



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTAL DE CUBASOLAR

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

20



Tendencias energéticas mundiales: implicaciones sociales y ambientales.....	1
Hidrógeno como combustible automotor barato: producido por la agroindustria azucarera y para ella.....	32
Diseño industrial y energía solar térmica, estudio de caso: la cocina solar portátil.....	40
Evaluación de los sistemas de vapor en industrias de procesos mediante un uso combinado de herramientas computacionales.....	49
Modelación y simulación de un sistema de rueda desecante para el acondicionamiento del aire en Cuba.....	59
Propuesta para la adecuación de las instalaciones del CETER a las técnicas y tecnologías de ahorro energético y agua.....	70

Tendencias energéticas mundiales: implicaciones sociales y ambientales

Worldwide energy trends: social and environmental implications

*Ramón Pichs Madruga**

** Subdirector del Centro de Investigaciones
de la Economía Mundial (CIEM), La Habana, Cuba.
e-mail: rpichs@ciem.cu*

Resumen

Desde comienzos del presente siglo se ha reforzado el cuestionamiento del modelo energético vigente, que está basado preferentemente en los combustibles fósiles, como el petróleo, el carbón mineral y el gas natural. Resultan cada vez más evidentes los límites de dicho modelo, tanto en el orden económico (altos precios de la energía), como en el plano social (inequidad y pobreza energética) y ambiental (implicaciones adversas para el entorno). En estas condiciones resulta extremadamente limitado el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía y existen enormes reservas no utilizadas de ahorro y eficiencia energética. Muchos de los problemas energéticos del mundo actual se han tornado más graves en los últimos 25 años, después de más de dos décadas de políticas neoliberales que estimularon la desregulación y la liberalización energética. Esas fórmulas de mercado propiciaron, en muchos casos, el desmantelamiento del control estatal en diversos países y regiones, con el consecuente reforzamiento del control transnacional en esos segmentos estratégicos. Además, se han reforzado los conflictos internacionales y las guerras de rapiña de las grandes potencias por el control de los recursos energéticos del planeta, sobre todo aquellos no renovables, como el petróleo y gas natural. Ante tales tendencias, se impone la necesidad de una reestructuración energética global que cambie significativamente los patrones actuales de generación y consumo de energía, y que promueva el desarrollo sostenible sobre bases de equidad y justicia social. Se requiere también continuar avanzando en la cooperación energética Sur-Sur, a partir de criterios de solidaridad internacional.

Palabras clave: Energía, petróleo, combustibles fósiles, eficiencia energética, fuentes renovables, sostenibilidad energética, biocombustible, cooperación energética.

Abstract

Since the beginning of this century it has strengthened the questioning on the world's energy model which is based on fossil fuels: oil, coal and natural gas. The limitations of this model are increasingly evident, both from the economic (high costs of energy), as well as from the social (inequity and energy poverty) and environmental perspectives (environmental impacts). The use of renewable energies is still extremely limited and there are enormous unexploited reserves of energy saving and efficiency. Many of today's world energy problems have worsened in the last 25 years, after more than two decades of market-oriented policies that stimulated the deregulation and liberalization of the energy market.

Those market-oriented formulae propitiated, in many cases, the dismantling of the state control in various countries and regions, with the consequent strengthening of transnational control in those strategic segments. Furthermore, the international conflicts and despoliation wars of the great powers addressed to control the energy resources of the planet have gotten stronger, above all the non-renewable ones, like oil and natural gas. Before such trends, it is necessary a restructuring of the global energy system that significantly changes the current patterns of generation and consumption of energy that promotes sustainable development based on equity and social justice. It is also required to continuing moving forward in the South-South energy cooperation based on international solidarity.

Keywords: Energy, oil, fossil fuels, energy efficiency, renewable sources, energy sustainability, biofuel, energy cooperation.

Introducción

La situación energética mundial actual es el resultado de la combinación de diversas tendencias económicas, políticas, tecnológicas, sociales y ambientales, entre otras que confluyen en un complejo panorama de crisis y ajustes, signado en los años más recientes por una escalada de precios, sobre todo en los hidrocarburos y especialmente en el petróleo.

La elevación de los precios del petróleo, desde comienzos de este siglo, ha reforzado significativamente el cuestionamiento del modelo energético basado en los combustibles fósiles (petróleo, carbón mineral y gas natural), que avanzó gradualmente hasta llegar a ser dominante, a partir del último tercio del siglo XVIII con el advenimiento de la Revolución Industrial en Inglaterra. Luego de dos siglos de despliegue de tales patrones energéticos han resultado más evidentes los límites del modelo vigente, tanto en el orden económico (altos precios de la energía), como en el plano social (inequidad y pobreza energética) y ambiental (implicaciones adversas para el entorno).

En estas condiciones, en pleno siglo XXI, persiste un modelo energético asimétrico y excluyente, con una elevada dependencia de los combustibles tradicionales de la biomasa —como la leña— en las poblaciones más pobres del planeta, que no tienen acceso a los combustibles modernos para cubrir sus necesidades básicas. Al propio tiempo, resulta extremadamente limitado el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía, sobre todo las llamadas nuevas fuentes de energía renovable;¹ y existen enormes reservas no utilizadas de ahorro y eficiencia energética.

Muchos de estos problemas se han tornado más graves en los últimos 25 años, después de más de dos décadas de políticas neoliberales que estimularon la desregulación y la liberalización energética. Estas fórmulas de mercado resultaron extremadamente nocivas al propiciar el desmantelamiento del control estatal en diversos países y regiones, con el consecuente reforzamiento del control transnacional en esos segmentos estratégicos.

Paralelamente se han reforzado los conflictos internacionales y las guerras de rapiña de las grandes potencias por el control de los recursos energéticos del planeta, sobre todo aquellos no renovables, como el petróleo y gas natural, que

en su conjunto representan 60% de la energía comercial que se utiliza a escala global.

En las condiciones actuales se impone la necesidad de una reestructuración energética global que cambie significativamente los patrones actuales de generación y consumo de energía y que promueva el desarrollo sostenible sobre bases de equidad y justicia social.

Desequilibrios e inequidades en el consumo energético mundial

Como parte de las irracionales tendencias energéticas, que han prevalecido desde la Revolución Industrial en Inglaterra, el consumo global de energía primaria aumentó en unas diez veces a lo largo del siglo xx, mientras que la población mundial creció en cuatro veces (de 1,6 mil millones a 6,1 mil millones) [Smith, 2005], y todo parece indicar que el dinamismo de la demanda energética continuará en las próximas décadas.

En cuanto a la inequidad en el acceso a la energía por parte de los distintos segmentos de la población mundial, se destaca el hecho de que los cerca de mil millones de personas que viven en los países desarrollados consumen alrededor de la mitad de la energía primaria total, mientras que dos mil millones de personas pobres (residentes en países subdesarrollados) dependen básicamente de fuentes tradicionales de energía —como la leña y residuos de plantas y animales—, que son utilizadas de forma rudimentaria e ineficiente [BP, 2006 y FAO, 2005].

En el área subdesarrollada, las regiones de mayor desarrollo relativo, como América Latina y el Caribe y el Medio Oriente, muestran un nivel de cobertura de electricidad que supera 89% de sus respectivas poblaciones, mientras que en las regiones más pobres la situación resulta muy preocupante. En África solo 35% de la población total (apenas 19% en el área rural) tiene acceso a la electricidad [Alliance for Rural Electrification, 2004].

Según las últimas estadísticas disponibles, los combustibles fósiles representan alrededor de 78% del consumo global de energía primaria, distribuidos de la siguiente forma: petróleo, 33%; carbón, 24%; y gas natural, 21%. El consumo restante está repartido entre las fuentes renovables (17%) y la energía nuclear (5%). Sin embargo, debe tenerse en cuenta que el porcentaje de las fuentes renovables se divide a su vez entre las fuentes tradicionales de la biomasa (9%), la hidroelectricidad a gran escala (6%) y las llamadas «nuevas fuentes renovables», con apenas 2% (Anexo 1).

La elevada dependencia de los combustibles tradicionales, como la leña y los residuos de plantas y animales, tiene serias implicaciones adversas en los planos económico, social y ambiental para sectores considerables de la población de los países subdesarrollados, sobre todo en los países más pobres. Estas fuentes representan alrededor de 9% del consumo global de energía primaria y alrededor de la tercera parte del correspondiente a los países del Tercer Mundo, pero en algunos de los países más pobres, como Cambodia, Uganda, Rwanda, R. D. Congo, Burundi, Etiopía, Chad y Sierra Leona esa proporción supera 90% (Anexo 2).

En términos de energía comercial, es decir, excluyendo a las fuentes tradicionales de energía, los combustibles fósiles representan alrededor de 90% del balance, y en su conjunto han liderado la dinámica del consumo mundial en los pasados 40 años. La hidroenergía y la energía nuclear muestran un aporte similar, del orden de 6% en cada caso, al balance global (Anexos 3 y 4).

También en el segmento de la energía comercial resultan evidentes grandes disparidades en cuanto al acceso de los distintos grupos de países. Si bien el consumo per cápita de energía comercial mundial es de 1,6 toneladas de petróleo equivalente; en países como EE.UU. este indicador alcanza las 7,9 toneladas, mientras que en los países subdesarrollados el promedio es de apenas 0,6 toneladas. En otras palabras, un norteamericano consume como promedio trece veces más energía comercial que un habitante del Tercer Mundo (Anexo 5). Según los cálculos más recientes de la Agencia Internacional de Energía (AIE), la inversión total requerida para la creación de infraestructura de producción de energía entre 2005 y 2030 ascendería a unos 20 millones de millones de dólares, es decir, unos 800 mil millones de dólares anuales [IEA-Finfacts, 2006].

Los propios expertos de la AIE ponen en duda que inversiones de tal magnitud se realicen, en un entorno internacional como el actual, pero aún en el más optimista de los escenarios, no bastaría con incrementar sustancialmente los recursos de inversión en este sector; se requeriría además el reconocimiento y adecuado tratamiento de las inequidades que caracterizan al mundo actual en esta esfera. De persistir tales asimetrías, se alejaría aún más la posibilidad de resolver los graves problemas socioeconómicos y ambientales que afectan a la humanidad, y en particular a los más pobres.

Dinámica del consumo de energía comercial en 1973-2005

La composición del balance de energía comercial en los últimos 30 años, tanto a nivel global como en los países desarrollados y los subdesarrollados ha mostrado variaciones en dependencia, básicamente, del comportamiento de los precios internacionales de los hidrocarburos. En este sentido pudieran identificarse tres períodos fundamentales a partir de comienzos de la década de 1970: un período de altas cotizaciones del petróleo entre 1973 y 1985; uno de precios moderados, entre 1985 y 1999; y la escalada de precios registrada a partir de 2000 (Anexos 6 al 8).

Durante el período de altos precios del petróleo comprendido entre 1973 y 1985, la participación del petróleo en el balance mundial de energía comercial se redujo de 48 a 39%, como resultado de la sustitución petrolera por fuentes alternativas. El resto de las fuentes aumentaron su participación, pero las más dinámicas fueron la energía nuclear y el gas natural.

Los principales cambios en la composición del balance de energía comercial de los países desarrollados se registraron entre 1973 y 1985, al calor de los altos precios del petróleo vigentes en ese período. En esos años, el petróleo caro perdió posiciones de forma marcada (pasó de 52 a 42%), en tanto la energía nuclear y el carbón incrementaron su participación. En los países

subdesarrollados, la participación del petróleo se redujo de 42 a 35% durante esos años.

En el período 1985-2000, en que predominaron niveles de precios relativamente estables y moderados, se estancó la sustitución petrolera, el gas natural fue la fuente más dinámica y el carbón fue la fuente que más retrocedió. En los países desarrollados, la característica más notable fue el avance del gas natural, en detrimento del carbón. En los países subdesarrollados, al disminuir los precios, la proporción del petróleo aumentó de 35 a 40%, lo que estuvo acompañado de un aumento paralelo del gas natural de 10 a 14% y una marcada pérdida de posiciones del carbón de 46 a 35%.

En el período de altos precios más reciente (2000-2005) se destaca un retroceso del petróleo, principalmente en el Tercer Mundo, así como una recuperación del carbón, sobre en todo en países subdesarrollados de Asia (China e India). La parte del petróleo en el consumo de los países subdesarrollados cayó de 40 a 33%, lo que revela la sensibilidad de ese indicador en estos países, ante las variaciones de los precios del petróleo. En los países industrializados, la participación de las principales fuentes de energía comercial se mantuvo prácticamente sin cambios en 2000-2005.

Predominio de los combustibles fósiles y repunte de la energía nuclear

Los combustibles fósiles (petróleo, gas y carbón) representan alrededor de 90% de la demanda global de energía comercial y en un contexto como el de los últimos 25 años en que la elección tecnológica ha estado en función básicamente de los patrones del mercado, se ha favorecido el consumo de este tipo de combustibles. De acuerdo con fuentes especializadas, de mantenerse las tendencias y políticas actuales, el petróleo y el gas natural continuarán dominando la oferta energética mundial en las próximas décadas, a pesar del incremento de los precios de los hidrocarburos. Adicionalmente se prevé un repunte de la energía nuclear, sobre todo en Asia.

Teniendo en cuenta estas tendencias, un informe reciente de la Agencia Internacional de Energía (*World Energy Outlook 2006*) revela que el futuro previsible (hasta 2030), basado en la extrapolación de las tendencias actuales, sería un escenario contaminado, inseguro y caro [IEA-Finfacts, 2006].

Petróleo

En el caso del petróleo, se trata del combustible más comercializado (60% del petróleo producido se comercializa internacionalmente) y, consecuentemente, el comportamiento de sus precios impacta de manera significativa en el comercio y las finanzas internacionales. Este portador energético constituye, además, el principal componente del balance de energía comercial global (36%) y su dinámica de precios tiene implicaciones diferenciadas por grupos de países, según la ubicación en el comercio internacional de hidrocarburos (exportadores netos o importadores netos) y el nivel de desarrollo (alto, medio o bajo). La situación petrolera de los años transcurridos del presente siglo, sobre todo a partir de 2004, ha estado marcada por los altos precios (Anexo 9), como expresión de diversos factores extraeconómicos y económicos, entre los que se encuentran el estado de creciente volatilidad, incertidumbre y

especulación, que se ha reforzado a partir de la invasión y ocupación de Irak por EE.UU. y las fuerzas aliadas; la rigidez de la oferta petrolera, como expresión de las limitaciones productivas de la OPEP y de los problemas en la infraestructura de refinación; y la creciente demanda de hidrocarburos por parte de grandes consumidores como EE.UU., y países de rápida industrialización como China, India y otros.

En los años más recientes se han alcanzado niveles récord de precios nominales, aunque en términos reales (es decir, considerando la variación de la inflación y del tipo de cambio del dólar) se han mantenido por debajo de los niveles de comienzos del decenio de 1980.

Entre los principales productores de petróleo en 2005 se ubicaban Arabia Saudita (14% de la producción global), Rusia (12%) y los EE.UU. (8%), y los mayores exportadores, 2 según datos de 2004, eran Arabia Saudita (18% de las ventas mundiales), Rusia (15%) y Noruega (6%).

Los principales consumidores en 2005 fueron EE.UU. (25% del consumo mundial de este producto), China (9%) y Japón (6%), y los mayores importadores, 3 de acuerdo con estadísticas de 2004, eran EE.UU. (28% de las compras mundiales), Japón (11%) y China (7%) [BP, 2006; IEA, 2006].

Dentro de este selecto grupo de países se destaca la doble condición de EE.UU. como gran productor y mayor consumidor de hidrocarburos del mundo; así como la pujante economía china que ha pasado a ocupar la segunda posición entre los grandes consumidores, aunque todavía muy alejada del primer puesto que ocupa EE.UU.

En cuanto a las perspectivas del mercado petrolero, resulta preocupante la desaceleración en el crecimiento de las reservas de petróleo en los últimos veinte años, máxime si se tiene en cuenta la gran incertidumbre que persiste en este mercado y los largos períodos de maduración de las inversiones en exploración y desarrollo. De acuerdo con informes recientes de la Agencia Internacional de Energía (AIE), las inversiones de la industria mundial de petróleo y gas en el área de exploración y producción han experimentado un crecimiento muy limitado (apenas 5% en términos reales) desde el 2000 y esto reforzaría la rigidez de la oferta en los próximos años [IEA-Finfacts, 2006].

Además, muchos países y regiones fuera del Medio Oriente (como Norteamérica, los territorios de la otrora Unión Soviética y el Mar del Norte), ya han alcanzado su pico productivo y otros lo alcanzarían en los próximos años, 4 lo que se traduciría en un reforzamiento de la dependencia del Medio Oriente, donde se concentra más de 60% de las reservas mundiales (Anexo 10). Todo esto favorecería la posibilidad de nuevas guerras y conflictos que inyectarían mayor inestabilidad en los mercados.

También cabría esperar un fuerte crecimiento de la demanda en los próximos cinco años, a pesar de los altos precios, en países como EE.UU., China e India, lo que alimentaría las presiones alcistas de precios. Según el Departamento de Energía de EE.UU., la demanda mundial de petróleo, en un

escenario de referencia, se incrementaría en 47% en 2003-2030 y 43% de ese incremento tendría lugar en los países subdesarrollados de Asia, incluidos China e India (DOE-EIA, 2006).

