



ECO SOLAR

REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTAL DE CUBASOLAR



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

5



Uso de la biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental.....	1
Consideraciones medioambientales de la gasificación de biomasa cañera en un central azucarero.....	9
El ciclo del hidrógeno solar y los nuevos materiales.....	18
Metodología de estimación de variables meteorológicas secundarias para modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos.....	35
Utilización de las ruedas desecantes, entálpicas y sensibles en el tratamiento del aire en Cuba.....	49

Uso de la biomasa cañera como alternativa para el incremento de la eficiencia energética y la reducción de la contaminación ambiental

Use of the sugar cane biomass as an alternative for the increment of energy efficiency and the reduction of environmental pollution

*Ing. Jorge Luis Reyes Montiel
M.Sc. Raúl Perez Bermúdez
M.Sc. Jesús Betancourt Mena
Centro de Estudios de Termoenergética Azucarera (CETA),
Universidad Central de Las Villas (UCLV).
Carretera a Camajuaní, Km. 5½ Santa Clara, Cuba. CP 54830.
Tel.: (53 42) 281194 y 281630. Fax: (53 42) 281608.
E-mail: jorgelrm@fim.uclv.edu.cu y jorgelrm2002@yahoo.es*

Resumen

En Cuba existe un elevado potencial de recursos biomásicos provenientes de la agroindustria azucarera; estos recursos no se aprovechan adecuadamente y todavía el peso de la generación de electricidad proviene de las centrales termoeléctricas, con un alto índice de contaminación ambiental. Esta biomasa posee características que permiten catalogarla como buen combustible, además de tener ventajas desde el punto de vista ambiental. Usando adecuadamente la biomasa cañera (bagazo y residuos agrícolas cañeros), y con la implantación de nuevas tecnologías, se incrementa la eficiencia en la generación eléctrica en la industria azucarera y se reduce grandemente la contaminación ambiental.

Palabras clave: biomasa cañera, contaminación ambiental, industria azucarera

Abstract:

Biomass potential from the sugar cane industry in Cuba is considerably large and these resources are not sufficiently exploited and in addition most of the electricity generated is supplied basically by power stations, which highly pollute the environment. Biomass features characteristics that allow to classify it as a good fuel, advantageous from the environmental point of view. By using sugar cane biomass adequately (Bagasse, RAC) the efficiency in the electricity generation in the sugar cane industry would be increased, also, by introducing new technologies, which altogether, will reduce the environmental pollution.

Keywords: sugar cane biomass, environmental pollution, sugar cane industry

Introducción

La caña de azúcar es uno de los cultivos con mayor capacidad para convertir la energía solar en biomasa. Si tomamos en cuenta sólo el bagazo y la paja, en los cañaverales se almacena alrededor del equivalente a una tonelada de petróleo por cada tonelada de azúcar que pueda producirse.

La agroindustria cubana de la caña de azúcar es la fuente más importante de biomasa con que cuenta el país para el desarrollo de energía renovable, y

actualmente constituye la única a partir de la cual se está generando electricidad.

Durante los últimos veinte años se han desarrollado tecnologías que hacen posible introducir saltos importantes en la eficiencia de los procesos basados en combustibles renovables, como el bagazo y la paja de caña. Hoy existen instalaciones capaces de elevar la eficiencia entre 10 y 15 %; al mismo tiempo, se desarrollan otras tecnologías más avanzadas aún, como las turbinas de gas integradas con gasificadores de biomasa, que podrían entonces elevar los valores en veinte o treinta veces [Pérez, 1997].

Esos avances tecnológicos hacen competitiva la generación de electricidad a partir de la biomasa, si se la compara con la obtenida a partir de combustibles fósiles.

La combustión de la biomasa tiene además una ventaja ambiental: no incrementa la concentración atmosférica de carbono, porque sólo devuelve a la atmósfera el carbono que fijó la planta durante su crecimiento.

Producción de biomasa

En zafras promedios anuales en nuestro país, de molidas de 70 millones de toneladas de caña, se producen unos 20,5 millones de toneladas de bagazo y una cantidad similar de residuos agrícolas (paja, cogollo y hojas) [Torres, 1999; Pérez, 1997; Documentos..., 1993].

Actualmente la propia industria azucarera y la de sus derivados consumen alrededor de 19 millones de toneladas de bagazo para satisfacer 74 % de la demanda energética del Ministerio del Azúcar, incluyendo todas sus actividades [Torres, 1999; Curbelo et al.; Pérez, 1997; Documentos..., 1993].

Históricamente la producción de energía eléctrica en nuestro país ha tenido como soporte principal la utilización de centrales termoeléctricas que consumen actualmente alrededor de 40 % de los combustibles derivados del petróleo, para generar más de 80 % de la electricidad total producida en el país. Esta situación implica que la producción de energía eléctrica depende de la capacidad para la importación de combustible, para lo cual se destina una parte importante de las divisas disponibles. La única alternativa viable para cambiar esta dependencia de los necesarios combustibles importados es logrando el aprovechamiento de las fuentes nacionales de energía [Torres, 1999; Pérez, 1997].

La biomasa aprovechable energéticamente es el bagazo y los residuos agrícolas cañeros (RAC). El bagazo representa 30 % de los tallos verdes molidos y es el residuo fibroso de este proceso; se obtiene con 50 % de humedad; esto significa que por cada hectárea cosechada es posible obtener anualmente 13,5 t de bagazo, equivalentes a 2,7 de toneladas de combustible equivalente ($tce = 37,5 \text{ MJ/kg}$).

El uso de los residuos agrícolas cañeros como combustible depende ante todo de la posibilidad de su recolección. En Cuba se cosecha 70 % de la caña en

forma mecanizada por medio de cosechadoras que reintegran 50 % de los residuos agrícolas cañeros al campo; posteriormente, en centros de acopio y limpieza de la caña cosechada se separa 50 % de los residuos agrícolas que vienen del campo. Como promedio es posible recolectar 3,75 t de residuos agrícolas cañeros por hectárea de caña cosechada, equivalentes a 0,62 tce.

Caracterización de la biomasa como combustible

El término biomasa, en sentido amplio, se refiere a cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido su origen inmediato como consecuencia de un proceso biológico. El conocimiento de la composición y propiedades de los recursos biomásicos es de fundamental importancia para evaluar su potencialidad como materia prima en los procesos de conversión térmica.

En esta sección se presenta la información bibliográfica sobre la composición de los residuos de la industria azucarera en cuanto a sus principales constituyentes, así como en términos de análisis inmediato y elemental. Asimismo, se revisan los datos sobre el poder calorífico de estos residuos. Además, se comparan estas composiciones y propiedades con las de otros recursos utilizados como combustibles sólidos.

En las propiedades del bagazo y los residuos agrícolas cañeros como combustible influye un grupo de factores agrícolas e industriales que actúan sobre la caña de azúcar como materia prima. Dentro de las agrícolas se pueden citar: grado de mecanización de la cosecha, variedad y edad de la caña, tipo de suelo y condiciones climáticas. Entre los factores industriales están: grado de preparación de la caña para su molida en el tándem de molinos, presión y desgaste de los molinos, así como la cantidad y temperatura del agua de inhibición [Pérez, 1997].

Las características del bagazo y los residuos agrícolas cañeros como combustibles son las que se muestran en la tabla.

Composición química del bagazo y los residuos agrícolas cañeros

Elementos químicos	Bagazo (%)	RAC (%)
Carbono	47,00	48,28
Hidrógeno	6,50	5,55
Oxígeno	44,00	45,61
Cenizas	2,50	9,50
Azufre	0,00	0,13
Nitrógeno	-	0,43

Calor específico de combustión.

Bagazo: CECS. 19 000-19 900 kJ/kg

CECI: 17500-18900 kJ/kg

RAC: Si se considera como humedad promedio de los residuos agrícolas cañeros 25 %, después de haber transcurrido tres días de secado natural, se

puede tener un valor aproximado de su calor de combustión, el cual es:
CECI = 11 825 (kJ/Kg).

Contenido de humedad

Esta es la propiedad más importante desde el punto de vista de la producción de vapor. Cuando el trabajo de los molinos es deficiente, es decir, existe un mal ajuste en la presión del último de los molinos, el contenido de humedad del bagazo será superior a 50 %; mientras que con un buen trabajo su contenido será de 48 %; normalmente oscila en un rango estrecho 44-50 %.

Contenido de cenizas

El bagazo de la caña aporta alrededor de 2,8 % de cenizas; y los residuos agrícolas cañeros, 9,5 aproximadamente.

Se plantea que el porcentaje de cenizas fluctúa entre 0,78 y 3,22, en dependencia del tipo de suelo, forma de alza y recolección. Los constituyentes de la ceniza varían en cantidad dentro de estrechos límites, de acuerdo con la cantidad de terreno, tipo de abono y variedad de la caña [Villegas, 2000; Pérez, 1997; Luna, 1972].

Contenido de la ceniza del bagazo

Compuesto químico	SiO ₂ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	MgO (%)	K ₂ O+Na ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	MnO (%)
%	82,7	1,1	3,4	3,0	3,5	4,6	1,7	-

Granulometría

La granulometría depende mucho del grado de preparación que tenga la caña en su proceso de extracción de jugo, el número de juegos de cuchillas, desmenuzadoras y molinos, así como su calidad; al aumentar aquellos aumentará el contenido de finos como resultado de la preparación de la fibra. La presión y el grado de desgaste de los molinos son dos factores muy importantes que se deben ir controlando durante la zafra, pues influyen en la granulometría del bagazo.

Una de las características más importantes de las biomásas cuando van a ser usadas en reactores de lecho fluidizado, es tener una dimensión uniforme y lo más pequeña posible. En el caso del bagazo, este presenta una característica muy singular: un mismo diámetro del bagazo presenta longitudes muy variadas, ya que existen partículas en forma de fibras muy alargadas y partículas fibrosas pero más cortas, cualidades que lo convierten en un material muy polidisperso.

Características energéticas y ambientales del uso de la biomasa cañera

En particular, la caña de azúcar exhibe índices más ventajosos que otros cultivos en cuanto al almacenamiento de energía proveniente de la radiación solar, como se aprecia en los aspectos siguientes:

* Es capaz de almacenar 1,7 % de la energía existente en la radiación incidente en cultivos con irrigación y en condiciones experimentales, y 1,1 % en campos bien atendidos con regadío.

* Tiene un rendimiento potencial genético que se encuentra entre 200 y 300 t/ha, con un máximo teórico de 233 kg, que compara ventajosamente con otros cultivos.

* Para un valor calórico de 17 476 MJ/kg de materia seca (MS), con un contenido de materia seca de 30 % y un rendimiento de 100 toneladas de caña integral por hectárea, la producción energética de la caña es veinte veces mayor que la energía que se utiliza para producirla, cosecharla y trasladarla al ingenio.

Como promedio pueden emplearse las siguientes relaciones de sustitución:

* 5,2 toneladas de bagazo, 50 % de humedad por tonelada de petróleo (39,7 MJ/kg).

* Una tonelada de bagazo equivale a 231 m³ de gas natural.

* Cuatro toneladas de paja equivalen a una tonelada de petróleo (calor de combustión de la paja 30 % de humedad: 11,7 MJ/kg).

* El valor calórico del bagazo (50% humedad) es de 7,64 MJ/kg, semejante al de la madera: 7,9 MJ/kg.

Las operaciones del proceso de producción de azúcar seleccionado que provocan emisiones de CO₂ al medio ambiente, pueden agruparse en las categorías de impacto siguientes: las que representan un aporte neto al nivel de CO₂ en la atmósfera al provenir del empleo de combustibles fósiles, como son la cosecha, transportación, fertilización y uso de plaguicidas y herbicidas, y las asociadas al proceso fabril azucarero, donde la fuente de energía es el bagazo y las emisiones de CO₂ están compensadas por la fijación del mismo por el cultivo.

Los procesos que emiten CO₂ son: combustión del bagazo en la caldera, producción y combustión de alcohol, y producción y combustión de biogás. La cantidad de CO₂ emitido durante la combustión del bagazo es de 0,885 kg de CO₂/kg de bagazo, con 50 % de humedad.

Soluciones a tener en cuenta

A pesar de que la industria azucarera produce anualmente una cantidad de biomasa renovable equivalente a 5,2 millones de tce, su utilización en la generación de electricidad es sólo equivalente al consumo de 0,4 millones de tce en las centrales termoeléctricas del país. Este hecho está relacionado, ante todo, con el aprovechamiento de la capacidad instalada y con la obsolescencia tecnológica de la base energética de la industria. A partir de este hecho se han identificado diferentes variantes para un mejor aprovechamiento de este potencial, que se distinguen por los plazos y recursos financieros requeridos para su ejecución:

1. Aprovechamiento óptimo de la capacidad instalada. La cantidad de electricidad que se produce en un central azucarero depende del aprovechamiento de la norma potencial de molida y la operación estable de la planta eléctrica. Estos factores están determinados por el suministro regular de caña al central y por el tiempo de las paradas. Un aprovechamiento a 85 % de la norma potencial de molida y de la capacidad operacional de los turbogeneradores, permitiría una generación de 19,5 kW/h/t de caña molida y cubrir 10,5 % de la producción nacional de electricidad correspondiente a 1991.

2. Aumento de la eficiencia de la generación de electricidad utilizando calderas de alta presión. La eficiencia del ciclo térmico de la generación de electricidad está determinada por las características del generador y de la turbina de vapor. La modernización o sustitución de los generadores de vapor, con el propósito de lograr una eficiencia térmica de 80 % y alcanzar presiones de vapor de 40 kg/cm², posibilitaría generar 27,5 kW/h/t de caña molida; y si además se sustituyen las turbinas de contrapresión por turbinas de extracción-condensación, es posible llegar hasta 33,5 kW/h/t caña molida. De esta manera la industria azucarera llegaría a producir en cada caso 13 % y 15,6 % de la cantidad de energía eléctrica generada en el país en 1991, con lo que se lograría cubrir el consumo de energía eléctrica en el sector con la introducción de las turbinas de extracción-condensación.

3. Centrales termoeléctricas en la industria azucarera. Un aumento significativo de la generación de electricidad en la industria azucarera se puede alcanzar mediante la introducción de generadores de vapor a alta presión (80 kg/cm²), lo cual requiere el uso de esquemas de generación similares a los utilizados en las centrales termoeléctricas. En este caso, debido al monto de la inversión, es necesario que la generación de electricidad se realice durante todo el año para lograr que la misma sea económicamente ventajosa. En Cuba el combustible más apropiado para lograr estos propósitos son los RAC, de los que como ya se indicó se recolectan anualmente alrededor de un millón de toneladas de combustible equivalente; el principal problema tecnológico por resolver resulta el de su compactación y conservación durante un tiempo prolongado. En estas condiciones es posible producir 120 kW/h/t de caña durante la zafra y 300 kW/h/t de RAC fuera de zafra. Estudios realizados demuestran la posibilidad de instalar en los centrales azucareros del país 1,675 MW, en centrales termoeléctricas con 41 unidades de 25 MW y 11 de 50 MW, con la posibilidad de producir hasta 9,648 GW/h anualmente, lo que representa 73 % de la electricidad generada en el país en 1991.

4. Utilización de ciclos con turbinas de gas. Los ciclos térmicos para la generación de electricidad que utilizan turbinas de gas, han alcanzado un nivel comercial cuando se emplea gas natural o combustible líquido en las centrales termoeléctricas. La alta eficiencia que se logra con estas tecnologías, superiores a 40 %, hace que los costos de inversión por kW/h instalado sean los menores entre las tecnologías que se comercializan actualmente en el mundo [Pérez, 1997]. El uso de la biomasa cañera como combustible en estos ciclos está frenada, incluso, por estar en etapa de investigación y desarrollo los gasificadores de biomasa requeridos para estas aplicaciones, y se trabaja en el perfeccionamiento de los sistemas de limpieza de los gases; además, las turbinas aereoderivativas aún no han sido evaluadas en las condiciones de trabajo de estos ciclos termodinámicos. Actualmente se desarrollan varios proyectos a escala de planta piloto para la evaluación práctica de estos ciclos térmicos. De los ciclos que se evalúan en la literatura, el BIG/STIG (Biomass Integrated Gasifier-Steam Injection Gas Turbine) parece ser el de mayores perspectivas de manera inmediata. La aplicación de este ciclo en la industria azucarera requiere disminuir el consumo de vapor en el proceso de los 500 kg/t

de caña molida a 300 kg, lo que permitiría producir hasta 250 kW/h/t de caña molida y 700 kW/h/t de residuos agrícolas cañeros en el período fuera de zafra.

Los sistemas BIG/GT aplicados a la industria azucarera permitirán obtener más de 460 kWh de electricidad por tonelada de caña molida, en comparación con 240 kWh para sistemas convencionales de alta presión, y aproximadamente 200 kWh para los actuales sistemas de cogeneración. Esto significa, aplicado a la industria azucarera cubana, la instalación 5,700 MW, distribuidos en noventa unidades de 25 MW, treinta y nueve de 50 MW, y quince de 100 MW que generarían hasta 32 832 GW/h anualmente, o sea, 2,5 veces la electricidad producida en el país en 1991 [Pérez, 1997].

Estas plantas producen emisiones de preocupación, las cuales incluyen óxidos de nitrógeno y partículas sólidas; sin embargo, existen métodos y vías para reducirlas. Los combustibles de la biomasa contienen pequeñas cantidades de azufre comparados con el carbón, y producen emanaciones disminuidas de dióxido de azufre (SO₂). Además, poseen temperaturas de combustión más bajas que ayudan a reducir las emisiones de (NO_x). De estas plantas modernas, las que cuentan con ciclos IGCC son las más eficientes en cuanto a la producción de energía eléctrica y emisiones. Asimismo, cuentan con un beneficio económico adicional que consiste en lograr la reducción de las emisiones a costos más bajos, con respecto a otras tecnologías avanzadas. La competitividad del uso de la biomasa ayuda económicamente, ya que al contrario de los combustibles fósiles, los combustibles de la biomasa son renovables y no contribuyen al efecto invernadero; además, no liberan más dióxido de carbono (CO₂) que el que la planta absorbió durante su ciclo vital.

Sin embargo, si esta biomasa no es convertida de manera eficiente y limpia en una forma de energía secundaria, los beneficios medioambientales sólo se comprenden parcialmente. Por esta razón debe favorecerse la utilización de la biomasa de una manera moderna y eficaz, por encima de las aplicaciones tradicionales.

