado el nivel de complejidad y variedad de situaciones que se pueden presentar, esto debe ser organizado y analizado siguiendo

metodologías uniformes para, a escala mundial, poder establecer comparaciones y tener una visión más clara de la situación, que permita ir resolviendo o al menos adecuando la respuesta a un lógico nivel de prioridades, lo cual se logra mediante las *técnicas de construcción de escenarios de cambio climático*.

El empleo de estas técnicas será el basamento para el análisis del efecto del cambio climático sobre el comportamiento de la velocidad del viento y la radiación solar, como pilares fundamentales de las fuentes renovables de energía para el presente siglo XXI en nuestro país, aspecto de resaltada novedad, debido a que es la primera vez que se realiza este tipo de análisis para Cuba, ya que en el mundo actual es reconocido que una de las vías factibles para combatir el calentamiento global y la conservación del planeta, transita por el camino del desarrollo y aplicación de las energías renovables [EPA, 2001].

Generalidades

Según Viner y Hulme [1992], la definición de *escenarios de cambio climático* establece que este es una representación, internamente consistente, del clima futuro, construida a partir de métodos con basamento científico, y que puede ser usada para dar una comprensión de la respuesta de los sistemas sociales y medio ambientales, al futuro cambio climático.

No obstante, y según se aclaró posteriormente [Smith y Hulme, 1996], los escenarios climáticos constituyen representaciones plausibles del clima futuro, que son consistentes con nuestras suposiciones de las futuras emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes, así como con nuestra comprensión del efecto del incremento de la concentración atmosférica de estos gases sobre el clima global, pero no son predicciones del clima futuro al estilo de los pronósticos del tiempo, debido al nivel de incertidumbre adicional que provoca la existencia de un amplio rango de posibles escenarios. Esto último no debe ser confundido con la posibilidad de generación de un número ilimitado de escenarios por libre albedrío, o creados según inspiración personal del investigador. Para evitar esto existen metodologías con criterios firmemente establecidos que deben ser cumplidos de forma estricta [Smith y Hulme, 1996]. Tomando esto en consideración, puede procederse a la construcción de los escenarios climáticos.

Tipos de escenarios climáticos

1. Escenarios sintéticos.
2. Escenarios análogos.
3. Escenarios de modelos de soluciones físicas.
4. Combinación de escenarios.

De todos estos, los de mayor aceptación son los basados en soluciones físicas, y dentro de estos resaltan:

- Modelos de circulación general (GCM).
- Modelos simples.
- Modelos regionales.
- Modelos simples y generales acoplados.

Según se verá en la siguiente sección, para este trabajo se emplearon los

modelos de circulación general en la creación de los denominados escenarios de cambio climático.

Materiales y métodos

Los escenarios climáticos para los valores de cambio de la radiación solar global sobre la región centro-oriental de Cuba (de Villa Clara a Las Tunas) fueron obtenidos empleando la metodología elaborada por la Unidad de Apoyo del II Grupo de Trabajo del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático [IPCC, 1996]. Esto permitió obtener los valores de cambio de las temperaturas, las precipitaciones y la radiación solar global (W/m^2), para el momento en que se duplique la concentración atmosférica de CO_2 con relación a su valor de referencia para el período 1961-90. Es aconsejable señalar que, aunque el momento en que esta concentración se alcance dependerá en gran medida del escenario de emisión de gases de efecto invernadero que sea realizado en el futuro [IPCC, 1992], la fecha probable de ocurrencia de este hecho para los escenarios utilizados (incremento anual de la concentración atmosférica de CO_2 en 1,0 %) corresponde al período 2060-2080.

Los valores de cambio de las variables de interés, y en específico de la radiación solar global, dependerán en cierta medida del modelo de circulación general de la atmósfera que se utilice para estimar el clima futuro. En este caso fueron utilizadas para este fin las corridas de experimentos de equilibrio de los modelos de circulación general conocidos en la literatura como UKMO, CCCM y GISSEQ [IPCC, 1996]. El primer modelo nombrado fue creado en el centro Hadley de la Real Oficina Meteorológica del Reino Unido (*United Kingdom Meteorological Office*), el segundo por el Centro del Clima de Canadá (*Canadian Climate Center*) y el último por el Instituto Goddard de Ciencias del Espacio, en Estados Unidos.

Los valores de cambio de las temperaturas asociados a estos cambios en la concentración atmosférica de CO_2 son también de interés para el aprovechamiento de la energía solar porque tendrán una influencia mensurable en el balance de radiación de las superficies, en el intercambio de calor entre estas y el medio, así como en las características del funcionamiento de los componentes electrónicos, ópticos y optoelectrónicos.

Los escenarios climáticos para los valores de cambio de la velocidad del viento sobre la región oriental de Cuba fueron definidos empleando los resultados obtenidos por el Centro de Distribución de Datos del IPCC [IPCC-DDC, 1999]. Esto permitió obtener los valores de cambio de la velocidad media del viento (m/s) sobre la región oriental de Cuba para el 2020, 2050 y 2080. El escenario de emisión de gases de efecto invernadero utilizado fue el IS92a [IPCC, 1992], que es muy cercano al que se obtiene asumiendo un incremento anual de la concentración atmosférica de CO_2 de 1,0 %.

Para este análisis fueron utilizadas las corridas de experimentos en transiente de los modelos acoplados de circulación general océano-atmósfera, conocidos en la literatura como HadCM2, ECHAM4, y CGCM1 [IPCC_DDC, 1999]. El primer modelo fue creado en el Centro Hadley para la Investigación y la Predicción Climática del Reino Unido [*Hadley Center*, 1995], el segundo por el Centro Alemán de Investigación Climática en Hamburgo, y el último por el

Resultados y discusión

Radiación Solar

Según se aprecia de la tabla 1, no existe una plena coincidencia en cuanto a la magnitud y momento (mes) en que se produce la afectación para el escenario en cuestión, aspecto que es normal cuando se emplean diversos modelos, tal y como ha sido planteado en la sección de materiales y métodos, debido, fundamentalmente, a las imperfecciones en la descripción matemática de muchos de los fenómenos que intervienen en el proceso. Sin embargo, resulta de interés señalar tres aspectos fundamentales:

- En cada uno de los escenarios climáticos utilizados se arriba a que, durante una época del año, va a existir una reducción de la radiación global, producto del cambio climático.
- Aunque el número total de meses y su ubicación dentro del año no coincide completamente en los tres escenarios, sí puede afirmarse que la cantidad de meses que presentará disminución de la radiación solar global oscila entre 4 y 11.
- Según algunos escenarios, se presentará incremento de la radiación global en algunos meses del año, pero su distribución temporal y magnitud varía entre ellos.

Independientemente de todo lo anterior, puede señalarse que las disminuciones de radiación global se moverán en el rango de 1 a 9 %, mientras que los incrementos constituirán valores de 1 a 7 %, todo ello tomando como base la media del período 1961-1990.

Tabla 1. Variación de la radiación solar global para el momento de la duplicación de la concentración de CO₂ atmosférico. Relación (2x CO₂)/(1x CO₂).

Mes del año	Escenario climático		
	CCCM	GISSEQ	UKMO
Enero	0,94	0,95	1,06
Febrero	0,94	1,00	1,07
Marzo	0,97	1,00	1,05
Abril	0,99	0,97	1,02
Mayo	0,97	0,99	1,02
Junio	0,95	0,99	1,00
Julio	0,97	1,01	0,91
Agosto	1,01	1,02	0,95
Septiembre	0,96	1,02	0,96
Octubre	0,94	1,03	0,98
Noviembre	0,93	1,00	1,03
Diciembre	0,93	1,00	1,03

Debe tenerse en cuenta que el momento de la duplicación de la concentración de CO₂ debe ocurrir en el intervalo de tiempo entre los años 2060 y 2080, de mantenerse el ritmo de desarrollo y políticas en el mundo acorde al escenario de emisiones de gases de efecto invernadero IS92a y IS92b [IPCC, 1992].

Velocidad media del viento

Para el análisis de esta variable pudo contarse con los escenarios generados con ayuda de los modelos CGCM1, ECHAM4, y HadCM2, los cuales permiten obtener los estimados en períodos de 30 años, centrados en los años 2020, 2050, y 2080, por lo que para organizar el análisis de los resultados, estos se expondrán en tablas independientes para cada uno de estos períodos.

Tabla 2. Variación de la Velocidad media del Viento para el año 2020 (m/s).

Mes del año	Escenario climático		
	CGCM1	ECHAM4	HadCM2
Enero	-0,32	0,11	-0,04
Febrero	-0,31	0,29	0,01
Marzo	-0,09	0,58	-0,13
Abril	0,21	0,21	0
Mayo	-0,14	0,05	0,08
Junio	0,16	0,09	0,09
Julio	0,23	-0,03	0,12
Agosto	0,05	-0,02	0,07
Septiembre	0,24	-0,23	0,08
Octubre	-0,18	-0,30	-0,15
Noviembre	0,02	0,32	-0,08
Diciembre	-0,31	0,61	-0,15

*Nota: se resaltan en **negrita** los casos en que ocurre disminución del parámetro.*

De la tabla 2 se aprecia que el viento sufrirá disminución para el año 2020 durante algunos meses del año y, aunque la distribución de los períodos de disminución se diferencia de un escenario a otro, llama la atención que la cantidad total de tiempo en que se manifiesta este comportamiento, oscila entre 4 y 5 meses del año.

Para el caso del año 2050, la situación en sentido general es semejante a la del año 2020, sin embargo, la cantidad de meses en que se presenta disminución de la variable en cuestión aumenta según se observa de la tabla 3, oscilando en 4 y 9 meses al año acorde a los escenarios que se manejan en este trabajo.

Tabla 3. Variación de la velocidad media del viento para el año 2050 (m/s).

Mes del Año	Escenario climático		
	CGCM1	ECHAM4	HadCM2
Enero	-0,6	-0,01	-0,2
Febrero	-0,38	-0,02	0,06
Marzo	-0,06	-0,25	0,06
Abril	0,36	0,07	0,15
Mayo	-0,06	-0,35	0,35
Junio	0,28	-0,08	0,02
Julio	0,26	-0,01	0,04
Agosto	-0,11	-0,2	0,14
Septiembre	0,36	-0,38	0,1
Octubre	-0,55	-0,32	-0,17
Noviembre	0,17	0,23	-0,07
Diciembre	-0,34	0,4	-0,36

Tabla 4. Variación de la velocidad media del viento para el año 2080 (m/s).

Mes del Año	Escenario climático		
	CGCM1	ECHAM4	HadCM2
Enero	-0,7	0,29	-0,34
Febrero	-0,33	-0,03	-0,05
Marzo	-0,17	-0,16	0,03
Abril	0,05	-0,02	0,12
Mayo	0,04	-0,05	0,29
Junio	0,44	-0,03	-0,18
Julio	0,22	-0,26	-0,13
Agosto	-0,15	-0,23	0,04
Septiembre	0,11	-0,55	0,18
Octubre	-0,13	-0,24	-0,17
Noviembre	-0,24	0,44	-0,37
Diciembre	-0,41	0,86	-0,52

De la tabla 4 se verifica que a medida que se acerca el momento de la duplicación de la concentración de CO₂, la cantidad de meses en que se presenta disminución de la velocidad del viento aumenta independientemente del escenario que se emplee, lo que motiva a pensar que hay más elementos para decir que ocurrirá una disminución del valor de esta variable en el futuro, con la consiguiente afectación en el potencial de energía eólica.