La escalada de precios del petróleo registrada a partir de 1999 y reforzada desde 2004 ha impactado significativamente a los distintos grupos de países; pero existen marcadas diferencias en cuanto a la capacidad de las distintas economías para enfrentar situaciones de esta naturaleza.

En el área desarrollada, que absorbe 80% de las importaciones globales de crudo, los efectos adversos han sido, en sentido general, mucho menos intensos que en períodos anteriores de elevadas cotizaciones petroleras (como 1973-1974 y 1979-1981), ya que estas economías son en la actualidad mucho menos vulnerables a los altos precios de la energía, dada la significativa reducción del consumo energético por unidad de PIB registrada por estas economías en los últimos treinta años.

En el mundo subdesarrollado, los más afectados han sido los importadores netos de energía, en los cuales se ha profundizado la crisis energética y se ha obstaculizado el acceso de sectores mayoritarios de la población a la energía necesaria para cubrir sus necesidades básicas.

Por su parte, las grandes compañías petroleras transnacionales han resultado las mayores beneficiarias de las elevadas cotizaciones petroleras; en particular aquellas firmas que han fortalecido su control sobre distintas fases del ciclo de producción y comercialización, como resultado de los recientes procesos de fusiones y adquisiciones en este sector. Entre las compañías más favorecidas se cuentan EXXON-MOBIL, British Petroleum, Royal Dutch Shell, Chevron-Unocal y Total S.A.

En los años más recientes, el debate acerca de las implicaciones económicas adversas de los altos precios petroleros para los países importadores de energía se ha combinado con una nueva oleada de preocupaciones acerca de los efectos ecológicos negativos de los actuales patrones de producción y consumo de energía, donde predominan los combustibles fósiles como el petróleo. Entre las consecuencias ambientales más preocupantes del modelo energético vigente se destacan las crecientes emisiones de gases de efecto invernadero —como el CO₂—, derivadas de la producción y consumo de combustibles fósiles.

Existe una estrecha relación entre la participación de los distintos países en el consumo mundial de combustibles fósiles y su contribución a las emisiones del CO₂ como principal gas de efecto invernadero (Anexo 11). Así, por ejemplo, EE.UU. absorbe 25% del consumo mundial de petróleo y aporta 24% de las emisiones globales de CO₂, lo que se traduce en emisiones de 20 toneladas métricas de CO₂ anuales por habitante. En su conjunto, los países desarrollados consumen 61% del petróleo y emiten 63% del CO₂; mientras en los subdesarrollados las proporciones correspondientes son 39 y 37%, respectivamente.

Gas natural

Al igual que en el caso del petróleo, las reservas probadas de gas natural se encuentran muy concentradas, con 69% ubicado en siete países (Rusia, Irán, Qatar, Arabia Saudita, Emiratos Árabes Unidos, EE.UU. y Nigeria). De mantenerse la tasa actual de utilización de este combustible, las reservas probadas al cierre de 2005 alcanzarían para unos 65 años.

Más de la mitad de la producción y el consumo de gas natural tiene lugar en Estados Unidos, Rusia y la Unión Europea. En 2005 los principales productores de gas natural fueron Rusia (22%), EE.UU. (19%), Canadá (7%), Argelia (3%), Reino Unido (3%), Noruega (3%) e Irán (3%); y los mayores exportadores fueron Rusia (24% de las ventas globales), Canadá (13%) y Noruega (10%). Los principales consumidores en 2005 fueron EE.UU. (23%), Rusia (15%), Reino Unido (3%), Canadá (3%), Irán (3%) y Alemania (3%), y los mayores importadores resultaron EE.UU. (15% de las compras mundiales), Alemania (11%) y Japón (10%) (BP, 2006; IEA, 2006).

El gas natural ha sido uno de los segmentos más dinámicos en el consumo mundial de energía comercial en los últimos treinta años y se espera un crecimiento aún mayor en las próximas décadas. Según estimados de la Agencia Internacional de Energía (AIE), el aumento de la demanda de gas natural podría incrementarse sustancialmente para el 2030; y de acuerdo con el Departamento de Energía de EE.UU., la participación de este combustible en el balance global de energía comercial pasaría de 24% en 2003 a 26% en 2030 (DOE-EIA, 2006).

A diferencia del petróleo, la mayor parte del gas se consume localmente y solo se comercializa internacionalmente 25%. La mayor parte del comercio internacional de gas natural se lleva a cabo regionalmente, sobre todo en Norteamérica y Europa, que responden por las cuatro quintas partes del intercambio comercial a través de gaseoductos. El resto del comercio se lleva a cabo, en lo fundamental, con buques tanqueros que transportan el gas natural licuado (GNL), en áreas como Asia-Pacífico y el Medio Oriente, donde la infraestructura del GNL está más desarrollada. Se prevé que para el 2030 se triplique el comercio global de gas natural, principalmente como gas natural licuado.

En América Latina y el Caribe los principales exportadores de gas natural a través de gaseoductos son Bolivia y Argentina, que según datos de 2005 exportaron 10,4 y 6,8 miles de millones de metros cúbicos, respectivamente.

El único país de América Latina y el Caribe que aparece en la lista de los grandes exportadores de GNL es Trinidad y Tobago, país que en 2005 exportó 14 mil millones de metros cúbicos, de los cuales 89% se dirigió a EE.UU. Trinidad y Tobago cubrió en ese año 70% de las importaciones de GNL de EE.UU. El 38% del consumo mundial de gas natural va dirigido a la generación de electricidad, 27% a la industria y 27% al sector residencial / comercial. El transporte apenas capta 3 y el 5% restante se destina a otros usos.

De los tres combustibles fósiles antes mencionados, el gas natural es el menos contaminante en cuanto a emisiones de carbono. Mientras el carbón mineral y el petróleo generan 26,8 y 20 t de carbono por TJ5 de energía, respectivamente; el gas natural emite 15,3 t de carbono por TJ de energía. En otras palabras, el gas natural podría suministrar los mismos servicios energéticos que el carbón con 40% menos de emisiones de CO₂, lo que lo convierte en un componente clave de las políticas de mitigación del cambio climático.

Carbón mineral

El carbón es el más abundante de los combustibles fósiles; pero más de la mitad de las reservas probadas están ubicadas en solo tres países: EE.UU. (27%), Rusia (17%) y China (13%). Otros países con importantes reservas son India, Australia, Sudáfrica, Ucrania y Kazajstán. En 2005 los principales productores fueron China (38%), EE.UU. (20%), Australia (7%), India (7%), Sudáfrica (5%) y Rusia (5%); y los mayores exportadores⁶ fueron Australia (30% de las ventas globales), Indonesia (14%), Rusia (10%), Sudáfrica (9%), China (9%) y Colombia (7%).

El análisis del aporte regional a la producción mundial de carbón revela la preponderancia de Asia en este segmento energético, durante los últimos 30 años. En efecto, la parte asiática en la oferta global de carbón pasó de 24% en 1973 a 57% en 2005, donde predomina la contribución de China, que pasó de 19 a 45% en ese período [IEA, 2006].

Este combustible fósil —el más contaminante— representa 28% del consumo de energía comercial (utilizado sobre todo en la generación de electricidad y procesos industriales). Solo se comercializa internacionalmente 17% del carbón producido, y en 2005 los principales consumidores fueron China (37%), EE.UU. (20%), India (7%), Japón (4%), Rusia (4%) y Sudáfrica (3%). Los mayores importadores⁷ eran Japón (23%), Corea del Sur (10%), China Taipei (8%), Reino Unido (6%), Alemania (5%) e India (5%).

La participación del carbón en el consumo mundial de energía comercial cayó de 29% en 1985 a 24% en el 2000, en un período de precios bajos o moderados del petróleo en los mercados internacionales. Sin embargo, con la escalada de los precios petroleros —desde comienzos de este siglo— la parte del carbón se incrementó nuevamente hasta 28% en 2005. El cambio experimentado en la primera mitad de esta década se ha registrado, básicamente, en el área subdesarrollada, donde el carbón pasó de 46% de la energía comercial consumida en 1985 a 35% en 2000 y 44% en 2005.

El dinamismo del carbón en el mundo subdesarrollado se explica, en lo fundamental, por la contribución de Asia —la región que experimenta el más rápido crecimiento del consumo energético en el mundo—, donde se ubican varios países con una elevada presencia del carbón en sus balances energéticos, como China e India. Este combustible representa 70% del consumo de energía comercial en China y 55% en la India (Anexo 12).

Según el Departamento de Energía de EE.UU., en un escenario de referencia, el consumo de carbón se duplicaría entre 2003 y 2030; y alrededor de 81% de ese incremento ocurriría en el mundo subdesarrollado. La participación de este combustible en el balance de energía comercial global aumentaría tres puntos porcentuales en ese período, es decir, mostraría mayor dinamismo que el gas natural [DOE-EIA, 2006].

Luego de considerar los combustibles fósiles (88% en 2005), el resto del balance global de energía comercial es aportado a partes aproximadamente iguales por la energía nuclear y las fuentes renovables, en especial la hidroelectricidad.

Tendencias de la energía nuclear

La energía nuclear, que apenas representaba 1% del balance de energía comercial en 1973, llegó a aportar 5% en 1985 y desde entonces se mantuvo en torno a 6%, debido a la pérdida de dinamismo de este segmento energético en los últimos 30 años por razones económicas, ambientales, entre otras, que eclipsaron el auge registrado hasta comienzos de la década de los ochenta.

En los últimos 25 años el aporte de la energía nuclear a la generación mundial de electricidad se ha mantenido en torno a 16%. En noviembre de 2006 existían 442 plantas nucleares en operación, con una capacidad instalada de 371 GWe. De las unidades en operación, 103 estaban en EE.UU., 59 en Francia, 55 en Japón y 31 en Rusia [IAEA, 2006] (Anexo 13).

Los principales productores de electricidad de origen nuclear son EE.UU (30% del total mundial), Francia (16%), Japón (11%), Alemania (6%), Rusia (5%) y Corea del Sur (5%). En general, 85% de la generación de este tipo de electricidad se concentra en los países de la OCDE [BP, 2006].

Los países más dependientes de la energía nuclear para la generación de electricidad son Francia (donde esta fuente aporta 79%), Lituania (70%), Bélgica (56%), Eslovaquia (56%), Ucrania (49%), Corea del Sur (45%), Suecia (45%), Bulgaria (44%), Armenia (43%) y Eslovenia (42%).

En los años más recientes se percibe un renovado interés en esta fuente energética, sobre todo en Asia. Por ejemplo, la India espera una expansión de la capacidad de generación de núcleo-electricidad en ocho veces para el 2022 y China en cinco veces en los próximos 15 años. Existen unas 29 plantas en construcción y muchas otras planeadas en China, India, Japón, Corea del Sur, Rusia, Sudáfrica y EE.UU. [IAEA, 2006].

En los debates internacionales sobre la energía nuclear, una de las aristas más polémicas es la relacionada con las implicaciones ambientales. En las últimas décadas se han dejado sentir las preocupaciones acerca del impacto negativo de los accidentes nucleares, la disposición de desechos, y los peligros de proliferación de armamento nuclear, entre otras. Sin embargo, en los años más recientes se ha potenciado el aprovechamiento de la energía nuclear como una opción de mitigación ante el cambio climático.

Como parte de las tendencias más recientes en el sector energético mundial, también se ha abierto paso la necesidad de fomentar la sostenibilidad energética, a partir del fomento de las fuentes renovables y del ahorro y uso eficiente de la energía a escala global, lo que supone, además, promover la cooperación energética entre países y regiones.

Nuevos retos: la sostenibilidad energética

A partir de los conceptos de *desarrollo humano*⁸ y de *desarrollo sostenible*,⁹ se pueden identificar tres dimensiones básicas de la sostenibilidad: económica, social y ambiental, como componentes de una misma agenda.

El análisis de los irracionales patrones de funcionamiento del sector energético a nivel mundial, así como sus implicaciones socioeconómicas y ambientales, revelan la necesidad de una reestructuración energética global basada en un paradigma energético sostenible.

Una reestructuración energética sostenible estaría llamada a resolver diversos problemas a escala planetaria, entre los que cabe mencionar:

- Implicaciones negativas de las tendencias alcistas en el precio de la energía para las economías nacionales.
- Vulnerabilidad social de amplios sectores de la población mundial, condicionada en alto grado por la escasa cobertura de servicios energéticos fundamentales.
- Impacto ecológico adverso del sector energético.
- Acelerado agotamiento de recursos energéticos no renovables, como el petróleo.

Dada la naturaleza global de los problemas económicos y ecológicos que se pretende resolver con una reestructuración energética sostenible, se requieren cambios radicales en los patrones de producción y consumo de energía a nivel global. No obstante, el ritmo y los patrones concretos de este proceso en cada región o país dependerán de las condiciones específicas de cada caso.

Los patrones de una reestructuración energética sostenible se orientan en dos direcciones básicas:

- Incremento del ahorro y la eficiencia energética.¹⁰
- Desarrollo de las fuentes renovables de energía.

Un factor clave a considerar en este proceso de reestructuración energética es la necesaria cooperación entre productores y consumidores, a partir del principio del trato preferencial a los países de menor desarrollo relativo.

Ahorro y eficiencia energética

Existe un enorme potencial para el ahorro y el uso eficiente de la energía en el mundo, aunque con significativas diferencias cuantitativas y cualitativas entre los países desarrollados y subdesarrollados.

Al relacionar el Índice de Desarrollo Humano (IDH) y el consumo de energía comercial per cápita para un conjunto de 64 países (tanto desarrollados como subdesarrollados), puede observarse que cerca de 60% de los países de este grupo exhiben un IDH mayor que 0,8; es decir, un nivel alto según la metodología del PNUD. Sin embargo, de esos países con alto IDH, la mitad (sobre todo países industrializados) tiene niveles de consumo energético per cápita superiores a las cuatro toneladas equivalentes de petróleo (TEP).¹¹ En este grupo, en que se concentran las mayores reservas de ahorro de energía comercial del mundo, se ubican además de EE.UU. y Canadá, 9 países europeos, 5 países industrializados de Asia-Pacífico y 3 países petroleros del Medio Oriente. Solo tres de los países de la muestra cuentan con un IDH mayor a 0.8 y un consumo per cápita de energía comercial inferior a las dos toneladas (Anexo 14).

Este patrón es muy similar al que resulta de relacionar el Índice de Desarrollo Humano y la huella ecológica¹² calculada por WWF, donde la inmensa mayoría de los países con alto desarrollo humano muestran una elevada huella ecológica (Anexo 15).

En el área desarrollada, saltan a la vista las reservas de ahorro y uso eficiente de la energía a partir de los elevados niveles de consumo energético per cápita que tienen estos países. Así, por ejemplo, el consumo de energía comercial por habitante de EE.UU. fue de 7,8 toneladas equivalentes de petróleo en 2005, frente a una media mundial de apenas 1,6 toneladas per cápita.

Si se redujera en una tercera parte el consumo de energía comercial per cápita de los países industrializados, este indicador aún seguiría teniendo un nivel superior en más de dos veces¹³ al promedio mundial actual. Tal disminución en un tercio del consumo de energía comercial por habitante de los países industrializados de altos ingresos se traduciría en un ahorro de 691 mil millones de dólares, correspondiendo a EE.UU. 48% de ese monto (Anexo 16).

En el área subdesarrollada también se aprecian importantes reservas para el ahorro y el uso eficiente de la energía, cuyo aprovechamiento supone cambios tecnológicos significativos. Cabe recordar, por ejemplo, que el consumo ineficiente de los combustibles tradicionales de la biomasa y la utilización de tecnologías obsoletas de producción y consumo tiende a elevar la intensidad energética¹⁴ de estas economías.

La inmensa mayoría de las naciones subdesarrolladas ha sido severamente afectada por los altos precios de los hidrocarburos, debido a su elevado grado de dependencia del crudo importado. Como promedio, en los países subdesarrollados importadores netos de petróleo el consumo petrolero por unidad de PIB generado (intensidad petrolera) es el doble que el

correspondiente a los países desarrollados, lo que revela una mayor vulnerabilidad ante el incremento de los precios del crudo importado.

Tomando la intensidad petrolera de la OCDE en 2002 como igual a 1, el nivel correspondiente a un grupo seleccionado de países subdesarrollados

importadores de petróleo se comportó como sigue, en ese año: Brasil (1,4 veces), China (2,3 veces), África (2,3 veces), Tailandia (2,4 veces) e India (2,9 veces). Además, la intensidad petrolera de estos países tiende a crecer en la medida en que los combustibles comerciales desplazan a los tradicionales.

Así las cosas, no cabe dudas que el ahorro de energía, basado en patrones más racionales de consumo y en tecnologías energéticas más eficientes, podría resultar una pieza clave de la reestructuración energética sostenible, que rompa el ciclo vicioso del *enfoque ofertista* que está orientado preferentemente al aumento de la oferta de energía sin considerar debidamente la administración sostenible de la demanda.