Conclusiones

La caña de azúcar constituye el tipo de biomasa con mayor importancia y potencial como combustible, atendiendo a su amplia distribución geográfica (80 países) y que hoy se cosechan importantes volúmenes, que ascienden a 1 200 millones de caña anualmente. Esto reviste gran importancia para Cuba, donde esta es la única alternativa con posibilidades reales de lograr incrementos considerables en la generación de energía eléctrica, posibilidad que de hecho no ha sido explotada en la magnitud que necesita la economía nacional y que en otros países se aprovecha a un nivel considerablemente mayor. Por lo tanto, deben acometerse cambios tecnológicos que posibiliten aumentar los índices de generación eléctrica de 20 kWh/tcaña en los centrales azucareros con los actuales sistemas de contrapresión, a valores de 400 kWh/tcaña, con sistemas BIG/GT/CC. Introduciendo este tipo de tecnología se logra un impacto positivo sobre el medio ambiente, ya que la cantidad de combustible fósil dejado de quemar asciende a 32 640 tpe/a, lo que equivale a 119 748 t de CO₂/a que se dejan de emitir a la atmósfera y se posibilitaría generar sobre bases renovables 2,5 veces la energía eléctrica producida en el país en 1991. Teniendo en

cuenta que Cuba cuenta con un alto potencial de biomasa cañera y que esta biomasa cumple todos los requisitos para ser catalogada como combustible, solo queda establecer las tecnologías de avanzada para aprovechar al máximo su poder energético.

Bibliografía

- CUBASOLAR, *Boletín trimestral*. La Habana: mar., 1997.
- CURBELO ALONSO, ALFREDO; BÁRBARA GAREA MOREDA Y ANTONIO VALDÉS DELGADO. *Generación de electricidad a partir del bagazo en Cuba* (Internet).
- DE LORENZI, OTTO. "El bagazo como combustible en la industria azucarera mexicana", en Rev. Boletín Azucarero Mexicano, jul., México, 1958.
- DOCUMENTOS DEL CONSEJO TÉCNICO ÁREA INDUSTRIAL DEL MINAZ. *Los residuos agrícolas cañeros (RAC) vistos como combustible nacional*. Sección 3 de febrero de 1993.
- HAREL, P. AND J. BAGUANT. "Bagasse combustion", en Rev. International Sugar Journal. Vol. 94. No. 1117, p. 1-18, 1992.
- HUGOT, E. *Manual para ingenieros azucareros*. La Habana: Ed. Pueblo y Educación, 1980.
- LUNA NELIA, L. "Estudio sobre el contenido de cenizas, celulosas y su grado de polimerización en centrales azucareros de Cuba", en 38 Conferencia de la ATAC. La Habana: 1972.
- MESA ORAMA, JESÚS Y LEONEL GONZÁLEZ PENICHET. Departamento de Investigaciones, ICIDCA.
- PATURAU, M. J. *By products of cane sugar industry*. Elsevier publisher company. Londers 1969.
- PÉREZ GARAY, L. *Generadores de vapor*.
- PÉREZ, ESPERANZA. *Estudio teórico experimental de la fluidodinámica del proceso de gasificación en lecho fluidizado de bagazo de caña. Técnicas de energía renovable*. Tesis de Maestría. Universidad Internacional de Andalucía. Sede iberoamericana La Rábida. Santa Clara, Cuba, 1997.
- RODRÍGUEZ ANAS, A. ET AL. "Propiedades físico-químicas de los combustibles sólidos disponibles en Cuba", en II Conferencia de Termoenergética Industrial. Santa Clara: 1992.
- ROQUE, PABLO. *Combustión*. Santa Clara: Edición interna de la Universidad Central de Las Villas, 1990.
- RUBIO GONZÁLEZ, A. Incremento de la eficiencia de la caldera RETAL de 45 t/h mediante modificaciones de la aerodinámica de su horno. Tesis en opción al grado científico de Doctor a Ciencias Técnicas, tutor Pablo Roque Díaz. Santa Clara: Universidad Central de Las Villas, 1994.
- RUBIO GONZÁLEZ, ÁNGEL M. *Termoconversión de combustibles*.
- TORRES, JULIO. *Biomasa cañera y electricidad*. 1999 (Internet).
- UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAM. *Biomass integrated gasification / gas turbine project*.
- USÓN, C. "La actualidad de la gasificación de biomasa", en Conferencia de Termoenergética Industrial. Cuba: nov., 1996.
- VILLEGAS, PEDRO J. *Aprovechamiento de residuos fibrosos de la industria azucarera mediante procesos de conversión térmica*. Tesis de doctorado. Santa Clara: Universidad Central de Las Villas, 2000.

Consideraciones medioambientales de la gasificación de biomasa cañera en un central azucarero

Environmental considerations of sugar cane biomass gasification in a sugar cane mill

*M.Sc. Ing. Raúl A. Pérez Bermúdez
Centro de Estudios de Termoenergética Azucarera (CETA),
Universidad Central de Las Villas,
Carretera a Camajuaní, Km. 5½, Santa Clara, Cuba. CP 54830.
Tel.: (53 42) 281194/281630. Fax: (53 42) 281608
e-mail: raulito@uclv.edu.cu y rulete2000@yahoo.com*

Resumen

En este trabajo se expone un análisis del actual y futuro uso de la biomasa, principalmente cañera, con fines energéticos y su implicación medioambiental en la reducción de las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Se presenta una valoración de las reales potencialidades de generar excedentes de energía con que cuentan los países en desarrollo y productores de caña de azúcar, y su relación directa con la aplicación de sistemas avanzados; así como una valoración de las posibilidades con que cuenta Cuba en la biomasa cañera y la posibilidad de incrementar sus actuales índices de generación eléctrica en los centrales azucareros con el fin de convertir a esta en una industria sucroenergética. Se analizan algunos aspectos medioambientales del empleo de la biomasa cañera como combustible en la generación de energía eléctrica. Se exponen los aspectos fundamentales del proceso de gasificación de biomasa, relacionados con los productos que se deben obtener y sus características fundamentales, las formas de empleo de los gases producidos en la generación de energía eléctrica y los rendimientos alcanzables. Por último se realiza un análisis de la instalación de un sistema de ciclo combinado con gasificación de biomasa integrada al central Abel Santamaría, atendiendo a que se están valorando varias alternativas que permitan incrementar los índices de generación eléctrica de forma sustancial. Se significa que la introducción de este sistema proporciona un incremento importante en la generación eléctrica de 102 GWh/a adicionales a lo que hoy produce con sistemas de contrapresión. Se expresan los valores de petróleo evitados en la generación de una cantidad similar de energía y, por tanto, la cantidad de CO₂ dejado de emitir a la atmósfera.

Palabras clave: biomasa cañera, gasificación

In this paper we expose an analysis of the present-day and future use of biomass as fuel, mainly sugar cane biomass, and its environmental implications in the reduction of CO₂ emissions to the atmosphere. The paper presents an evaluation of the real potential of generating energy surplus that developing countries and sugar cane producers countries account with, and its direct relationship with the application of advanced systems. We also discuss the

possibilities of Cuba regarding sugar cane biomass and the possibility of increasing the present-day rates of electricity generation in the sugar cane mills with the purpose of turning this industry into an energy-sugar combined industry. We analyze some environmental aspects of the use of sugar cane biomass as fuel in the generation of electricity. The fundamental aspects of the process of biomass gasification are exposed, the products that should be obtained and their main characteristics, the uses of the gases produced in the generation of electricity and the achievable performances. Finally we carry out an analysis of the installation of a combined cycle system with biomass gasification integrated to the Abel Santamaria sugar cane mill, considering the fact that several alternatives are evaluated in order to enable incrementing the rates of electricity generation substantially. The introduction of this system provides a significant increment in 102 GWh of electricity generation additional to what is produced today with back pressure systems. The amount of oil not consumed in the generation of a similar figure of electricity is quantified as well as the CO₂ not emitted to the atmosphere.

Keywords: sugar cane biomass, gasification

Introducción

Los graves problemas que hoy presenta el medio ambiente, provocados principalmente por el uso excesivo de combustibles fósiles han ido creando una conciencia ecológica a escala mundial, ante lo cual varias naciones han trazado estrategias orientadas a reducir sus emisiones y hacer un uso racional de los recursos energéticos.

Las pruebas de que está ocurriendo un incremento progresivo de la concentración de CO₂ en la atmósfera terrestre son irrefutables y su relación con la quema de combustibles fósiles es bien evidente. Las proyecciones realizadas apuntan que la concentración actual de CO₂ se habrá duplicado a mediados del siglo.

Los acuerdos de Kyoto comprometen a la Unión Europea a reducir sus emisiones de CO₂ en el año 2010 en dos mil novecientos millones de toneladas, lo que supone 8 % respecto a las emisiones que había en 1990. En el 2020 las reducciones tienen que situarse entre 15 y 30 % por debajo de los niveles de los años noventa. La realidad resulta, sin embargo, muy diferente, ya que la previsión es que dentro de diez años la Comunidad Europea producirá seiscientos millones de toneladas más de CO₂ que lo establecido en Kyoto, y ochocientos millones más en el 2020.

Por esto el desarrollo futuro de la humanidad tiene que estar encaminado a la búsqueda incansable de otras fuentes productoras de energía, las cuales no contaminen y destruyan el medio ambiente.

Nuestro planeta reclama cada vez más el uso de la biomasa como fuente de energía renovable, pues es una de las vías de obtención de energía limpia y ecológica, sobre todo en aquellos países con grandes recursos orgánicos. Hoy la biomasa en general representa alrededor de 14 % de la energía que se consume en el mundo (25 millones de barriles de petróleo equivalentes por día) y 38 % del consumo en los países subdesarrollados. No obstante se están

manejando naciones en vías de desarrollo tecnologías para llevar a cabo una utilización más racional y eficiente de la biomasa.

Entre las biomasas, el bagazo después de la leña, constituye el tipo de biomasa con mayor importancia y potencial como combustible; anualmente se cosechan en el mundo alrededor de mil doscientos millones de toneladas de caña de azúcar equivalentes a 0,3 Gt de bagazo (50 % de humedad) y aproximadamente 0,16 Gt de pajas y hojas de la caña de azúcar.

Industria azucarera cubana

En Cuba, por ser un país eminentemente agrícola y azucarero, la biomasa cañera es la única alternativa con posibilidades reales de lograr incrementos considerables en la generación de energía eléctrica. Esta industria posee la característica de contar en la caña, además de con la materia prima para su proceso productivo, con la fuente energética que puede satisfacer las necesidades de la industria y, además, aportar considerable energía eléctrica a consumidores externos. Esta posibilidad de hecho no ha sido explotada en la magnitud en que necesita la economía nacional, y que en otros países se aprovecha a un nivel considerablemente mayor.

Para lograr que los centrales azucareros cubanos puedan generar sus propias demandas energéticas y aportar excedentes a consumidores externos (SEN) con la sola utilización de su propio combustible (biomasa cañera), es necesario llevar a cabo una serie de acciones que permitan, a mediano o largo plazos, niveles de generación muy superiores a los actuales. Entre estas acciones debe primar la modernización de los sistemas energéticos, la introducción de ciclos termodinámicos más eficientes, sustitución de equipos de transferencia

de calor por otros que garanticen la disminución de los consumos de vapor de escape en el proceso, uso de los residuos cañeros (RAC) como combustible, generar energía eléctrica todo el año, etc.

Es decir, es necesario conducir a nuestra primera industria hacia alcanzar eficiencias altas, tanto en la producción de azúcar como de energía eléctrica, o sea, convertirla en una industria sucroenergética.

Para avanzar hacia la aplicación de ciclos termodinámicos más eficientes que los actuales, resulta imprescindible acometer programas inversionistas encaminados a la construcción de instalaciones apropiadas de generación de energía eléctrica en los centrales azucareros o en sus inmediaciones, que permitan el aumento sustancial de los índices de generación, y que aunque inicialmente no sean totalmente competitivos con los sistemas tradicionales al menos sean rentables y que faciliten con su explotación el desarrollo de las tecnologías en el camino hacia la eficiencia económica.

Cuba cuenta con una industria azucarera que produce anualmente más de veinticuatro millones de toneladas de biomasa cañera; de estos, veinte millones son bagazo de caña, los cuales se someten a una baja eficiencia térmica en los generadores de vapor de las fábricas de azúcar.

Los restantes cuatro millones de toneladas son residuos agrícolas cañeros

(RAC) que se queman en los campos sin darle una utilización energética adecuada. La conversión energética es hasta ahora bastante inefectiva, ya que los procesos de cogeneración utilizados sólo han tenido el objetivo de satisfacer los requerimientos de calor y potencia del propio proceso, aunque es posible obtener excesos de energía para consumidores externos, como ha sido demostrado en varios países productores de azúcar.

Actualmente se estudian en nuestro país alternativas termoeconómicamente más factibles para el incremento de la generación de energía eléctrica, a partir de nuevos esquemas energéticos, como son:

- * Elevación de la presión en los generadores de vapor.
- * Uso de turbinas de extracción-condensación.
- * Uso de esquemas de gasificación de biomasa en ciclos BIG/GT (Biomass Integrated Gasification / Gas Turbine).

Impacto medioambiental del uso de la biomasa cañera como combustible

La biomasa desempeña un papel importante en la reducción de la concentración de CO₂ de dos formas: como reservorio de carbón, absorbiendo CO₂ en su propio desarrollo, y como sustituto de combustibles fósiles al ser usada como fuente energética.

Dentro de las biomásas la caña de azúcar se caracteriza por crecer de forma rápida y aportar más biomasa que la mayoría de los cultivos energéticos, por lo que constituye un recurso energético importante en la generación de energía eléctrica, sobre todo en países en desarrollo, atendiendo a su amplia distribución y presencia en estos países.

La introducción de nuevas tecnologías, como la gasificación, encuentra varias dificultades pues tendrá que propiciar la recuperación de las inversiones en un tiempo razonable y aportar cierto margen de beneficio; hoy resulta poco competitiva, aún con las tecnologías tradicionales establecidas hace tiempo. Sin embargo, en el precio de los combustibles fósiles no se refleja el daño ecológico que provoca su uso. Esta cuestión puede subsanarse si se implanta y desarrolla un sistema impositivo con fines proteccionistas y que, al mismo tiempo que "penalice" la utilización de dicho combustible, lo que pudiera llamarse "impuestos verdes", a la vez estimule, por medio de subvenciones sostenidas, el empleo de fuentes renovables de energía.

Las emisiones de estas plantas incluyen óxidos de nitrógeno y partículas sólidas; la inyección de urea o amoníaco (reducción no-catalizadora selectiva) puede usarse para reducir emisiones de óxido de nitrógeno, mientras el precipitador electrostático o filtros pueden usarse para el control de emisiones de partículas. Los combustibles de la biomasa contienen pequeñas cantidades de azufre comparado con el carbón y producen emanaciones disminuidas de dióxido de azufre (SO₂). Además, sus temperaturas de combustión son más bajas, las cuales ayudan a reducir las emisiones de (NO_x).

De estas plantas modernas las que cuentan con ciclos IGCC son las más eficientes en cuanto a la producción de energía eléctrica y a emisiones. Las mismas cuentan con un beneficio económico adicional que consiste en lograr

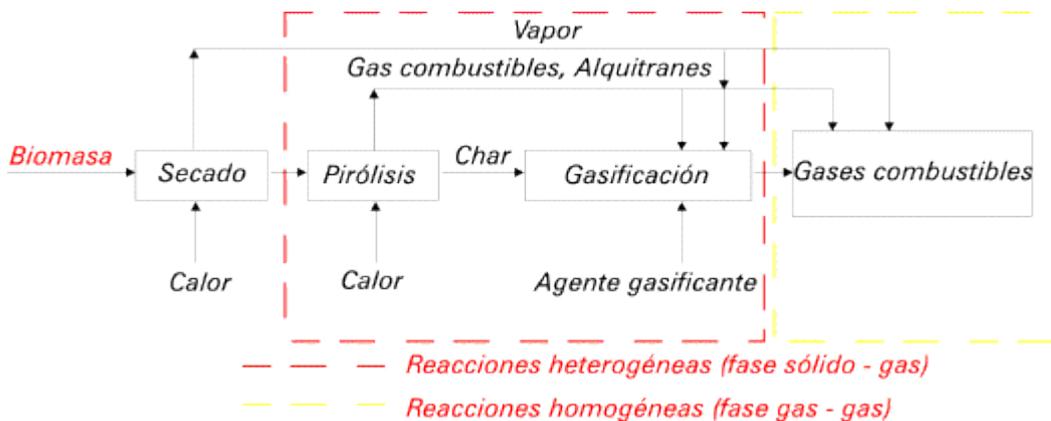
grandes reducciones de las emisiones a costos menores con respecto a otras tecnologías avanzadas. Las valoraciones medioambientales pueden ayudar económicamente a la biomasa haciéndola un combustible competitivo, puesto que, al contrario de los combustibles fósiles, los combustibles de la biomasa son renovables y no contribuyen al efecto invernadero; además, tampoco liberan más CO₂ que el que la planta absorbió durante su ciclo creciente.

Sin embargo, a menos que la biomasa sea eficaz y limpiamente convertida en una forma de energía secundaria, los beneficios medioambientales sólo se comprenden parcialmente, no en absoluto. Por esta razón debe favorecerse el empleo de la biomasa de una manera moderna y eficaz, por encima de la eficiencia de las aplicaciones tradicionales.

Gasificación de biomasa

La gasificación se define como aquel proceso termoquímico a alta temperatura en el cual un combustible sólido reacciona con una limitada cantidad de aire u oxígeno (agente gasificante), para convertirse en combustible gaseoso. Los constituyentes en el combustible gaseoso incluyen CH₄, CO, H₂, y algunos hidrocarburos más altos; los constituyentes inertes son principalmente el N₂, CO₂ y vapor de agua. En dependencia del proceso utilizado, el valor calorífico del gas combustible generalmente está entre 3 y 7 MJ/Nm³ (100-200 Btu/scf) para los gasificadores directos, y entre 11 y 17 MJ/Nm³ (300-450 Btu/scf) para los gasificadores indirectos. Este gas posee una potencia calorífica promedio de 4-6 MJ/Nm³ con aire, y de 10-15 J/Nm³ cuando se utiliza oxígeno. Este proceso alcanza sus mejores resultados de 800-10 000 C cuando se utiliza aire como agente gasificante, y de 1 000-14 000 C cuando se utiliza oxígeno.