Si se realiza un análisis general de los resultados obtenidos para cada uno de los períodos estudiados (años 2020, 2050 y 2080) y teniendo en cuenta la media de todos los escenarios de cambio climático considerados en este trabajo, se obtienen distintos grados de afectación (Tabla 5), pero como tendencia se aprecia que las variaciones de la afectación de la potencia eólica van a ser más significativas a medida que se avanza en el tiempo, o sea, en la medida en que se va elevando la concentración atmosférica de CO₂.

Tabla 5. Grado de afectación general de la velocidad del viento.

Año (período)	Nivel de afectación
2020	+3,0 %
2050	-3,8 %
2080	-9,1 %

Una comprensión mayor del efecto que se producirá puede obtenerse si se toman en cuenta de manera combinada la acción de la variación de la densidad del aire por el incremento de la temperatura, y de la disminución de la velocidad del viento sobre la potencia eólica media por unidad de área expuesta al viento (P/A). Para ejemplificar esto se tendrán en cuenta los resultados obtenidos del escenario climático HadCM2, que es uno de los que más aceptación han obtenido para las condiciones del área del Caribe y que, además, posee toda una serie de elementos que convencen para su utilización no solo como el más acertado para nuestras condiciones, sino también por su concepción y calidad [INSMET, 1999].

Para ello se calcularon las densidades del aire para las condiciones actuales y futuras empleando para ello los datos de temperatura actual y del futuro incremento de la temperatura, sustituyendo en la ecuación de Clapeyron (Pavlov et al., 1981):

$$p_{\text{Aire}} = (M/22,4) (273 P)/(T P_0) \quad (1.1)$$

Donde:

p_{Aire} : densidad del aire (kg/m^3).

M: masa molecular del aire ($29 kg/kmol$).

P: presión atmosférica a las condiciones dadas (kg/cm^2).

P_0 : presión atmosférica a las condiciones normales (kg/cm^2).

T: temperatura absoluta (K).

Luego se sustituye en la ecuación de potencia teórica para el rotor por unidad de superficie expuesta al aire (P/A), según Eggleston (1998):

$$(P/A) = 0,5 p_{\text{Aire}} V_w^3 \quad (1.2)$$

De lo anterior se obtienen los valores de la tabla 6, que resume los resultados que permiten evaluar el comportamiento de la potencia eólica para las condiciones del período base (1991-2000), y futuras en la zona de Camagüey, y el grado de afectación en relación con el período base señalado.

Tabla 6. Variación de la densidad y potencia eólica para el 2080 en relación con el período base (1991-2000).

TM_1	Vw_1	RoA_1	$(P/A)_1$	dt	TM_2	Vw_2	RoA_2	$(P/A)_2$	Variación
22,7	3,54	1,1953	26,5	1,86	24,56	3,2	1,1878	19,5	-26,6
22,6	3,67	1,1957	29,6	2,39	24,99	3,62	1,1861	28,1	-4,8
23,7	3,78	1,1912	32,2	3,04	26,74	3,81	1,1791	32,6	1,4
25,1	3,56	1,1856	26,7	3,47	28,57	3,68	1,1720	29,2	9,2
26	3,2	1,1821	19,4	3,75	29,75	3,49	1,1674	24,8	28,1
27	2,89	1,1781	14,2	4,71	31,71	2,71	1,1599	11,5	-18,8
27,5	3,3	1,1762	21,1	4,96	32,46	3,17	1,1571	18,4	-12,8
27,2	2,85	1,1773	13,6	4,55	31,75	2,89	1,1598	14,0	2,7
26,9	2,36	1,1785	7,7	4,73	31,63	2,54	1,1602	9,5	22,7
25,9	2,44	1,1825	8,6	3,94	29,84	2,27	1,1671	6,8	-20,5
24,6	3,3	1,1876	21,3	3,34	27,94	2,93	1,1744	14,8	-30,8
23,1	3,49	1,1936	25,4	2,29	25,39	2,97	1,1845	15,5	-38,8

Donde:

TM_1 : temperatura media mensual del período base ($^{\circ}C$).

Vw_1 : velocidad media mensual del viento en el período base (m/s).

RoA_1 : densidad media del aire en el período base (kg/m^3).

$(P/A)_1$: potencia eólica por unidad de superficie, en el período base (W/m^2).

dt : incremento de temperatura esperado para el 2080 ($^{\circ}C$).

TM_2 : temperatura media mensual para el 2080 ($^{\circ}C$).

Vw_2 : velocidad media mensual del viento para el 2080 (m/s).

$(P/A)_2$: potencia eólica por unidad de superficie, para el 2080 (W/m^2).

Variación: cambio en el valor de la potencia eólica con relación al período base (expresado en %).

De aquí puede apreciarse que, aunque existirán oscilaciones en el valor de la potencia eólica (con meses que presentarán incremento y otros que presentarán disminución), el efecto neto es el de una disminución de un 9 % en el año.

Conclusiones

- Independientemente del tipo de escenario climático que se emplee, existirá una disminución de la radiación global durante cierta época del año cuando se produzca la duplicación de la concentración de CO_2 atmosférico.
- Según todos los escenarios climáticos probados, la variable climática viento, experimentará una disminución de su valor en determinado período del año, siendo mayor en frecuencia e intensidad a medida que se avanza en el tiempo. Todos estos elementos deben ser tenidos en cuenta por los diseñadores y proyectistas en el desarrollo de sus trabajos con vistas al futuro.

Bibliografía

1. EGGLESTON, E. How can I calculate the amount of power available at given wind speed?, 1998. En Internet: <http://www.awea.org/faq/windpower.html>
2. EPA. Electricity and Environment. EPA Global Warming Site Actions. Disponible en el sitio de Internet: <http://www.epa.gov/globalwarming/actions/cleanenergy/electricity/index.html>. Octubre 19, 2001.

3. HADLEY CENTER. *Modelling climate change: 1869-2050*. Hadley Center for Climate Prediction and Research, Bracknell, 1995.
4. HULME M. and E. BARROW. MAGIC and SCENGEN Workbook. UNDP/GEF NCSP. First Draft, 13 December, 1999.
5. IPCC. Climate Change 1992: *The Supplementary Report to the IPCC Scientific Assessment*. (J. T. Houghton, B. A. Callander, and S. K. Varney, eds.). WMO / UNEP, Cambridge University Press, Cambridge, 1992. 200 pp
6. IPCC. Climate Change 1995. Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses, 1996. 879 pp. Cambridge University Press.
7. IPCC-DDC. *Data/Information Supplied by the IPCC Data Distribution Center for Climate Change and Related Scenarios for Impacts Assessments*. CD-ROM, Version 1.0. Climate Research Unit, University of East Anglia, 1999.
8. PAVLOV, K. F., P. G. ROMANKOV y A. A. NOSKOV. (1981). Problemas y Ejemplos para el Curso de Operaciones Básicas y Aparatos en Tecnología Química. Moscú: Ed. MIR, 1981. 611 pp.
9. RIVERO JASPE, R.R. y R. E. RIVERO VEGA. Construcción de escenarios climáticos. Un nuevo tipo: los escenarios semisintéticos. Informe Científico-técnico, Centro Meteorológico de Camagüey, 1998. 11 pp.
10. Smith J.B. and M. Hulme. Handbook on Methods for Climate Change Impact Assesment and Adaptation Strategies. Appendix to Chapter 1: Climate Change Scenarios. Draft Version 1.0. September 18. United Nations Environment Programme. Global Environment Facility, 1996. 25 pp.
11. VINNER D. and M. HULME. Climate Change Scenarios for Impact Studies in the UK. Climate Research Unit. University of East Anglia: Norwich, United Kingdom, 1992.

Estudio de los Días-Grado con fines térmicos en Santa Clara

Study of Day-Grade for Thermal Purposes in Santa Clara

*Guillermo Saura González
Ricardo Osés Rodríguez*

Resumen

En este trabajo se discuten los datos de variables climatológicas a lo largo del año para la evaluación del ambiente con fines de enfriamiento y calentamiento. Se presentan las distribuciones de frecuencia de los parámetros más importantes, así como se estiman índices estadísticos. Se utilizan técnicas de correlación y expresiones para predecir los parámetros propuestos. Todo es presentado en forma de metodología para usar una base de datos que recoja el tiempo que se mantiene la temperatura ambiental en un intervalo de temperaturas dado, lo que permite usar la variable días-grado en las expresiones para el diseño e instalación de sistemas de enfriamiento o calentamiento.

Abstract

The paper discusses yearly weather variables data for thermal environmental assessment purposes. The frequency distributions of the most important parameters are presented, and statistical indicators are considered. Correlation techniques and equations to predict the proposed parameters are used. Everything is presented in the form of a methodology for using a database that registers the time that the ambient temperature remains within a given interval of temperatures, which enables the use of the degree-days variable in the expressions for the design and installation of air conditioning systems.

Introducción

El buen diseño de los edificios e instalaciones térmicas, tanto de enfriamiento como de calentamiento, precisa del conocimiento de los niveles y la distribución de la temperatura ambiente. El desarrollo de importantes trabajos en técnicas de la energía solar pasiva recientemente, ha mostrado gran información sobre datos de la temperatura ambiente [Commission, 1985; Jones et al, 1982; Phillips, 1984; Hawlader et al, 1990 y Tselepidaki et al, 1993]. Sin embargo, la compilación de estos datos ha sido realizada fundamentalmente para propósitos de calentamiento, por lo que no se cuenta con información disponible para el diseño y explotación del comportamiento de sistemas de enfriamiento; las metodologías existentes para la evaluación de las cargas de enfriamiento de los edificios e instalaciones están principalmente basadas en el uso de los días-grado de enfriamiento [Tselepidaki et al, 1993 y Vida y Kreider, 1987]. Tanto para Europa como para Cuba estos parámetros son raramente conocidos y cuando existen son limitados solamente a una temperatura base [Antinucci, 1992 y Antinucci, 1990].

El diseño de los sistemas de frío se realiza de tal forma que conducen a un

sobredimensionamiento de la instalación, referida al uso que se le dará. Los sistemas pasivos e híbridos de enfriamiento requieren información adicional como, por ejemplo, los días-grado de enfriamiento nocturno para el cálculo de la eficiencia de ventilación nocturna [ASHRAE, 1977; Maldonado, 1990 y Baker, 1986], la variación diaria de la temperatura, la distribución en 24 h, los valores máximos y mínimos, así como la distribución de frecuencias de la temperatura y el número de días consecutivos sobre cierto valor [Samatouris, 1990].

El dato climatológico primario es tomado y procesado en las estaciones meteorológicas. No obstante, para una clasificación de los parámetros necesarios, así como para reportes con propósitos de enfriamiento y calentamiento, no existe una definición de la forma de la base de datos. El presente trabajo trata de ofrecer una metodología del tratamiento de los datos tanto en invierno como en verano, o sea, con propósitos de enfriamiento o de calentamiento.

Materiales y métodos

Base de datos:

Santa Clara se caracteriza por un clima cálido y húmedo, con temperaturas medias en verano entre 23 y 27 °C, y entre 20 y 24 °C en invierno. Debido a que el objetivo de nuestro trabajo es el estudio de las temperaturas ambientes con propósitos de enfriamiento y calentamiento se tomaron los meses de febrero y julio, por ser el más frío y el más caliente, respectivamente.