Fuentes renovables de energía

A pesar de sus grandes potencialidades para propiciar un desarrollo energético sostenible, las fuentes renovables de energía aún tienen una presencia muy limitada en el balance energético global.

Según estimaciones recientes, estas fuentes representan alrededor de 17% del balance global de energía primaria; y de esa proporción 9% corresponde a la biomasa tradicional (leña, residuos de plantas y animales y otros, que se utilizan, sobre todo, por amplios sectores de la población más pobre del Tercer Mundo).¹⁵ De 8% restante, 6% corresponde a la hidroelectricidad generada en grandes plantas;¹⁶ y apenas 2% a las llamadas «nuevas» fuentes renovables (pequeñas estaciones hidroeléctricas, tecnologías modernas para la utilización de bioenergía, energía eólica, solar y geotermia).

Paradójicamente, como ya se ha mencionado, las fuentes no renovables como los combustibles fósiles aportan 78% del consumo mundial de energía primaria (petróleo: 33%, carbón: 24% y gas natural: 21%) y la energía nuclear contribuye con 5%.

Este contraste entre disponibilidad (reservas) y utilización real de los distintos portadores energéticos con un claro sesgo hacia las fuentes no renovables resulta particularmente alarmante en un contexto como el actual en que los precios de los hidrocarburos se han disparado en los mercados internacionales, y en que se han agravado los problemas ambientales globales vinculados a las emisiones contaminantes del sector energético, como el reforzamiento del efecto invernadero, la contaminación urbana y la lluvia ácida, entre otros.

En medio de estas realidades, aumentan las presiones para promover las fuentes renovables, y consecuentemente la dinámica inversionista en este sector ha aumentado a un ritmo promedio anual de casi 18% entre 1995 y 2004. Las inversiones en fuentes renovables en 2004 (excluyendo a la

hidroelectricidad de gran escala) totalizaron 30 mil millones de dólares,¹⁷ lo que representa 20-25% de lo invertido globalmente en la generación de electricidad.

El segmento más dinámico de las fuentes renovables en los últimos años ha sido la tecnología solar fotovoltaica conectada a la red eléctrica, cuya

capacidad instalada se incrementó a razón de 60% anual en 2000-2004; y en segundo lugar se ubica la eoloelectricidad con un crecimiento anual de 28% en igual período.¹⁸

El 23% de la capacidad instalada globalmente para la generación de electricidad corresponde a fuentes renovables (19% corresponde a la hidroelectricidad en gran escala y el restante 4% a las «nuevas» fuentes renovables).

Una tendencia notable en esta área corresponde a los biocombustibles (etanol y biodiésel), cuya producción excedió los 33 mil millones de litros en 2004, con perspectivas de seguir creciendo. La expansión de la producción de etanol en Brasil, a partir de la caña de azúcar, se ha visto relanzada en los últimos años con la introducción de los vehículos flexibles,¹⁹ que han llegado a representar 75% de las nuevas ventas de autos en ese país. El programa de etanol brasileño (Proalcool) se inició en 1975 cuando el país importaba alrededor de 90% de sus necesidades de petróleo²⁰ y en 2005 la producción de etanol alcanzaba los 16 mil millones de litros. Brasil cubre más de 50% de las exportaciones de etanol y proyecta duplicar sus ventas externas para 2012 (OPEC, 5-6/2006).

El debate más reciente acerca de los biocombustibles dedica especial atención a los desafíos sociales y ambientales asociados a la producción de estos portadores energéticos (ver epígrafe: Biocombustibles y subdesarrollo en este trabajo). En un entorno nacional marcado por una muy desigual distribución de la tierra, el programa Proalcool, por ejemplo, ha recibido fuertes críticas de movimientos sociales brasileños por sus elevados costos sociales (mala calidad de vida de los trabajadores cañeros) y ambientales (uso intensivo de agroquímicos, efectos derivados de la quema de la caña y afectaciones para ecosistemas sensibles), entre otros.

Si bien se ha registrado un rápido desarrollo de tecnologías modernas y más eficientes para el aprovechamiento de las fuentes renovables, sobre todo en países desarrollados y de industrialización reciente, los progresos ulteriores en esta área se ven eclipsados por los grandes subsidios que continúan favoreciendo los combustibles fósiles (unos 150-250 mil millones de dólares por año) y a la energía nuclear (16 mil millones de dólares anuales), según estimados de Naciones Unidas y de la Agencia Internacional de Energía (AIE) [REN21, 2005].

Son pocos los países del Tercer Mundo (como China, la India y Brasil) que ocupan posiciones cimeras en la utilización de tecnologías modernas para el aprovechamiento de las energías renovables y esas experiencias no siempre han estado exentas de desafíos y contradicciones. Solo China aporta 23% de la capacidad de generación eléctrica mundial a partir de «nuevas» fuentes renovables (53% del monto correspondiente al conjunto de los países subdesarrollados)²¹ y 13,6% de la hidroelectricidad en gran escala utilizada globalmente (29% del nivel correspondiente a países del Tercer Mundo).²² Además, este país cuenta con más de la mitad de la capacidad mundial de generación eléctrica a partir de pequeñas hidroeléctricas; y 60% de la

capacidad existente de equipos para el calentamiento de agua y generación de calor a partir de energía solar. Por su parte, la *India* ocupa el cuarto lugar por su capacidad para generar eoloelectricidad, después de Alemania, España y EE.UU.; en tanto que Brasil se ubica entre los grandes productores mundiales de hidroelectricidad y es el líder mundial en la producción de etanol a partir de la caña de azúcar.

En la inmensa mayoría de los países subdesarrollados el contraste entre el progreso de las fuentes renovables de energía y el potencial existente para desarrollar esos portadores energéticos es mucho más marcado que en los países industrializados, debido a las serias restricciones tecnológicas y financieras que enfrenta la inmensa mayoría los países del Sur. Se estima que el flujo de financiamiento público, tanto multilateral como bilateral, que reciben estos países para el desarrollo de fuentes renovables apenas se acerca a los 500 millones de dólares anuales; es decir, una cifra equivalente a 0,1% de los pagos anuales del Tercer Mundo por concepto de servicio de su deuda externa.²³ Según registros de REN21 (2005) apenas 14 países subdesarrollados (frente a 34 desarrollados) cuentan con alguna variante de política para promover las energías renovables.

La experiencia histórica ha demostrado que los países que más se han rezagado en el desarrollo de fuentes renovables de energía y en el aprovechamiento de las reservas de eficiencia energética han tenido que pagar los mayores costos en períodos de altos precios de los combustibles convencionales como el petróleo.

La mayor parte del Tercer Mundo, sobre todo aquellos países más pobres que son importadores netos de energía, muestran un escenario muy sombrío, donde las tendencias alcistas de los precios de los hidrocarburos se combinan con las implicaciones adversas de una creciente deuda externa, un incremento de los precios de los alimentos y una creciente vulnerabilidad económica, social y ambiental. En este contexto, los precios de los alimentos se han incrementado, adicionalmente, como resultado de los planes de expansión de los biocombustibles a partir de cultivos como la caña de azúcar, los cereales, la soja y otros.

Sin políticas de intervención que favorezcan las fuentes renovables, su participación en el balance global durante las próximas décadas no aumentará significativamente. Hasta el momento, las inversiones en Investigación y Desarrollo (I + D) con fines energéticos de los países industrializados han favorecido sobre todo a los combustibles fósiles y a la energía nuclear en detrimento de las fuentes renovables. Así, por ejemplo, la inversión pública total en tecnologías energéticas en países de la OCDE en 1987-2002 ascendió a unos 291 mil millones de dólares y se destinaron en 50% a la energía nuclear, 12,3% a los combustibles fósiles y apenas 7,7% a las fuentes renovables.²⁴

Biocombustibles y subdesarrollo

Como se ha expresado antes, la bioenergía, en general, y los biocombustibles, en particular, son una fuente renovable de energía y su utilización racional y equilibrada, en función de prioridades económicas, sociales y ambientales de

algunas regiones y países —con condiciones para su producción—, puede contribuir a la mitigación del cambio climático y al desarrollo sostenible. Sin embargo, la actual fiebre de los biocombustibles, a los que se ha llegado a llamar el «oro verde», dista mucho de ponderar adecuadamente las dimensiones económicas, sociales y ambientales de este proceso y se inserta en las actuales tendencias globalizadoras como un nuevo mecanismo generador de pobreza y subdesarrollo.

El auge de los biocombustibles, en el contexto más reciente, responde, en gran medida, a los intereses de las transnacionales del agronegocio y la energía, así como de círculos de poder de países desarrollados que buscan atenuar el impacto de los altos precios de la energía, importando desde regiones subdesarrolladas buena parte de los biocombustibles requeridos por el Norte industrializado, sin promover cambios significativos en los patrones actuales de consumo energético.

Para los productores actuales y potenciales de biocombustibles en América Latina, Asia y África, un escenario de exportación de biocombustibles en gran escala implicaría que buena parte de las tierras agrícolas, dedicadas actualmente a la producción de alimentos —e incluso ecosistemas naturales sensibles— serían utilizadas para cultivar materias primas para la producción de combustibles.

De acuerdo con un informe de *Worldwatch* para llenar con etanol el tanque de un automóvil de 25 galones, se necesita una cantidad de granos suficientes para alimentar a una persona por un año. Con lo requerido para llenar ese tanque por dos semanas, se podría alimentar a 26 personas durante un año.

En un mundo que cuenta con más de 850 millones de hambrientos, este modelo resulta extremadamente excluyente, pues pondría en mayor peligro la soberanía alimentaria y la salud de los ecosistemas en diversas partes del planeta, sobre todo en el área subdesarrollada. Bajo este esquema, los países del Tercer Mundo aportarían la tierra y su fertilidad, mano de obra barata y se quedarían con todos los daños ambientales provocados por las grandes plantaciones de las que se extraerán los biocombustibles.

Los renovados esfuerzos del gobierno de los EE.UU. a favor de los biocombustibles y el interés por establecer alianzas con países latinoamericanos (como Brasil) para asegurar sus requerimientos futuros en este campo, constituyen otro ingrediente de la estrategia norteamericana de asegurar buena parte de sus suministros energéticos a largo plazo desde Latinoamérica y el Caribe, ya no solo petróleo y gas natural, sino también biocombustibles. Tales alianzas también buscan socavar los esfuerzos de Venezuela por avanzar en un nuevo tipo de integración energética regional, basada en la complementación, la solidaridad y el trato especial a los países de menor desarrollo.

Cooperación energética

Otro eje estratégico de la sostenibilidad energética es la cooperación energética y dentro de esta la que se desarrolla entre países subdesarrollados

(cooperación energética Sur-Sur) tiene un papel clave. Debe tenerse en cuenta que si bien la mayor parte de las reservas energéticas mundiales se ubican en los países del Tercer Mundo (sobre todo las fuentes no renovables y algunas renovables como la hidroelectricidad en gran escala), están desigualmente distribuidas, de manera que la inmensa mayoría de los países subdesarrollados son importadores netos de energía.

Después de más de dos décadas de políticas neoliberales que erosionaron considerablemente la actividad de los Estados en el sector energético del Tercer Mundo, una cooperación energética efectiva entre países subdesarrollados pasaría necesariamente por un fortalecimiento del papel de las instituciones estatales en este sector estratégico. De esta forma no solo se recuperaría el control soberano de los recursos energéticos, por parte de los gobiernos de los países productores y exportadores de energía, sino que además se facilitaría la creación de condiciones y capacidades de transporte, almacenamiento y distribución, entre otras, en los importadores de energía del Tercer Mundo, que serían los beneficiarios de los proyectos de colaboración Sur-Sur.

A partir del año 2000, con la firma del Acuerdo Energético de Caracas entre el gobierno bolivariano de Venezuela y numerosos países centroamericanos y caribeños se inauguró una nueva era en la cooperación energética entre países subdesarrollados. Posteriormente, con el surgimiento del proyecto ALBA, este tipo de colaboración ha incorporado nuevos elementos, basados en criterios de solidaridad, que favorecen adicionalmente a los países beneficiarios.

Basado en los preceptos generales del proyecto ALBA, nació la iniciativa PETROAMÉRICA con tres secciones básicas: PETROCARIBE, PETROANDINA y PETROSUR.

El caso de PETROCARIBE resulta paradigmático. A finales de junio 2005, representantes de 14 países del área, incluida Venezuela, suscribieron el Acuerdo de Cooperación Energética PETROCARIBE, en Puerto la Cruz, Venezuela.

El objetivo fundamental de PETROCARIBE, según el Acuerdo suscrito, es «contribuir a la seguridad energética, al desarrollo socioeconómico y a la integración de los países del Caribe, mediante el empleo soberano de los recursos energéticos, todo esto basado en los principios de integración denominada Alternativa Bolivariana para las Américas (ALBA).²⁵

Este Acuerdo destaca el nacimiento de PETROCARIBE «como una organización capaz de asegurar la coordinación y articulación de las políticas de energía, incluyendo petróleo y sus derivados, gas, electricidad, uso eficiente de la misma, cooperación tecnológica, capacitación, desarrollo de infraestructura energética, así como el aprovechamiento de fuentes alternativas, tales como la energía eólica, solar y otras».

El Acuerdo destaca, asimismo, la formación de PDV CARIBE, como una filial de PDVSA para atender los compromisos suscritos y la creación de un Fondo

destinado al financiamiento de programas sociales y económicos, con aportes provenientes, entre otras fuentes, de las contribuciones que se puedan acordar de la porción financiada de la factura petrolera y los ahorros producidos por el comercio directo. Este Fondo denominado ALBA-CARIBE contaría con un capital inicial de 50 millones de dólares, aportado por Venezuela.

Entre otras ventajas para los países caribeños, PETROCARIBE garantizaría un vínculo directo que excluye la onerosa intermediación en el comercio petrolero, y el cobro al costo de los fletes derivados de estas operaciones.

Bajo este Acuerdo, que va mucho más allá del Acuerdo de San José (1980) y del Acuerdo de Cooperación Energética de Caracas (2000), la parte de la factura petrolera que sería financiada a largo plazo aumentaría en la medida en que se incrementen los precios internacionales del crudo, llegando a ser de 30% para precios a partir de los 40 dólares por barril, 40% para precios de 50 dólares o superiores; y 50% para precios iguales o mayores a los 100 dólares.

Con precios inferiores a 40 dólares por barril, este financiamiento sería a 17 años (igual que en el Acuerdo Energético de Caracas), incluyendo dos años de gracia; pero si los precios superan los 40 dólares, el plazo de pago se extendería a 25 años, incluyendo dos años de gracia, con una tasa de interés reducida a 1%. Adicionalmente, Venezuela podría aceptar parte de los pagos diferidos en bienes y servicios que oferten los países caribeños (como azúcar, banano y otros), los que pagaría a precios preferenciales.

El nuevo Acuerdo también incorpora con fuerza la variable ambiental al subrayar la necesidad de incluir, junto a los acuerdos de suministro, programas de ahorro de energía, lo que constituye un enfoque energético sostenible que resulta novedoso en el contexto energético regional. Asimismo, se hace énfasis en el papel clave que tendrían los entes estatales en la realización de las operaciones energéticas acordadas.

Como puede apreciarse, este histórico Acuerdo que parte del reconocimiento de los principios de cooperación, solidaridad, trato especial y diferenciado para los países de menor desarrollo, y complementariedad —con estricto respecto a la independencia, soberanía e identidad nacional—, constituye un aporte sin precedentes a la integración regional, con un enfoque solidario e integrador muy diferente al que subyace en el proyecto anexionista del ALCA.

En abril de 2007 sesionó en Venezuela la I Cumbre Energética Suramericana, con la presencia de varios jefes de estado de la subregión. A pesar de los esfuerzos foráneos para tratar de boicotear la reunión, en el contexto de esta Cumbre nació la Unión de Naciones Suramericanas (UNASUR) y se sentaron las bases para procesos ulteriores de complementación energética en el área.

En sentido general, esta cooperación energética Sur-Sur tiende a favorecer la sostenibilidad energética, a partir de sus múltiples dimensiones. La *dimensión económica* considera la reducción del impacto adverso de los altos precios de la energía sobre los países importadores de energía más vulnerables; la

dimensión social se refiere a la contribución para combatir la pobreza, sobre todo la pobreza energética y en este sentido apunta al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM) de Naciones Unidas; la *dimensión ambiental* refleja el impacto ambiental positivo de estas iniciativas, que van más allá del sector petrolero, y consideran la posibilidad de proyectos de eficiencia energética y fomento de fuentes renovables. Adicionalmente, como ya se ha expresado, al revalorizarse el papel del Estado en este estratégico sector se favorece una perspectiva de largo plazo, se potencia el efecto multiplicador del sector energético en otros sectores socioeconómicos y se asegura la soberanía energética.

Resumen

La escalada de precios del petróleo que se registra desde comienzos de este siglo, con un reforzamiento a partir de 2004, ha tenido implicaciones adversas para los países importadores netos de energía. Sin embargo, el grado de las afectaciones varía según los niveles de desarrollo de los países y de su capacidad para enfrentar este nuevo *shock* petrolero.