Fig. 1. Secuencia del proceso de gasificación.



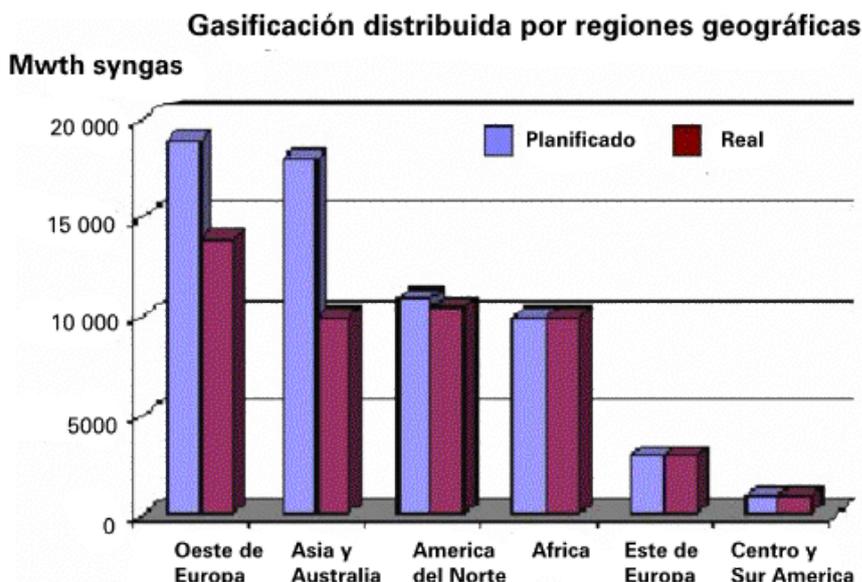
El gas es producido por la combustión parcial del combustible sólido a través de la reacción química entre este y el agente gasificante. Es un proceso endotérmico donde la mayor parte de la energía química del combustible sólido se le transfiere al combustible y por eso es necesario quemar parte del combustible sólido que proporcione la energía necesaria a las reacciones de gasificación (Fig. 1).

En un sistema operando bajo un esquema de gasificación de biomasa en ciclo BIG/GT, los gases producidos en la etapa de gasificación se conducen a una etapa de purificación o beneficio donde se disminuyen los contenidos de partículas, tar y otros contaminantes hasta niveles requeridos para el buen funcionamiento de las turbinas de gas. Luego se introduce en la turbina, con una conversión del 30 % al 35 % del GN en electricidad. Variantes al sistema usan la energía contenida en los gases que salen de la turbina para recuperar el calor sensible y generar vapor que puede servir para la cogeneración, elevándose la eficiencia térmica hasta 80 %. Alternativamente, si el objetivo único es la generación de electricidad, el vapor producido en la cogeneración puede ser inyectado en la misma turbina, lo que permite una mayor potencia de salida en la misma unidad y logra mayor eficiencia eléctrica. Esta variante se llama SITG, con un rendimiento eléctrico de 40 a 45 % y la ventaja añadida de controlar el exceso de temperatura en la turbina y, por lo tanto, minimizar la producción de NOX. Utilizando ciclos combinados, se alcanza un rendimiento eléctrico de hasta 55 %.

En todos estos esquemas se tiene previsto el empleo de RAC, los cuales son un aporte apreciable a la generación de energía eléctrica.

El estado de la tecnología de gasificación se puede considerar dividiendo los sistemas en gasificadores de pequeña escala (potencia < 750 kWe) y gasificadores de escala mayor. Todos los sistemas de mayor escala están basados en la tecnología de lecho fluidizado, han sido desarrollados y se encuentran en fase de demostración. En la figura 2 se muestra el grado de desarrollo de la tecnología de gasificación por diferentes áreas geográficas.

Fig. 2. Estado de la gasificación a escala mundial.



Estudio de aplicación de gasificación de bagazo en un central azucarero
 Este estudio se realizó en el central Abel Santamaría, del municipio Encrucijada, provincia de Villa Clara. El mismo procesó un volumen de caña

aproximado de 2 610 t/día, generando unas 810 t/día de bagazo (50 %), el cual fue combustionado en cuatro generadores de vapor a dos presiones diferentes. La potencia eléctrica instalada es de 1,5 MW en un turbogenerador de contrapresión, lo cual limita grandemente las potencialidades que presenta el mismo para generar considerables cantidades de energía. Además, este central presenta problemas con su tándem, relacionados con las máquinas de vapor que lo accionan; estas últimas muestran grandes signos de deterioro que podrían paralizar las actividades del central. Por lo antes expuesto, actualmente se están valorando diferentes variantes para solucionar los problemas existentes e incrementar los índices de generación eléctrica. Entre estas vías estudiamos la aplicación de la gasificación de bagazo con ciclo combinado.

Una premisa fundamental para lograr mayores índices de generación eléctrica en los centrales azucareros es hallar las vías para disminuir los actuales consumos de vapor de proceso (aproximadamente 500 kgvapor/tcaña). Por tanto, el análisis comenzó por estudiar y proponer cambios en el proceso que condujeron a discretas disminuciones de los consumos de vapor de escape, sin grandes inversiones.

Para esto fueron empleadas técnicas de análisis Pinch. Además, se propone un tándem eléctrico y la electrificación total del central.

Basado en la disponibilidad de bagazo que presenta este central fue calculado la nueva potencia para un ciclo combinado con gasificación de biomasa integrada, que es de 44 MWe. En la tabla 1 se muestra un resumen de los balances realizados, los cuales se acompañan con el balance de la situación actual a modo de comparación. En ella se puede observar la gran diferencia en la generación de energía eléctrica (102 GWh/zafra) que puede alcanzarse al introducir una tecnología de ciclo combinado con gasificación de biomasa integrada en un central de media capacidad, como el Abel Santamaría. Es significativa la cantidad de energía que pudiera entregar a la red nacional, que asciende a los 98,4 GWh/zafra, garantizando eliminar la actual dependencia de la red nacional. El índice de generación eléctrica experimenta un gran salto de 17,24 kWh/tcaña, a valores de 400 kWh/tcaña. Nótese que solo se ha considerado el bagazo como combustible y la zafra como período de operación (cien días); estos valores se incrementarían si se emplea la paja de caña y se opera en período inactivo.

Tabla 1. Datos técnicos de la situación actual y de la planta de gasificación.

CAI Abel Santamaría	Unidades	Sit. actual	BIG/GT/CC
Molida potencial	t/día	2611	2611
Bagazo disponible potencial	t/día	813,95	814,0
Potencia eléctrica instalada	kW	1 500	44 000
% Reductora	%	6,94	0.35
Índice de generación eléctrica	kWh/tc	17,24	404,52
Índice de consumo eléctrico	kWh/tc	16,66	27,58

Vapor de escape/t caña	kgvapor/tcaña	509,4	467,8
Vapor %'caña	%	50,94	46,78
Generación en zafra	MWh/a	3 600	105 600
Energía total vendida a la red	MWh/a	120	98 400
Demanda eléctrica del complejo	kW	1 450	3 000
Compra del SEN	kW	200	0

En la tabla 2 se exponen los valores del incremento de generación eléctrica que se logra con la introducción de la nueva tecnología, y por tanto la cantidad de petróleo evitado en la generación de la misma cantidad de energía eléctrica, así como la cantidad de CO₂ dejado de emitir a la atmósfera.

Tabla 2. Valores de petróleo evitado y CO₂ dejado de emitir.

Generación	GWh/a	102
Petróleo evitado	tpetróleo evitado/a	32 640
CO ₂ dejado de emitir a la atmósfera	t CO ₂ /a	119 748

La introducción de este tipo de tecnología cuenta con valores de inversión de alrededor de 1 200 a 1 400 USD\$/kW instalado, y los periodos de recuperación son de alrededor de cuatro a seis años.

Conclusiones

1. Nuestro planeta requiere cada día más del empleo de nuevas fuentes energéticas que disminuyan el actual incremento progresivo de la concentración de CO₂ en la atmósfera. Los graves problemas que hoy presenta el medio ambiente son provocados principalmente por el uso excesivo de combustibles fósiles; la sociedad contemporánea debe trazar estrategias orientadas a reducir sus emisiones y hacer un uso racional de los recursos energéticos.

2. Dentro de estas, la caña de azúcar constituye el tipo de biomasa con mayor importancia y potencial como combustible, atendiendo a su amplia distribución geográfica (ochenta países), donde hoy se cosechan importantes volúmenes que ascienden a mil doscientos millones de caña anualmente. Esto reviste gran importancia para Cuba, donde esta es la única alternativa con posibilidades reales de alcanzar incrementos considerables en la generación de energía eléctrica, posibilidad que de hecho no ha sido explotada en la magnitud que necesita la economía nacional y que en otros países se aprovecha a un nivel considerablemente mayor. Por tanto, deben acometerse cambios tecnológicos que posibiliten elevar los índices de generación eléctrica en los centrales azucareros de 20 kWh/tcaña, con los actuales sistemas de contrapresión, a valores de 400 kWh/tcaña con sistemas BIG/GT/CC.

3. Al aplicar el estudio al central Abel Santamaría se determinó el elevado incremento que presenta la generación de energía eléctrica con la introducción de un sistema BIG/GT/CC, de 3,6 GWh/año a 105,6 GWh/año, siendo también

significativa la cantidad de energía que pudiera entregar a la red nacional, que asciende a 98,4 GWh/zafra, lo cual garantizaría eliminar la actual dependencia de la red nacional. El índice de generación eléctrica experimenta un gran salto, de 17,24 kWh/tcaña a valores de 400 kWh/tcaña.

4. Al introducir estas tecnologías se logra un impacto positivo sobre el medio ambiente, ya que se produce una cantidad de energía a partir de un combustible no contaminante y renovable que, expresado en cantidad de combustible fósil dejado de quemar, asciende a 32 640 t petróleo evitado/a. Esto implica una cantidad de 119 748 t CO₂/a dejados de emitir a la atmósfera.

Bibliografía

DESAI, A. V. ET AL. *"Investigación sobre energía. Orientaciones y recomendaciones para países en desarrollo"*. International Research Center. El colegio de México, 1991.

GABRA, M. *"Study of possibilities and some problems of using cane residues as fuel in a gas turbine for powergeneration in the sugar industry"*. Doctoral Thesis. Department of Mechanical Engineering. Division of Energy Engineering. Lulea University of Technology, Sweden, 2000.

IROYAZ. Estudio integral del ingenio Abel Santamaría. Código 5019-015-1-0101-1, mayo, 2000.

KINOSHITA, C. M. *"Potential for cane energy."* International Conference on Energy from sugar cane. September 10-13. Hilo, Hawaii, 1991.

ROQUE, P. ET AL. Proyecto Abel Santamaría. CTE-AS-01-97. *Central termoeléctrica (CTE) trabajando con biomasa cañera en cooperación con un central azucarero*. Estudios preliminares. CETA, 1997.

El ciclo del hidrógeno solar y los nuevos materiales

Solar hydrogen cycle and new materials

Elena Vigil.

*Cátedra de Energía Solar, Instituto de Materiales y Reactivos,
Facultad de Física, Universidad de La Habana.*

Resumen

Se calcula que las reservas conocidas y estimadas de petróleo y gas natural serán suficientes sólo para una primera parte de este siglo considerando el actual ritmo de crecimiento en su uso, por lo que también los precios deben ir en aumento. Por otra parte, la explotación de los combustibles fósiles debe frenarse con urgencia por las afectaciones que origina al planeta. Por estas razones, grandes cambios en la infraestructura del sistema energético están llamados a ocurrir en el futuro no tan distante. Dentro de este contexto, la energía solar debe desempeñar un papel preponderante. Para el aprovechamiento de la energía solar de forma directa se utilizan las conversiones térmica y fotovoltaica. Dado el carácter no permanente de la radiación solar originado por las noches y otros fenómenos climáticos no periódicos, se hace indispensable contar con formas eficientes de almacenamiento y transporte de la energía. En este sentido, el almacenamiento y uso del hidrógeno como portador energético se avisa como solución óptima. El perfeccionamiento y creación de sistemas para aprovechar la energía solar, almacenarla y transportarla en forma de hidrógeno pasa en todos los casos por el desarrollo de nuevos materiales. Con éstos se logrará llevar a la práctica tecnologías hasta hoy no rentables o desarrollos aún inexistentes. En este trabajo se fundamenta la necesidad imperiosa de modificar nuestro sistema energético basado en las energías fósiles y se argumenta que es la energía solar la llamada a sustituirlas. Después se analiza la importancia de los nuevos materiales para llegar a lograr este objetivo y su "estado del arte", fundamentalmente de los materiales para la utilización del hidrógeno como portador energético.

Palabras clave: sistema energético, ciclo del hidrógeno solar, nuevos materiales

Abstract

It is estimated that known and estimated oil and natural gas world reserves will be only enough for a first half of this century considering present-day growth rate in their use, which is why prices should also be on the increase. On the other hand, the exploitation of the fossil fuels should stop urgently for the impacts that their combustion cause on the planet. For these reasons, great changes in the infrastructure of the energy system should happen in the near future. Within this context, solar energy should take a predominant role. For harnessing the direct manifestations of solar energy the thermal and photovoltaic conversions are used. Given the intermittent character of solar

radiation due to the rotation of the Earth along its axis, the translation around the Sun and the tilt of the axis with respect to the plane of the orbit, it becomes indispensable to count on efficient technologies of storage and transportation of energy. In this regard, the storage and use of hydrogen as an energy carrier is seen as the optimal solution. The creation and improvement of systems to take advantage of solar energy, to store it and transport as hydrogen is related in all cases with the development of new materials. With these materials it will be possible to put it into practice technologies today profitless or still non-existent developments. In this paper the forceful demand to modify our energy system based on fossil energy has a base and it is claimed that solar energy is the call to substitute them. The paper also analyzes the importance of the new materials to achieve this objective and its state of the art, mainly the materials the utilization of hydrogen as an energc carrier.

Keywords: energy system, solar hydrogen cycle, new materials

Dentro de este contexto, la energía solar debe desempeña un papel preponderante. Para el aprovechamiento de la energía solar de forma directa se utilizan las conversiones térmica y fotovoltaica. Dado el carácter no permanente de la radiación solar originado por las noches y otros fenómenos climáticos no periódicos, se hace indispensable contar con formas eficientes de almacenamiento y transporte de la energía. En este sentido, el almacenamiento y uso del hidrógeno como portador energético se avisoro como solución óptima. El perfeccionamiento y creación de sistemas para aprovechar la energía solar, almacenarla y transportarla en forma de hidrógeno pasa en todos los casos por el desarrollo de nuevos materiales. Con éstos se logrará llevar a la práctica tecnologías hasta hoy no rentables o desarrollos aún inexistentes.

En este trabajo se fundamenta la necesidad imperiosa de modificar nuestro sistema energético basado en las energías fósiles y se argumenta que es la energía solar la llamada a sustituirlas. Después se analiza la importancia de los nuevos materiales para llegar a lograr este objetivo y su "estado del arte", fundamentalmente de los materiales para la utilización del hidrógeno como portador energético.

I. Necesidad del uso de la energía solar. Energías fósiles vs. energía solar

Entre las ventajas de las llamadas "energías duras" están su fácil almacenamiento y transportación, así como las tecnologías ya maduras para su explotación. No por gusto la utilización de combustibles fósiles (petróleo, gas, carbón) cubre más del 80 % de la demanda mundial, y la energía nuclear alrededor de 5 % [David, 1990]. Sin embargo, todas ellas son extinguibles, fuertemente contaminantes, concentradas en pocas regiones de la Tierra, en las manos de multinacionales y utilizadas de forma ineficiente; su consumo se ha convertido en una fuerza destructiva. Ya hoy los daños ecológicos y sociales son de grandes dimensiones y están en continuo aumento [Bockris et al., 1991; Turrini, 1993].

Incremento en los últimos decenios de la acidez de las lluvias en más de un 10 %.

Los ácidos sulfúrico, nítrico y carbónico en la lluvia, formados a partir de los óxidos correpondientes presentes en la atmósfera producto de la combustión

del petróleo, son responsables de daños considerables a lagos, ríos, océanos, bosques, plantaciones, edificaciones, animales, y humanos. Por ejemplo, catorce mil lagos en Suecia se han acidificado y de ellos cuatro mil ya no tienen peces. El costo anual para neutralizar la acidez de estos lagos en Suecia fue calculado en 40 millones de dólares en 1985.

En Canadá muchos ríos ya no permiten la reproducción del salmón. Se ha estimado que, de continuar el actual ritmo de crecimiento de la acidez de los océanos, a mitad del próximo siglo los sesenta metros superiores de agua no permitirán la vida de especies debido a su acidez. Un estudio europeo muestra que el 15 % de las reservas forestales están dañadas, daño seis veces mayor que la tala anual de bosques. Se estimó que en 1984 las pérdidas agrícolas en los Estados Unidos debidas a las lluvias ácidas fueron superior a los ocho mil millones de dólares. La lluvia ácida corroe la piedra de los edificios, incluyendo lugares como el Partenón en Grecia, el Coliseo en Roma, la Catedral de Nuestra Señora de París, etc. Alemania está gastando aproximadamente cuatro millones por año para reemplazar el trabajo en piedra de la Catedral de Colonia.

En 1984 se estimó en ciento cuarenta mil millones de dólares anuales el total de daños a edificios históricos, públicos y viviendas; cifra que se eleva cada año con los aumentos en el consumo de combustibles fósiles. Cientos de especies de animales y plantas desaparecen cada año por el aumento de la acidez del agua con que se alimentan. Esto también afecta a los humanos. Se ha calculado que en los Estados Unidos los efectos de las lluvias ácidas sobre la salud en 1985, fueron de ciento ochenta millones de dólares. Esto, desde luego, no incluye el sufrimiento humano que los acompaña.

Aumento de la temperatura media del planeta por el efecto invernadero.

Miles de millones de toneladas de CO₂ se originan anualmente por la combustión de portadores energéticos fósiles y la cifra va en aumento. Su acumulación en la atmósfera ha provocado un incremento de la temperatura media de la Tierra de 0,6 oC desde la revolución industrial hasta hoy. De continuarse utilizando las energías fósiles, la temperatura media al final del próximo siglo habría aumentado en 5 oC, lo cual significaría una verdadera catástrofe por el incremento del nivel del mar, el aumento de la frecuencia y severidad de los huracanes, los cambios climáticos anormales que originarían sequías en algunos lugares e inundaciones en otros, y los efectos de esta variación de temperatura sobre todos los organismos vivos.