La base de datos se diseñó de forma tal que las variables recogieran el tiempo en que la temperatura se mantenía por encima de un valor base prefijado. Los valores base de la temperatura ambiental que se estudiaron fueron: 20, 22, 24, 26, 28 y 30 °C, correspondientes al período 1977 a 1990, de una base de datos diaria de la estación agrometeorológica del Yabú. Se procesaron los datos, además, en forma decenal.

Procesamiento:

Se utilizó la regresión lineal para buscar las ecuaciones que relacionan las diferentes variables entre ellas y con respecto a la temperatura máxima y mínima.

Resultados y discusión

En la tabla 1 se muestra una estadística descriptiva de las diferentes variables, lo que es muy útil a la hora del diseño de la instalación, tanto para el cálculo de la capacidad de enfriamiento o calentamiento, como para la elección del tipo y espesor de aislante. Como era de esperar, el valor medio disminuye a medida que aumentamos el valor base, al igual que la desviación estándar; se aprecia, además, cómo en invierno es mayor la variabilidad de las variables.

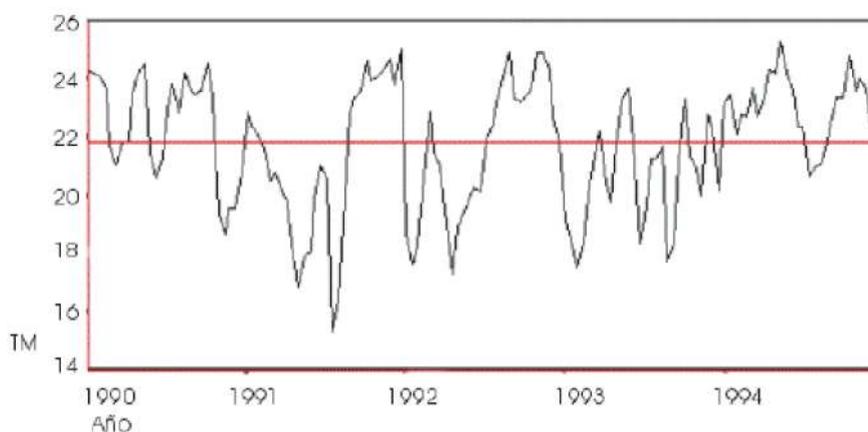
Tabla 1. Estadística descriptiva de las variables.

	TH20	TH22	TH24	TH26	TH28	TH30	TX	TN	TM
Media febrero	982,4	685,0	448,9	273,1	135,0	39,64	28,0	16,93	21,8
Desv Tip febrero	352,8	279,4	225,7	203,7	154,4	86,46	2,64	2,64	2,17
Media julio	1440	1376	1039	720,8	522,3	326,9	32,33	22,17	26,49
Desv Tip julio	0,0	147,5	237,7	187,5	145,6	140,1	0,94	0,94	0,86

TH20, TH22, ..., TH30: Número de minutos diario promedio mensual con temperatura por encima de los 20 °C, 22 °C, ..., 30 °C.

La figura 1 muestra la marcha histórica para el mes de febrero de la temperatura media en la estación meteorológica del Yabú. Como puede apreciarse, no existe una tendencia evidente, por lo que la media mantiene una estabilidad relativa, variando entre los 15,5 °C y los 25,5 °C. Similar comportamiento en cuanto a la forma de la curva se presenta para el mes de julio.

Fig. 1. Marcha histórica para el mes de Febrero de la temperatura media.



A continuación se comparan las distribuciones de frecuencia para el mes de febrero (Fig. 2) y para el mes de julio (Fig. 3), observándose cómo para el mes más frío la distribución se inclina hacia la derecha, el valor modal se encuentra situado a la derecha del valor medio, por lo que se presenta una asimetría izquierda, en el caso del mes de julio la asimetría no es tan acentuada, pudiéndose considerar en buen grado aproximadamente simétrica. Este tipo de información es necesaria para la evaluación del desempeño de las técnicas de pipeo, para estimar el período posible en que el sistema puede operar, así como para utilizarse también en la primera estimación de las necesidades de enfriamiento.

Fig. 2. Histograma de temperatura media para el mes de julio.

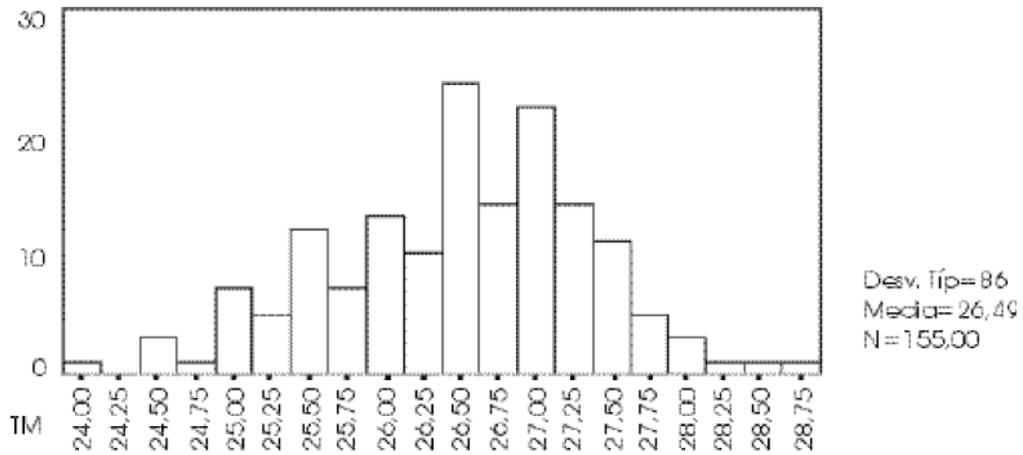
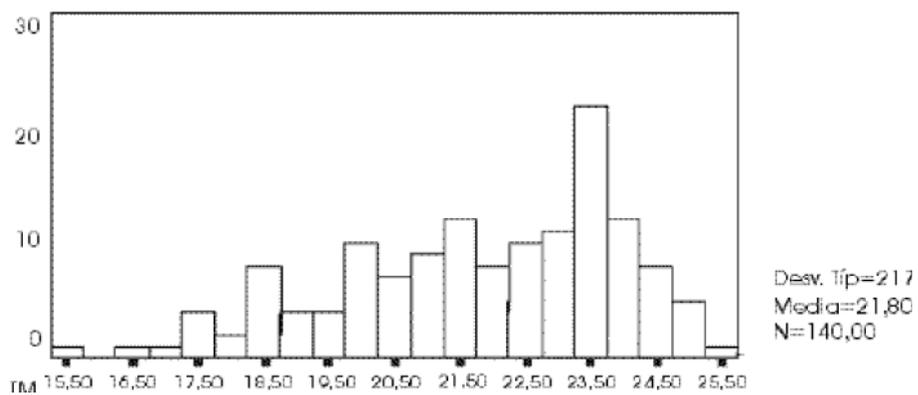
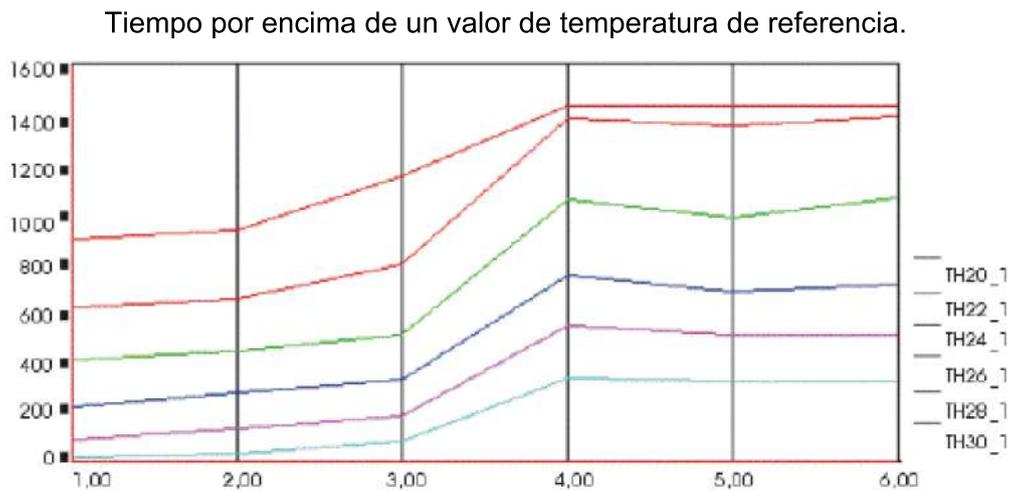


Fig. 3. Histograma de temperatura media para el mes de febrero.



La figura 4 muestra el comportamiento decenal para ambos meses del tiempo en que la temperatura ambiental tiene valores por encima de cierta de temperatura base.

Fig. 4. Comportamiento Histórico decenal para los valores bases.



En el mes de febrero se puede apreciar un ligero incremento en la decena segunda y tercera con respecto a la decena primera; sin embargo, para el mes de julio se aprecia un ligero descenso en la segunda decena, comportándose de manera semejante la segunda y la tercera decena.

En la figura 5 se puede apreciar el comportamiento de la marcha diaria del tiempo sobre un valor base de temperatura para el mes de febrero. Se observa un comportamiento muy similar para todas las variables con valores superiores a las 3 h sobre la temperatura de 28 °C a partir del día 19, y valores superiores a las 13 h para el valor base de 20 °C; lo anterior pone en evidencia que, pese a estar en presencia del mes más frío del año, nuestro país es un eterno verano. Para el caso del mes de julio en la figura 6 se observan valores superiores a las 6 h sobre la temperatura base de 28 °C, mientras para el valor base de 30 °C este tiempo se reduce a 3 h.

Fig. 5. Marcha Histórica diaria del tiempo sobre un valor base de temp en febrero.