Si bien las economías industrializadas muestran una elevada dependencia de los hidrocarburos importados, en la actualidad son mucho menos vulnerables ante los altos precios de la energía que a comienzos de los setenta debido, entre otras razones, a la drástica reducción tendencial en el consumo de energético por unidad de producción, derivada de los cambios estructurales ocurridos en esas economías durante las últimas tres décadas. Por su parte, los importadores de energía del mundo subdesarrollado han sido particularmente golpeados por las más recientes elevaciones de los precios del petróleo, ya que se ha agravado significativamente el deterioro de sus términos de intercambio, en un contexto de gran vulnerabilidad socioeconómica que ha estado dominado por la marginalización de estos países de los flujos comerciales y financieros internacionales.

En períodos anteriores de altas cotizaciones del crudo, como el comprendido entre 1973 y 1985, se estimuló el desarrollo de las fuentes energéticas alternativas al petróleo —como las renovables—, y se progresó significativamente en la reducción de la intensidad energética (sobre todo petrolera), fundamentalmente en los países industrializados. Si bien en las condiciones actuales el avance en esas direcciones ha sido más limitado, la persistencia de los altos precios de los hidrocarburos, unido a las crecientes presiones internacionales para reducir las implicaciones adversas del sector energético sobre el medio ambiente, ponen nuevamente en un primer plano el debate acerca de la necesidad de avanzar hacia una reestructuración energética.

Esta reestructuración del sector energético debe emprenderse bajo criterios de sostenibilidad que promuevan el ahorro y uso eficiente de la energía, así como el fomento de las fuentes renovables; en contraste con las fórmulas neoliberales que han dominado el escenario energético mundial durante los últimos veinte años.

En este contexto, resultan muy preocupantes los intentos más recientes de los países desarrollados, encabezados por EE.UU., que pretenden intensificar a

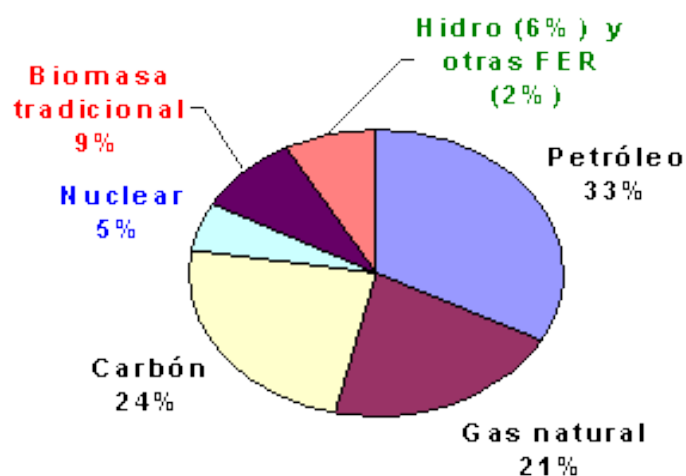
toda costa la producción de biocombustibles —sobre todo en regiones subdesarrolladas—, para satisfacer la creciente demanda energética del Norte industrializado, sin reparar en los efectos adversos que tal variante tendría para los países del Tercer Mundo, tanto en el plano económico como social y ambiental.

Considerando las graves asimetrías que caracterizan a la economía mundial actual, un componente clave para avanzar en una reestructuración energética sostenible es el fomento de la cooperación entre productores y consumidores, a partir de los principios de trato preferencial a los países de menor desarrollo relativo, la solidaridad y la revalorización del papel de Estado en este sector estratégico. En este sentido se inscriben las más recientes iniciativas del gobierno bolivariano de Venezuela, como la creación de PetroCaribe y otros proyectos energéticos regionales dentro de PetroAmérica, bajo los principios del ALBA.

ANEXOS

Anexo 1

Consumo de energía primaria global, por fuentes (%)



Fuente: Elaborado a partir de REN21, 2005.

Anexo 2. Dependencia de combustibles tradicionales

Rango	Relación de países
40-60%	Paraguay, Sri Lanka, Guyana, Nicaragua, Honduras, Guatemala, Guinea Ecuatorial, Haití, Nigeria, Guinea Bissau.
61-75%	Myanmar, Papua Nueva Guinea, Bangladesh, Sudán, Congo, Zimbabwe, Camerún, Kenia, Gambia, Senegal, Eritrea, Benin, Côte d'Ivoire.
76-90%	Lao, Buthán, Ghana, Togo, Madagascar, Guinea, Tanzania, Malawi, Zambia, Mozambique, República Centroafricana, Mali, Burkina Faso, Níger.
Más de 90%	Camboya, Uganda, Rwanda, R. D. Congo, Burundi, Etiopia, Chad, Sierra Leona.

Fuente: PNUD (2005)

Anexo 3. Balance de energía comercial mundial, 2005

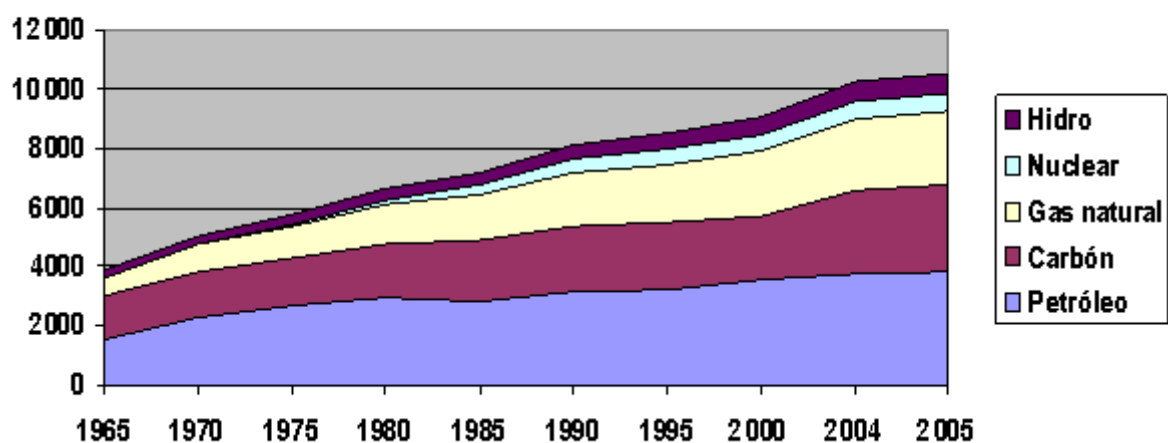
Fuente	%
Petróleo	36
Carbón	28
Gas natural	24
Nuclear	6
Hidro	6
Total	100

Fuente: Elaborado a partir de *BP* (2006).

Anexo 4

Consumo de energía comercial 1965-2005

(en millones de toneladas de petróleo equivalente)



Fuente: Elaborado a partir de *BP* (2006)

Anexo 5. Consumo per cápita de energía comercial en 2003

Grupos de países	Consumo de energía comercial (MTPE)	Población (millones)	Consumo energético per cápita (TPE)
Países OCDE de altos ingresos	5 018,7	917,4	5,5
- EE.UU.	2 298,7	292,6	7,9
- Unión Europea	1 697,5	456,9	3,7
- Japón	504,9	127,7	4,0
Países subdesarrollados	3 105,6	5 022,4	0,6
MUNDO	9 800,8	6 313,8	1,6

Fuente: Elaborado a partir de BP (2006) y PNUD (2005).

Anexo 6. Consumo mundial de energía comercial por fuentes (%)

Fuentes	1973	1985	2000	2005
Petróleo	48	39	39	36
Gas natural	18	21	24	24
Carbón	28	29	24	28
Hidro	5	6	7	6
Nuclear	1	5	6	6
Total	100	100	100	100

Fuente: Elaborado a partir de BP (2006).

Anexo 7. Consumo de energía comercial en países desarrollados (%)

Fuentes	1973	1985	2000	2005
Petróleo	52	42	41	41
Gas natural	20	19	23	23
Carbón	22	26	21	21
Hidro	5	7	6	5
Nuclear	1	7	9	10
Total	100	100	100	100

Fuente: Elaborado a partir de BP (2006).

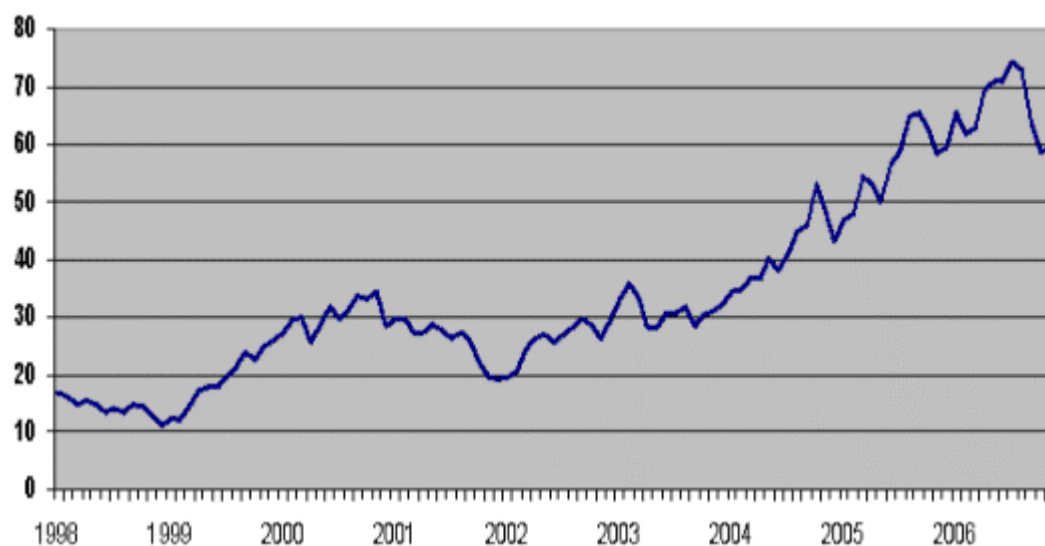
Anexo 8. Consumo de energía comercial en países subdesarrollados (%)

Fuentes	1973	1985	2000	2005
Petróleo	42	35	40	33
Gas	6	10	14	13
Carbón	45	46	35	44
Hidro	7	9	10	9
Nuclear	0	0	1	1
Total	100	100	100	100

Fuente: Elaborado a partir de BP (2006).

Anexo 9

Precios del petroleo WTI, 1998-2006 dolares por barril)

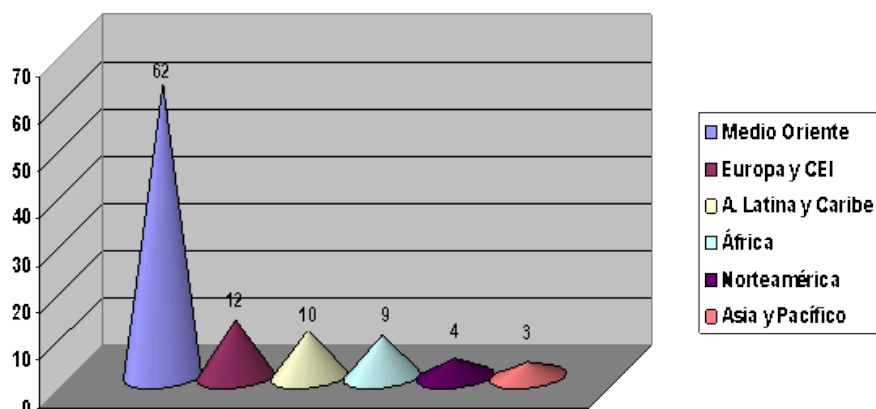


Nota: Se refiere a las cotizaciones mensuales del *West Texas Intermediate*, crudo de referencia para EE.UU.

Fuente: Elaborado a partir de *Economagic.com: Economic Time Series Page*.

Anexo 10

Reservas probadas de petróleo 2005
(% del total mundial)



Fuente: BP (2006).

Anexo 11. Petróleo y CO₂

Países	Consumo petróleo, % del total	CO ₂ , % de emisiones mundiales	CO ₂ per cápita, TM
EE.UU.	24,9	24,4	20,1
Canadá	2,6	1,9	16,5
R. Unido	2,1	2,5	9,2
Francia	2,5	1,6	6,2
Alemania	3,3	3,4	9,8
Italia	2,4	1,9	7,5
Japón	6,4	5,2	9,4
Países desarrollados	60,6	63,1	11,1
Países subdesarrollados	39,4	36,9	2,0

Fuentes: BP (2006), PNUD (2005).

Anexo 12. Ejemplos de economías dependientes del carbón

Fuentes	China	India
Petróleo	21,1	29,9
Carbón	69,6	55,0
Gas natural	2,7	8,5
Hidro	5,8	5,6
Nuclear	0,8	1,0
Total	100	100

Fuentes: BP (2006).

Anexo 13. Reactores nucleares 2005-2006

	Generación de electricidad de origen nuclear 2005		Reactores en operación Nov 2006		Reactores en construcción Nov 2006		Reactores planificados Nov 2006		Reactores propuestos Nov 2006		Uranio 2006
	Mil millones kWh	% e	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	No.	MWe	ton U
Argentina	6,4	6,9	2	935	1	692	0	0	1	1 000	134
Armenia	2,5	43	1	376	0	0	0	0	1	1 000	51
Bélgica	45,3	56	7	5 728	0	0	0	0	0	0	1 075
Brasil	9,9	2,5	2	1 901	0	0	1	1 245	0	0	336
Bulgaria	17,3	44	4	2 722	0	0	2	1 900	0	0	253
Canadá*	86,8	15	18	12 595	2	1 540	2	2 000	0	0	1 635
China	50,3	2,0	10	7 587	5	4 170	13	12 920	50	35 880	1 294
R. Checa	23,3	31	6	3 472	0	0	0	0	2	1 900	540
Egipto	0	0	0	0	0	0	0	0	1	600	0
Finlandia	22,3	33	4	2 696	1	1 600	0	0	0	0	473
Francia	430,9	79	59	63 473	0	0	1	1 630	1	1 600	10 146
Alemania	154,6	31	17	20 303	0	0	0	0	0	0	3 458
Hungría	13,0	37	4	1 773	0	0	0	0	0	0	251
India	15,7	2,8	16	3 577	7	3 088	4	2 800	20	10 360	1 334
Indonesia	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4 000	0
Irán	0	0	0	0	1	915	2	1 900	3	2 850	0
Israel	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1 200	0
Japón	280,7	29	55	47 700	2	2 285	11	14 945	1	1 100	8 169
Kazajstán	0	0	0	0	0	0	0	0	1	300	0
RDP Corea	0	0	0	0	0	0	1	950	0	0	0
Corea Sur	139,3	45	20	17 533	1	950	7	8 250	0	0	3 037
Lituania	10,3	70	1	1 185	0	0	0	0	1	1 000	134

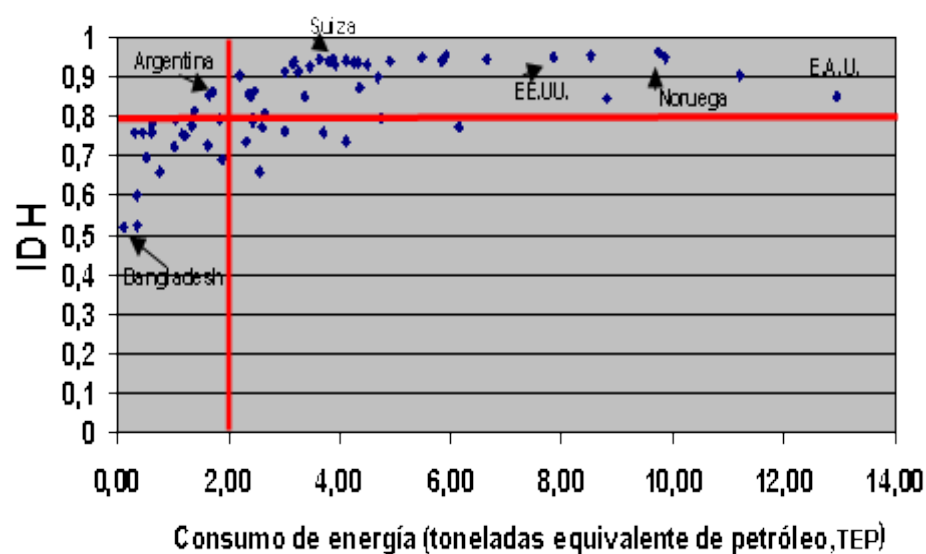
México	10,8	5,0	2	1 310	0	0	0	0	2	2 000	256
Holanda	3,8	3,9	1	452	0	0	0	0	0	0	112
Pakistán	1,9	2,8	2	400	1	300	2	600	2	2 000	64
Rumania	5,1	8,6	1	655	1	655	0	0	3	1 995	176
Rusia	137,3	16	31	21 743	3	2 650	8	9 600	18	21 600	3 439
Eslovaquia	16,3	56	6	2 472	0	0	0	0	2	840	356
Eslovenia	5,6	42	1	696	0	0	0	0	1	1 000	144
Sudáfrica	12,2	5,5	2	1 842	0	0	1	165	24	4 000	329
España	54,7	20	8	7 442	0	0	0	0	0	0	1 505
Suecia	69,5	45	10	8 975	0	0	0	0	0	0	1 435
Suiza	22,1	32	5	3 220	0	0	0	0	0	0	575
Turquía	0	0	0	0	0	0	3	4 500	0	0	0
Ucrania	83,3	49	15	13 168	0	0	2	1 900	0	0	1 988
Reino Unido	75,2	20	23	11 852	0	0	0	0	0	0	2 158
EE.UU.	780,5	19	103	98 254	1	1 200	2	2 716	21	24000	19 715
Vietnam	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2000	0
Mundial*	2 626	16	442	370,921	28	22,645	62	68,021	161	120,625	65,478

* El total mundial incluye seis reactores de Taiwán con una capacidad combinada de 4 884 MWe, la cual generó un total de 38,4 miles de millones de kWh en 2005 (20% de la generación de electricidad de este territorio). Taiwán tiene dos rectores en construcción con una capacidad combinada de 2 600 MWe.