Ya hoy, a pesar de ser pequeño el incremento de la temperatura media, sufrimos cambios climáticos anormales que han causado grandes afectaciones económicas y sociales. La situación del efecto invernadero se agrava cada día debido a que la radiación ultravioleta que pasa a través del hueco en la capa de ozono en la estratosfera destruye el fitoplancton; éste y los bosques afectados por las lluvias ácidas son los mayores consumidores de CO₂ de la atmósfera.

La contaminación ambiental.

Otros contaminantes presentes en el aire producto de la combustión del petróleo que afectan directamente la salud del hombre y otros seres vivos son el CO, el SO₂, el NO, el NO₂, el benzopireno, el peroxiacilnitrato (PAN) y el "smog".

Otros daños ecológicos son producidos por los derrames de crudo y la existencia de valores altos de radioactividad en determinadas regiones.

Por otra parte, son graves los daños sociales derivados de la concentración y el monopolio de las energías fósiles, lo cual genera conflictos armados e injerencia extranjera. Todo esto obliga a volver la vista a las energías renovables con tecnologías que aún deben hacerse masivas y eficientes para que no resulten más costosas que las energías fósiles. Incluso, hoy serían más competitivas si se añadieran a los costos de las energías duras, el precio que todos pagamos a posteriori por daños ecológicos y sociales.

Para que los países menos desarrollados alcancen mejores niveles de vida deben aumentar el consumo energético. La figura 1 [Veziroglu, 1991] evidencia que existe una gran diferencia entre los consumos de los países menos desarrollados con respecto a los más desarrollados, por lo que evidentemente el desarrollo de los primeros, basado en las energías fósiles, incrementaría extraordinariamente los efectos nocivos mencionados.

En la figura 2 se muestran las reservas existentes de petróleo, gas natural y carbón [Fullerson et al., 1990]. Puede pronosticarse un aumento de sus precios debido a la disminución constante de las reservas, el incremento de las dificultades para extraer las que van quedando y los costos añadidos si se convirtiera el carbón en combustible líquido o gaseoso. Por otra parte, los países desarrollados se preparan para los cambios que se avecinan. Es de esperarse una variación de la infraestructura del consumo energético, tanto del sector poblacional como industrial, propiciando la generación de energía cerca de donde se consume, evitando la forma concentrada de producción de energía como en las termoeléctricas, que se origina por la economía de escala en la utilización de combustibles fósiles. Inversiones en estos momentos en grandes plantas generadoras de electricidad y redes de distribución por parte de los países en vías de desarrollo, pueden ser tardías y volverse obsoletas e incosteable su materia prima en un tiempo menor al necesario para recuperar dicha inversión. Todo lo anterior indica que se debe acelerar la introducción del uso de las energías renovables. Para los países iberoamericanos resulta particularmente importante la conversión directa de la energía solar por la potencialidad grande que todos poseen por su situación geográfica.

La energía irradiada por el Sol sobre la Tierra anualmente corresponde a 1,5.10¹⁸ kWh. Un cálculo sencillo, considerando un consumo por habitante igual al promedio actual de los países desarrollados y una eficiencia de conversión del 10 %, arroja que se necesita menos de la centésima parte del área terrestre para cubrir las necesidades de toda la humanidad, con un nivel de consumo promedio igual al actual de los países desarrollados; área que resulta inferior por cuanto las eficiencias de conversión son mayores. La

energía solar es accesible a todos, es limpia, está descentralizada y es inagotable por millones de años. Resulta desventajoso su manifestación no constante (noches, nubes) y su aparente no rentabilidad hasta el momento, ya que tiene que competir con combustibles fósiles a los que no se les recarga el daño ecológico que ocasionan. Además, la adquisición de la instalación implica estar pagando por adelantado todo el combustible que se compraría en un período entre quince y veinte años, o sea, el gasto tiene un período largo de amortización. Es el desarrollo de los nuevos materiales y de sus tecnologías lo que solucionará las desventajas de su manifestación no constante y su relativo alto costo en el presente.

II. El desarrollo de materiales para el aprovechamiento de la energía solar

Las formas de aprovechar la energía solar son diversas: conversión fototérmica, fotovoltaica, arquitectura bioclimática, fotólisis, biofotólisis, efecto fotosintético (biomasa), gradiente de temperatura de los océanos, energía eólica, saltos y corrientes de los ríos (hidroenergía). El desarrollo de nuevos materiales tiene repercusión de una u otra forma en todas ellas; en algunas, de forma más esencial que en otras. Por ejemplo, para la conversión fototérmica se investiga tanto en las propiedades ópticas y durabilidad de los materiales para las ventanas transparentes de los colectores planos, como en materiales aislantes, como en los utilizados para la absorción de la radiación o para los espejos. La conversión térmica tiene gran importancia por su rentabilidad ya en estos momentos y su alta eficiencia (puede llegar a 60 %).

El desarrollo de la arquitectura bioclimática depende también de los nuevos materiales y sus tecnologías. Esto es de gran importancia para la solución de necesidades de los países iberoamericanos con materias primas diversas para la industria de la construcción [Justi, 1985]. No obstante, particularizaremos en los materiales de avanzada para la conversión fotovoltaica y aquellos que se utilizan en las distintas partes componentes del ciclo del hidrógeno solar. Los materiales de avanzada para estos dos objetivos son de extrema importancia, por cuanto garantizan la descentralización del sistema energético a partir de la autonomía de las instalaciones; inclusive, las de relativa baja potencia. El carácter modular, como se verá más adelante, de varias de las partes componentes del sistema "energía fotovoltaica-hidrógeno solar", hace que haya que cuestionarse el paradigma de las grandes plantas productoras de energía eléctrica con sus redes de distribución.

II.1 Materiales necesarios para la energía fotovoltaica

El efecto fotovoltaico permite la conversión directa a electricidad de la radiación solar de forma instantánea. Otras ventajas son:

- * La ausencia de partes mecánicas articuladas en los colectores fotovoltaicos.
- * Su carácter modular (los módulos de una instalación de 1 MW son los mismos que los de una instalación mucho menor; sólo varía el número de módulos).
- * La fácil instalación.
- * El corto tiempo de puesta en marcha, inclusive para centrales grandes.
- * El muy bajo costo de mantenimiento.
- * Su operación silenciosa.

- * Su carácter no contaminante del medio ambiente.
- * Su factibilidad de almacenamiento.

Los materiales necesarios para los paneles solares no sólo comprenden a los materiales fotovoltaicos, sino también capas delgadas para los contactos, capas antirreflectantes, materiales poliméricos para la elaboración y encapsulado de los paneles, etc. Sin embargo, el elemento clave donde se decide el costo del panel y la rentabilidad de la energía fotovoltaica es la celda solar.

Los materiales fotovoltaicos tradicionales son los semiconductores inorgánicos. El efecto fotovoltaico se reportó en 1839 por primera vez cuando Edmond Becquerel observó que la iluminación de un electrodo oxidado de platino, en un electrólito, provocaba un fotovoltaje. En 1877 se observaron efectos similares en barreras sólidas de selenio. En 1914, celdas solares basadas en selenio presentaban una eficiencia del 1 % [Fahrenbruch y Bube, 1983; Solar Cells..., 1995; Boschloo, 1996]. Las celdas solares de silicio monocristalino se fabricaron por primera vez en 1954, con una eficiencia del 6 % [Chaplin et al., 1954]. Actualmente las celdas de silicio monocristalino obtenidas a nivel de laboratorio han superado el 25 % de eficiencia sin concentración de la luz solar [Boschloo, 1996; Swanson et al., 1992]. Las eficiencias más altas a nivel comercial de los paneles, no obstante, están por debajo del 20 %. Para aumentar la eficiencia y disminuir los costos, se continúan las investigaciones en las celdas de silicio monocristalino en los siguientes aspectos [Swanson et al, 1992].

- * Pasivación de la superficie con estabilidad mejorada y recombinación superficial reducida.
- * Reducción de la resistencia mejorando la metalización.
- * Emisores de avanzada (SiC, polisilicio, etc.).
- * Proceso de fabricación para reducir costos.
- * Estructuras sobre sustratos de menor calidad o más delgados.
- * Obtención de sustratos de bajo costo con mayor calidad.

El desarrollo de materiales ha permitido reducir los costos con las celdas solares de silicio policristalino de granos grandes (multisilicio) y de silicio amorfo, que también se comercializan. Presentan menores eficiencias que las de silicio monocristalino, pero esto se compensa por su menor costo. Las de silicio amorfo se degradan con la radiación fuerte de luz, por lo que se han utilizado relativamente muy poco para convertir la radiación solar, comparado con su uso en relojes, calculadoras, etc. Ya hoy en día se comercializan también para uso exterior. La lucha por aumentar la eficiencia y reducir los costos también abarca otros materiales, como los compuestos III-V (fundamentalmente el GaAs junto con la solución sólida $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$), los II-VI (CdS, CuInSe_2 , CdTe).

Los valores más altos de eficiencia de conversión fotovoltaica reportados corresponden a las celdas basadas en GaAs y sus compuestos, pero también son las más costosas. Se han utilizado donde el factor relevante es la eficiencia y no los costos, por ejemplo, en satélites y naves espaciales. Las celdas de II-

VI se basan en capas delgadas policristalinas que se obtienen con tecnologías muy baratas. Se han obtenido ya eficiencias superiores a 15 %. Se argumenta que desde el punto de vista ecológico no son una buena opción, por los componentes tóxicos que poseen [Moskowitz et al., 1990].

Por otra parte, las reservas de indio, selenio y telurio no abundan en la naturaleza, y esto puede ser una dificultad para un uso en gran escala de paneles fotovoltaicos [Alsen y Engelenburg, 1992]. Tienen gran interés en la actualidad las celdas de capas finas CIS (cobre-indio-selenio) y las CIGS (cobre-indio-galio y selenio o azufre).

Otra dirección de trabajo en el desarrollo de materiales para celdas solares es la utilización de uniones múltiples de distintos materiales, buscando un mejor aprovechamiento de la radiación en todo el espectro solar y por tanto una mayor eficiencia: las llamadas celdas tándem. En la tabla 1 se resumen algunos datos de las eficiencias más altas alcanzadas, según el material [Green et al., 1997].

Tabla 1. Eficiencias confirmadas para celdas solares terrestres medidas para el espectro global AM1,5 (1 kW/ m²) a 25°C (15).

Clasificación	Eficiencia (%)	Lugar de medición (fecha)
Silicio monocristalino	24	Sandia (9/94)
Silicio multicristalino	18,6	NREL (12/85)
Silicio amorfo (resultados no estables)	12,7	Japan Quality Assurance (4/92)
Capa delgada de silicio (60 nm de Si sobre SiO ₂)	14,2	Japan Quality Assurance (3/93)
GaAs monocristalino	25,1	NREL (3/90)
GaAs multicristalino (sobre sustrato de Ge)	18,2	NREL (11/95)
Rtfgvb54 Capa policristalina de CdTe	15,8	NREL (6/92)
Capa policristalina de CuInGaSe ₂ (CIGS)	16,4	NREL (11/94)
GaInP/GaAs	30,3	Japan Quality Assurance (4/96)
GaAs/CuInSe (CIS), (capa delgada)	25,8	NREL (11/89)

Todas las celdas anteriormente descritas se basan en una barrera de potencial originada por un campo eléctrico, que hace que no regresen a su estado inicial los electrones excitados por la luz en el semiconductor dado. Estas barreras están formadas por una unión p-n (semiconductor tipo p-semiconductor tipo n), o una barrera Schottky (metal-semiconductor) o una estructura MIS (metal-aislante-semiconductor). Se han reportado además las barreras sólido-líquido o

electrólito-semiconductor, cuyo principio de funcionamiento también es la absorción de la radiación por el semiconductor y separación de carga por el campo eléctrico en la interfaz.

Estas son las llamadas celdas fotoelectroquímicas. Como se verá más adelante, esta interfaz se ha investigado no sólo con el objetivo de obtener un dispositivo fotovoltaico, sino también para generar hidrógeno. Se han estudiado muchas diferentes combinaciones de electrólito y semiconductor. Se han utilizado el silicio, el germanio, los semiconductores II-VI, los III-V, los óxidos semiconductores y otros compuestos [Chandra y Pendey, 1982]. Estas celdas presentan la dificultad de ser inestables ante el electrólito y aquellos semiconductores que son estables, como los óxidos, poseen una banda prohibida muy grande.

El valor de la energía de la banda prohibida que caracteriza a cada semiconductor determina la energía de los fotones que es capaz de absorber el semiconductor en cuestión. Así, los óxidos semiconductores sólo absorben la radiación solar en el ultravioleta y parte del azul; esto representa un porcentaje muy pequeño de la energía del espectro de radiación solar y hace que la eficiencia de conversión sea extremadamente baja. Por otra parte, algunos de estos óxidos además de ser estables son poco costosos.

Con el objetivo de extender la absorción de la radiación a la zona visible del espectro, se han investigado celdas fotoelectroquímicas sensibilizadas mediante la unión al óxido que actúa como fotoelectrodo de otro semiconductor, con una energía de la banda prohibida menor o con un colorante. En este último caso el colorante puede también estar disuelto en el electrólito. El principio de funcionamiento de estas celdas fotoelectroquímicas sensibilizadas se basa en la absorción de los fotones por la sustancia sensibilizadora. La energía de los fotones es tomada por electrones que van a un estado excitado.

La energía de este estado excitado coincide con la de algún estado vacío en la banda de conducción del óxido semiconductor, por lo que el electrón puede pasar sin dificultad al óxido semiconductor y después al circuito externo, donde su energía puede ser cedida y convertida en trabajo antes de regresar al otro electrodo de la celda. En el otro electrodo este electrón reduce especies oxidadas del electrólito. La sustancia sensibilizadora que cedió un electrón al semiconductor lo repone aceptando un electrón de las especies reducidas en el electrólito que pasan a oxidadas, completándose así el ciclo.

Lamentablemente pueden producirse otras reacciones que disminuyen la eficiencia de estas celdas: los electrones que se inyectan al semiconductor pueden reaccionar con especies oxidadas en el electrólito; pueden de nuevo ir al colorante; o puede que los electrones excitados en el colorante no lleguen a transferirse al semiconductor y se recombinen radiativa o no radiativamente. Como puede observarse, en este tipo de celda el efecto fotovoltaico se produce por una transferencia de carga y no por separación de carga por el campo eléctrico de la barrera [Bedja et al., 1990]. Se ha demostrado que éste no existe dadas las dimensiones nanométricas de los cristales. Para aumentar la

eficiencia del proceso de transferencia de carga es necesario que la molécula de colorante esté próxima al semiconductor [Boschloo, 1996].

Producto de los estudios anteriores, ha surgido un nuevo tipo de celda solar basada en un fotoelectrodo de dióxido de titanio nanoestructurado como semiconductor, cuyo principio de funcionamiento es la transferencia de carga por una monocapa de la sustancia sensibilizadora del TiO₂ [O'Reagan y Gratzel, 1991; Hagfeldt et al., 1994; Bard y Fox, 1995; Nazeruddin et al., 1993]. Se utilizan monocapas para lograr una transferencia de carga más efectiva. Como la absorción de la radiación en el espesor de una monocapa es pequeña, ésta se ha depositado sobre el semiconductor nanoestructurado, que alcanza una superficie efectiva cientos de veces superior al área visible. La luz es atrapada en los poros del semiconductor y sufre reflexiones múltiples, aumentando así la absorción en la monocapa de la sustancia sensibilizadora que recubre el TiO₂ nanocristalino. En estas celdas se han alcanzado eficiencias superiores al 8 %.

Se ha iniciado su comercialización en Europa y se ha firmado un acuerdo entre Sustainable Technologies Australia y la Academia de Ciencias de China para establecer una planta de fabricación de paneles en China [Photovoltaic..., 1997].

Como puede apreciarse de lo anterior, se investiga sostenidamente por encontrar el material y la tecnología de la celda solar que haga competitiva la energía fotovoltaica con los actuales precios de las energías fósiles. Ya habíamos mencionado que el elemento que decide el costo del sistema fotovoltaico es el de la celda solar. En la actualidad, para lugares remotos donde no llegue la red eléctrica, ya resulta más económica la alternativa fotovoltaica. El mercado fotovoltaico mundial ha ido en aumento [Photovoltaic..., 1997], incremento que no ha sido uniforme en los diferentes países, destacándose Japón.

Se pronostica por el Canadian Centre for Mineral and Energy Technology (CANMET), en "uno de los estudios de mercado más minuciosos de la industria fotovoltaica que se haya realizado", según [Photovoltaic..., 1997], que las ventas de módulos en el año 2010 estarán en el rango de 800 a 1 000 MW, o sea, del orden de diez veces mayor con respecto a 1996. Una parte apreciable de las ventas cubren necesidades en países subdesarrollados, donde las redes de sus sistemas energéticos no abarcan todo el territorio nacional. Sin embargo, los productores son los países más desarrollados. Se hace necesario cambiar esta situación si aspiramos a que los países en desarrollo no continúen siendo fundamentalmente exportadores de materia prima e importadores de productos elaborados con ellas. De no cambiarse, habría que comprar la energía fotovoltaica a pesar de tener el sol. Es evidente la necesidad de trabajar en los materiales para celdas solares.

II. 2. Almacenamiento de la energía solar

La energía fotovoltaica necesita almacenarse para tener disponibilidad de electricidad durante los períodos de "no sol". Puede almacenarse en aire comprimido, bombeando agua, en baterías, utilizando superconductividad o en

forma de hidrógeno. Para los tres últimos, las investigaciones sobre materiales tienen gran importancia y actualidad. La utilización de almacenamiento de energía en superconductores posibilita eficiencias de almacenamiento por encima de 90 %, mucho mayor que las eficiencias de las restantes posibilidades mencionadas [Hubbard, 1989], pero las investigaciones en estos materiales aún no han logrado que esta posibilidad pueda materializarse en la práctica. El almacenamiento en baterías es hoy el más común y frecuente. Existen las baterías secas a las que no se les repone el electrólito, y las conocidas como "acumuladores". El más conocido y utilizado es el de plomo ácido. Existen también diferentes tipos de baterías alcalinas con electrodos de Ni-Cd, Ni-Fe, Ag-Zn, Ag-Cd. Se trabaja en el desarrollo de los materiales de los electrodos con el objetivo de aumentar el número de watt-hora por unidad de peso de la batería (Wh/kg). Gran actualidad tienen los estudios de la batería de Zn-aire para los vehículos eléctricos. Estas alcanzan valores de 200 Wh/kg, superiores a otras mencionadas, aunque no se recargan en el auto y necesitan cambiarse en las estaciones de servicio (en lugar de llenar el tanque con combustible). Las baterías basadas en elementos inorgánicos son las que se han utilizado ampliamente hasta el momento, pero se están desarrollando otras basadas en materiales poliméricos. Se han desarrollado los poliorganodisulfuros que pueden actuar como electrólito y electrodo redox al mismo tiempo, así como otros polímeros.