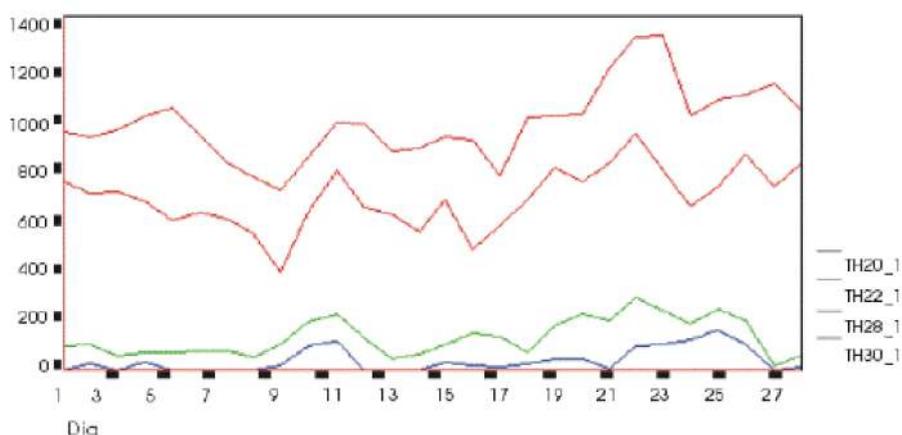
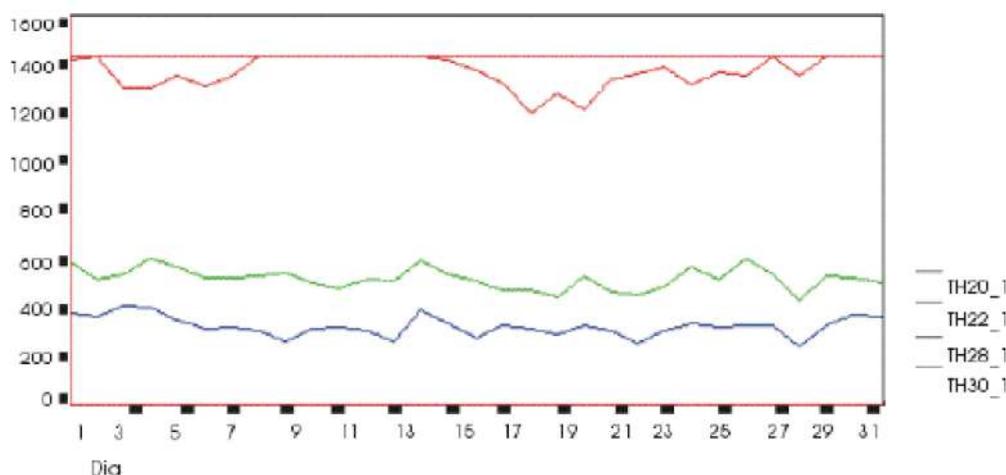


Fig. 6. Marcha Histórica diaria del tiempo sobre un valor base. Mes de julio.



Posteriormente se calcularon las ecuaciones de regresión entre el valor base más pequeño (TH20) y los restantes (TH22 al TH30), los resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Regresiones con respecto a TH20. R = Coeficiente de Correlación.

Var Dep	R	Std Dev	F	Sig F	C. Th20	Constante
TH22	0,86	205,6	873,4	0,000	1,060	-251,58
TH24	0,76	242,4	410,0	0,000	0,860	-299,44
TH26	0,75	195,2	385,8	0,000	0,675	-318,47
TH28	0,74	162,2	373,3	0,000	0,548	-330,87
TH30	0,63	143,5	198,9	0,000	0,354	-242,23

Std Dev= Desviación estándar. F= Estadístico de Fisher. C= Coeficiente de la ecuación. Sig F= Significación de la F.

En general, todas las ecuaciones son significativas para $\alpha = 0,01$, los coeficientes de correlación son altos, mayores que 63 % y los errores de estimación pequeños. Se puede apreciar cómo a medida que aumenta el valor base el coeficiente de correlación lineal va decreciendo.

En la tabla 3 se muestran los parámetros de las regresiones con respecto a la temperatura máxima media (TX) y a la temperatura mínima media (TN); todas las ecuaciones son significativas para $\alpha = 0,01$, los coeficientes de correlación son altos, superiores a 78 % y los errores de estimación pequeños. Como se puede apreciar los coeficientes de correlación y los errores de estimación son más pequeños que los de la tabla 1, por lo que para el cálculo de los valores de temperatura base es preferible utilizar los valores de TX y TN, teniendo en cuenta además que si se decidiera realizar una expedición para la caracterización de determinado punto de interés, sería más factible la medición

con termómetros de los valores de TX y TN que con equipos registradores, pues son más costosos y escasos.

Tabla 3. Regresiones con respecto a los TX y TN. R = Coeficiente de Correlación.

Var Dep	R	Std Dev	F	Sig F	TX TN Coef	Constante
TH20	0,91	136,8	728,0	0,000	41,7 61,8	
TH22	0,92	153,4	901,8	0,000	64,3 65,8	-251,58
TH24	0,88	176,3	518,8	0,000	67,4 47,8	-299,44
TH26	0,86	147,0	450,6	0,000	61,2 29,1	-318,47
TH28	0,86	122,3	439,8	0,000	51,3 22,4	-330,87
TH30	0,78	116,2	229,0	0,000	36,1 14,5	-242,23

Coef = Coeficientes de la ecuación. Std Dev = Desviación estándar. F = Estadístico de Fisher. Sig F = Significación de la F.

Conclusiones

- Se logró un análisis de las temperaturas ambientales enfocado hacia el diseño e instalación de equipos y obras que realicen o empleen procesos de calentamiento y/o enfriamiento.
- En una expedición para la caracterización de determinado punto de interés es más factible la medición con termómetros de los valores de la TX y la TN.

Bibliografía

1. COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES. Test reference years. Weather data sets for computer simulations of solar energy systems and energy consumption in buildings. Brussels: D.G. 12, 1985.
2. JONES, R.; BALCOMB, J. D.; KOSIEWICZ, C. E.; LAZARUS, G. S.; MCFARLAND, R. D. AND W. O. WRAY. Passive solar design handbook. DOE/CS-0127/3, 1982.
3. PHILLIPS, W. F. *Harmonic analysis of climatic data*, in Solar Energy, 32, 319-328, 1984.
4. HAWLADER, M. N. A.; BONG, T. Y. AND MAHMOOD, W. *Some frequently used meteorological data for Singapore*, in Solar Energy, 8, 1-11, 1990.
5. TSELEPIDAKI, I.; SANTAMOURIS, M. AND MELITSIOTIS, D. *Analysis of the summer ambient temperatures for cooling purposes*, in Solar Energy, 3, 197-204, 1993.
6. VIDA, M. AND KREIDER, J. F. *Monthly averaged cooling load calculations-Residential and small commercial buildings*, in Solar Energy, 109, 311-320, 1987.
7. ANTINUCCI, M. *Passive cooling-State of the art*, in Solar Energy, 12, 311-320, 1992.
8. ANTINUCCI, M. *Horizontal study on passive cooling*, in Research project, E.E.C., No. 12, 1990.
9. ASHRAE. Handbook of fundamentals. 1977.
10. MALDONADO, E. *Auxiliary environmental control in pasively cooled buildings*, in Proceedings of the Workshop on Passive Cooling. Italy: E.E.C., D.G. 12, Ispra, 1990.
11. BAKER, N. Passive cooling evaluation method. Hungary: PACE, A. Zold (ed.), Proc. PLEA 86S-11, Pecs, 1986.
12. SAMATOURIS, M. *Natural cooling techniques*, in Proceedings of the Workshop on Passive Cooling. Italy: E.E.C., D.G. 12, Ispra, 1990

Biomasa torrada como sustituto de la madera

Heat Dried Biomass as a Wood Alternative

M. Pach

*Universidad Politécnica de Catalunya, EUETIT, 08222 Terrassa, Barcelona,
08222 Terrassa, Barcelona, Spain.*

R. Zanzi y E. Björnbom

*Department of Chemical Engineering and Technology, Chemical Reaction Engineering,
Royal Institute of Technology (KTH), 100 44 Stockholm, Sweden.*

Email: rolando@ket.kth.se

Resumen

Se presenta un trabajo sobre torrefacción de biomasa realizada en un reactor de laboratorio. El reactor tiene un diámetro de 0,04 *m* y un largo de 0,5 *m*. El mismo es calentado mediante resistencias eléctricas. Las biomásas utilizadas son dos tipos de maderas, abedul y pino, y bagazo de caña de azúcar. Se utilizan 3 temperaturas de tratamiento (230, 250 y 280 °C) y 3 tiempos de residencia (1, 2 y 3 *h*). Se estudia el efecto del tipo de biomasa utilizada, temperatura y tiempo de residencia, sobre las propiedades de los productos. Los productos obtenidos son caracterizados (contenido energético, humedad, cenizas y fracción volátil). Los productos gaseosos de la torrefacción son analizados. El tipo y composición de la biomasa influye en la distribución de los productos obtenidos. Durante la torrefacción ocurren cambios en las propiedades físicas y químicas de la biomasa. El contenido de carbón fijo y la densidad energética aumenta tanto con el tiempo y la temperatura, mientras que el rendimiento en peso del producto sólido disminuye. La biomasa torrada tiene propiedades hidrofóbicas y un mayor poder calorífico que la biomasa precursora.

Abstract

The paper presents a work on biomass heat drying, which was carried out in a laboratory reactor. The reactor has a diameter of 0,04 *m* and a length of 0,5 *m*. It is heated by means of electric resistances. The biomasses used are two types of wood, birch and pine, and sugar cane bagasse. Three treatment temperatures are used (230, 250 and 280 °C) and three residence times (1, 2 and 3 *h*). The effect of the type of biomass utilized, temperature and residence time on the properties of the products is studied. The obtained products are characterized (energy contents, humidity, ashes and volatile fraction). The gas products of the heat drying are analyzed. The type and composition of biomass influences the distribution of the obtained products. During heat drying, physical and chemical properties of biomass change. The contents of fixed charcoalcoal and the energy density increase with both time and the temperature while the yield in weight of the solid product diminishes. The heat-dried biomass has hydrophobic properties and a greater heating power than the precursor biomass.

1. Introducción

La torrefacción es una alternativa para el mejoramiento de las propiedades de la biomasa como combustible. Consiste en un calentamiento lento de la biomasa en una atmósfera inerte, a una temperatura máxima de 300 °C [Fonseca et al, 1998]. Se produce un producto sólido uniforme con bajo contenido de humedad y alto poder calorífico comparado con la biomasa inicial.

El proceso puede llamarse pirólisis suave, con la formación de un producto sólido que retiene aproximadamente 70 % del peso inicial y de 80 a 90 % del poder calorífico inicial [Arcate, 2000].

La biomasa torrada puede sustituir al carbón vegetal en un gran número de aplicaciones como combustible para cocinas domésticas de leña, para calentamiento de residencias, producción de biomasa peletizada y en briquetas para uso comercial y doméstico [Bourgeois y Doat, 1985; Girard y Shah, 1991 y Battacharya et al, 1995]. La biomasa torrada puede ser usada como combustible en la industria. Con un intervalo entre 30 y 35 % de carbón fijo, la biomasa torrada es un excelente agente reductor [Girard y Shah, 1991]. La biomasa torrada puede ser mezclada con carbón mineral y quemada en una caldera de carbón mineral pulverizado. Una ventaja importante de la madera torrada, en comparación con la madera original, es su uniformidad. La madera torrada es un combustible producible, flexible y con óptimas propiedades de combustión y de transporte. Debido al bajo contenido de humedad de la madera torrada, la calidad del combustible es mejor y el costo del transporte menor. Las propiedades de la madera torrada deberían implicar un mejoramiento en la operación de los gasificadores, donde la estabilidad del proceso es importante [Bourgeois y Doat, 1985].

2. Método, materiales y reactor

En cada experimento se utilizan 65 g de biomasa. Se usa un flujo de nitrógeno de 5 L/h como gas inerte. Algunos experimentos son realizados también con un flujo de nitrógeno de 10 L/h, usando pino como materia prima. El reactor es calentado a la temperatura final elegida (230, 250 y 280 °C). La muestra es mantenida a la temperatura final durante un período determinado de tiempo (1, 2 y 3 h), luego se apagan los calentadores eléctricos. Después del tratamiento se deja enfriar el reactor. Antes de cada experimento se hacen circular 12 L de nitrógeno para evitar la presencia de oxígeno en el reactor.

El producto sólido torrado es pesado y caracterizado. Se estudia la influencia de las condiciones experimentales (temperatura, tiempo de residencia y flujo de gas inerte) sobre la distribución de los productos y sobre sus propiedades.