Fuente: *World Nuclear Association*, 27 November 2006

Anexo 14

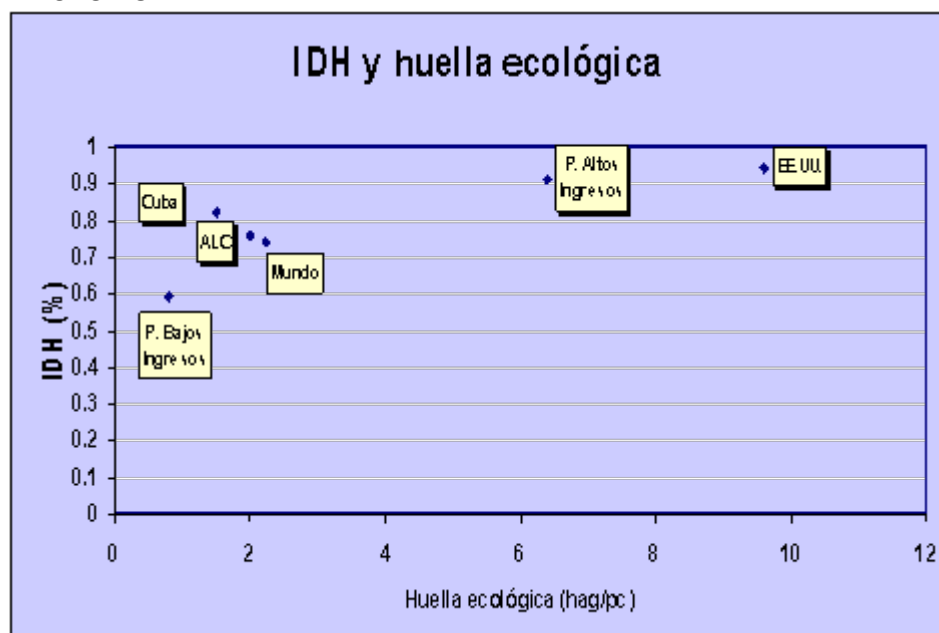
Desarrollo humano y consumo energético per cápita



partir de BP (2006) y PNUD (2005).

Fuente: A

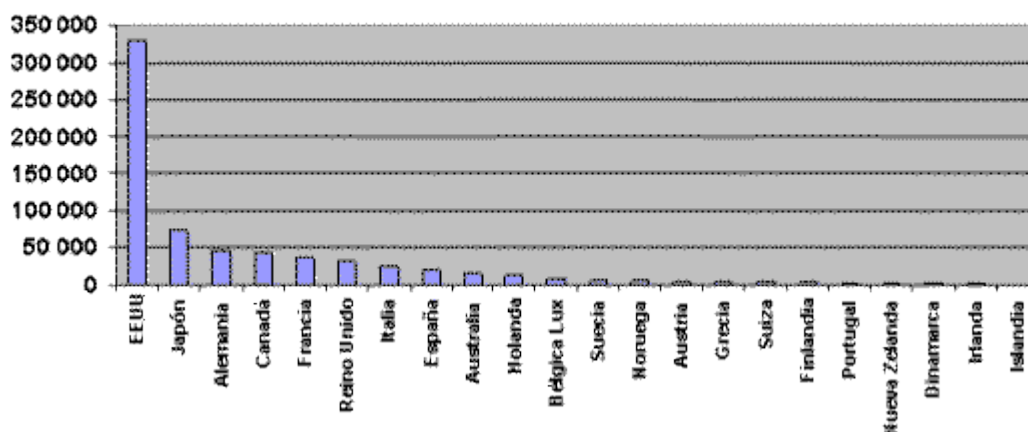
Anexo 15



Fuente: WWF (2006).

Anexo 16

Opción de ahorro de una tercera parte del consumo energético de los países desarrollados 2005 (Valoración en millones de USD)



Fuente: Elaborado a partir de BP (2006).

Notas

1. Se refiere a las pequeñas estaciones hidroeléctricas, tecnologías modernas para la utilización de bioenergía, la energía eólica y la solar. Esta clasificación incluye también la geotermia, que es aportada por fuentes geológicas (de origen no solar), pero aprovecha recursos prácticamente inagotables.
2. Incluye crudo y productos derivados.
3. Incluye crudo y productos derivados.
4. De acuerdo con las más recientes proyecciones de la Agencia Internacional de Energía (*World Energy Outlook 2006*), la producción convencional de petróleo crudo de los países no miembros de la OPEP alcanzaría su nivel máximo a mediados de la próxima década [IEA-Finfacts, 2006].
5. Terajoule = 10^{12} joule.
6. Se refiere sólo a las exportaciones de carbón bituminoso y antracita (*hard coal*) (IEA, 2006).
7. Se refiere sólo a las exportaciones de carbón bituminoso y antracita (*hard coal*) (IEA, 2006).
8. Ver PNUD. Informes sobre Desarrollo Humano (desde 1990): www.undp.org.
9. Ver The World Commission on Environment and Development. *Our Common Future*, Oxford University Press, 1987.
10. Según estimados publicados por la Agencia Internacional de Energía (*World Energy Outlook 2006*), por cada dólar adicional invertido en equipos eléctricos más eficientes, se ahorrarían más de dos dólares de inversiones en generación de electricidad (IEA-Finfacts, 2006).
11. Este umbral de 4 toneladas de petróleo (equivalente) supera en casi 2,5 veces a la media mundial de consumo de energía comercial per cápita.
12. Impacto de la actividad humana sobre el planeta. Según WWF, la huella ecológica de la humanidad se ha triplicado desde 1961; y excede en la actualidad en casi 25% la capacidad del planeta para regenerarse.
13. Más de tres veces en el caso de EE.UU.
14. Consumo energético por unidad de producto interno bruto (PIB) generado.
15. Para el conjunto de los países subdesarrollados los combustibles

tradicionales de la biomasa representan alrededor de 35% del consumo de energía primaria (Santamaría, 2004).

16. Los principales productores de hidroelectricidad (a gran escala) en 2005 fueron China (13,6% del total mundial), Canadá (12,2%), Brasil (11,5%), EE.UU. (9,1%), Rusia (5,9%) y Noruega (4,6%); y dentro de los diez grandes productores de esta hidroelectricidad, los más dependientes de esta fuente para la generación eléctrica eran, según datos de 2004: Noruega (99% de la electricidad tiene su origen en esta fuente), Brasil (83%), Venezuela (71%), Canadá (57%) y Suecia (40%) (BP, 2006; IEA, 2006).

17. El mayor monto de inversiones en ese año correspondió a la generación de electricidad de origen eólico, con 9,5 mil millones de dólares; seguida por la solar fotovoltaica con 7 mil millones de dólares; la hidroeléctrica de pequeña escala con 4,5 mil millones de dólares y la termosolar (para generación de calor y calentamiento de agua) con 4 mil millones de dólares; correspondiendo los restantes 5 mil millones de dólares a la geotermia y a la biomasa.

Adicionalmente, cada año se invierten entre 20 y 25 mil millones de dólares en la hidroelectricidad de gran escala (REN21, 2005).

18. Los costos de generación de electricidad de origen solar y eólico equivalen en la actualidad a un 50% de los niveles existentes hace 10 o 15 años (REN21, 2005).

19. Pueden utilizar gasolina, etanol o una mezcla de ambos.

20. Desde 2006 Brasil es prácticamente autosuficiente en petróleo.

21. Datos de 2004 publicado por REN21 (2005).

22. Datos de 2005 publicados por BP (2006).

23. Calculado por el autor a partir de REN21 (2005) y FMI (2006).

24. AIE (2004).

25. Ver «Acuerdo de Cooperación Energética PETROCARIBE», enperiódico *Granma*, La Habana, 1 de julio de 2005, pp.4-5.

Bibliografía

ALLIANCE FOR RURAL ELECTRIFICATION. Electricity Access 2004:

http://www.ruralelec.org/documents/WS_061018_01_ARE.pdf

BIROL, F. «Power to the People. The World Outlook for Energy Investment», IAEA Bulletin 46/I, junio 2004:

<http://www.iaea.or.at/Publications/Magazines/Bulletin/Bull461/article3.pdf>

BP. *Statistical Review of World Energy*, varios años (2000-2006).

DELOITTE RESEARCH-GLOBAL ECONOMIC OUTLOOK 2006. Global risks, regional opportunities.

DOE-EIA. (US Department of Energy-Energy Information Administration), *Internacional Energy Annual 2003* (Última actualización: 28 de junio de 2005).

DOE-EIA. *International Energy Outlook 2006*, DOE/EA 0484(2006), junio de 2006: www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index/html

FAO. «La bioenergía, clave en la lucha contra el hambre», 14 de abril de 2005: <http://www.fao.org/newsroom/es/news/2005/101397/index.html>

FMI. *World Economy Outlook*, diversos números (1999-2004).

IEA. *Analysis of the Impact of High Oil Prices on the Global Economy*, Paris, 2004.

IEA. *Key World Energy Statistics*, París, 2006.

IEA. Finfacts Team. «The World Energy Outlook: IEA says investments in oil and natural gas production has only marginally increased since 2000 signaling continuing tight oil supply market», París, 7 de noviembre de 2006.

IAEA. «New Countries Interested in Nuclear Power Meet in Viena», *IAEA Staff Report*, 1 December, 2006

IMF. *Oil Markets Developments and Issues*. Preparado por Policy Department and Review Department, 1 de marzo de 2005.

IPCC. «Mitigación del cambio climático». Contribución del Grupo de Trabajo III a la Tercera Evaluación del IPCC, Cambridge University Press, 2001.

OPEC. *Monthly Oil Market Report* (varios números).

OPEC. *Oil Outlook to 2005*, septiembre de 2004, Viena.

OPEC. *OPEC Bulletin* (diversos números).

Periódico *Granma*, La Habana, 1 de julio de 2005.

PNUD. *Informe sobre desarrollo humano*. Ediciones-Prensa, Nueva York, diversos números (1999-2005).

REN21 Renewable Energy Policy Network (2005). *Renewables 2005 Global Status Report*. Washington, D.C.: Worldwatch Institute.

SANTAMARTA, J. «Las energías renovables son el futuro». *Worldwatch* 2004.

SMITH, A. «World Energy Use». *Alternative Energy Action Network*, 24 de enero de 2005:

<http://www.altenergyaction.org/mambo/index.php?option=content&task=view&id=11&Itemid=31>.

US-DOE (2005). *World Oil Markets. Energy Information Administration/International Energy Outlook*.

WWF. *Informe Planeta Vivo* 2006.

Hidrógeno como combustible automotor barato: producido por la agroindustria azucarera y para ella

Hydrogen as a cheap automotive fuel produced for and by the sugar cane industry

Jorge Lodos Fernández y Elena Vigil Santos

** Ministerio del Azúcar (MINAZ), El Vedado, Plaza, La Habana, CP 10400, Cuba.*

*** Facultad de Física, Universidad de La Habana,*

El Vedado, Plaza, La Habana, CP 10400, Cuba.

e-mail: lodos@ocentral.minaz.cu y evigil@fisica.uh.cu

Resumen

Los países desarrollados intentan reducir la contaminación de sus ciudades sustituyendo la gasolina, entre otras opciones, por hidrógeno, que solo produce agua en su combustión. Contra esto conspira su alto costo, por el consumo de energía en la electrólisis del agua y las dificultades de almacenamiento a bordo. También resulta costoso obtener hidrógeno de combustible fósil. En este caso, y/o si se utiliza electricidad generada de ellos, además, se contribuye al efecto invernadero. Para que esta alternativa sea compatible con el medio ambiente, el hidrógeno debe ser obtenido con materia prima y energía renovables. En la agroindustria de la caña de azúcar hay condiciones para superar estas dificultades y ofrecer una solución aplicable a los muchos países que la poseen. En el trabajo se analiza la producción de hidrógeno por electrólisis, con electricidad cogenerada de bagazo, y su uso como combustible automotor en transportar caña. En esas condiciones, la electricidad es barata y renovable, y todo el hidrógeno producido puede ser utilizado localmente sin almacenamiento a alta presión ni gastar energía en comprimirlo. Se demostró que el costo del hidrógeno «azucarero», para iguales recorridos, es 60% del costo de la gasolina o alcohol combustible. El consumo en un viaje promedio de un camión con tráiler con diez toneladas de caña sería de 2 kg en ida-retorno. Una fábrica de 7 000 toneladas de caña/día necesitaría, para transportarla toda, un electrolizador de 60 kg/h que consumiría 3 MW de potencia instalada. Esta fábrica genera no menos de 10 MW, y consume 6-8 MW. Se propone un proyecto para adaptar a hidrógeno un camión, generarlo en un electrolizador de 0,4 kg/h, con electricidad sobrante, y almacenarlo en contenedores de 2 kg a 10 bar. El objetivo sería promover tecnologías eficientes de conversión de energía sobrante y suministrar información sobre almacenamiento, transportación, seguridad y comportamiento del camión, y la realización de los cálculos técnico-económicos correspondientes.

Palabras clave: Hidrógeno, combustible automotor, agroindustria azucarera.

Abstract

Developed countries attempt to reduce the pollution in their cities by substituting gasoline, among other options, by hydrogen, that only produces water as a byproduct of its combustion. The challenge is the high cost of obtaining hydrogen due to the high energy consumption of the electrolysis of water and difficulties of on-board storage of hydrogen. It is also expensive and polluting to get hydrogen from fossil fuels because when we use electricity generated from fossil fuels we are contributing to the emission of greenhouse gases. In order for this alternative to be environmentally-friendly, hydrogen should be obtained with renewable raw materials and using renewable energies. There are conditions in the sugar cane agroindustry to overcome these difficulties and bring about a solution to countries that account with industry. In the present paper it is analyzed the production of hydrogen by electrolysis, with electricity co-generated from bagasse, and its use as a automotive fuel in transporting cane from the fields. In those conditions, electricity is cheap and renewable, and all the hydrogen produced can be locally used without needing high pressure bonding or spending energy in compressing it. It was demonstrated that the cost of the "sugar" hydrogen, for similar trips, is 60 % of the cost of gasoline or ethanol fuel. The fuel consumption in an average round trip of a ten tons truck with trailer fully loaded with sugar cane would be 2 kg. A sugar cane processing mill of 7 000 ton of sugar cane per day would need, in order to transport all the sugar cane from the fields, an electrolyzer with the capacity of producing 60 kg/h with 3 MW of power installed capacity. A factory like this generates no less than 10 MW and consumes 6-8 MW. A project is intended to adapt a truck to hydrogen. The hydrogen would be produced in a 0.4 kg/h electrolyzer, with a surplus of electricity, and to storage it in 2 kg containers at 10 bar. The objective would be promoting efficient technologies of conversion surplus energy and facilitate information on storage, transportation, performance of the truck, and economic feasibility.

Keywords: Hydrogen, automotive fuel, sugar agroindustry

Introducción

Los países desarrollados buscan resolver el grave problema de la contaminación de sus ciudades debido a la combustión de los combustibles que utilizan en el transporte automotor. Una de las alternativas con más perspectivas es su sustitución por hidrógeno, que puede obtenerse del agua recuperada en su combustión. Contra esto conspira:

1. Su alto costo, relativo a los combustibles actualmente utilizados.
 2. Dificultades de almacenamiento y transportación.
 3. Su carácter no renovable, si se obtiene utilizando combustibles fósiles.
- Es conveniente insistir en que para que la combustión del hidrógeno sea totalmente compatible con el medio ambiente, debe ser obtenido de fuentes renovables de energía [Erdman, *et al.*, 2004].

El escenario anterior no describe la situación de los países subdesarrollados que están obligados a incrementar dramáticamente la producción de energía para desarrollarse y mejorar su nivel de vida. Este desarrollo ya no puede ser basado en petróleo abundante y barato, como lo fue el de los países

actualmente desarrollados, pues se calcula que más de la mitad del total del petróleo que una vez existió en la naturaleza ya ha sido gastado.

El precio del petróleo está en ascenso y ya es actualmente prohibitivo, motivado, entre otros factores, porque desde hace varios años los nuevos descubrimientos no compensan lo consumido, y las reservas disminuyen de manera sistemática. Por otro lado, buena parte de los combustibles fósiles utilizados han sido convertidos en CO₂ atmosférico, dando lugar al incremento del efecto invernadero, que amenaza al clima terrestre sin distinción de país. Una alternativa totalmente compatible con el medio ambiente es producir energía renovable de biomasa y, eventualmente, su conversión en hidrógeno para sustituir combustible automotor fósil.