Hidrógeno solar

En general, el almacenamiento en baterías es adecuado para valores de potencia almacenada relativamente pequeños. Para poder lograr sistemas autónomos descentralizados, no obstante, se necesita almacenar cantidades superiores de energía; el almacenamiento en hidrógeno se tiene en la perspectiva como el más prometedor por ofrecer muchas ventajas:

- * Se obtiene por descomposición del agua, que es abundante y asequible.
- * No influye en el medio ambiente y sólo genera de nuevo agua cuando cede la energía almacenada. O sea, es limpio y renovable.
- * Es adecuado para el uso doméstico e industrial.
- * Se transporta y almacena con pocas pérdidas.

El llamado ciclo del hidrógeno solar comprende:

- * La obtención de hidrógeno utilizando energía solar (fotovoltaica u otra).
- * El almacenamiento de esta energía (que desde luego también puede utilizarse directamente).
- * La distribución o transportación del H₂ (lo que es de menor peso relativo donde se tenga abundante sol y se pueda descentralizar el sistema energético).
- * La reconversión a otro tipo de energía útil (ya sea eléctrica o calor en distintas formas).

II. 2.1. Obtención de hidrógeno

El hidrógeno puede obtenerse de energía térmica, eléctrica (electrolíticamente) o directamente.

Obtención de hidrógeno utilizando energía térmica

Para la obtención de hidrógeno del agua utilizando energía solar térmica

pueden emplearse la descomposición directa y el proceso termoquímico. En el primer caso se necesita del desarrollo de materiales que puedan soportar más de 2 000 oC de temperatura para disociar la molécula de agua por calor. En el segundo caso puede usarse la descomposición termoquímica. Se buscan materiales reciclables eficientes y que puedan soportar muchos ciclos de oxidación-reducción. Por ejemplo, vapor de agua a alta temperatura se hace circular a través de polvo de hierro; este se oxidará tomando el oxígeno del vapor y quedando libre el hidrógeno. Es necesario que el óxido de hierro pueda de nuevo reducirse para repetir el ciclo. La instrumentación práctica de estas posibilidades es lejana aún.

Obtención de hidrógeno utilizando electricidad

La electricidad para la electrólisis puede obtenerse por diversas vías a partir de la energía solar. Con la conversión térmica, la energía eólica, la hidroenergía y otras fuentes renovables puede producirse energía eléctrica.

Para convertir la energía eléctrica en hidrógeno se necesitan los electrolizadores, que son equipos modulares, cuya unidad es la celda electrolítica (un vaso). El escalado de sistemas modulares, o sea, de aquellos donde se logra una mayor potencia incorporando un número mayor de unidades, es más simple y constituye un factor importante. En cada celda los elementos constituyentes son los electrodos y el electrólito. Las reacciones que se producen en uno y otro electrodo son:

Reacciones en la electrólisis alcalina:

En el cátodo: $4\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2 + 4\text{OH}^-$

En el ánodo: $4\text{OH}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 + 4\text{e}^-$

Reacciones en la electrólisis ácida:

En el cátodo: $4\text{H}_3\text{O}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 4\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}_2$

En el ánodo: $6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}_3\text{O}^+ + \text{O}_2 + 4\text{e}^-$

Como se puede observar, en una y otra electrólisis el hidrógeno se desprende en el cátodo y el oxígeno en el ánodo, invirtiéndose la formación de agua que ocurre en el ánodo en la alcalina y en el cátodo en la ácida.

En ambos casos ocurre la reacción neta:

$2\text{H}_2\text{O} + \text{electricidad} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2 + \text{calor}$

Los electrolizadores ácidos trabajan en condiciones más agresivas y corrosivas para el cátodo, donde se desprende hidrógeno, que los alcalinos [Savadogo, 1996].

Materiales para celdas electrolíticas

Las celdas electrolíticas logran descomponer la molécula de agua cuando se aplica un voltaje mayor que el mínimo indispensable de 1,23 V. Se desarrollan materiales para electrodos con el objetivo de que el voltaje necesario sea lo más cercano a este valor. No sólo estos materiales son necesarios para la optimización de la celda, también se utilizan y prueban diferentes electrocatalizadores, así como los materiales de las membranas necesarias para mantener sin mezclarse, el oxígeno e hidrógeno que se forman. Se

emplean tanto electrólitos ácidos como alcalinos y se trata de encontrar las mayores eficiencias y durabilidad a los menores costos. En la tabla 2 se muestran algunos materiales utilizados.

Tabla 2. Materiales utilizados en celdas electrolíticas [Savadogo, 1996; Podestá y Piatti, 1997].

Material	Electrólisis ácida	Electrólisis alcalina
Para cátodos	Platino; carbón con Pt; composites con Pt; Pd-P, Au-P y Co-P amorfos	Níquel brillante o poroso (níquel-Raney)
Para ánodos	RuO ₂ , IrO ₂ , óxido de Ru-Ir-Ta	Níquel brillante, CoNiO ₃ , NiCo ₃ O ₄ , espinelas con Co
Membranas separadoras	Acido sulfónico perfluorinado (polímero Nafion , polímeros sulfonados poliaromáticos	Asbestos, membranas orgánicas de polímeros (PTFE, FEP, PFA, PPS, PETFCE, PSP); BaTiO ₃ , CaTiO ₃
Electrólitos sólidos	Membranas poliméricas conductoras de protones (proton exchange membrane, PEM)*	

**Hasta el momento, las membranas PEM desarrolladas que actúan como electrolito sólido no pueden trabajar a temperaturas superiores a 180 °C, lo cual sería una ventaja.*

El lograr mayores eficiencias, estabilidad y durabilidad a menor costo depende del desarrollo futuro de los materiales necesarios para las partes componentes.

Obtención directa de hidrógeno

Aunque el hidrógeno puede obtenerse según las variantes analizadas, en la descomposición directa sólo hay una transformación de energía y por lo tanto energéticamente es el camino mejor. Se puede descomponer fotoquímicamente el agua utilizando biofotólisis y fotólisis.

Las plantas y bacterias han resuelto de manera eficiente la descomposición del agua; es el proceso denominado biofotólisis que forma parte de la fotosíntesis. La planta utiliza los cuantos de luz para obtener oxígeno e hidrógeno, aunque el último no se obtiene en su forma molecular sino que pasa por otras reacciones a formar parte de la biomasa que la planta sintetiza utilizando también CO₂ del aire. La planta almacena la energía solar en la biomasa que produce. Algunas algas en condiciones especiales pueden producir hidrógeno molecular, y su cultivo es una vía de producir hidrógeno utilizando la biofotólisis [Podestá y Piatti].

La fotólisis es el procedimiento empleado por el hombre para descomponer directamente la molécula de agua mediante la radiación luminosa en lugar de la electricidad. Este procedimiento está en desarrollo, aún no se aplica en la práctica y se trabaja en los materiales para lograrlo. Los sistemas utilizados

hasta el momento se basan en la interfase electrolito semiconductor al igual que las celdas fotovoltaicas electroquímicas descritas anteriormente. Al principio de la década del setenta, Fujishima y Honda [1971] demostraron el uso de fotoelectrodos semiconductores para la descomposición fotoasistida de la molécula de agua. Estos autores emplearon el dióxido de titanio como semiconductor. El elemento clave para poder introducir en la práctica este tipo de celda es el material para el fotoelectrodo. Su eficiencia de conversión fotoquímica de la energía del espectro solar y su estabilidad en el tiempo son factores críticos para determinar el buen comportamiento y eficiencia de la celda.

En general, los diseños reportados pueden clasificarse en dos grupos: aquellos en que tanto el cátodo como el ánodo están en el mismo electrolito (celdas homogéneas), y las llamadas celdas heterogéneas, que tienen compartimentos separados con diferentes electrolitos para el cátodo y el ánodo con el objetivo de producir una diferencia de voltaje adicional. Además, puede uno sólo de los electrodos recibir la luz o ambos actuar como fotoelectrodos. En estas celdas, como en las fotoelectroquímicas fotovoltaicas, existen fotoelectrodos que se descomponen o degradan con la luz, y fotoelectrodos estables pero poco eficientes, porque sólo absorben una pequeña parte del espectro solar. Para extender la zona de absorción se ha trabajado en dopar el semiconductor, así como en sensibilizar el semiconductor o la solución electrolítica [Savadogo, 1971; Kikkawa et al., 1991; Gurunathan et al., 1993].

Se han reportado celdas fotoelectrolíticas para la obtención de hidrógeno a partir de agua de mar [Goc y Tien, 1993; Ichikawa, 1997] Todas estas investigaciones están indisolublemente unidas al estudio de nuevos materiales. Recientemente, en el National Renewable Energy Laboratory de EE.UU. se ha obtenido una estructura en base a semiconductores III-V, con la cual han logrado una eficiencia para la producción fotolítica de hidrógeno superior al 10% por primera vez. Llegar a las soluciones con los materiales que permitan introducir en la práctica el proceso de fotólisis tendrá sin duda grandes implicaciones.

II.2.2. Almacenamiento de hidrógeno

El hidrógeno puede almacenarse como gas natural. La densidad energética (energía almacenada por unidad de volumen) del hidrógeno gaseoso, incluso comprimido, es baja. Por ello, esta forma de almacenamiento no es adecuada para usos en el transporte por el espacio que requiere. La mayor parte de las investigaciones en materiales para el almacenamiento de hidrógeno tienen como objetivo su uso en el transporte con el propósito de reducir las dimensiones del tanque de hidrógeno necesario para garantizar los recorridos que se alcanzan actualmente con la gasolina.

El hidrógeno puede combustionarse directamente; es posible convertir los motores de los vehículos actuales para ello. Sin embargo, la solución que parece más viable en la perspectiva es el uso de motores eléctricos, más eficientes que los de combustión interna, en los que la electricidad proviene de una celda de combustible que transforma en electricidad la energía almacenada en el hidrógeno. Este es un proceso limpio donde sólo se genera

agua. Los materiales que se investigan deben ser capaces de retener y expulsar el hidrógeno con facilidad bajo la acción, por ejemplo, de variaciones de temperatura y/o presión. Se busca también aumentar la relación de masa de hidrógeno almacenada a volumen ocupado y disminuir el peso total del "depósito". Se han utilizado y estudian hidruros de compuestos intermetálicos, zeolitas y carbones superactivados [Kronberger, 1996; Weitkamp et al., 1995].

También se investigan materiales compuestos para lograr depósitos de hidrógeno gaseoso a presión más ligeros que los empleados normalmente [Chahine y Bose, 1996].

II.2.3. Generación de energía a partir del hidrógeno

Del hidrógeno puede obtenerse energía térmica por combustión o electricidad utilizando las celdas de combustible. La conversión a energía térmica depende menos directamente de los materiales, por lo que revisaremos la situación de las celdas de combustible.

Las celdas de combustible se basan en el proceso inverso a la electrólisis del agua.

O sea, en ella el hidrógeno y el oxígeno se recombinan para dar agua. Esta es una reacción con desprendimiento de energía, lo que se hace en forma de electricidad en estas celdas. Al igual que en las celdas para la electrólisis del agua, los estudios para el desarrollo de estas celdas abarcan tanto los materiales de los electrodos y los electrólitos sólidos, como materiales y procesos catalizadores de la reacción. En la tabla 3 se resumen los diferentes tipos de celdas y sus características [Fuel Cell Systems, 1993].

Tabla 3. Celdas de combustible

Tipo	Eficiencia	Uso	Potencia
Alcalinas, KOH 30 %	40-50 %	militar, espacio	10-100 kW
Ácidas, ácido fosfórico	40-45 %	cogeneración durante "picos"	1 kW-5MW
Carbonato fundido	45-60 %	gasificación de carbón	1-100 MW
Óxidos sólidos	45-60 %	cogeneración	0,1-100 MW
Polímero (PEM)	45-50 %	transporte, sistemas de energía autónomos	hasta 1 MW

Las celdas de combustible tienen las ventajas de:

- * Ser modulares.
- * No tener partes móviles.
- * No contaminar.
- * No hacer ruido.
- * Ser seguras.
- * Tener altas eficiencia y densidad de energía.
- * Ser de fácil mantenimiento.

Como en otras partes componentes del sistema del hidrógeno solar, las investigaciones sobre los materiales están guiadas a reducir los costos y aumentar la eficiencia. Dos objetivos fundamentales dependen del desarrollo futuro de las celdas de combustible y de los materiales que ellas utilizan: los sistemas de energía autónomos basados en el ciclo del hidrógeno y los vehículos eléctricos. En el caso de los vehículos eléctricos sobre la base de celdas de combustible que se están desarrollando por prácticamente todos los fabricantes de autos, se está tratando de utilizar un combustible fósil y de él obtener el hidrógeno. Por esta vía, por lo tanto, se siguen enviando grandes cantidades de CO₂ al medio ambiente; aunque un poco menos dada la mayor eficiencia del motor eléctrico. La opción verdaderamente limpia sería desarrollar la utilización del hidrógeno; sin embargo, existen intereses de grandes consorcios en mantener las redes de producción, distribución y venta de combustibles fósiles.

Resumen y recomendaciones

De todo lo anterior se hace evidente la importancia para todos los países, y en particular para aquellos en desarrollo, de prepararse para cambios futuros en la infraestructura energética basados en una amplia explotación de la energía solar y en la utilización del hidrógeno como portador energético.

Los países desarrollados se preparan y tienen programas amplios de desarrollo en materiales encaminados al aprovechamiento de la energía solar fotovoltaica y la utilización de sistemas autónomos basados en el ciclo del hidrógeno solar en los que participan numerosas universidades.

Por ejemplo, en Alemania, en la Universidad de Stuttgart, se creó el Centro SFB 270 para las investigaciones interdisciplinarias orientadas a la utilización del hidrógeno como portador energético; abarca doce institutos de la propia universidad además del Centro de Investigaciones Aeroespaciales Alemán, el Instituto Max-Planck de Investigaciones de Metales y el Instituto Gubernamental de Prueba de Materiales [Hydrogen..., 1996]. Pero existen muchos otros proyectos y grupos en ese país. Por ejemplo, el proyecto PHOEBUS de electrificación de la Biblioteca Central del Centro de Investigaciones Jülich basado en una instalación completamente autónoma que incluye energía fotovoltaica, hidrógeno electrolítico y celdas combustibles [Barthels et al., 1996]. Existe además el proyecto conjunto entre Alemania y Arabia Saudita HYSOLAR, para el desarrollo del ciclo del hidrógeno solar [Hug et al., 1996].

En Alemania se creó, en 1986, la empresa Solar-Wasserstoff-Bayern GmbH (SWB) para probar a escala industrial las diferentes componentes del ciclo del hidrógeno solar. Esta lleva a cabo el proyecto de Newunburg vorm Wald que comprende un sistema fotovoltaico que es el segundo en Alemania, 371 KWp [Dietsch, 1996]. Lo mencionado es sólo una pequeña parte de las investigaciones en ese país, existen muchísimos más proyectos [Wurster, 1997].

La situación de Alemania no es única, millones de dólares se invierten en estas investigaciones también en Estados Unidos, Japón, Suiza, Suecia, Holanda, etc. Estos datos señalan la necesidad de priorizar también en los países menos

desarrollados las investigaciones para el aprovechamiento de la energía solar, y en particular las de los materiales de avanzada necesarios, que como se ha visto son los que determinan su introducción amplia, los que pueden hacerla competitiva. Es fundamental crear conciencia de esta necesidad. Para ello, debe promoverse el acceso a información actualizada en estos temas por todas las vías. Es necesario fomentar proyectos multidisciplinarios para el desarrollo de materiales y partes componentes que los utilicen; que puedan incluso abarcar varios países promoviendo el intercambio científico y cooperación con objetivos bien definidos.

Debemos cuanto antes priorizar estos estudios y desarrollos para no tener que comprar en el futuro nuestra energía solar, es decir tener que importar los equipos y sistemas necesarios para su explotación. A la ciencia de los materiales, y por tanto a los profesionales que a ella se dedican, les cabe desempeñar un papel preponderante en esto.

Bibliografía

- ALSEMA E. A., B. C. W. VAN ENGELENBURG. *Proceedings of the Eleventh E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference*, Switzerland, oct., 1992, pp.995-998.
- BARD A. J., M. A. FOX. *Accounts of Chemical Research*, Vol. 28, 1995. p.141.1995.
- BARTHELIS H., W. A. BROCKE, K. BONHOFF, H. G. GROEHN, G. HEUTS, M. LENNARTZ, H. MAI, J. MERGEL, L. SCHMID, P. RITZENHOFF. *Proceeding of the 11th World Hydrogen Energy Conference*. Eds. T.N.Veziroglu, C.-J.Winter, I.P.Baselt, G.Kreysa, June 1996. pp.1005-1015.
- BEDJA I., S. HOTCHANDANI, P. V. KAMAT. *J. Phys. Chem.*, Vol.98, p.4133 (1994); B. O'Regan, J. MOSER M., M. ANDERSON, J. GRÄTZEL. *J. Phys. Chem.*, Vol. 94, 1990. p. 8720.
- BOCKRIS, J. O'M., T. N. VEZIROGLU, D.SMITH. *Solar Hydrogen Energy: The Power to Save the Earth*. London: Macdonald & Co. Ltd., 1991.
- BOSCHLOO, G. *Solar Energy Conversion by Porphyrin-Sensitized Titanium Dioxide*, Tesis Doctoral, Univ. Técnica de Delft, Dic., 1996.
- CHAHINE R., T. K. BOSE. *Proceeding of the 11th World Hydrogen Energy Conference*. Eds. T. N. Veziroglu, C.-J. Winter, I. P. Baselt, G. Kreysa, June, 1996. pp.1259-1263.
- CHANDRA S., R. K. PANDEY. *Phys. Stat. Sol. (a)*, Vol.72, pp.415-439 (1982).
- CHAPLIN D. M., C. S. FUELLER, G. L. Pearson. *J. Appl. Phys.*, Vol.25, pp.676-677, (1954).
- DAVIS, G.R. "Energy for Planet Earth", *Scientific American*, Vol. 263, No.3, 1990. pp.55-62.
- DIETSCH, T. *Power Engineering J.*, Vol. 10, No. 1, 1996.
- FAHRENBRUCH A. L., R.H. BUBE. *Fundamentals of Solar Cells*, New York: Academic Press, 1983.
- Fuel Cell Systems. New York: Eds. L.J.M.Blomen, M.N.Mugerwa, Plenum Press, 1993.
- FUJISHIMA A. Y K. HONDA. *Bull. Chem. Soc. Japan*, Vol. 44, p. 1148 (1971); A.Fujishima, K.Honda, *Nature*, Vol. 238, No. 37, 1972.
- FULLERSON, W., R. J. JUDKINS, M. K. SANGHVI. "Energy from Fossil Fuels", *Scientific American*, Vol. 263, No. 3. 1990. pp.129-135.
- GOC J., H. T. TIEN. *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 18, 1993. pp.5-8.
- GOLDSTEIN J. R., I. GEKTIN, B. KORETZ. "The 1995 Annual Meeting of the Applied Electrochemistry Division of the German Chemical Society", Duisburg, Germany, September, 1995.
- GREEN M. A., K. EMERY, K. BÜCHER, D. L. KING, S. IGARI. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 5, 1997. pp. 51-54.