2.1. Biomasa

Dos tipos de madera, abedul y pino, y bagazo de caña de azúcar, son seleccionados como materia prima. El bagazo de caña de azúcar es el residuo sólido en los centrales azucareros después de la extracción de los jugos azucarados.

Las muestras de madera son primeramente molidas, tamizadas y separadas en fracciones. Las muestras de pino tienen un diámetro entre 1 y 3,2 mm, mientras que las de abedul tienen un tamaño de partícula entre 1,0 y 1,35 mm. Las

muestras de bagazo no fueron tamizadas ni separadas en fracciones. La tabla 1 muestra el contenido de cenizas y humedad de las biomásas originales.

Tabla 1. Materias primas.

Biomasa	Cenizas	Humedad
-	<i>p% lh</i>	<i>p%</i>
Abedul	0.50	5.4
Pino	0.14	5.1
Bagazo	2.24	4.4

lh: libre de humedad.

2.2. Equipo

La figura 1 muestra el equipo utilizado en los experimentos. Incluye un reactor cilíndrico y un equipo para la condensación de los productos líquidos y medición de los productos gaseosos. El reactor (0,5 m de largo y 0,04 m de diámetro) es calentado por calentadores eléctricos. El reactor consiste en dos cilindros. La muestra se sitúa en el cilindro interior, el cual tiene una red metálica en la parte inferior. Dicho cilindro interior se puede sacar por arriba, de manera de poder retirar la biomasa torrada producida. La parte exterior está conectada mediante una rosca a un tubo metálico, a través del cual los volátiles son transportados al equipo de separación de productos líquidos. Los volátiles se enfrían en el condensador de agua. El gas pasa a través de una columna conteniendo algodón y pentóxido fosfórico como agente secante y luego es transportado a una bolsa. Luego el gas es analizado en un cromatógrafo de gases. Se analiza la concentración de CO₂, H₂, CO, N₂, CH₄, e hidrocarburos C₂ (etano, eten y acetileno).



Figura 1. Equipo.

3. Resultados y discusión

3.1. Distribución de productos

La tabla 2 muestra el rendimiento de los productos obtenidos en los experimentos, así como el contenido de humedad y ceniza del producto sólido torrado.

Tabla 2. Distribución de productos a diferentes condiciones.

-	Condiciones torrefacción			Rendimiento de productos			-	-
Biomasa	T	Tiempo	Flujo N ₂	Sólido	Líquido	Gas	Ceniza	Humed.
-	°C	h	l/h	p% lhc	p% lhc	p% lhc	p% lh	p%
Abedul	230	2	5	86,9	11,5	1,6	0,60	1,66
Abedul	250	1	5	85,5	12,8	1,7	0,64	1,62
Abedul	250	2	5	85,0	12,9	2,1	0,65	1,56
Abedul	250	3	5	82,1	13,9	4,0	0,67	1,33
Abedul	280	2	5	68,9	26,3	4,8	0,75	1,30
Pino	230	1	5	92,4	7,0	0,6	0,15	2,13
Pino	230	2	5	90,4	8,9	0,7	0,16	2,03
Pino	230	3	5	86,7	11,7	1,6	0,16	1,56
Pino	250	1	5	88,2	10,8	1,0	0,16	1,90
Pino	250	2	5	85,4	13,1	1,5	0,16	1,80
Pino	250	3	5	83,3	14,4	2,3	0,17	1,56
Pino	280	1	5	78,1	19,8	2,1	0,18	0,80
Pino	280	2	5	72,1	23,2	4,7	0,20	0,61
Pino	280	3	5	69,0	25,7	5,3	0,21	0,51
Bagazo	230	1	5	87,5	9,9	2,6	2,41	2,50
Bagazo	230	2	5	85,0	10,0	5,0	2,66	2,23
Bagazo	230	3	5	83,7	10,3	6,0	2,46	2,00
Bagazo	250	1	5	78,9	10,7	10,4	2,84	1,95
Bagazo	250	2	5	77,5	10,9	11,6	2,89	1,69
Bagazo	250	3	5	75,4	12,6	12,0	2,97	1,63
Bagazo	280	1	5	68,6	18,5	12,9	3,27	1,81
Bagazo	280	2	5	64,7	20,5	14,8	3,46	1,68
Bagazo	280	3	5	63,8	21,0	15,2	3,51	1,02
Pino	230	1	10	92,1	7,3	0,6	0,15	1,69
Pino	230	2	10	90,3	9,0	0,7	0,15	1,53
Pino	230	3	10	89,2	9,4	1,4	0,16	1,38
Pino	250	1	10	87,1	11,2	1,7	0,16	1,21
Pino	250	2	10	85,3	13,0	1,7	0,16	0,93
Pino	250	3	10	83,5	14,4	2,1	0,17	0,90
Pino	280	1	10	77,3	19,6	3,1	0,18	0,79
Pino	280	2	10	70,4	23,3	6,3	0,20	0,59
Pino	280	3	10	67,1	26,0	6,9	0,21	0,55

T: temperatura. Tiempo: tiempo de residencia: duración del tratamiento a la temperatura final. lhc: libre de humedad y cenizas. lh: libre de humedad. p% = por ciento en peso.

La distribución de los productos es influenciada por el tipo y composición de la biomasa usada. En los experimentos con madera (abedul y pino) se producen mayor cantidad de producto sólido y menor cantidad de agua-alquitrán y gas, que en los experimentos con residuos agrícolas (bagazo). La producción de sólido después del proceso de torrefacción a 250 °C durante 2 h es 85,4 p% usando pino como materia prima, y 85,0 p% usando abedul, pero 77,5 p% usando bagazo. El rendimiento de gas después del proceso de torrefacción a 250 °C durante 2 h es 1,5 p% usando pino, y 2,1 p% usando abedul, pero 11,6 p% usando bagazo.

Cuando la temperatura es aumentada de 230 °C a 280 °C, la producción de biomasa torreficada disminuye, mientras que la producción de gases y mezcla alquitrán-agua aumenta. El efecto de la temperatura sobre la distribución de productos es más pronunciada entre los 250 °C y 280 °C que entre los 230 °C y 250 °C. Un incremento del tiempo de duración de la torrefacción de 1 h a 3 h provoca una disminución en la cantidad de biomasa torrada y un aumento de la cantidad de volátiles producidos. Además, los resultados muestran que no hay una influencia pronunciada del flujo de gas inerte en las condiciones escogidas en el trabajo (experimentos con pino variando el flujo de gas inerte de 5 a 10 L/h).

La biomasa torrada tiene propiedades hidrofóbicas, de manera que no absorbe humedad del aire durante su almacenamiento. La tabla 2 muestra el contenido de humedad en la madera y bagazo de caña torrados después de un tiempo de almacenamiento de 30 a 45 días. Los resultados muestran que después de un período de 30 a 45 días, los productos de biomasa torradas han absorbido cantidades pequeñas de humedad. Sin embargo, el contenido de humedad en el producto torrado es muy inferior al contenido de humedad en la biomasa de origen (aproximadamente 5 %).

3.2. Composición elemental

El análisis elemental de la biomasa y de sus productos torrados (tabla 3) muestra que el contenido de carbono aumenta con la temperatura del torrado y que el contenido de hidrógeno y oxígeno decrece. Las pérdidas en oxígeno y hidrógeno se deben a la formación de agua y monóxido y dióxido de carbono durante el torrado. En los experimentos con bagazo se obtuvo un contenido de carbono en el producto sólido, inferior que el obtenido en los experimentos con pino y abedul.

Tabla 3. Análisis elemental.

Biomasa	T	t	C	N	H	O	CV	CV _p	Recup.	H/C	O/C
-	°C	hour	p% lhc ^c	p% lhc ^c	p% lhc ^c	p% lhc ^c	MJ/kg	CV _b ^b	% ^d	relac. ^e	relac. ^f
Abedul, raw	-	-	45,5	0,1	6,2	48,2	16,44	-	-	1,64	0,79
Abedul	230	2	50,8	0,16	6,0	43	18,79	1,14	99,34	1,42	0,63
Abedul	250	1	51,5	0,15	5,8	42,5	18,83	1,15	97,94	1,35	0,62
Abedul	250	2	51,6	0,17	5,9	42,2	19,19	1,17	99,24	1,40	0,61
Abedul	250	3	52,6	0,16	6,2	41	20,00	1,22	99,91	1,41	0,58
Abedul	280	2	56,6	0,17	5,6	37,6	21,07	1,28	88,31	1,19	0,50

Pino, raw	-	-	46,6	0,06	6,4	46,9	17,30	-	-	1,65	0,75
Pino	230	1	49,7	0,06	5,9	44,3	18,07	1,04	96,51	1,42	0,67
Pino	230	2	50,0	0,05	5,9	44	18,22	1,05	95,21	1,42	0,66
Pino	230	3	51,5	0,05	6,2	42,2	19,44	1,12	97,41	1,44	0,61
Pino	250	1	50,9	0,06	5,8	43,2	18,51	1,07	94,39	1,37	0,64
Pino	250	2	51,8	0,07	5,8	42,3	18,96	1,10	93,61	1,34	0,61
Pino	250	3	52,4	0,06	5,9	41,6	19,42	1,12	93,51	1,35	0,60
Pino	280	1	56,4	0,06	5,5	38	20,80	1,20	93,88	1,17	0,51
Pino	280	2	59,1	0,07	5,6	35,2	22,30	1,29	92,95	1,14	0,45
Pino	280	3	59,6	0,07	5,7	34,6	22,71	1,31	90,57	1,15	0,44
Bagazo, raw	-	-	44,8	0,25	5,8	49,10	15,50	-	-	1,55	0,82
Bagazo	230	1	48,6	0,25	5,6	45,50	17,08	1,10	96,47	1,38	0,70
Bagazo	230	2	48,8	0,26	5,6	45,30	17,18	1,11	94,26	1,38	0,70
Bagazo	230	3	49,2	0,28	5,7	44,90	17,49	1,13	94,47	1,39	0,69
Bagazo	250	1	50,6	0,30	5,6	43,50	18,08	1,06	92,04	1,33	0,64
Bagazo	250	2	50,6	0,30	5,6	43,50	18,08	1,05	90,45	1,33	0,64
Bagazo	250	3	51,5	0,32	5,7	42,50	18,69	1,07	90,94	1,33	0,62
Bagazo	280	1	52,8	0,39	5,3	41,50	18,73	1,04	82,93	1,20	0,59
Bagazo	280	2	54,7	0,41	5,4	39,50	19,84	1,10	82,83	1,18	0,54
Bagazo	280	3	55,4	0,44	5,5	38,70	20,34	1,09	83,76	1,19	0,52

*Flujo de nitrógeno usado en estos experimentos: 5 L/h. ^aO dif: el oxígeno es calculado por diferencia. ^cCV_p: Poder calorífico del producto torrado. CV_b: Poder calorífico de la biomasa de origen. lh: libre de humedad y cenizas, lh: libre de humedad. p% = por ciento en peso. ^eRecuperación de energía = CV_p * rend, sólido / CV_b. ^frelación = cantidad de átomos H / cantidad de átomos. C = (%H/1) / (%C/12). ^grelación = cantidad de átomos O / cantidad de átomos. C = (%O/16) / (%C/12).*

A mayores temperaturas de torrefacción, el contenido de C en el producto sólido aumenta, mientras que disminuye el contenido de H y O. Por lo tanto, el poder calorífico (CV) del producto sólido torrado aumenta con la temperatura, A temperaturas sobre los 250 °C se observa un mayor efecto de la temperatura sobre el poder calorífico del producto torrado. También, cuando se incrementa el tiempo de residencia en la torrefacción aumenta el poder calorífico. El poder calorífico es calculado usando la composición elemental de la muestra [Ruyter, 1982]: CV = 0,34 %C + 1,40 %H - 0,16 %O (MJ/kg).