La caña de azúcar, cultivo habitual de 81 países subdesarrollados, posee condiciones excepcionales para convertirse en una importante fuente de biomasa y energías renovables baratas que permitirían producir otros portadores energéticos, como el hidrógeno, y se compara favorablemente con otras fuentes de biomasa (Tabla 1).

Tabla 1. Comparación de biomosas

Indicador	Caña de azúcar	Otras biomosas [Biomasa..., 2004]
Biomasa	Bagazo concentrado en un punto	Residuos dispersos de madera o animales, paja de cereales
Tecnología energética	Existe	En desarrollo
Costo de la biomasa	Casi sin costo	> 30 USD/t
Cogeneración	Sí	No
Generación	Parcialmente	Sí
Otros productos	Azúcar, alcohol, biogás, oxígeno e hidrógeno	No

La caña de azúcar

Una hectárea de caña de azúcar es capaz de producir, como promedio, unas 80 t/año de caña, con 14-16% de azúcares y casi 30% de bagazo, residuo fibroso con 50% de humedad y 16-17 MJ/kg de valor calórico en base seca [Manual..., 1999]. El bagazo representa la biomasa industrial con mayor tonelaje de producción en el mundo y, por lo tanto, la de mayor potencialidad energética e impacto sobre el efecto invernadero. Como la fabricación de azúcar necesita de calor y de electricidad, el bagazo es utilizado como «leña» en las calderas, cuyo vapor alimenta turbogeneradores de contrapresión, produciendo vapor de calentamiento de 1-2 bar y electricidad. Usualmente, al fabricar azúcar de caña se consumen unas 45 t de vapor y 2 000 kWh por 100 t de caña procesadas.

Históricamente, la agroindustria azucarera produce azúcar y no ha estado interesada en elevar su eficiencia termoenergética para producir energía, ya que los grandes productores-distribuidores de electricidad de petróleo barato

no manifestaban interés en comprarle electricidad sobrante. Tampoco era tan actual, como ahora, el problema de la contaminación ambiental.

Las fábricas de azúcar de caña se diseñaron para consumir todo el bagazo que producían, por las dificultades de manipular el excedente. En la industria azucarera mundial hay unas diez mil calderas y varios miles de turbogeneradores, con una potencia instalada del orden de 6 000 MW, cuyo nivel de generación depende de la presión de trabajo (Tabla 2), que pudiera aumentarse fácilmente si existieran incentivos suficientes para ello.

Tabla 2. Generación según presión de trabajo

Presión, bar	Generación, kWh/t caña	Balance eléctrico
10	15	Compran
20	20-25	Compran y venden
30	40-45	Venden
60-80	100	Venden más

Cuando se considera a la agroindustria de la caña de azúcar como productora de energía y de alimentos, el cuadro cambia significativamente. El hecho de que la caña de azúcar sea el mejor convertidor de energía solar en biomasa del mundo vegetal cobra una mayor importancia, a lo que se le suman las tecnologías existentes para recoger los residuos agrícolas que se dejan en el campo [Aguilar, *et al.*, 1996]; también se pueden desarrollar nuevas variedades «energéticas» que producen el doble de bagazo, además de elevar el nivel de generación a 150 kWh/t de caña y más [Energetic..., 2001].

La fábrica de azúcar y energía

Con el objetivo de mejorar la eficiencia energética de la fábrica de azúcar, se hace necesario elevar la eficiencia de la generación de vapor (más vapor disponible), del uso del vapor (más vapor disponible para convertir en electricidad) y de su conversión en electricidad (más electricidad por unidad de vapor). Para ello, con tecnología disponible se aumenta la eficiencia de las calderas, de 65 a 85% y más, se reduce el consumo de vapor de 45 a 35% y menos, y se eleva la presión de trabajo hasta 60-80 bar [Feasibility..., 1999]. También, se recogen los residuos de la cosecha y se extiende la duración de la campaña, en particular, procesando caña «energética».

La abundante electricidad barata disponible permite la producción de hidrógeno que, además, puede ser utilizado como combustible automotor en los camiones que transportan la caña y el azúcar a distancias relativamente cortas. De esta manera, se hace totalmente factible sustituir combustibles automotores fósiles, de precio creciente, por hidrógeno de bajo costo, sin tampoco enfrentar, como se discutió, los problemas de almacenamiento y transportación que lo acompañan.

La inversión y los costos

Una fábrica como la descrita, que procese 7 000 t/día de caña, capacidad común en el mundo azucarero, con una campaña de azúcar de cinco meses, pero cuya generación de electricidad continúe operando hasta 7 200 h/año, podrá disponer de 30 MW de potencia instalada [*Feasibility...*, 1999]. Para efectuar los cálculos se consideró que el área energética financia la adquisición de los nuevos medios y las modificaciones que haya que hacer en la fábrica, a cambio de lo cual recibe la biomasa sin costo, pero le suministra a la fábrica todo el vapor y la electricidad que requiera. Los costos e ingresos vinculados al azúcar se mantienen iguales o favorecidos porque, como es de esperar, los cambios en la eficiencia energética, si alguna repercusión tuvieran sobre la eficiencia azucarera, serían positivos.

En lo que respecta a la producción de hidrógeno, se extrapolaron los datos de la literatura para un electrolizador de 2 t/día de hidrógeno de capacidad, que incluye también la compresión inicial, el almacenaje y la adaptación de los motores [Erdman, *et al.*, 2004]. Esta producción permite sustituir al combustible automotor necesario para transportar la cantidad diaria de caña que procesa la fábrica.

El cálculo se hizo sobre la base real de que un camión de caña con tráiler transporta 10 t/viaje, a una distancia promedio de 10-15 km, y da 4 viajes/día. Diariamente, el camión recorre unos 100 km y gasta 30 litros de combustible automotor, equivalente a unos 8 kg de hidrógeno (2 kg por viaje). Este valor permite dar una solución de almacenamiento compatible con el volumen y capacidad de carga del camión, aún a presiones relativamente bajas. En la tabla 3 aparecen los datos más relevantes de la inversión.

Tabla 3. Inversiones para generar energía.

Indicador	Costo, MMUSD
Calderas de mayor eficiencia y presión	27
Turbogenerador de extracción-condensación	
Modificaciones a la fábrica para ahorrar vapor	2
Almacén de biomasa	1
Sistema de electrólisis para 2t/día de hidrógeno	5
Total	35

Otra manera de hacer este cálculo, aún más favorable a la producción de energía, es cuando la fábrica de azúcar se ve obligada, por obsolescencia técnica o moral, a sustituir las calderas y/o turbogeneradores. En este caso, si los sustituyese por los adecuados para producir más energía, solo sería

aplicable la diferencia entre el nuevo valor de la inversión y el tradicional. Esa diferencia es significativamente menor que el valor de 27 MMUSD que aparece en la tabla 3.

Esta cifra también puede ser reducida si los equipos sustituidos tienen un valor residual, que puede alcanzar varios millones de dólares en dependencia de su estado técnico. Adicionalmente, la puesta en vigor del Protocolo de Kyoto y del Mecanismo de Energía Limpia asociado permite que los países subdesarrollados puedan acceder a los «créditos de carbón» como una ayuda al financiamiento de inversiones en energía renovable. A los precios actuales de los créditos de carbón (20-25 Euro/t), su venta pudiera significar un ingreso adicional de 4 MMUSD/año.

En lo que respecta al costo de la energía, en la tabla 4 aparece un estimado para el total de la operación de la nueva área energética. En el mismo se supone un costo para el bagazo y los residuos de la cosecha vinculado sólo a su recolección, almacenaje y manipulación. El costo del resto de los componentes se calculó en base al gasto real en instalaciones similares.

Aquí también es aplicable lo dicho para las inversiones de que la parte azucarera reduce sus costos, al no tener que asumir los costos de operación o mantenimiento del área energética, por ejemplo.

Tabla 4. Costo de producir energía

Componente	Costo anual, MMUSD
Bagazo	1,0
Residuos de la cosecha	0,5
Mantenimiento, 5%	1,8
Energía	0
Salarios de 80 trabajadores	0,5
Otros insumos	0,3
Costo del capital de trabajo, 8%	0,4
Otros gastos, 8%	0,3
Total	4,8

En lo que respecta a los ingresos (Tabla 5), se ha considerado para la electricidad un precio de 6 US¢/kWh, inferior al costo del kWh fósil, con menor pérdida en línea. La producción de hidrógeno consume 40 kWh/kg [Gielen y Fulton, 2004] (80 000 kWh/día o 3 MW de potencia), aunque durante todo el año que se añadió al consumo de 8-9 MW de la fábrica de azúcar en zafra (54 GWh), se consideró que el hidrógeno sustituiría a la gasolina en la proporción de 1:3, con un precio de 600 USD/t inferior al actual.

Tabla 5. Ingresos asociados a la energía

Producto	Por año	Precio	Ingreso
Electricidad	162 GWh	6 US¢/kWh	9,7
Hidrógeno	600 t	600 USD/t x 3	1,1
Crédito de carbón	200 000 t	20 USD/t	4,0
Total			14,8

Una pregunta interesante es: ¿a qué costo se obtiene el hidrógeno? En el análisis se consideró que su precio de oportunidad era el del combustible que sustituía, o unos 1 800 USD/t, mientras que su precio internacional es de 2 000-4 000 USD/t [*Hydrogen...*, 2003]. Una respuesta más completa dependería de cómo se distribuyan los costos entre el hidrógeno y la electricidad. Si el costo del kWh estuviese en un rango tan atractivo como 2,0-2,5 US¢, el costo del hidrógeno sería inferior a 800 USD/t.

Estas consideraciones deben ser comprobadas en la práctica, para lo que se propone ejecutar un Proyecto piloto, en pequeña escala.

Las alternativas propuestas no comprometen el uso del azúcar para hacer alcohol, o de los residuales para biogás, que serían otros portadores energéticos factibles de ser producidos. Todas estas soluciones se caracterizan por reducir la dependencia de los combustibles importados y las pérdidas por transmisión, ser compatibles con el entorno y no contaminar el medio ambiente ni incrementar el efecto invernadero.

El Proyecto

Se propone un proyecto para producir hidrógeno en un electrolizador de 0,4 kg/h alimentado con electricidad sobrante de una fábrica de azúcar, comprimido hasta 10 bar —presión usual en la industria— y almacenado en contenedores de 2 m³ con 1,5-2 kg de hidrógeno cada uno. Los cálculos realizados evidencian que un contenedor es suficiente para transportar la caña a una distancia promedio de 10-15 km y retornar en un camión cuyo carburador se haya adaptado a quemar hidrógeno.

El objetivo del proyecto sería obtener, en dos campañas, información para escalado, almacenamiento, transportación y seguridad del trabajo, comportamiento del motor y del sistema de tiro de caña, y realizar cálculos técnico-económicos para promover el uso de tecnologías eficientes de conversión y almacenamiento de energía sobrante. Se estima la magnitud de la contribución externa en 200 000 USD, que incluiría el suministro del electrolizador, compresor y accesorios para modificar el carburador, así como la asistencia técnica y los intercambios. Las etapas del proyecto serían:

1. Instalar un electrolizador de 10 kg/día y llenar 4 tanques de 2 m³ a 10 bar.
2. Convertir 400 kWh/día de electricidad de biomasa renovable en 10 kg H₂ para cuatro viajes de 10-15 km de recorrido, en un camión con motor adaptado.
3. Evaluar el sistema cogeneración-electrólisis-H₂-camión-tiro de caña-recarga.

4. Obtener información para escalado, almacenamiento, transportación, seguridad, comportamiento del motor y del sistema, y cálculos económicos.

Conclusiones

Se demuestra que la producción de energía de la caña de azúcar muestra resultados superiores a otras biomásas por ser menor la inversión, estar distribuido el riesgo entre varios productos, ser conocida la tecnología agrícola e industrial, aportar portadores que reducen el efecto invernadero, bajo costo de la electricidad y réplica en 81 países subdesarrollados. Se demuestra la factibilidad de producir hidrógeno «azucarero», barato y renovable, para sustituir combustible automotor fósil en la transportación local de caña, y se fundamenta un proyecto para evaluar los problemas de escalado, almacenamiento y transportación; seguridad del trabajo, comportamiento del motor y del sistema, y resultados económicos.

Bibliografía

AGUILAR, A., ET AL. «Cane Agricultural Waste Fuel Potential and Available Technology». *Proc. XXII ISSCT*, Colombia, 1996.

Special Report of the UK Royal Commission for the Use of Biomass for Heat and Power Production. «Biomass as a Renewable Energy Source», may., 2004.

CUBAN MINISTRY OF SCIENCE. «Energetic cane», *Research Project 171*, oct., 2001.

ERDMAN, G., ET AL. «Hydrogen Infrastructure Investment Strategies», 3rd International Conference on Applied Infrastructure Research, Berlín, oct., 2004.

Final Report Project CUB.G41/95. «Feasibility Study on H. Molina Sugar Mill», 1999.

GIELEN D. Y L. FULTON. «Current IEA analysis on Hydrogen», International Energy Workshop IEA, jun., 2004.

Climate Technology Sheet. «Hydrogen Production», No. 9, nov. 2003.

ICIDCA. *Manual dos derivados da cana-de-açúcar*. ABIPTI, Brasil, 1999.

Diseño industrial y energía solar térmica, estudio de caso: la cocina solar portátil

Case study on industrial design and solar thermal energy: the portable solar cooker

Luis Octavio González Salcedo y Julio César Lozano Figueroa***

** Ingeniero Civil, Máster en Ciencias, Profesor Asociado, Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Colombia.*

*** Diseñador Industrial, Universidad Nacional de Colombia, Sede Palmira, Colombia.
e-mail: logonzalezsa@unal.edu.co y octavilento@yahoo.es*

Resumen

Se proponen diez alternativas de cocina solar bajo parámetros del diseño industrial y para el uso en actividades de camping. Las alternativas fueron evaluadas en varios aspectos, como costo de producción, facilidad de transporte, funcionamiento; a la alternativa seleccionada, denominada diáfana —cocina solar portátil—, le fueron incluidas algunas especificaciones técnicas, planos de producción y manual del usuario.

Palabras clave: Cocina solar, energía solar térmica, diseño industrial.

Abstract

In this paper we propose ten alternatives of solar cookers to be used in camping activities that were made taking into account industrial design parameters. The alternatives were evaluated considering the following aspects: cost of production, easiness to handle and functionality. The selected alternative, named portable solar cooker, accounts with, production drawing, technical specifications and user's manual.

Keywords: Solar cooker, solar thermal energy, industrial design.

Introducción

A partir de la localización de los problemas energéticos en la población mundial en general, y sobre todo en la población de bajos recursos, se observa la problemática acerca del sostenimiento del desarrollo social vinculado a la cuestión energética. Se decide explorar con la aplicación de la energía solar porque es la energía alternativa más fácilmente obtenible y aprovechable. Desde la época moderna, en muchos países los combustibles fósiles han tomado el relevo de la leña de otra época, pero aún en muchas zonas ésta es la única fuente de energía térmica, incluso de combustible disponible. Debido a ello, la provisión de leña condiciona la localización y el tamaño de los asentamientos en función del entorno proveedor de la madera de los bosques cercanos, o de otras fuentes de biomasa.

Esta leña ha representado también la forma tradicional de aportar energía para cocer alimentos, pues aparte de las necesidades energéticas situadas en el

campo de los transportes, de la producción de utensilios, ropas y vivienda, etc., está la que permite cocinar alimentos, ya que algunos de ellos necesitan elaboraciones térmicas previas para facilitar su asimilación. Esta opción tecnológica aparece hoy día prácticamente como la única alternativa, en algunos países en vías de desarrollo, para resolver algunas de sus necesidades energéticas, puesto que las otras fuentes de energía presentan graves problemas de aprovisionamiento. En los países con mayores posibilidades energéticas también se muestra como un sistema deseable de aplicar, por ofrecer una vía para avanzar en la solución de los problemas medioambientales, nacidos a raíz de sus sistemas de alto consumo energético centrados en los combustibles fósiles.

Desde los albores del género humano, las artes culinarias han facilitado esta labor de elaboración previa de los alimentos hasta su consumo. La energía térmica suministrada por la combustión de la leña ha sido, hasta muy recientemente, la forma mayoritaria de aportar esta energía y aún lo es hoy para unos 2 500 millones de seres humanos. Esto corresponde a una media de consumo de 360 kg de leña per cápita al año, pues se da un rendimiento muy bajo en su utilización (5%). Tales necesidades de madera son ya insostenibles en distintos lugares del planeta, estableciéndose un déficit de mil millones de metros cúbicos de madera anualmente; junto a todo ello, se le añaden desastrosos problemas medioambientales en el transcurso de su aprovisionamiento. Recurrir a otras fuentes energéticas, como la de los combustibles fósiles, acarrearía a su vez, en el caso de ser posible, nuevos problemas ambientales y también económicos.