GURUNATHAN K., P. MARUTHAMUTHU, M. V. C. SASTRI. *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 22, 1993. pp.57-62.

HAGFELDT A., S-E LINDQUIST, M. GRÄTZEL. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vo.32, 1994. p. 245.

HUBBARD H. M. *Science*, Vol. 244, pp.297-304, Abril, 1989.

HUG W., P. MOHR, V. PEINECKE, W. SEEGE. *Proceeding of the 11th World Hydrogen Energy Conference*, Eds. T. N. Veziroglu, C.-J. Winter, I. P. Baselt, G. Kreysa, June, 1996. pp. 775-780.

Hydrogen as an Energy Carrier-Fundamentals of Generation and Storage. Publicado por la Oficina Administrativa del Sonderforschungsbereich (SFB) 270, University of Stuttgart, Stuttgart, 1996.

ICHIKAWA S. *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 22, 1997. pp.675-678.

JUSTI, E.W. *Hidrógeno solar: Energía para el futuro*. Marcombo Boixareu Ed., Barcelona-Méjico, 1985.

KIKKAWA H., B. O'REGAN, M. A. ANDERSON. *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 139, 1991.

KRONBERGER, H. *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 21, 1996. pp.577-581.

MOSKOWITZ P., K. ZWEIBEL, V. FTHENAKIS. *Health, Safety and Environmental Issues Relating to Cadmium Usage in Photovoltaic Energy Systems*, SERI/TR-211-3621, 1990.

NAZEERUDDIN M., A. KAY, I. RODICIO, R. HUMPHRY-BAKER, E. MÜLLER, P. LISKA, N. VLACHOPOULOS, M. GRÄTZEL. *J. Am. Chem. Soc.*, Vol. 115, 6382, 1993.

New and Advanced Materials, Emerging Technology Series, No. 3 , UNIDO, Vienna, 1996.

Photovoltaic Insider's Report, Vol. XVI, No. 2, Ed. R.Curry , Feb., 1997.

PODESTÁ J. J., R. C. V. PIATTI. *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 22, pp.753-758, 1997.

REGAN B. O', M. GRÄTZEL. *Nature. London*: Vol.353, pp.737-738, 1991.

SAI RAMAN S. S, O. N. SRIVASTAVA. *Proceeding of the 11th World Hydrogen Energy Conference*, Eds. T. N. Veziroglu, C.-J. Winter, I. P. Baselt, G. Kreysa, June, 1996. pp.2335-2348.

SAVADOGO O. *Proceeding of the 11th World Hydrogen Energy Conference*, Eds. T.N.Veziroglu, C.-J.Winter, I.P.Baselt, G.Kreysa, June, 1996. pp. 2065-2091.

Solar Cells and Their Application. L.D. Partain, Editor, John Wiley and Sons, New York: 1995.

SWANSON R., P. VERLINDEN, R. CRANE, R. SINTON, C. TILFORD. *Proceedings of the Eleventh E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference*, Switzerland , October, 1992. pp.35-40.

TURRINI, E. *O Caminho do Sol*, Editora Vozes Ltda., Brasil: 1993.

VEZIROGLU, T.N. *Hydrogen Energy Initiation in Developing Countries, Report prepared for UNIDO*. Clean Energy Research Institute, University of Miami, Coral Gables, FL, 1991.

WEITKAMP J., M. FRITZ, S. ERNST. *Int. J. Hydrogen Energy*, Vol. 20, pp.967-970, 1995.

WURSTER, R. *Hydrogen Projects and Conceptual Ideas in Germany*, LBST, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, Ottobrunn, Junio, 1997.

Metodología de estimación de variables meteorológicas secundarias para modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos

Methodology of estimation of secondary meteorological variables for atmospheric pollutants dispersion models

*Leonor Turtós Carbonell**, *Alfredo Roque Rodríguez***,
*Rolando Soltura***, *Madeleine Sánchez Gácita*
* CUBAENERGÍA, Calle 20, No. 4111, e/ 18-A y 47, Playa,
Ciudad de La Habana, Cuba.
Tel.: 2027527. Fax: 2041188.
E-mail: leonort@cien.energia.inf.cu
** Instituto de Meteorología.

Resumen

En el presente artículo se resumen parte de los trabajos realizados dentro del marco del Proyecto Nacional al Programa de Desarrollo Energético Sostenible "Externalidades ambientales atmosféricas de la generación eléctrica en Cuba", con el objetivo de mejorar la calidad de los datos meteorológicos secundarios usados en los cálculos de contaminación atmosférica, específicamente las categorías de estabilidad, los exponentes de perfiles de viento, la altura de la capa de mezcla y los gradientes de temperatura.

Palabras clave: Calidad del aire, dispersión, datos meteorológicos, perfil de viento, gradiente vertical de temperatura.

Abstract

This paper include the main activities carried out within the framework of the project "Atmospheric environmental externalities of the electricity generation in Cuba", aimed at improving the quality of the secondary meteorological data used in atmospheric pollutant calculations, specifically wind profiles coefficient, urban and rural mixed high and temperature gradients.

Keywords: air quality, dispersion, meteorological data, wind profile, vertical temperature gradient

Introducción

Los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos requieren numerosos datos meteorológicos, algunos de ellos son medidos de forma rutinaria en nuestras estaciones meteorológicas -y en adelante los denominaremos primarios-, pero otros no lo son y por tanto deben ser inferidos a partir de los primarios.

Los datos meteorológicos primarios que necesitan de una forma u otra los modelos de dispersión que serán evaluados en el proyecto en cuestión son: velocidad y dirección del viento, temperatura ambiente, cantidad de cielo cubierto y altura de la base de las nubes, humedad y presión.

Por otra parte, los datos secundarios son: categoría de estabilidad atmosférica, altura de la mezcla urbana y rural (h), exponente de perfil de viento (p),

gradiente vertical y gradiente potencial vertical de temperatura, longitud de Monin-Obukhov (L) y velocidad de fricción (U*).

En trabajos anteriores se propusieron metodologías simplificadas para estimar los datos secundarios, pero no se conoce el error que introduce en la estimación de la calidad del aire el uso de tales metodologías. Un ejercicio de validación de los modelos de dispersión exige el uso de metodologías lo más precisas posible para la estimación de los datos meteorológicos de entrada.

1. Categorías de estabilidad atmosférica

Las categorías de estabilidad son empleadas en la modelación de la dispersión para facilitar la estimación de los parámetros de dispersión lateral y vertical, empleados en los modelos Gaussianos. El esquema de clasificación de la estabilidad recomendado para ser usado en la modelación de la dispersión es el propuesto por Pasquill en 1961; los parámetros de dispersión asociados con este esquema -obtenidos a partir de curvas como función de la distancia x en la dirección del viento para cada clase de estabilidad [curvas de de Pasquill-Gifford (P-G)]- se usan por defecto en la mayoría de los modelos de dispersión Gaussianos; sin embargo, la clasificación original propuesta por Pasquill para las categorías de estabilidad resulta impracticable para la aplicación rutinaria, así que Turner desarrolló un método más práctico, que se detalla en la tabla 1.

Los parámetros básicos necesarios para clasificar la estabilidad según este método son la velocidad del viento, medida a 10 m sobre el nivel del terreno, y la estimación de la insolación diurna -en base al ángulo de elevación solar y la nubosidad (porcentaje de cielo cubierto y altura de la base de las nubes)- durante el día y la nubosidad durante las noches. Todas estas variables se registran en nuestras estaciones meteorológicas y de la mayoría de ellas, excepto de la altura de la base de las nubes, existen copias electrónicas.

Existen propuestas más simplificadas del método de Turner que no tienen en cuenta la altura de la base de las nubes y utilizan menor número de rangos de velocidades del viento. Como resultado del proyecto se establecerá el error que introduce en los resultados finales la utilización de estas simplificaciones.

Tabla 1. Método de Turner.

Vel. del viento U (m/s)	Día: insolación				Cielo cubierto: nubosidad 10/10, altura <2133,6 m	Noche: nubosidad	
	Fuerte, $\alpha > 60^\circ$	Moderada, $35 < \alpha < 60^\circ$	Ligera, $\alpha < 35^\circ$	Débil, $\alpha < 15^\circ$		> 4/10	$\leq 4/10$
0-0,77	A	A	B	C	D	F	F
0,77-1,80	A	B	B	C	D	F	F

1,80-2,83	A	B	C	D	D	E	F
2,83-3,34	B	B	C	D	D	E	F
3,34-3,86	B	B	C	D	D	D	E
3,86-4,89	B	C	C	D	D	D	E
4,89-5,40	C	C	D	D	D	D	E
5,40-5,92	C	C	D	D	D	D	D
≥ 5,92	C	D	D	D	D	D	D

Durante el día, la categoría de estabilidad es la obtenida de la tabla anterior si la nubosidad =5/10. En caso contrario, se modifica el grado de insolación según los siguientes criterios:

- * Si la altura de la base de las nubes < 2 133,6 m, disminuir dos grados de insolación.
- * Si la altura de la base de las nubes = 2 133,6 m y < 4 876,8 m, disminuir un grado de insolación.
- * Si la nubosidad = 10/10 y la altura de la base de las nubes está entre 2 133,6 m y 4 876,8 m, disminuir dos grados de insolación, si la altura de la base de las nubes =4 876,8 m entonces disminuir solo uno.
- * Si por las modificaciones anteriores, el grado de insolación debiera ser menor que débil, mantenerlo como débil.

Existen otros métodos alternativos, como el de radiación solar, que consideran la desviación estándar de la dirección horizontal del viento o del ángulo de elevación del viento, y el basado en los gradientes verticales de temperatura, que se formularon para ser usados cuando no existe nubosidad, y eliminan las subjetividades que introducen los observadores en la determinación de la cantidad de cielo cubierto y la altura de la base de la capa de nubes.

El método de radiación solar se fundamenta en la medición de la radiación solar directa diurna y la radiación neta nocturna; es un método objetivo pues se basa completamente en el resultado de mediciones y una de sus principales ventajas es que los datos de insolación obtenidos en una estación meteorológica cercana pueden considerarse aceptables; sin embargo, en la actualidad en nuestro país no es posible aplicar este método por no contarse con una red actinométrica operativa adecuada para ello.

Los métodos basados en la desviación estándar de la dirección horizontal del viento (αA) o del ángulo de elevación del viento (αE) en combinación con la velocidad media del viento, requieren, por supuesto, de la medición de estas desviaciones, lo que tampoco es rutinario en nuestras estaciones meteorológicas. Tampoco se puede utilizar para determinar la estabilidad el basado en los gradientes verticales de temperatura, tal y como se especifica en las tablas 2 y 3, pero proponemos usarlo en sentido inverso, es decir, estimada la estabilidad por el método de Turner, deducir el gradiente vertical de temperatura que se necesita para otros cálculos.

Tabla 2. Categorías de estabilidad atmosférica según el gradiente vertical de temperatura.

Categoría de estabilidad	DT/DZ(°K/100 m), medidos entre 20 y 120 m de altura
A	<-1,9
B	-1,9 ≤ 1,7 A
C	-1,7 ≤ 1,5 A
D	-1,5 ≤ 0,5
E	-0,5 ≤ 1,5
F	>1,5

Tabla 3. Categorías de estabilidad atmosférica según el gradiente vertical de temperatura y la velocidad del viento.

Velocidad del viento (m/s a 10 m)	DT/DZ (°K/100 m), medidos entre 20 y 120 m de altura						
	≤-1,5	-1,4/-1,2	-1,1/-0,9	-0,8/ -0,7	-0,6/-0,0	0,1/-2,0	> 2,0
0-1	A	A	B	C	D	F	F
1-2	A	B	B	C	D	F	F
2-3	A	B	C	D	D	E	F
3-5	B	B	C	D	D	D	E
5-7	C	C	D	D	D	D	E
>7	D	D	D	D	D	D	D

2. Perfiles de velocidad de viento

Los modelos de dispersión emplean algoritmos para obtener el dato de velocidad del viento a la altura de la chimenea, mediante la extrapolación del dato obtenido en superficie, generalmente 10 m, para calcular el transporte y difusión de los contaminantes. La extrapolación se realiza a partir del perfil vertical del viento dado por la teoría de la similitud de Monin-Obukhov para condiciones no-neutrales, el cual viene expresado por:

$$U_z = \frac{U^+}{K} \left[\ln \left[\frac{z}{z_0} \right] - \Psi \left(\frac{z}{L} \right) + \Psi \left(\frac{z_0}{L} \right) \right] \quad (1)$$

Donde $U(Z)$ es la velocidad media del viento a la altura Z , $\psi (Z/L)$ es una función dependiente de la estratificación térmica del aire, Z_0 es el parámetro de rugosidad y $K 0.4$ es la constante de Van Karman. Para condiciones neutrales de la atmósfera, $\psi (Z/L)=0$. En terrenos no complejos, hasta una altura de 200m sobre el nivel del terreno, el perfil de viento es razonablemente bien representado por la siguiente ley de potencia:

$$U_z = U_r \left(\frac{Z}{Z_r} \right)^p \quad (2)$$

Donde U_r es la velocidad escalar media del viento a la altura de referencia (Z_r), típicamente 10 m.

Este exponente varía usualmente desde 0,1 en una tarde soleada hasta 0,6 durante noches despejadas. Mientras mayor sea el valor de p , mayor será el gradiente vertical de la velocidad del viento. Como esta ley de potencia es una aproximación ingenieril del perfil medio de velocidad del viento, los perfiles reales se desvían de esta relación. Los valores de p , específicos para cada sitio, pueden ser determinados con los datos de vientos en dos niveles, resolviendo la ecuación:

$$p = \frac{\ln(U) - \ln(U_r)}{\ln(Z) - \ln(Z_r)} \quad (3)$$

Los exponentes de perfil de viento son función de la categoría de estabilidad, la rugosidad de la superficie y el rango de altura sobre el cual es determinado. Así, los exponentes determinados usando dos o más niveles de mediciones de viento deben ser estratificados por categorías de estabilidad y rugosidad de la superficie. La Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos (EPA) propone el uso de los valores por defecto para cada categoría de estabilidad mostradas en la segunda y tercera columnas de la tabla 1 [Barthels et al., 1996]. También existen estadísticas nacionales en función, además, de la rugosidad de la superficie [Soltura et al., 1997], las cuales se muestran en las columnas finales de la misma tabla. El valor 0,4 de la rugosidad corresponde a zonas urbanas, y los valores 0,03 y 0,1 se refieren a zonas rurales. Como estos valores no fueron calculados para atmósfera tropical, se decidió determinar los valores horarios de p a partir de los datos de superficie usando la metodología que se muestra a continuación, la cual permite comparar los valores calculados por Soltura et al. con los de la EPA y determinar la influencia de usar unos u otros en la modelación de la dispersión.

Tabla 4. Valores estadísticos del exponente de perfil de viento.

Categoría de estabilidad	Valores por defecto propuestos por la EPA		Rugosidad de la superficie (Z_0)				
	Zonas urbanas	Zonas rurales	0,0002	0,005	0,03	0,1	0,4
A	0,15	0,07	0,0364	0,0569	0,0797	0,1065	0,1658
B	0,15	0,07	0,0406	0,0638	0,0896	0,1193	0,1824

C	0,2	0,10	0,0466	0,076	0,1092	0,1438	0,2178
D	0,25	0,15	0,086	0,119	0,1512	0,1848	0,2485
E	0,3	0,35	0,3933	0,3059	0,293	0,3054	0,3306
F	0,3	0,55	0,5971	0,5702	0,5376	0,5149	0,4861

El exponente p se puede calcular a partir de la relación siguiente propuesta por Sedefian (1980):

$$p = \frac{\Phi_m \left(\frac{Z}{L} \right)}{\ln \left(\frac{Z}{Z_0} \right) - \Psi_m \left(\frac{Z}{L} \right)} \quad (4)$$

Donde $\phi_m(Z/L)$ es la función universal de Monin-Obukhov. Para condiciones estables e inestables de la atmósfera, Businger et al. (1971) propusieron las siguientes funciones:

Condiciones estables ($L > 0$):

$$\begin{aligned} \Phi_m &= 1 + 5 \frac{\bar{Z}}{L} \\ \Psi_m &= -5 \frac{\bar{Z}}{L} \end{aligned} \quad (5)$$

Condiciones neutrales ($L = 8$)

$$\Phi_m = 1, \Psi_m = 0 \quad (6)$$

Condiciones inestables ($L < 0$):

$$\begin{aligned} \Phi_m &= \left(1 - 16 \frac{\bar{Z}}{L} \right)^{-1/4} \\ \Psi_m &= 2 \ln \left(\frac{1+x}{2} \right) + \ln \left(\frac{1+x^2}{2} \right) - 2 \arctan x + \frac{\pi}{2} \\ x &= \left(1 - 16 \frac{\bar{Z}}{L} \right)^{1/4} \end{aligned} \quad (7)$$

Con el fin de obtener perfiles del viento más reales que se ajusten mejor a una atmósfera tropical, se utilizará la metodología propuesta por Soltura [2001] para el cálculo de L y U^* . La iteración se resuelve a partir del nomograma de Golger

[Golder, 1972], que permite determinar, para seis categorías de dispersión [Pasquill, 1961], la longitud L a partir de conocer el valor del parámetro de rugosidad Z_0 . Estas ecuaciones, incluyendo el nomograma de Golder, fueron verificadas por Hsu (1982) en la región del Caribe, para una atmósfera tropical.