Los productos sólidos obtenidos en los experimentos con abedul, pino y bagazo tienen grados de carbonización similares (CV_p/CV_b). El grado de carbonización es calculado como la relación entre el poder calorífico del producto torrado y el poder calorífico de la biomasa inicial. El grado de carbonización aumenta con la temperatura.

Durante la torrefacción se producen cambios en la composición química de la biomasa. Como se muestra en la tabla 3, el contenido de carbono aumenta a expensas de una disminución del contenido de oxígeno e hidrógeno, por lo que las relaciones de cantidad de átomos H/C y O/C disminuyen.

3.3. Composición de los productos gaseosos

La composición del producto gaseoso obtenido en torrefacción se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Composición de los productos gaseosos (libre de nitrógeno y agua).

Biomasa	T	Tiempo	N ₂ Flujo	CH ₄	C ₂	CO ₂	CO
	°C	horas	l/h	vol %	vol %	vol %	vol %
Abedul	230	2	5	0,1	0,05	81,0	18,8
Abedul	250	1	5	0,1	0,05	81,2	18,6
Abedul	250	2	5	0,1	0,06	80,3	19,5
Abedul	250	3	5	0,2	0,10	77,0	22,7
Abedul	280	2	5	0,3	0,13	75,0	24,5
Pino	230	1	5	0,2	0,05	76,7	23,0
Pino	230	2	5	0,2	0,08	70,0	29,4
Pino	230	3	5	0,3	0,10	69,5	30,1
Pino	250	1	5	0,2	0,05	76,4	23,3
Pino	250	2	5	0,2	0,07	70,0	29,7
Pino	250	3	5	0,3	0,09	64,5	35,1
Pino	280	1	5	0,3	0,09	68,2	31,4
Pino	280	2	5	0,4	0,12	64,3	35,1
Pino	280	3	5	0,4	0,36	62,3	36,9
Bagazo	230	1	5	bld	0,05	84,4	15,5
Bagazo	230	2	5	bld	0,06	83,0	16,9
Bagazo	230	3	5	0,2	0,08	81,1	18,6
Bagazo	250	1	5	bld	0,10	78,1	21,8
Bagazo	250	2	5	bld	0,10	77,1	22,8
Bagazo	250	3	5	0,4	0,10	73,5	26,0
Bagazo	280	1	5	0,1	0,06	78,1	21,7
Bagazo	280	2	5	0,3	0,13	75,5	24,0
Bagazo	280	3	5	0,8	0,17	71,0	28,0
Pino	230	1	10	bld	bld	80,0	20,0
Pino	230	2	10	0,2	bld	66,6	33,2
Pino	230	3	10	0,2	0,04	59,5	40,2
Pino	250	1	10	0,2	0,05	69,5	30,2
Pino	250	2	10	0,3	0,06	63,8	35,8
Pino	250	3	10	0,4	0,10	59,0	40,5
Pino	280	1	10	0,4	0,06	58,2	41,3
Pino	280	2	10	0,6	0,18	60,3	38,9
Pino	280	3	10	0,7	0,23	55,9	43,1

T: temperatura. Tiempo: tiempo de residencia, duración de la torrefacción a la temperatura final. bld: bajo el límite de detección.

Las mayores temperaturas favorecen la producción de CO, metano e hidrocarburos C₂, mientras que disminuye el porcentaje de CO₂ en el producto gaseoso (Tabla 4). El efecto de la temperatura sobre la composición de un

producto gaseoso es más pronunciado entre 250 y 280 0C que entre 230 y 250 0C. Mayores tiempos de residencia producen el mismo efecto sobre la composición de los productos gaseosos, que un aumento de la temperatura.

4. Conclusiones

El tipo de biomasa influye sobre la distribución de los productos. Las muestras de madera (abedul y pino) producen más producto sólido y menos productos líquidos y gaseosos que el residuo agrícola estudiado (bagazo de caña de azúcar). El rendimiento de sólido disminuye mientras que el rendimiento de gas, alquitrán y agua disminuye cuando se aumenta tanto la temperatura como el tiempo de residencia. No se encontró una influencia significativa del flujo de nitrógeno sobre la distribución de los productos en las condiciones seleccionadas.

El contenido de carbono en el producto sólido aumenta a temperaturas más elevadas y a tiempos de residencia más largos, mientras que el contenido de hidrógeno y oxígeno disminuye. Por lo tanto, el poder calorífico de la biomasa torrada aumenta con la temperatura y el tiempo de residencia.

El porcentaje de CH₄, H₂, C_xH_y, y CO en el producto gaseoso aumenta con la temperatura, mientras que el porcentaje de CO₂ disminuye.

Las muestras de biomasa torrada absorben pequeñas cantidades de humedad. Sin embargo, el contenido de humedad es mucho más inferior en el producto torrado, que en la biomasa originaria.

Bibliografía

1. FONSECA FELFLI, F., C. A. LUENGO, G. BEZZON and P. BEATON SOLER. *Bench unit for biomass residues torrefaction*, in Biomass for Energy and Industry, Proceeding of Int. Conf., Würzburg. Germany: 8-11 June, Ed, by Kopetz, Weber, Palz, Chartier and Ferrero, C.A.R.M.E.N. Rimpf Germany, 1998. p.1593-1595.
2. ARCATE, J. R. *New process for torrefied wood manufacturing*, in Bioenergy update, vol, 2, No, 4, April 2000. (<http://www.techtp.com/Bioenergy%20Update%20.pdf>).
3. BOURGEOIS, J. P. and J. DOAT. *Torrefied wood from temperate and tropical species: Advantages and prospects*, in Bioenergy 84, Proceedings of an Int. Conf. on bionergy in Göteborg, Vol.3, 1985. pp.153-159, Elsevier Applied Science Publishers.
4. GIRARD, P. and N. SHAH. *Developments on Torrefied Wood an Alternative to Charcoal*, from REUR Technical Series No. 20, Charcoal Production and Pyrolysis Technologies, 1991. p.101-114, publ. by the Food and Agriculture Organization of the United Nations.
5. BATTACHARYA, S. C., S. JUNGTIYNONT, P. SANTIBUPPAKUL and V. M. SINGAMSETTI. *Some aspects of screw press briquetting*, Int. Workshop on Biomass Briquetting, New Dehli, 3-5 April, 1995.
6. RUYTER, H. P. *Coalification model*, Fuel 61, 1982. 1182.

Obtención por vía electroquímica de electrodos composite sobre la base de níquel para el desprendimiento de hidrógeno

Electrochemical Obtaining of Nickel- Based Composite Electrodes for Hydrogen Evolution

*Alberto Jiménez Pérez y Ramón Piloto Rodríguez
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE),
Facultad de Ingeniería Mecánica. Centro de Estudios de Energía Renovable. Calle 127
s/n, Habana 6, Marianao. Apartado 6028, CP 19390,
Ciudad de la Habana, Cuba.
Teléfono: (537) 260 5060, Fax: (537) 267 2964.
Hilda González Medina, Maura Valdés,
Ernesto Peláez Abellán y Carlos Nuñez Valdés
Universidad de La Habana. Facultad de Química.
Zapata esq. G, CP 10400, Plaza,
Ciudad de la Habana, Cuba. E-mail: pelaez@fq.uh.cu*

Resumen

Este trabajo tiene como objetivo presentar, de forma didáctica, diferentes aspectos relacionados con la obtención y caracterización de electrodos composite sobre la base de níquel, por lo que se escogió el composite Ni/Al₂O₃ como material de electrodo para la RDH.

Abstract

The aim of the paper is to present, in a didactic style, different aspects related to obtaining and characterizing nickel-based composite electrodes, for which the composite Ni/Al₂O₃ was chosen as electrode material for the RDH.

Introducción

La necesidad de obtener algún portador energético que posea las mismas ventajas de los combustibles fósiles actuales ha obligado a buscar nuevas fuentes de energía renovable. Por esta razón, en la actualidad se ha identificado al hidrógeno como el combustible del futuro [Turrini, 1999].

La electrólisis del agua es el único método actual que puede ser utilizado en una producción de hidrógeno a escala industrial; sin embargo, el alto costo de producción llama a mejorar el trabajo a altas temperaturas con electrocatalizadores más eficientes [Babir y Veziroglu, 1992]. Actualmente esta es la principal dirección hacia la que se orientan las investigaciones y consiste en la búsqueda de mejores materiales para la reacción de desprendimiento de hidrógeno (RDH).

En la búsqueda de mayor actividad, se han obtenido nuevos electrodos por el aumento del área superficial o mediante la modificación de la estructura de materiales tradicionales [Trassati, 1992].

En este sentido se viene trabajando en diferentes tipos de electrodos, tanto composites [Tonida et al, 1992 y Raj, 1992] como aleaciones [Huot et al, 1991 y Choquette y Menard, 1990]. Se ha encontrado que electrodos de MoS₂ [Huot et al, 1999 y Gala et al, 1984], son superiores a los de sulfuro de Ni, Co y Fe. Además, se han estudiados materiales conteniendo Sn, en aleaciones Ni-Sn [Divisek et al, 1989 y Conway, 1983], presentando compuestos intermetálicos, así como aleaciones Ni-Zn, Ni-Co, Ni-Mo, Ni-W, Ni-Fe y Ni-Cr, siendo el Ni-Mo el de mejores características electrocatalíticas [Choquette, 1990].

Este trabajo tiene como objetivo presentar de forma didáctica diferentes aspectos relacionados con la obtención y caracterización de electrodos composite sobre la base de Ni, por lo que se ha escogido el composite Ni/Al₂O₃ como material de electrodo para la RDH.

Parte experimental

Para la obtención de los electrodos composite se utiliza una celda de vidrio que se nombrará celda T, formada por tres electrodos, un cátodo (al centro) y un ánodo de Ni despolarizados por cada cara (electrodos extremos). La capacidad es de 300 ml, el sustrato metálico (cátodo) puede ser de Ni (BDH) de 0,15 mm de espesor, con un área activa de 3 cm² por ambas caras. Además, consta de una camiseta para recircular agua por medio de un termostato, que permite mantener constante la temperatura de trabajo. La celda está sujeta de forma tal que puede rotar 180 °C, con lo que se logra que la cara anterior del cátodo, donde se sedimenta el polvo suspendido en la solución, pasa a ser la cara posterior. Esta rotación permite mantener las partículas de polvo en suspensión, que van sedimentando con el tiempo sobre la cara anterior del cátodo, lo que permite que codepositen con el catión en solución. Por esta razón, el tiempo de rotación (τ) es un parámetro muy importante en la construcción de este material composite, ya que tiene una gran influencia en la composición y morfología de estos electrodos. Los tiempos de rotación de la celda pueden ser hasta de 8 min.