Las crisis energéticas generalizadas y el encarecimiento gradual de las fuentes convencionales dejan de ser accesibles a una gran franja social, obligando a optimizar los recursos técnicos e intelectuales. Además, se considera fundamental valorar e integrar el uso de energías alternativas en la cocción de alimentos para disminuir de esta manera el impacto medioambiental global. Buena parte de los alimentos necesitan una preparación previa culinaria, no solo por razones gastronómicas, sino también para facilitar su digestibilidad y seguridad alimentaria. Las cocinas solares se presentan como la solución idónea para estos problemas, y a la par brindan otros campos de utilización, siempre con el carácter favorable tanto desde el punto de vista ecológico como económico. En primer lugar, ofrecen un sistema simplificado de cocinar, con ahorro de dinero, al no necesitar ningún aporte de combustible u otra fuente de energía que no sea la solar directa libre y gratuita, todo ello acompañado de otras múltiples ventajas, como mayor seguridad en la operación de cocinar y calidad nutricional de los alimentos cocinados.

Metodología

Se realizó una descripción del usuario, dirigiéndose el proyecto a sectores sociales con gusto por las actividades de campo, el interés por la naturaleza y que además deseaban explorar otras formas de energía que contribuyeran a disminuir el impacto ambiental. Al igual que las otras cocinas solares, también está dirigida a personas marginadas y de bajos recursos que por su condición tienen difícil acceso a las fuentes tradicionales de energía debido al alto costo de estas.

Se determinaron las condiciones específicas de uso, a saber: materiales de alto aislante térmico, materiales de fácil limpieza, componentes removibles, percepción

de seguridad, percepción de que sí se puede cocinar, facilidad para su transporte armado y desarmado, manipulación, limpieza, revisión y mantenimiento. De igual manera, se consideraron especificaciones de funcionalidad, como temperaturas de cocción entre 100 y 135 °C, temperatura de pasteurización de 100 °C, temperatura de limpieza de equipo médico de 65 °C, hermetismo total, y volúmenes y dimensiones mínimas. Otras consideraciones fueron tenidas en cuenta para especificaciones técnicas y formales del diseño industrial.

Para la generación de soluciones se utilizó el método de diagrama morfológico, que generó el fenómeno «explosión combinatoria», el cual presenta la gama completa de elementos, componentes o soluciones secundarias que pueden combinarse para formar la solución al proyecto de la cocina solar portátil. El número de combinaciones posibles de este caso sería de 256, e incluye no solo las soluciones convencionales existentes, como la de caja de cartón, sino también una amplia gama de variantes y soluciones completamente novedosas. La figura 1 muestra el diagrama morfológico del proyecto, y la figura 2 presenta las alternativas formales del proyecto que fueron inicialmente evaluadas.

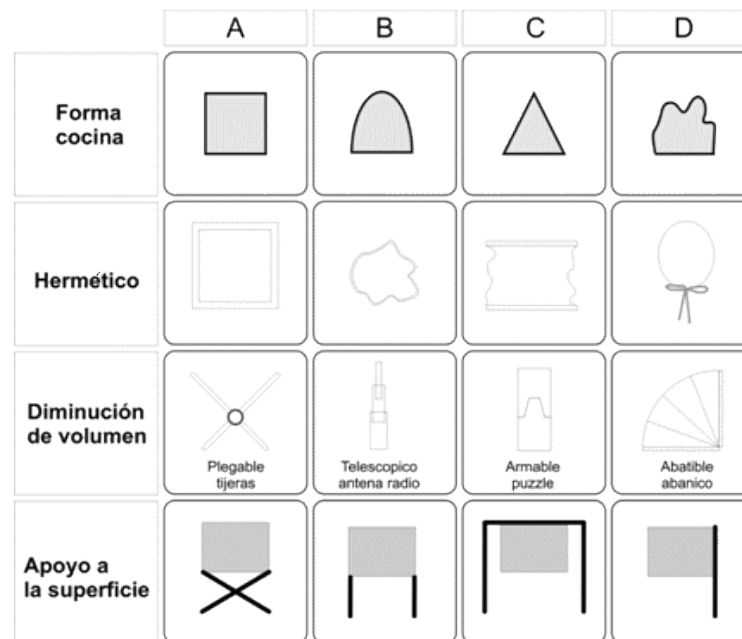


Fig. 1. Diagrama morfológico para el diseño de una cocina solar portátil.



Fig. 2. Alternativas formales para el diseño de una cocina solar portátil.

Las propuestas fueron evaluadas en una matriz de calificación, con una escala de 1 a 3, donde el valor de tres (3) es el más alto y por lo cual se considera óptima la respuesta del criterio de selección expuesto, a saber: hermetismo, disminución de volumen, costo, facilidad de armado, seguridad para el usuario, y aspecto formal (estético). La matriz completamente diligenciada se muestra en los resultados. Se consideraron también los factores antropométricos, mostrados en la figura 3.

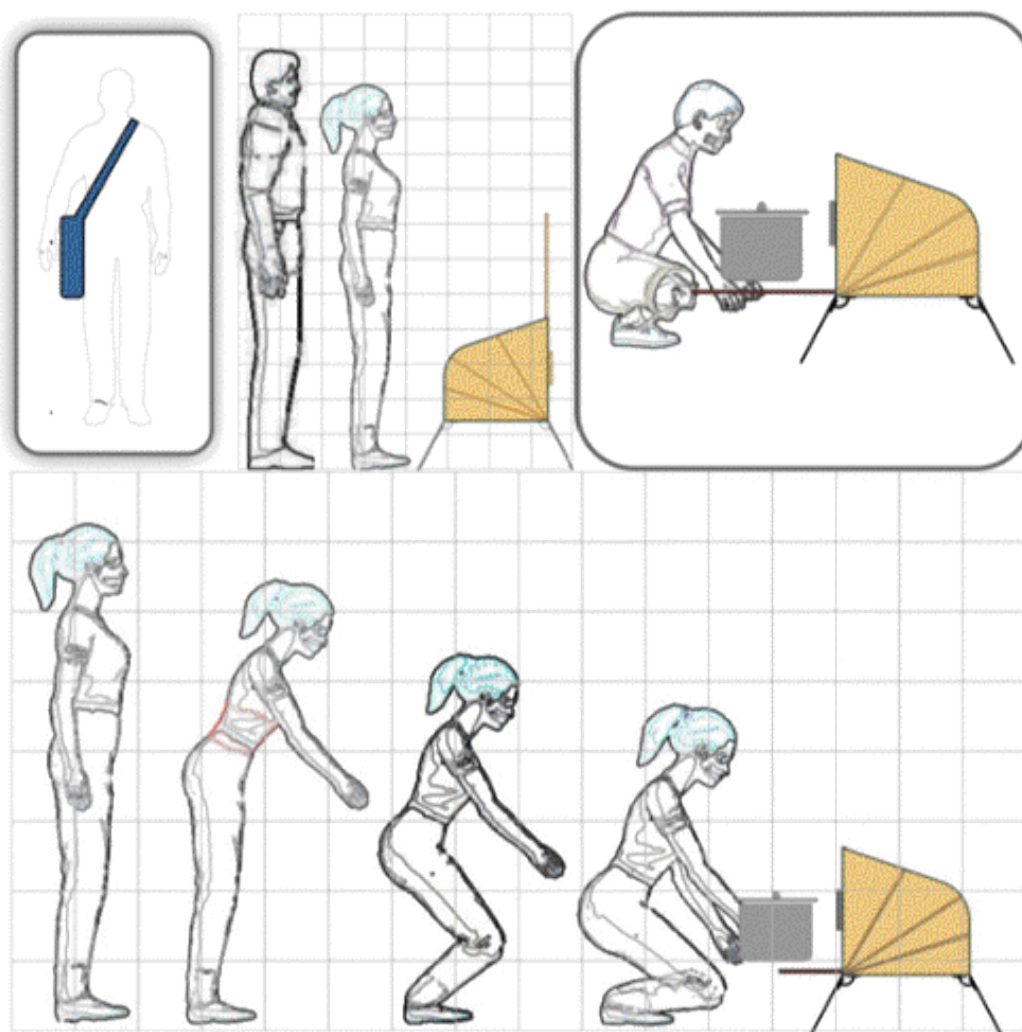


Fig. 3. Esquematización de factores antropométricos considerados en el diseño de la cocina solar portátil.

Resultados

La tabla 1 muestra la evaluación realizada para las propuestas presentadas. La propuesta más adecuada se denominó *diáfana* y se detalló con las especificaciones correspondientes, descritas más adelante.

Tabla 1. Evaluación de propuestas de cocina solar portátil

	Propuestas									
Criterio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Hermetismo	2	2	2	3	2	3	3	1	3	3
Disminución del volumen	3	2	1	2	2	3	3	2	2	3
Costo	2	1	1	1	1	3	3	2	2	3

Facilidad de armado	3	1	1	1	1	3	3	1	1	3
Seguridad para el usuario	1	1	2	3	2	2	2	1	3	1
Formal estético	1	1	2	2	2	2	3	3	2	2
Total	12	8	9	12	10	16	17	9	14	15

Se definió el objeto como una cocina solar portátil para cocinar alimentos y pasteurizar agua, en actividades de campo, que aprovecha la energía solar a través del efecto invernadero. Sus partes y componentes se aprecian en la tabla 2.

Tabla 2. Sistemas y subsistemas de la cocina solar diáfana

Sistema	Subsistema	Material
Superficial	Superficie interior	Fibra de vidrio
	Superficie aislante	Fibra de poliestireno
	Superficie exterior	Fibra de yute
	Superficie transparente	Fibra de poliestireno doble
Estructural	Base	Madera
	Puerta	Madera
	Superficie reflectora	Madera acabados brillantes
	Rieles	Metal
	Apoyos	

La imagen corporativa propuesta se muestra en la figura 4. Se diseñó una secuencia de armado que se muestra en la figura 5, y la gama de colores del producto definida, en la figura 6.



Fig. 4. Imagen corporativa de la cocina solar portátil.

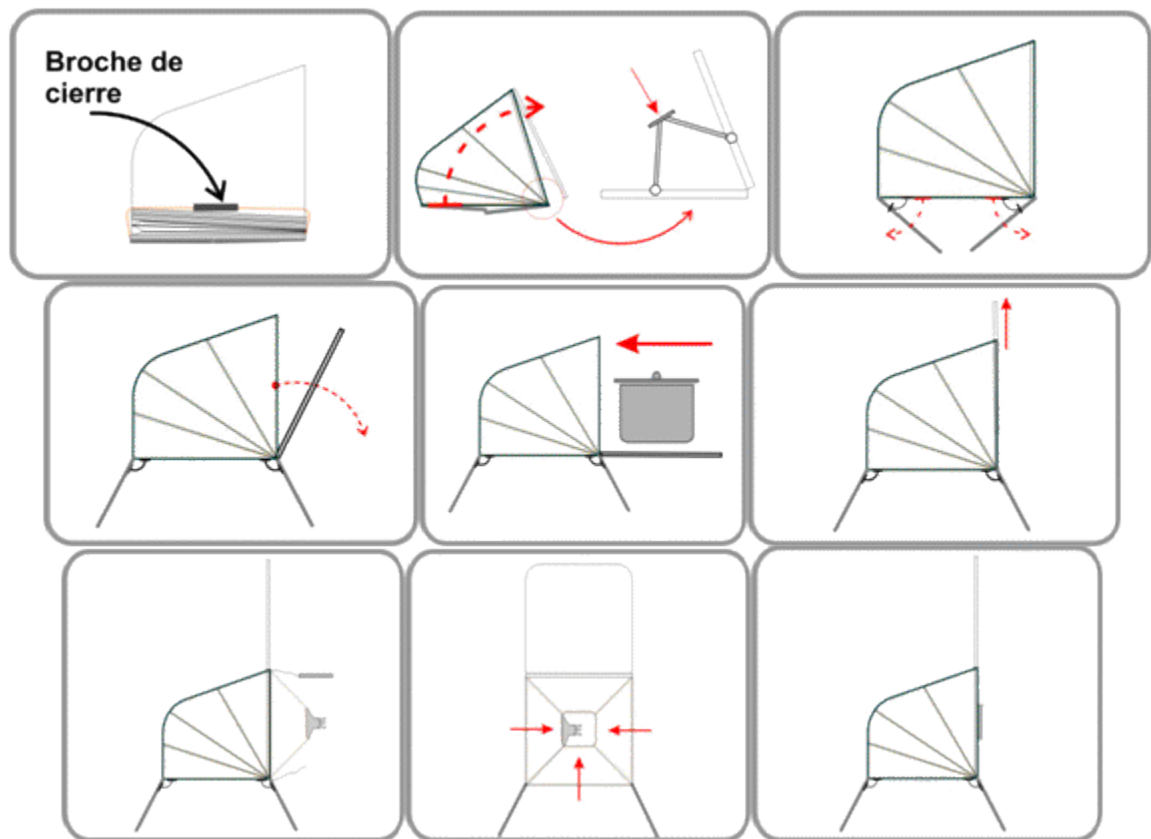


Fig. 5. Secuencia de armado de la cocina solar portátil diáfana.

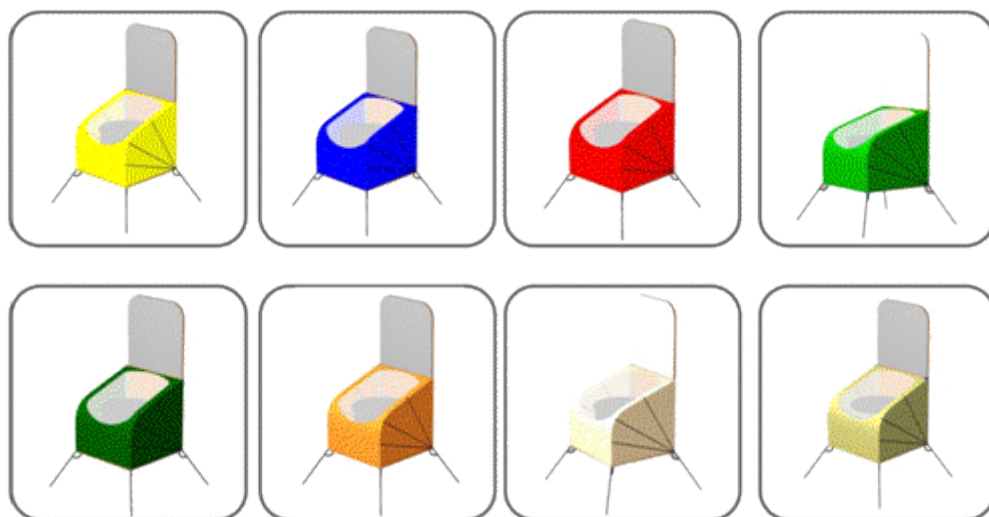


Fig. 6. Propuestas de color.

Conclusiones

- El trabajar sobre la energía solar, especialmente en la cocción de alimentos, ha sido poco explorado en el diseño industrial, por lo que vale la pena tener en cuenta la energía solar, que por ser un campo relativamente nuevo puede generar nuevas expectativas laborales y al mismo tiempo colaborar con el planeta.
- Debemos señalar que para producir un impacto real en la sociedad, en lo referente a este tema, es necesario que se multipliquen suficientes proyectos orientados hacia esta forma de encarar la problemática energética global.
- Se comprendió la profundidad de la problemática energética al involucrarla de manera activa en el desarrollo y ejecución de las propuestas para solucionar estos problemas.
- Para tener en cuenta en la vida diaria este tipo de soluciones, es fundamental producir un cambio de mentalidad en la forma de encarar los problemas energéticos cotidianos.
- En el trabajo realizado se estudiaron las diferentes propuestas de materiales, formas, texturas y colores, con el fin de ampliar la gama de posibilidades de las cocinas solares en actividades de campo.
- El proyecto solamente pretendía generar una sola propuesta concreta, pero consideramos que puede seguir generando una línea de productos más atractivos a los usuarios.
- Para conseguir una temperatura uniforme en todos los puntos de la cocina solar, es conveniente utilizar una cuarta superficie en malla con un material sintético, para así disminuir la circulación del aire, ya sea caliente o frío, Esto añadirá una desventaja: aumentaría el peso total.
- Se recomienda, en los procesos de manufactura del producto para la tintura y acabado, realizarlos en poliéster, teñido con un agente absorbente a la luz y a los rayos ultravioleta (UV).
- Para reducir la inflamabilidad y mejorar la abrasión, se recomienda dar al tejido una capa de acrílica o resina de poliuretano.
- Las comprobaciones y simulaciones que se sugieren en la siguiente etapa del proyecto son:
 - Resistencia a la tracción: longitudinal y transversal.
 - Resistencia a la separación entre capas.
 - Deformación bajo cargas constantes.
 - Comportamiento al desgaste.
 - Permeabilidad al aire.
 - Comportamientos detergentes.
 - Comportamiento al ensuciamiento y limpieza.
 - Inflamabilidad.
 - Estabilidad dimensional.
 - Fuerza de costuras.
- En el desarrollo y evaluación del proyecto se recomienda incluir un sistema electrónico para medir la temperatura y facilitar el tiempo de cocción.
- El precio de la fibra no desempeña un papel muy significativo a la hora de decidir qué tipo de fibra utilizar para el producto final, y la competencia.