La principal fuente de incertidumbre en esta metodología es el gradiente vertical de temperatura, que se infiere a partir de las categorías de estabilidad previamente estimadas. Se realizó un estudio de sensibilidad para determinar la influencia de la desviación de los valores calculados de p en dependencia del gradiente asumido variando este desde los límites inferiores hasta los superiores de los rangos especificados en la tabla 2. Los resultados que aparecen en la tabla 5 muestran que excepto para la categoría de estabilidad E, los resultados pueden considerarse aceptables. Para poder usar esta metodología con el mínimo error posible se usará para la categoría E, no el valor medio del intervalo sino el obtenido al calcular los gradientes de temperatura en los sondeos disponibles, como se explica más adelante.

Tabla 5. Variación de p al usar los límites del rango de gradientes de temperatura para cada categoría de estabilidad.

Categoría de estabilidad	Variación (%)
A	1,33
B	2,48
C	3,71
D	0
E	44,11
F	7,15

3. Gradiente vertical de temperatura

El gradiente vertical y el gradiente vertical potencial de temperatura son usados ampliamente en la modelación de la dispersión de los contaminantes en la atmósfera para clasificar la estabilidad en la capa superficial, en varios algoritmos de parametrización de datos de superficie como la altura de la capa de mezcla y las ecuaciones de elevación del penacho para condiciones estables. Internacionalmente estos gradientes se obtienen de los sondeos diarios. En Cuba, actualmente estos sondeos no se realizan por limitaciones de recursos.

Teniendo en cuenta la tabla 6 y numerosos criterios recogidos en la bibliografía consultada, como la referencia [EDA, 2000], donde aparece un método adicional que usa el gradiente vertical de temperatura durante la noche como parámetro para estimar la estabilidad, proponemos el esquema mostrado en la tabla 6 para inducir los gradientes de temperatura a partir de la estabilidad y la velocidad del viento. Los gradientes de temperatura calculados a partir de los sondeos realizados en la estación de Casa Blanca entre 1993 y 1996 a las 12.00 GTM generalmente (7:00 a.m. hora local) y la estimación de las

categorías de estabilidad a partir de los datos de superficie a la hora que se realizaron estos sondeos, permitieron establecer las correspondencias entre las categorías de estabilidad D, E y F y los gradientes de temperatura que se muestran en tabla 7.

Tabla 6. Gradientes de temperatura ($^{\circ}\text{K/m}$) en dependencia de la categoría de estabilidad y la velocidad del viento.

Categorías de estabilidad	Velocidad del viento (m/seg)					
	<1	1 a 2	2 a 3	3 a 5	5 a 7	>7
A	<-0,012	<-0,015	<-0,015	-	-	-
B	-0,011 a -0,009	-0,014 a -0,009	-0,014 a -0,012	<-0,012	-	-
C	-0,008 a -0,007	-0,008 a -0,007	-0,011 a -0,009	-0,011 a -0,009	<-0,012	-
D día	-0,006 a 0	-0,006 a 0	-0,008 a 0	-0,008 a 0	-0,011 a 0	<0
D noche	-	-	-	0,001 a 0,02	0 a 0,02	>0
E	-	-0,006 a 0	0,001 a 0,02	>0,02	>0,02	-
F	>0,001	>0,001	>0,02	-	-	-

Tabla 7. Relación entre las categorías de estabilidad D, E y F y los gradientes de temperatura reales calculados a partir de los sondeos.

Categorías de estabilidad	Sondeos analizados	Gradiente vertical de temperatura ($^{\circ}\text{K/m}$)
4	109	-0,006015046
5	96	0,000643229
6	25	0,007094

4. Altura de la capa de mezcla

4.1. Método de Holzworth

La capa de mezcla se define como la capa inferior de la atmósfera en la que el penacho puede desarrollarse y subir libremente en dirección vertical. Para el cálculo de la capa de mezcla existen varias alternativas que pueden ser empleadas en dependencia de los datos de que se disponen. La más aceptada es el método de Holzworth [1972], el cual determina la altura de la capa de mezcla dos veces al día (en la mañana y en la tarde) a partir de los resultados de los sondeos de aire superior. La altura de mezcla en la mañana se halla mediante la intersección de la curva de la adiabática seca con la curva real de temperatura dada por el sondeo a las 12 GMT. La adiabática que asciende desde la superficie parte de la temperatura mínima seleccionada entre las 04 y 07 hora local más un incremento entre 3 y 5 $^{\circ}\text{C}$ para tener en cuenta los

efectos de isla de calor de las zonas urbanas durante la noche y en horas tempranas de la mañana, ya que las estaciones meteorológicas están generalmente situadas en zonas rurales o suburbanas.

El momento en que se calcula la altura de la mezcla urbana en la mañana coincide con las concentraciones típicas máximas diurnas de contaminantes pocos reactivos en muchas ciudades.

En un diagrama termodinámico, la adiabática seca se representa por la ecuación siguiente:

$$T_2 = T_1 - \gamma(Z_2 - Z_1) \quad (8)$$

Donde
temperaturas para las alturas
Z2 y Z1, respectivamente.

$\gamma = 0,0098$ oC/m es el

En la tarde la capa de mezcla es calculada de forma similar pero usando la temperatura máxima entre las 11 y 16 hora local sin realizar ningún ajuste en la temperatura debido a que la diferencia entre las temperaturas máximas de superficie urbana y rural son insignificantes. El momento en que se calcula la altura de la mezcla de la tarde coincide con bastante exactitud con las concentraciones típicas mínimas de contaminantes pocos reactivos en muchas ciudades.

Las alturas horarias de la capa de mezcla, que se necesitan en los modelos de dispersión, son interpoladas de las alturas mínimas y máximas de la capa de mezcla de un día dado - *Hmin* y *Hmax*- estimadas.

Los procedimientos de interpolación usan la *Hmax* del día anterior (i-1), del día del cómputo (i) y del siguiente (i+1), y la *Hmin* del día del cómputo y del siguiente.

Para zonas urbanas:

- * Entre la medianoche y el amanecer bajo estabilidad neutral (categoría D), la interpolación se realiza entre *Hmax*(i-1) y *Hmax*i y bajo condiciones estables (categorías E o F) es igual a *Hmini*.
- * Entre el amanecer y la hora de temperatura máxima en la tarde, bajo estabilidad neutral en la hora antes del amanecer (categoría D), se continúa la interpolación anterior entre *Hmax*(i-1) y *Hmax*i, y si la hora antes del amanecer fue clasificada como estable (categoría E o F), la interpolación es entre *Hmini* y *Hmax*i.
- * Entre la hora de temperatura máxima en la tarde y el ocaso, es igual a *Hmax*i.
- * Entre el ocaso y la medianoche, bajo estabilidad neutral (categoría D), la interpolación se realiza entre *Hmax*i y *Hmax*(i+1) y bajo condiciones estables (categorías E o F), la interpolación se realiza entre *Hmax*i y *Hmin*(i+1).

Para zonas rurales:

- * Entre la medianoche y el amanecer la interpolación se realiza entre *Hmax*(i-1) y *Hmax*i

* Entre el amanecer y la hora de temperatura máxima en la tarde; bajo estabilidad neutral en la hora antes del amanecer (categoría D), se continúa la interpolación anterior entre $H_{max(i-1)}$ y H_{maxi} , pero si la hora antes del amanecer fue clasificada como estable (categoría E o F), la interpolación es entre 0 y H_{maxi} .

* Entre la hora de temperatura máxima en la tarde y el ocaso es H_{maxi} y entre el ocaso y la medianoche la interpolación se realiza entre H_{maxi} y $H_{max(i+1)}$.

Debe señalarse que hay una discontinuidad en la altura de la mezcla rural al amanecer si la hora precedente es estable. Debido a las incertidumbres sobre la aplicabilidad del método de Holzworth durante períodos de estabilidad E y F, algunos modelos no utilizan las alturas de la mezcla interpolada para las estabildades E y F y tratan tales situaciones como si existiera un mezclamiento vertical ilimitado.

La altura de la mezcla así calculada es válida en el área donde sean válidos los datos de sondeo, para el caso de terreno simple (llano, sin grandes espejos de agua intermedios) en un radio de aproximadamente 250 km.

4.2. Parametrización de los datos de superficie

Otro método considerado fue la parametrización de los datos de superficie, sobre la base de parámetros tales como la velocidad de fricción, el parámetro de Coriolis y la longitud de Monin-Obukhov [Zilintinkevich, 1972 y 1975] mediante las expresiones:

Para condiciones atmosféricas neutrales:

$$h = \frac{\alpha U^*}{f} \quad (9)$$

Para condiciones atmosféricas inestables:

$$h = \frac{\alpha U^*}{f} \sqrt{\left| \frac{U^*}{fL} \right|} \quad (10)$$

Para condiciones atmosféricas estables [Middleton y Thomson, 2001]:

$$h\alpha \sqrt{\frac{U^* L}{f}} \quad (11)$$

Donde α es un parámetro igual a 0,35 y f es el valor absoluto del parámetro de Coriolis, que a su vez se obtiene de la expresión:

$$f = 2\omega \sin \phi \quad (12)$$

Donde ω es la velocidad de rotación terrestre y θ es la latitud.

La aplicación de este método arrojó resultados extremadamente altos para

condiciones inestables y se decidió entonces resolver la ecuación propuesta por Batchvarova y Gryning, 1991 [Batchvarova y Gryning, 1991].

$$\frac{dh}{dt} = (1 + 2A) \frac{S}{\rho C_p \gamma_\theta h} + 2B \frac{u_*^3 T}{g \gamma_\theta h^3} \quad (13)$$

Donde A y B son constantes, S es el flujo de calor superficial, ρ la densidad del aire, C_p es el calor específico a presión constante, g la aceleración de la gravedad, γ_θ el gradiente vertical potencial de temperatura sobre la capa de mezcla y T la temperatura de referencia (de superficie)

Internacionalmente el valor de γ_θ se obtiene del sondeo de la mañana. Como en Cuba no se están realizando sondeos, de acuerdo con las referencias consultadas [Sitios Web], se utilizarán preliminarmente los valores de γ_θ que aparecen en la tabla 8.

Tabla 8. Gradiente vertical potencial de temperatura sobre la capa de mezcla en función de la categoría de estabilidad atmosférica.

Categoría de estabilidad	g_q (°K/ m)
A	0,002
B	0,004
C	0,006
D	0,008
E	0,015
F	0,02

5. Módulos de CÁLCULO

5.1. MIXHP: Del inglés MIXing Height Program

Este programa se usará para el procesamiento de los datos de aire superior obtenidos de los sondeos: cálculo de la altura de la capa de mezcla según el método de Holzworth y estimación del gradiente vertical de temperatura.

Este programa fue descargado de la página web de la EPA www.epa.gov/scram001/tt24.htm. El código fuente fue modificado convenientemente y después se compiló y "linkeó" con MS Frontran Power Station 4.0. El listado de modificaciones aparece a continuación.

1. Modificadas las instrucciones de lectura de datos de entrada de acuerdo con el formato nacional establecido. Chequeo de las unidades de medición de los datos y modificación de las instrucciones de cálculo acordes con estos.

2. El valor del incremento de la temperatura mínima debido al efecto de "isla de calor" durante la noche y las primeras horas de la mañana en las ciudades para calcular la altura de la capa de mezcla urbana, pasó a ser una variable que se

introduce como dato de entrada. Esto permite que el programa pueda ser aplicado a diferentes lugares, sin modificar el código fuente.

3. Modificación de los horarios de temperatura mínimas y máximas de acuerdo con las condiciones nacionales: temperatura mínima entre 04 y 07; temperatura máxima: entre 11 y 16, en ambos casos hora local.

4. Incluido el cálculo del gradiente vertical de temperatura.

5.2. PCRAMMET

Este programa fue descargado de la página web de la EPA www.epa.gov/scram001/tt24.htm. El código fuente fue modificado convenientemente, ampliado, convertido de Lahey Fortran 90 a MS Fortran Power Station y compilado y "linkeado" con dicha herramienta, versión 4.0.

Este programa está diseñado para:

- * Procesar los datos meteorológicos de superficie.
- * Estimar las categorías de estabilidad atmosféricas, según el método de Turner.
- * Calcular la longitud de Monin-Obukhov (L) y la velocidad de fricción (U*) para atmósfera seca.
- * Determinar la altura de la capa de mezcla horaria por interpolación de las dos alturas obtenidas en MIXHP.

A estas posibilidades se le adicionaron:

1. Lectura de datos de entrada de acuerdo con el formato nacional establecido. Chequeo de las unidades de medición de los datos y modificación de las instrucciones acordes con dichas unidades.

2. Módulos para cálculos de:

- * Longitud de Monin-Obukhov (L) y velocidad de fricción (U*) para atmósfera tropical.
- * Exponente de perfil de viento para atmósfera tropical según método de Soltura y a partir de L y U* calculados para atmósfera seca.
- * Altura de la capa de mezcla horaria por parametrización de datos de superficie combinando el método de Zilitinkevich para la altura de la capa de mezcla mecánica y el propuesto por Batchvarova y Gryning para altura de la capa de mezcla convectiva. Determinación de la altura mínima y máxima diaria y obtención del fichero de salida correspondiente de forma que pueda combinarse el método de Holzworth cuando existan datos de sondeo con la parametrización.

El programa MPRM también fue descargado de la página web de la EPA. Se prevé modificarlo convenientemente -ya que este programa permite estimar las categorías de estabilidad atmosféricas según todos los métodos analizados en el presente informe, en dependencia de los datos de que se disponga para cada situación específica- o adicionarle sus capacidades al PCRAMMET.

Conclusiones

La estimación de la estabilidad atmosférica por el método de Turner es factible de aplicar, ya que se disponen de todos los datos que requiere. Para el resto de los métodos no se dispone de los datos necesarios. Tampoco se puede utilizar para determinar la estabilidad basado en los gradientes verticales de temperatura, pero proponemos usarlo en sentido inverso, es decir, estimada la estabilidad por el método de Turner, deducir el gradiente vertical de temperatura que se necesita para otros cálculos.

Para aumentar la calidad de los resultados se decidió establecer una metodología para calcular los valores horarios de p . Estos resultados pueden ser usados también para evaluar los potenciales eólicos del país con vistas a definir el comportamiento de los aerogeneradores.

El trabajo propone la combinación del método de Holzworth y la parametrización de los datos de superficie para determinar la altura de la capa de mezcla y desarrolló la herramienta que realiza los cálculos. Mejores resultados podrán ser obtenidos si se realizan mediciones de los gradientes verticales de temperatura.

Referencias

- BATCHVAROVA, E. AND S. E. GRYNING. "Applied model for the growth of the daytime mixed layer". *Boundary-Layer Meteorology*, 56, 261-274, 1991.
- EPA. *User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models, Volume II, Description of model algorithms*, EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, 1995.
- EPA-454/R-99-005. *Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications*, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air and Radiation, Office of Air Quality Planning and Standards, February, 2000
- GOLDER, D. Relation among stability parameters in the surface layer. *Boundary Layer Meteorol*, 3, 1972. p. 47-58
- HOLZWORTH, G. C. "Mixing Depths, wind speeds and air pollution potential for selected locations in the United States", *Journal Applied Meteorology*, 6 , pp.1039-1044, 1972.
- <http://www.dar.csiro.au/pollution/MixHeight>, <http://www.weblakes.com/aermod>
- MIDDLETON, D. R. AND D. J. THOMSON. *Uncertainties in met pre-processing for dispersion models*, Met Office London Road Bracknell Berkshire RG12 2SZ. Presented to ADMLC Workshop at NRPB 23 October, 2001.
- Pasquill, F. "The estimation of the dispersion of wind-borne material". *Meteorological Magazine*, 90, 1961. p. 33-49
- SOLTURA, R. ET AL. "Actualización de los modelos físicos y estadísticos del Atlas Eólico de Cuba", *Revista Cubana de Meteorología*, Volumen 8, Número 1/2001.
- SOLTURA, R. ET AL. "Atlas eólico de Cuba. Estadística y Climatología. Potenciales de generación eolo-eléctricos y bombeo eólico". *Revista Solar*, No. 33, México, 1997.
- ZILINTINKEVICH, S. S. "On the Determination of The Height of the Ekman Boundary Layer", *Boundary Layer Meteorology*, 3 , pp.141-145, 1972.
- ZILINTINKEVICH, S. S. "Resistance Laws and Prediction Equations for the Depth of the Planetary Boundary Layer", *Journal Atmospheric Science*, 32, pp.741-753, 1975.

Utilización de las ruedas desecantes, entálpicas y sensibles en el tratamiento del aire en Cuba

Utilization of the desiccative wheels, enthalpic and sensitive in air treatment in Cuba

*Ing. Tania Carbonell Morales, Ing. Leonart López Alen
y Dr. Ing. Guillermo Quesada Ramos
Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER),
del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría.*

Resumen

El desarrollo y crecimiento de nuestra economía trae consigo una necesidad creciente de la capacidad de almacenaje, conservación de los productos con mayor calidad y una mayor calidad en la producción de frío. En hospitales, centros biotecnológicos y en la industria farmacéutica se requieren calidades de aire muy específicas y un control absoluto de la humedad relativa, pues se trabaja con materiales higroscópicos; además, en la industria del plástico y en nuestra industria turística, donde se requiere estabilizar los parámetros de confort, es de vital importancia el tratamiento del aire. El control de la humedad del aire a presión atmosférica generalmente se realiza por enfriamiento, para hacer condensar el vapor de agua o poniendo en contacto el aire con una sustancia desecante. En este trabajo se muestra la tecnología de las ruedas como una tecnología exitosa en el tratamiento del aire, para la producción de aire seco y/o el control de humedad; se detalla el principio de funcionamiento y las posibles aplicaciones de las ruedas entálpicas, sensibles y desecantes en sectores importantes de la economía cubana.