Para la electrodeposición del material composite se utiliza un baño de níquel Watts. Para los ejemplos que se muestran, las concentraciones del baño son las siguientes:

$c(\text{NiSO}_4) = 137 \text{ g/L}$, $c(\text{H}_3\text{BO}_3) = 30 \text{ g/L}$, $c(\text{NiCl}_2) = 55 \text{ g/L}$, pH = 4.

La temperatura de trabajo es la usual para los baños de Watts, o sea, de 60 °C, el tiempo de electrólisis es alrededor de 80 minutos para obtener una capa del material composite de varias micras, la densidad de corriente (parámetro muy importante) puede oscilar entre 20 y 50 mA/cm². Para los ejemplos que se muestran, se tomó 20 mA/cm², y los tiempos de rotación de la celda fueron de 8 min. Se utilizó alúmina en polvo (Al₂O₃) con un diámetro de partícula de 3,75 mm.

Despegando la capa superficial (material composite) del sustrato, es posible hacer una determinación del contenido de Ni, la que se puede realizar por análisis gravimétrico, que consiste en una digestión de la muestra con ácido nítrico y una posterior valoración complejométrica de Ni con EDTA por la técnica analítica tradicional. Los pasos fundamentales del procedimiento analítico utilizado son los siguientes: Se pesan alrededor de 1 g de la muestra,

se adiciona HNO₃ hasta total digestión por calentamiento (con mucho cuidado) hasta ebullición, se trasvasa cuantitativamente a un volumétrico de 100 mL, se enrasa, se filtra con mucho cuidado con doble papel de filtro, se añaden 5 mL de NH₃ y una pizca de murexida, y se valora con EDTA 0,01 mol/L estandarizado.

Para conocer las características morfológicas de la superficie de estos electrodos se tomaron fotografías de microscopía electrónica de barrido (SEM), con aumento de 50 y 500 μm en un equipo SEM Hitachi S 2300.

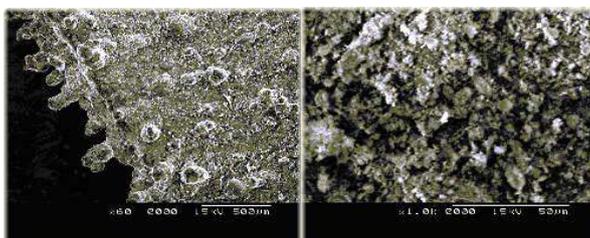
Resultados y discusión

Los electrodos composite que se obtuvieron fueron de buena calidad, pues el depósito tenía incrustadas gran cantidad de partículas de alúmina, presentando una superficie áspera con cierta rugosidad y en ninguno se despegó el depósito del metal base (sustrato). En la tabla 1 se muestran los resultados del análisis químico para determinar el contenido de Ni de tres réplicas. Según se puede apreciar de la tabla, el mayor porcentaje de alúmina se obtiene para $\tau = 8 \text{ min}$, lo que pudiera indicar que al aumentar t aumenta el contenido de alúmina en el composite. Este aspecto fue comprobado en otros experimentos y pudiera explicarse porque con el aumento de τ , la deposición de Ni en la cara invertida permite una mayor consolidación de las partículas dentro del enrejado cristalino. Además, con estos resultados se confirma que con el uso de este tipo de celda y la variación del tiempo de rotación, se pueden obtener electrodos composite de diferente composición.

Como en cualquier otro proceso heterogéneo, las características superficiales adquieren una gran importancia, ya que la selectividad que puede presentar un catalizador para acelerar una reacción en específico está relacionada con la estructura de su superficie y con el fenómeno de la adsorción. Debido a ello, se hace imperioso conocer las características morfológicas de estos electrodos composite.

Por esta razón se tomaron fotografías de SEM para diferentes electrodos, lo que se muestra en la figura 1.

Fig. 1. Fotos SEM de diferentes electrodos composite.



Según se aprecia en las fotos, la distribución de la alúmina es homogénea, se observa que algunas partículas muy próximas a la superficie están cubiertas por el depósito de níquel, la superficie es compacta y poco porosa debido a las

protuberancias del depósito y en ocasiones la formación del depósito da la impresión de capas o láminas superpuestas, que se debe a la rotación de la celda.

Tabla 1 Contenido de níquel en los electrodos composite.

<i>t</i> (min)	Contenido de Ni promedio*/%	Error de la media/%
4	94	1
8	89	0,9

*Promedio de 3 muestras.

Conclusiones

1. En la obtención de los electrodos composite se observó que se pueden obtener electrodos de diferente composición variando el tiempo de rotación, obteniéndose mejores resultados para $\tau = 8 \text{ min}$.
2. Mediante microscopía electrónica de barrido se pueden apreciar diferentes características de los electrodos obtenidos.

Bibliografía

1. TURRINI, E. El camino del sol. La Habana: CUBASOLAR, 1999.
2. BABIR, F. y T. N. VEZIROGLU. *Hydrogen Energy*: 17, 527-538, 1992.
3. TRASSATI, S. *Advances in Electrochem*, in *Science and Engineering*. H. Gerisher and C. W. Tobias, vol. 2, 4-6, 1992.
4. TONIDA, T., K. OKAMURA, T. ASHIDA y I. NAKABAYASHI. *Electrochem. Soc.*: 139, 981, 1992.
5. SCHULTZE, K. y H. BARTELT. *Hydrogen Energy*: 17, 711, 1992.
6. CHOQUETE, Y., L BROSSARD, A. LASIA y H. MENARD. *Electrochim. Acta* 35, 1251, 1990.
7. BÉLANBER, A. y A. K. VIJH. *Hydrogen Energy*: 12, 227, 1987.
8. RAJ, I. A. *Hydrogen Energy*: 17, 413, 1992.
9. HUOT, J. Y. M. L. TRUDEAU y R. SCHULZ. *Electrochem. Soc.*: 138, 1316, 1991.
10. GALA, J., A. MALACHOWSKI y G. NAWRAT. *Applied Electrochem.*: 221, 14, 1984.
11. DIVISEK, J., H. SCHINEITZ, y J. BALY. *Applied Electrochem.*: 19, 519, 1989.
12. CONWAY B. E., H. M. ANGERSTEIN-KOZLOWSKA, A. B. SATTAR y V. TILAK. *J. Electrochem Soc.*, 130, 1825, 1983.
13. CHOQUETTE Y. y H. MENARD. *Int. J. Hydrogen Energy*, 15, 21, 1990.

Biogás a partir de los efluentes de la pasteurización de la pulpa de café

Biogas from Effluents of Coffee Pulp Pasteurization

*Lic. José Lucas Pérez Pardo
Centro de Investigaciones en Bioalimentos (CIBA),
Ciego de Ávila, Cuba.
Dra. Rosa Catalina Bermúdez Savón
Lic. Wilfredo Valdés Méndez
Lic. Inaudis Álvarez Huber
Centro de Estudios de Biotecnología Industrial (CEBI),
Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.*

Resumen

Se muestran los resultados de la digestión anaerobia del efluente proveniente de la pasteurización de la pulpa de café, con el fin de utilizar esta última como sustrato para la producción de hongos comestibles. Como resultado de la medición del volumen de metano producido en función del tiempo de digestión, se obtuvo una relación funcional que evidenció un comportamiento diaúxico característico de los sustratos con constituyentes de diferente complejidad estructural. Se estimaron las velocidades máximas de crecimiento para las dos etapas de la diauxia así como el rendimiento, la eficiencia y la productividad del proceso. Además se caracterizó el sustrato, el inóculo, el producto final fermentado y el lodo de acuerdo con su contenido de sólidos en diferentes estados fisicoquímicos, AGV, DQO y el pH, siguiendo lo recomendado en los métodos estándares. Se concluye que mediante la digestión anaerobia de este residuo resulta posible su biodegradación en batch, con eficiencias de remoción de la DQO de 62 % y rendimientos del orden de los 0,40 m³ de CH₄ por kg de DQO removido en un tiempo de digestión de 389 h. El lodo producido presenta buena sedimentabilidad, altas concentraciones de sustancias de naturaleza orgánica y cantidades moderadas de cenizas.

Abstract

Results of the anaerobic digestion of the effluent from the pasteurization of the coffee pulp are shown with the purpose of using such pulp as the substrate for the production of eatable mushrooms. As a result of the volume measurements of the methane produced as a function of the digestion time, a functional relationship was obtained that made evident a characteristic diauxic behavior of the substrates with constituents of different structural complexity. The maximum growth speeds were considered for the two stages of the diauxia as well as the yield, efficiency and productivity of the process. The substrate, the inóculo, the fermented end product and the sludge according to its solids contents were also characterized in different physiochemical states, AGV, DQO and the pH, following what is recommended in the standard methods. It is concluded that by means of the anaerobic digestion of this waste, its batch biodegradation is possible, with DQO removal efficiencies of 62% and yields of 0,40 m³ of CH₄

per kg of removed DQO at a digestion time of 389 h. The sludge produced presents good sedimentability, high concentrations of substances of organic nature and moderate amounts of ashes.

Introducción

La aplicación de los procesos anaeróbicos a los residuales agrícolas e industriales se ha incrementado de forma considerable en los últimos años. Conjuntamente con el saneamiento y preservación del medio ambiente, tienen cada día mayor interés las soluciones energéticas a partir de fuentes renovables, así como el reciclaje de los efluentes, a fin de obtener tecnologías limpias.

Para aguas residuales con cargas orgánicas superiores a 5 g de DQO/L, los tratamientos anaeróbicos ofrecen ventajas económicas atractivas, lo cual se fundamenta en la posibilidad de tratamiento de residuos con altas cargas en instalaciones compactas, la producción limitada de lodos, requerimientos nutricionales reducidos y un balance energético positivo [Noyola, 1994].

Es conocido que los residuales del café poseen componentes de alto valor, así como otros productos cuya biotransformación puede resultar de interés económico, constituyendo una fuente de recursos renovables y de materia prima para industrias de variada magnitud [Traba et al, 1994]. El uso de estos residuos como sustrato para el cultivo de hongos comestibles constituye una de las alternativas de mayor interés [Rooltz et al, 1982 y Bressani, 1989]. En este proceso la pulpa deshidratada es sometida a un proceso hidrotérmico de cocción, generándose un volumen apreciable de residual líquido. Precisamente, el propósito de este trabajo es estudiar la biodegradación anaeróbica de estos efluentes a través de la evaluación de algunos parámetros cinéticos y de rendimiento.

Materiales y métodos

Se tomaron los efluentes de la pasteurización de la pulpa de café provenientes del proceso de producción de hongos comestibles que se lleva a cabo en el Centro de Estudios de Biotecnología Industrial de la Universidad de Oriente. Para la caracterización del efluente se determinó la concentración de sólidos en diferentes estados fisicoquímicos, la DQO, los AGV y el pH, según lo recomendado en los métodos estándares [APHA, 1985].

Se utilizó un inóculo de estiércol vacuno previamente adaptado a pulpa de café, de diez meses de edad. La inoculación se hizo en una relación porcentual de 20 % (v/v), ajustándose la carga orgánica inicial a 5,3 g de DQO/L, de volumen útil del reactor. No hubo necesidad de adicionar alcalinizantes para ajustar el pH a 7,0. El medio en fermentación fue agitado 2 veces cada 24 h.