Palabras clave: tratamiento del aire, rueda entálpica, materiales higroscópicos

The development and growth of our economy entails an increasing need of capacity of storage, conservation of the products with better quality and better quality in obtaining low temperatures. Hospitals, biotechnological centers and the pharmaceutical industry require very specific air quality and an absolute control of the humidity, because they work with hygroscopic materials. Furthermore, the plastic industry and in our tourism industry, where it is required to stabilize the comfort parameters, the treatment of air is of vital importance. The control of air humidity at atmospheric pressure is generally carried out by cooling, in order to condense steam or putting air in contact with a desiccant substance. In this paper we show the wheels technology as a successful technology in the treatment of air, for the production of dry air and control humidity. It is detailed the principle of functioning and the possible applications of enthalpic wheels, sensitive and desiccant in important sectors of the Cuban economy.

Keywords: air treatment, enthalpic wheel, hygroscopic materials

El control de la humedad del aire a presión atmosférica generalmente se realiza por enfriamiento, para hacer condensar el vapor de agua o poniendo en contacto el aire con una sustancia desecante.

En este trabajo se muestra la tecnología de las ruedas como una tecnología exitosa en el tratamiento del aire, para la producción de aire seco y/o el control de humedad; se detalla el principio de funcionamiento y las posibles aplicaciones de las ruedas entálpicas, sensibles y desecantes en sectores importantes de la economía cubana.

Introducción

El aire no es más que una mezcla de gases y a la mayoría de las personas les son familiares sus principales componentes, el nitrógeno y el oxígeno; solo cuando el aire se vuelve cálido y pegajoso nos damos cuenta de que existe además otro componente en la mezcla, el vapor de agua o la humedad. La necesidad de controlar la humedad del ambiente se extiende mucho más allá de la necesidad del confort humano, siendo dicho control un factor indispensable en muchas industrias, procesos de manufactura, almacenamiento, transporte y preservación de gran variedad de productos.

El control de la humedad del aire puede lograrse con la eliminación o la incorporación de agua. El proceso de eliminación del vapor de agua presente en el aire se conoce como deshumidificación. La tecnología de la deshumidificación tiene sus orígenes en la primera parte del siglo XX; en 1939 fue apareciendo como un factor importante en la protección de las cargas de los buques, lo que evitaba los daños por humedad durante el transporte y almacenamiento de las mercancías durante la Segunda Guerra Mundial. En las acciones militares en zonas tropicales se demostró la necesidad de deshumidificar para conservar y proteger las armas, materiales sensibles a la humedad y las propias embarcaciones; a partir de 1940 apareció una amplia gama de aplicaciones para los equipos deshumidificadores, como en las industrias del plástico, de producción y conservación de alimentos, farmacéutica, electrónica y en el almacenamiento de productos higroscópicos. Actualmente la tecnología de la deshumidificación es reconocida como un componente esencial para asegurar el ahorro de energía y la productividad.

La tecnología de deshumidificación por desecante

Una de las formas de eliminar la humedad del aire es presentando el mismo a una sustancia desecante. Los desecantes son sustancias que tienen una gran afinidad por el agua, propiedad que les permite atrapar la humedad del aire circundante. Existen desecantes sólidos y líquidos, lo que los diferencia desde el punto de vista funcional y los clasifica en absorbentes (líquidos) y adsorbentes (sólidos). Comercialmente los más utilizados en estos momentos son la zeolita, la sílica gel y el cloruro de litio.

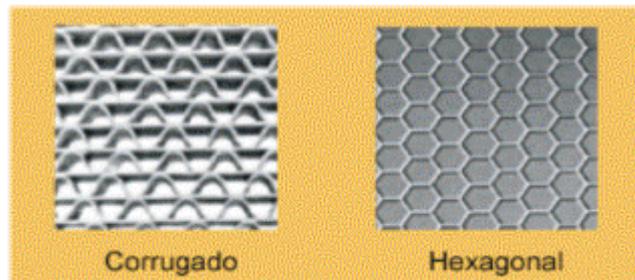
Existen básicamente cuatro tipos de deshumidificadores desecantes: líquido absorbente, torre empacada adsorbente, cama rotatoria adsorbente y rueda desecante; en este último centraremos nuestra atención.

¿Qué es una rueda desecante?

La mayoría de las ruedas desecantes son hechas de silicagel o zeolita (tamiz

molecular), unido a un substrato de fibras de vidrio, papel o algunas veces aluminio. Cuando se mira desde el aire la rueda asume la apariencia de un fino y enredado material de panal de abejas (HoneyCombe) con muchos canales pequeños; esta estructura se caracteriza por ser ligera, durable y garantiza gran superficie de contacto entre el desecante y el aire. En la figura 1 se muestran las configuraciones más usadas.

Fig. 1. Configuraciones típicas.

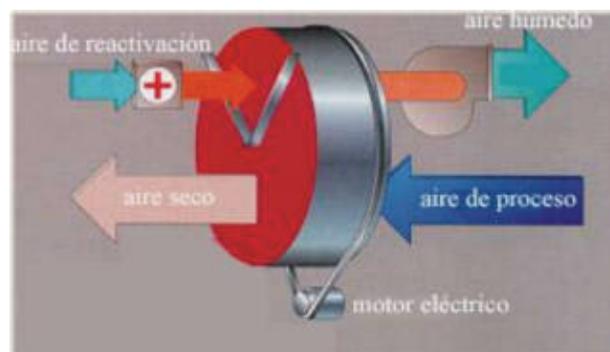


Los canales, como las aletas de una espiral, fuerzan la trayectoria del aire a lo largo del desecante concentrado. El desecante produce una atracción de las moléculas del aire a través de las microporosidades, basada esencialmente en el tamaño de los poros. De esta manera, el silica gel y el tamiz molecular atraen mecánicamente el agua como una esponja.

La rueda gira lentamente entre los flujos de proceso y reactivación. El aire de proceso fluye entre los canales formados y el desecante impregnado en la estructura va adsorbiendo la humedad del aire hasta que se satura, lo que aumenta la presión de vapor de su superficie. Cuando la rueda entra en el sector de reactivación, el desecante es calentado por el flujo de aire de reactivación, y se elimina la humedad en este. Una vez terminada la etapa de reactivación, el desecante caliente vuelve a la zona de proceso, donde se enfría al ponerse en contacto con una pequeña porción de aire de proceso; así queda listo para volver a adsorber humedad.

Este principio de funcionamiento se ilustra en el esquema de la figura 2.

Fig. 2. Principio de funcionamiento de un deshumidificador desecante rotatorio o rueda desecante.



En una aplicación general, 75 % de la rueda hace contacto con el aire, mientras el otro 25 % forma parte de la cámara de regeneración (3:1), aunque esta relación varía cuando existen ruedas de 50/50 o media luna.

Las ruedas desecantes, por naturaleza, eliminan humedad (calor latente) del aire exterior o carga interna. Estas no reducen, por sí solas, la carga de energía. Simplemente reemplazan la carga latente (humedad) con un incremento de carga sensible (temperatura) y eliminan la humedad del aire.

Aplicaciones de las ruedas desecantes

Las aplicaciones para las ruedas desecantes son excepcionalmente diversas debido a que estos equipos tienen un impacto muy positivo en la mayoría de los procesos, y siempre que se desee reducir cargas de humedad interna, mantener o bajar la humedad relativa específica o el punto de rocío y procesar altas cargas latentes del aire exterior, esta tecnología será muy factible, ya que muchas veces más de uno de estos propósitos pueden ser realizados por la misma rueda.

Comercialmente los sistemas desecantes son más comunes en aplicaciones de supermercados y cámaras de conservación y congelados. Las espirales refrigeradas de los supermercados y las cajas congeladoras tienen bajo punto de rocío. Cuando la humedad del aire entra en contacto con las cajas refrigeradas, el bajo punto de rocío hace que se produzca la condensación. Esta crea serios problemas en los supermercados. La escarcha y el hielo formado en las espirales, disminuye la eficiencia energética y provoca un ciclo de descongelación en el sistema de refrigeración, e incrementa la energía que se debe consumir en funcionamiento y recuperación. La condensación y el hielo formado en cajas, puertas y productos también reducen el potencial de los productos.

Los supermercados usan sistemas desecantes controlados para mantener la humedad relativa entre 40-45 %. La falta de humedad reduce el número de ciclos de descongelación, mientras mantiene el estado de los productos y los equipos. Algunos supermercados han usado el control de la humedad que provee la rueda desecante, incluso para aumentar las temperaturas alrededor de las cajas congeladoras y así proporcionar un ambiente más confortable para sus clientes.

En los últimos años, con el desarrollo de esta tecnología, los sistemas desecantes han estado funcionando como procesadores de aire exterior. Recientes cambios en los códigos han incrementado la cantidad de aire exterior que es requerida en edificios públicos. Las habitaciones y los salones de conferencias de hoteles, moteles o centros de convenciones, tienen grandes variaciones de carga sensible, ya que la gente va y viene y aquella cambia radicalmente. La carga latente, por otra parte, es más estable debido a que constantemente hace ingresar aire fresco al edificio, y trae consigo el vapor de agua. Convencionalmente los sistemas de aire acondicionado controlan tan rápido la temperatura que al parar dan tiempo a la formación de condensados en las paredes y objetos, causan malos olores y dañan los muebles y la estructura del edificio. Ante esta situación, la combinación de estas dos

tecnologías, la convencional y la deshumidificación por desecante, se presenta como una variante técnico-económica muy factible. En instalaciones como quirófanos y cuartos limpios esta tecnología se está introduciendo con buenos resultados.

Intercambiadores de calor rotatorios o ruedas sensibles

No son más que intercambiadores de calor en forma de rueda que se pueden utilizar en cualquier aplicación, siempre que se requiera un intercambio térmico y, como su nombre lo indica, sólo eliminan calor sensible, es decir, temperatura del aire; mantienen la humedad constante y obtienen un máximo de eficiencia cuando la diferencia de temperatura entre las corrientes de suministro y de escape es la mayor posible.

Se comercializan como un intercambiador de calor aire-aire o como partes integradas de un sistema de tratamiento de aire más grande, donde se puede encontrar combinada con ruedas desecantes o entálpicas.

Esta tecnología proporciona un efectivo ahorro de energía; gracias a su utilización se quemaron anualmente en Europa cuatro millones de toneladas menos de combustible y participa activamente en la protección del medio ambiente mediante la reducción de emisiones gaseosas y de polvo de las instalaciones de calefacción y climatización. El proceso de intercambio de calor en las ruedas sensibles se produce entre dos caudales de aire separados (suministro y escape), dispuestos a contracorriente, y mediante una masa acumuladora en rotación que por lo general está constituida por una aleación de aluminio, de 0,1 mm de espesor, resistente al ambiente salino.

Entre las aplicaciones de este tipo de rueda podemos encontrar instalaciones de aire acondicionado sencillas, sin humedad y sin refrigeración; cocinas, pabellones industriales, gimnasios, etcétera.

Ruedas entálpicas

La rueda entálpica es una combinación de estrategias sensible y latente en la misma rueda. Desde el punto de vista del funcionamiento, las ruedas entálpicas también necesitan dos corrientes de aire y requieren de una corriente de aire de descarga. También, mientras mayor sea la diferencia de humedad y temperatura de las dos corrientes de aire, mayor trabajo realiza la rueda; en función de esto se hallará su eficiencia, que ronda alrededor de 70 a 90 %.

Su apariencia física es muy similar a la de una rueda sensible. Al material de la masa acumuladora (aleación de aluminio) se le impregna un desecante, el cual crea una película higroscópica encargada de deshumidificar el aire cuando entra en contacto con él.

La rueda entálpica puede ser aplicada para las mismas condiciones que la sensible, así como para otras que requieran un mayor control de la humedad.

Las diferencias de costos entre las dos no son significativas y los desempeños son casi idénticos, excepto la capacidad de la entálpica para controlar las cargas de humedad.

La realidad es que el uso de la rueda entálpica ha crecido, pero no se ha extendido. Hoy en día en los mercados la rueda entálpica está limitada por los sistemas de rueda desecante, especialidades industriales y algunas unidades de procesamiento de aire.

Uso y aplicación en Cuba

En Cuba, en la industria del turismo comienza a ser una necesidad el control de la humedad para garantizar el confort humano y la calidad en los servicios, presentándose la tecnología de rueda desecante como una variante económicamente atractiva para controlar este parámetro, además de que su utilización puede llevar a mejorar la economía energética de esta industria.

La conservación y calidad de los alimentos es uno de los aspectos que se deben tener en cuenta, pues desempeñan un papel muy importante en la competitividad de nuestro mercado turístico, principal fuente de ingresos en divisas del país. Es por eso que las cámaras de conservación y congelados y las redes de supermercados son otros campos de aplicación factible para nuestra economía.

En la industria farmacéutica y en los denominados cuartos limpios de los centros de investigación es atractivo estudiar la factibilidad técnica-económica de su aplicación. Recientemente se han dado los primeros pasos en La Habana, y se han realizado estudios en una planta de producción de medicamentos con el objetivo de analizar la factibilidad técnica de instalar una rueda desecante en combinación con un sistema convencional de enfriamiento, para lograr una buena climatización del lugar con un preciso control de la humedad.

En estos momentos, teniendo en cuenta el amplio programa actual de ahorro energético, sería interesante estudiar la posibilidad de aplicación en instalaciones de ventilación de cocinas y en edificios industriales, debido a su fácil instalación y posibilidad de limpieza de forma manual o automática con vapor o disolventes de grasas, sin descontar que con el empleo de este dispositivo se ahorra aproximadamente entre 50 y 60 % en climatización, así como en los costos de mantenimiento, lo que hace de la rueda sensible un equipo óptimo para el intercambio de calor en este tipo de locales.

Otra posible aplicación de esta tecnología sería en las cámaras de conservación de alimentos de importación y exportación, y en las de congelados, donde uno de los problemas fundamentales es la formación de escarcha. El agua y el hielo provocan condiciones de trabajo peligrosas, ya que al formarse hielo alrededor de las puertas de acceso, los suelos se vuelven resbaladizos. El hielo igualmente se deposita en el interior de la cámara, incluyendo los evaporadores, lo que provoca la necesidad de constantes ciclos de desescarche y una disminución de la capacidad de enfriamiento de los equipos. Pueden aparecer problemas de seguridad del personal cuando se forma niebla en las proximidades de las entradas a la cámara, por la baja visibilidad. Todos estos inconvenientes se transforman en una disminución de la productividad de la cámara, y producen un aumento de los costos de mantenimiento.

El hielo, la escarcha y la niebla están provocados por la humedad del aire que se infiltra a través de las puertas de acceso a la cámara. En la figura 3 se muestran las puertas y paredes de una cámara totalmente cubiertas de hielo.

Fig. 3. Puertas y paredes de una cámara de refrigeración.



Si lo que queremos es frenar la infiltración de aire húmedo, para evitar este fenómeno, una opción es secar el aire antes de que este penetre en la cámara, lo que puede lograrse colocando un sistema basado en la deshumidificación por rotor desecante, que elimina la humedad del aire que es la que posteriormente se transforma en hielo. En la figura 4 se muestra un sistema Munters Ice-Dry® colocado en el punto de entrada a una cámara.

Fig. 4. Cámara de congelados con un deshumidificador MUNTERS



Con la aplicación de esta tecnología se logró que la mercancía se mantuviera en las condiciones de temperatura idóneas y se previniera el deterioro de los productos. La ausencia de hielo significa una reducción de los costos de reparación de las puertas por la formación del hielo en ellas, reducción de costos debido a operaciones de limpieza y la disminución de los accidentes causados por los suelos resbaladizos y la niebla. Además de una reducción en los costos energéticos, ya que se reduce la frecuencia y el número de desescarches, y aumenta el rendimiento del equipo frigorífico, dado que sólo

hay que ocuparse de enfriar los productos y el ambiente, pero no de la humedad procedente de las infiltraciones.

Conclusiones

Hay varios factores, a escala mundial, que han impulsado el crecimiento y las ventas actuales de los sistemas de ruedas. La necesidad de ahorrar energía y los problemas crecientes en la calidad del aire interior por cambios en normas y códigos, así como las continuas presiones para reducir los costos energéticos han traído consigo un elevado interés en las ruedas y su habilidad de controlar la humedad, unido a la posibilidad de separar el control de esta.

Para nuestro país es vital la necesidad de producir con mayor eficiencia energética y con la mayor calidad posible; por esta razón, mediante este trabajo hemos querido presentar los sistemas desecantes rotatorios, y las ruedas entálpicas y sensibles, como variantes ecológicas y económicamente atractivas para el tratamiento del aire. El estudio bibliográfico realizado muestra que en estos momentos esta tecnología se encuentra ampliamente difundida y su aplicación en diversos sectores industriales en países europeos y del área ha sido exitosa.

Referencias bibliográficas

- ASHRAE. "Chapter 22: *Desiccant dehumidification and pressure drying equipment*". ASHRAE. Handbook, 1996.
- BURNS P. R., J. W. MITCHELL Y W. A. BECKMAN. "*Hybrid desiccant cooling systems in supermarket applications*". ASHRAE Transactions, 91(1B): 1985. 457-468.
- CARBONELL T. Y G. QUESADA. *Posibilidad de aplicación del deshumidificador de rueda desecante en diversas aplicaciones industriales en Cuba*. IX Congreso Latinoamericano de Calor y de Masa, 2002.
- Dehumidification for all requirements*. <http://www.muntersamerica.com>; 2002.
- ENERGY USER NEWS (EUN). "*Energy User News Matrix of Commercial and Industrial Utility Incentive Program*". Energy User News, July, 1996. pp. 50-52.
- GIL G. Y L. LÓPEZ. *Cálculo y selección de un sistema de deshumidificación rotatorio para aplicaciones de climatización*. Tesis de grado. Ciudad de La Habana: ISPJAE, 2003.
- HARRIMAN, III, L. G. Editor. *The Dehumidification Handbook*. 2nd Edition, published by Munters Cargocaire, Amesbury, Massachusetts, 1990.
- HARRIMAN, L. *Applications Engineering Manual for Desiccant Systems*. American Gas Cooling Center, Arlington, Virginia, 1996.
- MECKLER, M., R. HEIMANN, J. FISCHER AND K. MCGAHEY. *Desiccant Technology Transfer Workshop Manual*. American Gas Cooling Center, Arlington, Virginia, 1995.
- TORRES Y. *Estudio del empleo de un deshumidificador entálpico rotatorio en locales con 100 % de aire exterior*. Tesis de grado. Ciudad de La Habana: ISPJAE, 2002.

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 Bériz 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 Bériz 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>