El desarrollo de la cinética del proceso se siguió midiendo el volumen desplazado por el gas de una disolución a 10 % de NaOH a diferentes tiempos [Borja et al, 1993], registrándose la temperatura ambiental a fin de expresar el volumen a TPN.

El inóculo, así como el producto fermentado y el lodo, fueron analizados según los indicadores anteriormente expresados. En toda la etapa experimental se realizaron mediciones del pH.

Resultados y discusión

Los resultados de la caracterización del sustrato muestran que este efluente presenta una elevada concentración de sustancias químicamente oxidables, así como que 80 % de los sólidos totales están altamente comprometidos con sustancias de naturaleza orgánica (Tabla 1). Por otra parte, la baja concentración de AGV y el alto valor del pH del inóculo indican un estado de agotamiento de los intermediarios acídicos de cadena corta, lo cual pudiera estar relacionado con la edad de éste (Tabla 2).

Tabla 1. Caracterización fisicoquímica del sustrato.

Variables	Concentración (mg/L)
ST MATERIALES	10 000
STV	8 000
STF	2 000
DQO	10 400
AGV	2,7
pH	6,1

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica del inóculo.

Variables	Concentración (mg/L)
S	9 500
STV	6 800
STF	2 700
STD	5 500
SDF	1 600
SDV	3 900
SST	4 000
SSV	2 900
SSF	1 100
DQO	5 700
AGV	0,03
pH	8,5

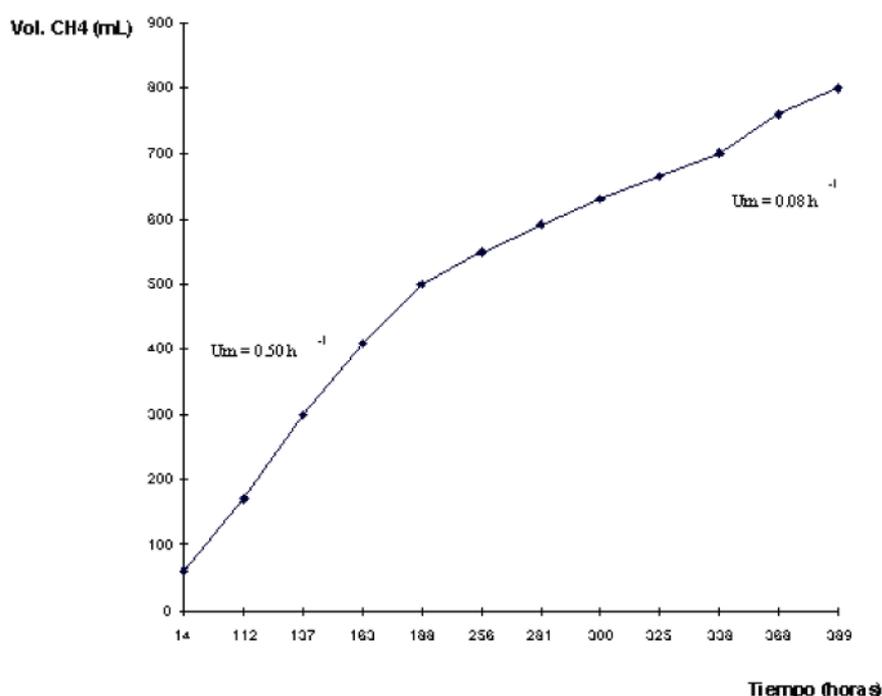
En la figura 1 se muestra la curva de acumulación de gas en función del tiempo. La presencia de un inóculo previamente adaptado dio lugar a que no se manifestara el comportamiento típico del estado de latencia, entrando el sistema en fase exponencial a partir de las 14 h. Resulta interesante observar cómo a partir de las 190 h la velocidad de acumulación de gas disminuye, para después incrementarse hasta el tiempo final en que fue seguido el proceso. Esto, al parecer, pone de manifiesto la presencia de un comportamiento

diáuxico, el que es característico en biotransformaciones donde el nivel de complejidad de los constituyentes del sustrato es variable [Martínez et al, 1989].

En este caso es de esperar que en la primera etapa los microorganismos, fundamentalmente los que intervienen en las reacciones de hidrólisis y fermentación, se nutran de sustancias estructuralmente sencillas tales como mono, di y trisacáridos entre otras, siendo la metanogénesis el paso limitante de la velocidad global del proceso. Sin embargo, una vez agotada esta fuente, se hace necesario una etapa de readaptación del sistema multienzimático, que posibilite la bioconversión de sustancias más complejas a sustratos que sean asimilables por las poblaciones microbianas productoras de los promotores de la biosíntesis del metano, tales como polifenoles y otros compuestos afines presentes en el medio [Wasser et al, 1995].

Por esto, en la segunda etapa del proceso, las reacciones de despolimerización y de biotransformación de componentes difíciles de degradar, pueden también estar comprometidas en la etapa limitante de la velocidad global de reacción [Guyot, 1992]. En la figura se ha indicado el valor de la velocidad máxima (U_m) para cada fase. Nótese como en la segunda etapa el valor estimado es marcadamente inferior, lo cual es muy frecuente cuando se manifiestan comportamientos como los descritos con anterioridad.

Figura 1: Producción de Metano en función del tiempo de digestión



En las tablas 3 y 4 se presenta la caracterización del producto fermentado y algunos parámetros del rendimiento del proceso. En el transcurso de la fermentación hubo una adecuada autorregulación de las propiedades ácido-base del sistema, pues el pH osciló en el intervalo de 6,9 a 7,1, indicando que la relación producción/consumo de ácidos grasos volátiles se mantuvo dentro de los límites permisibles como resultado de la acción sinérgica bacteriana

[Kubiak y Dubuis, 1985; Fonte y Martínez, 1996 y Monroy, 1997]. Los valores del rendimiento (Y), la eficiencia (E) y la productividad (P) son adecuados, teniendo en consideración las condiciones en que se desarrolló la fermentación (batch) y el tiempo en el que se realizó el corte de la etapa experimental (389 h). La temperatura, aunque no se reguló, se mantuvo en el intervalo de 27 a 33 °C.

Tabla 3. Caracterización del producto fermentado a $t = 389$ h ($n = 3$).

Variables	Valor medio	Cv/%
ST	4 594	1,48
STD	4 111	6,93
STS	483	10,87
STF	2 013	3,36
STV	2 581	6,01
SDF	1 850	9,29
SDV	2 054	10,77
SSF	163	8,30
SSV	320	11,35
DQO	2 016	18,50
pH	6,9	-

Tabla 4. Parámetros de rendimiento ($t_f = 389$ h).

Parámetro	Definición	Valor Medio	Cv/%
Y/m^3Kg^{-1}	$V(CH_4) / DQO_i$	0,25	1,50
	$V(CH_4) / DQO_r$	0,40	3,78
E_f	DQO_r / DQO_i	0,62	9,94
P	$V(CH_4) / V_R$	1,03	3,70

En la tabla 5 se muestra la caracterización del lodo previamente decantado. Llama la atención su alto nivel de compactación (5,25 % del volumen útil del digester), su riqueza en componentes orgánicos y la relativamente baja concentración de cenizas. Esto último, aunque aparentemente contradictorio con lo reportado por otros autores [Werner, 1983; Guillermo, 1985 y Valdés et al., 1991], pudiera estar influenciado por las características particulares de este residual en cuanto a su composición de sólidos totales fijos [Traba et al., 1994].

Tabla 5. Caracterización del lodo (n = 3).

Variables	Valor medio	Cv/%
Volumen de lodo/cm	42	9,35
$V_L / V_T / \%$	5,25	9,04
ST	8 930	3,63
STF	1 100	7,30
STV	7 830	3,20
STF / ST	0,123	5,10
STV / ST	0,876	3,52
STF / STV	0,100	4,90
DQO	12 096	11,0

Conclusiones

Mediante la fermentación anaerobia de los efluentes de la pasterurización de la pulpa de café, resulta posible su biodegradación en batch con una remoción de la DQO del 62 % y una producción de 0,43 m³ de metano por kg de DQO removido, en un tiempo de digestión de 389 h.

El lodo producido presenta buena sedimentabilidad, altas concentraciones de sustancias de naturaleza orgánica y cantidades moderadas de cenizas

Referencias

1. NOYOLA, A. Escalado de biorreactores anaeróbicos. México: Instituto de Ingeniería. UNAM, DF, 1994. p. 20 p.
2. TRABA, J. A., A. MARAÑÓN, R. C. BERMÚDEZ, M. DE J. VERDECIA, M. DE LOS A. SANTANA, y M. FERNÁNDEZ. *Caracterización de residuales sólidos del café, especie Coffea arabica L.*, en Ciencia. 45: 375-380, 1994.
3. ROOLZ, C. ET AL. *Biotechnology in washed coffee processing*, en Process Biochemistry. March-April: 8-10, 1982.
4. BRESSANI, R. *Utilización de los subproductos del café para otros fines industriales*, en Resúmenes de Café, 16: 12, 1989.
5. AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. Standard Methods for Examination of water and Wasterwater. 16 th edn, Mashington, D.C, 1985.
6. BORJA, R., A. MARTÍN, M. LUQUE and M. M. DURÁN. *Kinetic study of anaerobic digestion of wine destillery wastewater*, en Process Biochemistry. 28: 83-90, 1993.
7. MARTÍNEZ, J., A. SÁNCHEZ, M. QUINTANA, V. PAZOS y G. DEL BARRIO. Microbiología general. La Habana: Ed. Pueblo y Educación, 1989. 302 p.
8. WASSER, R., C. OROZCO, S. GAMEZ, J. MONGE, R. DUARTE y J. F. RODRÍGUEZ. *Reducing water contamination caused by coffe industries with anaerobic digestion technology*, en Biogas Forum. Ed. BORDA, II: 61: 8-14, 1995.
9. GUYOT, J. P. Curso de bioprocesos anaeróbicos para el tratamiento de efluentes industriales. México: UAM-ORSTOM-IMP, Iztalapa, 1992. 1-12 pp.
10. KUBIAK y DUBUIS (1985) citado por BERMÚDEZ, R. C., W. VALDÉS y E. DÍAZ. Compilación bibliográfica sobre fermentación anaeróbica en la producción de biogás. Santiago de Cuba: Centro de Estudios de Biotecnología Industrial, Universidad de Oriente, 1993.

11. FONTE, A. y N. MARTÍNEZ. *Factores fisicoquímicos que afectan la producción de biogás. Estudio bibliográfico. Parte II. Inhibidores y factores operacionales*, en Tecnología Química. Eds. ISPJAM, XV, XVI: 3,1: 19-24, 1996.
12. MONROY, O. *Control del arranque y operación de digestores anaeróbicos*, en Curso Pre-Congreso, VII Congreso Nacional de Biotecnología y Bioingeniería: MAZATLAN 97. 1997.
13. WENER, E. *Bioconversión: producción de energía utilizando desperdicios agrícolas*, en Boletín de Suelos de la FAO. El reciclaje de materias orgánicas en la agricultura de América Latina. 118-123, 1983.
14. GUILLERMO, A. *Biogás del tratamiento de residuos azucareros en un reactor horizontal*, en Cuba-Azúcar, marzo: 13-16, 1985.
15. VALDÉS, E., M. C. OBAYA y O. L. LEÓN. *Evaluación preliminar de los lodos anaeróbicos como biofertilizantes*, en ICIDCA, XXV: 12:15-18, 1991.

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>