Bibliografía

- BUIGUES, NOLLENS Y ROJOS. *Desarrollo y construcción de sistemas alternativos de cocción. 1ra. etapa cocinas solares*. Asades 18, t. II (7.19-7.26), 1995.
- DURÁN, ET.AL. *Adopción de cocinas solares. Motivando a la comunidad*. Resúmenes de Asades, 1991.
- ESTEVEZ. *Manual de autoconstrucción de cocinas y hornos solares*. Asades, 1991.
- . *Cocina solar abierta de reflector plano*. Asades, 1996.
- GARCÍA, J. «La cocina solar. Un sistema de aprovechamiento directo de la energía solar para cocer los alimentos y para otras aplicaciones». *Biblio 3W, Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*, Universidad de Barcelona, Vol. V No. 376, 25 de mayo de 2002.
- LOZANO, F. «Diseño de una cocina solar portátil para actividades de camping». Trabajo de grado (Diseñador Industrial). Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira. Palmira, 2006.
- NANDWANI SHYAM, S. *La cocina/horno solar. ¡Hágala Usted mismo!* Costa Rica: E Fundación Universidad Nacional (FUNA), 1993.
- Principios de diseño de la cocina solar*. Solar Cookers International. Aalfs, Marck Seattle, USA.
- RAMÍREZ, RAFAEL. «Estudio experimental del rendimiento absoluto del un horno solar en el clima de Costa Rica», Presentación en el 1er. Congreso Iberoamericano de Energía Renovable y 3er. Congreso Latinoamericano de Cocinas Solares, realizado en La Ceiba, Honduras, 2001.

Evaluación de los sistemas de vapor en industrias de procesos mediante un uso combinado de herramientas computacionales

Evaluation of steam-driven systems in processes industries by means of the combined use of computational tools

*Osvaldo Gozá León, Osney Pérez Ones y Héctor Pérez de Alejo Victoria.
Facultad de Ingeniería Química,
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE), Cuba.
e-mail: ogoza@quimica.cujae.edu.cu*

Resumen

Los sistemas energéticos que utilizan agua como agente de transformación para la producción de potencia mecánica, potencia eléctrica y energía calorífica se encuentran entre los más comunes en las industrias de procesos. Para el análisis del uso de la energía en estos sistemas los programas de computación, y en especial los programas de simulación, son de gran valor y utilidad. En el trabajo se presentan las características fundamentales de tres herramientas computacionales y su aplicación al análisis del sistema de vapor de una destilería de alcohol: dos de propósito general bajadas de Internet —el simulador de sistemas de vapor Steam System Assessment Tool (SSAT) y el programa Steam System Scoping Tool (SSST)— y una de propósito específico desarrollada por los autores, el programa de simulación STA. Se analiza cómo la aplicación combinada de estas herramientas facilita grandemente el planteamiento de un grupo de medidas, avaladas técnica y económicamente, que conllevan un uso más eficiente de la energía en la fábrica y una reducción de su impacto ambiental.

Palabras clave: Sistema de vapor, simulación, computación e Internet.

Abstract

The energy systems that use water as transformation agent in the production of mechanical power, electric power and heat are among the most common in the processes industries. To analyze the use of energy in these systems, softwares and particularly simulation software are very useful. In this paper we present the main characteristics of three computational tools and the analysis of their application to the steam-driven system of an alcohol distillery: two are of general purpose tools downloaded from Internet – the simulator of steam-driven systems Steam System Assessment Tool (SSAT) and Steam System Scoping Tool (SSST) – and one of specific purpose developed by the authors, the STA simulation software. In this paper we analyze how the combined application of these tools largely facilitates the proposal of a group of

measures, technically and economically endorsed, that involves a more efficient use of energy in the factory and a reduction of its environmental impact.

Keywords: Steam-driven system, simulation, computing and Internet..

Introducción

Los sistemas energéticos que utilizan agua como agente de transformación para la producción de potencia mecánica, potencia eléctrica y energía calorífica conocidos como sistemas de vapor se encuentran entre los más comunes en las industrias de procesos. En la figura 1 se muestra una representación esquemática de sus componentes fundamentales.

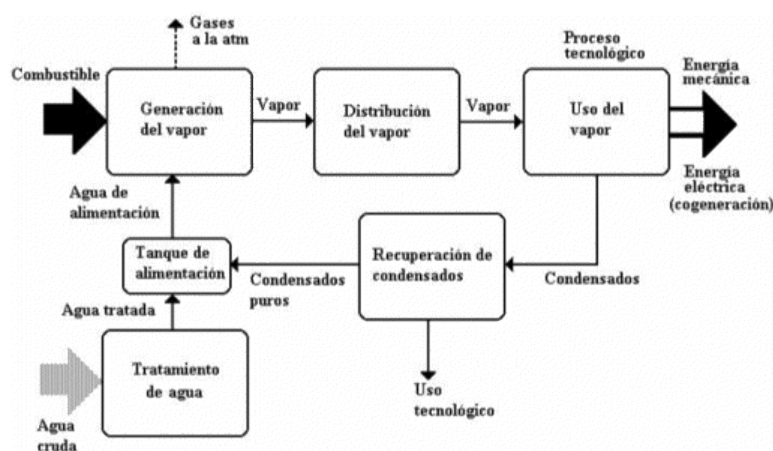


Fig. 1. Representación esquemática de un sistema de vapor.

Para el análisis del uso de la energía en estos sistemas se utiliza una estrategia general, ya aplicada exitosamente [Gozá, *et al.*, 2005], que consta de los siguientes pasos:

1. Caracterización tecnológica del proceso y de su sistema de vapor.
2. Identificación de problemas que afectan la eficiencia energética (caso base).
3. Planteamiento de alternativas de solución (alternativas propuestas).
4. Selección técnico-económica de las mejores alternativas.

Para la ejecución de los pasos 2, 3 y 4 se han utilizado tres herramientas computacionales fundamentales: dos de propósito general bajadas de Internet —el simulador de sistemas de vapor SSAT y el programa SSST— y una de propósito específico desarrollada por los autores, el programa de simulación TERMOAZÚCAR.

Este trabajo tiene como objetivo presentar las características fundamentales de las tres herramientas y analizar cómo su aplicación combinada facilita grandemente el planteamiento de un grupo de

medidas, avaladas técnica y económicamente, que conllevan un uso más eficiente de la energía en la fábrica y una reducción de su impacto ambiental.

Herramientas computacionales bajadas de Internet

El sitio <http://www.oit.doe.gov/bestpractices/> ofrece la posibilidad de bajar una cantidad grande de documentación técnica y de software. De aquí se obtuvieron los programas Steam System Assessment Tool (SSAT) y Steam System Scoping Tool (SSST), concebidos ambos para los ingenieros encargados de la operación y dirección de los sistemas de vapor en la industria.

El programa SSST permite efectuar una valoración cualitativa de los sistemas de vapor, mientras que el programa SSAT facilita realizar una valoración cuantitativa; sus características fundamentales de los mismos se describen a continuación.

Steam System Scoping Tool (SSST)

Tiene como objetivo realizar una valoración cualitativa de la eficiencia del sistema de vapor en comparación con prácticas de operación eficiente. Para ello utiliza un sistema de puntuación de un grupo de factores de relevancia en la eficiencia de un sistema de vapor.

Esta herramienta es de gran ayuda, específicamente para:

- Desarrollar una mayor conciencia de las oportunidades de mejoras en el sistema.
- Identificar acciones que reduzcan sustancialmente los costos de operación del sistema.
- Permitir evaluar las operaciones de sistema contra las mejores prácticas establecidas.

El programa incluye las siguientes secciones:

1. Perfil del sistema de vapor:

- o Costos de vapor
- o Patrones de comparación.
- o Mediciones del sistema de vapor.

2. Prácticas de operación en el sistema de vapor:

- o Mantenimiento de las trampas de vapor.
- o Programa de tratamiento de agua.
- o Aislamiento del sistema de vapor.
- o Fugas de vapor.
- o Golpe de ariete.
- o Mantenimiento de los equipos del sistema de vapor.

3. Prácticas de operación en la planta de generación de vapor:

- o Eficiencia del generador de vapor.
- o Equipos de recuperación de calor.
- o Generación de vapor seco.
- o Operación general del generador.

4. Prácticas de operación en sistemas de distribución y uso del vapor, y recuperación de condensados:

- o Minimización del flujo de vapor a través de válvulas reductoras de presión.
- o Uso y recuperación de los condensados disponibles.
- o Uso del condensado de alta presión para obtener vapor de baja presión.

5. Resumen de los resultados.

En estas secciones el usuario tiene que responder 26 preguntas sobre los aspectos señalados, a cuyas respuestas se le otorga una puntuación.

En cada una de estas secciones se explica qué se debe hacer y por qué es importante cada uno de los aspectos que se evalúan, lo que ayuda mucho a ratificar los conceptos fundamentales.

Finalmente el programa ofrece una calificación global de todo el sistema, tanto en valor absoluto (puntos de un máximo de 340) como porcentual.

Steam System Assessment Tool (SSAT)

El objetivo de este programa es realizar una simulación aproximada de los sistemas de vapor e identificar los potenciales de ahorro que se pueden obtener efectuando un grupo de medidas o proyectos. Está orientado al uso de todos los ingenieros involucrados en la operación y/o dirección de los sistemas de vapor en las industrias de proceso.

Este software corre sobre hojas de Excel y está formado por cinco hojas de cálculo:

Hoja 1 (Input): En esta hoja se realiza la entrada de datos del sistema en las condiciones actuales o caso base (*current operation*).

Un resumen de la información que pide es el siguiente:

- o Combustible utilizado en el generador de vapor.
- o Presión y temperatura del vapor generado.
- o Tanto por ciento de agua purgada en la caldera, ¿se realiza flasheo y recuperación del calor?
- o Deareador: presión de operación y porcentaje de venteo.
- o Turbinas de condensación y/o de contrapresión: rendimiento, generación eléctrica o flujo de vapor consumido.

- o Uso de atemperadores a la salida de válvulas reductoras, temperatura del agua utilizada.
- o Presión y consumo de vapor en cada nivel o línea de vapor.
- o En cada nivel de presión la cantidad total de trampas de vapor, la cantidad de trampas de vapor defectuosas y el tiempo aproximado transcurrido desde su último mantenimiento.
- o En cada nivel de presión, la magnitud aproximada de las fugas de vapor.
- o Estimado de las pérdidas de calor por aislamiento en el sistema de distribución de vapor.
- o Porcentaje de recuperación de condensados puros y su temperatura.
- o Temperatura y costo del agua de reposición.
- o Electricidad comprada o vendida por la fábrica.
- o Costo del agua de reposición.
- o Costo de la electricidad.
- o Costo del combustible.
- o Horas de operación al año.

Hoja 2 (Model): Esta hoja muestra el esquema del sistema de vapor que se debe evaluar y reflejar la información suministrada en la hoja 1. Existen tres posibles configuraciones para el sistema de vapor: un nivel, dos niveles y tres niveles de presión.

Hoja 3 (Project Input): Hoja en la que se definen los proyectos o alternativas a simular con el objetivo de mejorar el sistema. Las alternativas consideradas son:

- Cambio de combustible.
- Cambio del rendimiento térmico del generador de vapor.
- Cambio de la purga en caldera.
- Realizar el *flasheo* de la purga.
- Cambio en las condiciones del vapor generado.
- Cambios en el rendimiento y modo de operación de las turbinas
- Instalación de nuevas turbinas de contrapresión y/o condensación.
- Instalación de equipos para la recuperación del calor de la purga y los condensados.
- Incremento de la recuperación de condensados puros.
- Reducción de las pérdidas de vapor en las trampas y de las fugas de vapor en tuberías.
- Mejoramiento del aislamiento de las tuberías de distribución.

Hoja 4 (Project Model): Es análoga a la hoja 2, pero muestra los cambios especificados en la hoja 3.

Hoja 5 (Results): Muestra todos los resultados, tanto del caso base como de los proyectos de mejoras, con evaluaciones económicas y medioambientales en valores absolutos y porcentuales.

Programa de simulación TERMOAZÚCAR

TERMOAZÚCAR es un simulador del tipo modular-secuencial en estado estacionario concebido para realizar la evaluación de los sistemas de vapor de las fábricas de azúcar. El programa ha sido desarrollado por los autores, y sus características y aplicaciones se han presentado en diversos eventos científicos y publicaciones [Gozá, *et al.*, 2002 y Gozá, *et al.*, 2003].

La naturaleza modular secuencial le confiere las principales ventajas y características a este tipo de simuladores, como son: posibilidad de obtener gran cantidad de información precisa sobre los equipos y corrientes del proceso, fácil adición de nuevos módulos de cálculo, y gran flexibilidad para la representación detallada de cualquier configuración de los sistemas de vapor en fábricas de azúcar crudo y refino. Actualmente se trabaja en los módulos de cálculo, que permiten simular destilerías de alcohol hidratado.

Los resultados del cálculo están dados por la solución completa de los balances de masa y energía y la evaluación de parámetros de comportamiento de los equipos integrantes del sistema de vapor, tanto los correspondientes a la zona de alta presión como los equipos consumidores de vapor en el proceso tecnológico.

Aplicación combinada de las herramientas computacionales

Los programas SSST y SSAT son herramientas computacionales que pueden ser aplicadas para la evaluación de los sistemas de vapor en cualquier industria de procesos, mientras que el programa de simulación TERMOAZÚCAR está concebido específicamente para ser aplicado en la evaluación sólo de los sistemas de vapor de las fábricas de azúcar y alcohol.

El uso combinado de estas herramientas permite aprovechar las características y ventajas de cada una, lográndose una complementación que contribuye a una evaluación más rápida y completa de los sistemas de vapor. Dichas herramientas han sido aplicadas satisfactoriamente en la evaluación de los sistemas de vapor de distintas fábricas [Gozá, *et al.*, 2005 y Gozá, *et al.*, 2004].

La simulación de procesos es una potente herramienta en la cual se apoyan fuertemente las industrias químicas de avanzada para mantener y aumentar su competitividad. En la solución de problemas de ahorro de energía se ha reconocido que las aplicaciones de la simulación son tan amplias como el mismo campo de la energía, siendo especialmente útil en la formulación de estrategias energéticas que consideren los costos fluctuantes de la energía y de los precios de los productos. Dada la complejidad de los sistemas de vapor en las industrias de procesos, la simulación por computadora constituye una herramienta muy valiosa en la solución de los balances y el estudio de alternativas que permitan, de forma sistémica, establecer las tendencias de comportamiento para distintas condiciones de operación y disponibilidad de equipamiento. De

esta manera, la simulación brinda la posibilidad de estudiar los procesos de una forma más rápida, económica y completa que en la planta real, en la que en muchas ocasiones resulta imposible o muy costoso estudiar las condiciones extremas de operación.

En las aplicaciones mencionadas el programa de simulación TERMOAZÚCAR ha permitido realizar el cálculo riguroso de los consumos de vapor en el proceso tecnológico y en la zona de alta presión (turbinas y turbogeneradores de vapor), del consumo de combustible en los generadores de vapor, así como de los indicadores de comportamiento de estos equipos para distintas configuraciones y cualquiera que sea su cantidad, lo cual no es posible con los programas SSST y SSAT.

A modo de ilustración, para el caso de un intercambiador de calor y de un turbogenerador de vapor, el programa TERMOAZÚCAR calcula los siguientes indicadores de comportamiento:

1. Intercambiador de calor:

- Velocidad dentro de los tubos.
- Coeficiente de transferencia de calor.
- Efectividad termodinámica.
- Diferencia de temperaturas a la entrada y a la salida.

2. Turbogenerador de vapor:

- o Rendimiento mecánico.
- o Rendimiento del generador eléctrico.
- o Rendimiento relativo interno.
- o Rendimiento relativo del turbo-grupo.
- o Consumo específico de vapor real y teórico.
- o Condiciones del vapor de escape (calidad o grados de sobrecalentamiento).

El programa SSAT no calcula consumos de vapor en el proceso tecnológico, siendo esta una información de entrada requerida, por lo que en el caso de los intercambiadores de calor no permite realizar ninguna evaluación.

Para el caso de los turbogeneradores solo se calcula el rendimiento relativo interno y se hace para un solo equipo.

De la misma forma, el programa TERMOAZÚCAR permite evaluar los consumos en el proceso tecnológico considerando las múltiples configuraciones que se pueden presentar y que tienen una influencia decisiva en el consumo de vapor de la fábrica, lo cual no es posible con el programa SSAT.

De esta manera se puede realizar un análisis de los sistemas de vapor con un enfoque integral y sistémico, que considera todos los equipos fundamentales del sistema y las interacciones existentes entre ellos.

El programa SSAT ha permitido integrar en la evaluación los aspectos energéticos, con aspectos económicos y medio para dimensionar ambientales no contemplados en la versión actual de TERMOAZÚCAR, lo que constituye una valiosa ayuda para la determinación de potenciales de ahorro y el planteamiento de las alternativas de solución.

Si bien la simulación que permite realizar este programa es aproximada, y necesita disponer del proceso tecnológico como información de entrada del consumo de vapor, incorpora la evaluación económica mediante el cálculo de los principales componentes del flujo de caja en un sistema de vapor que son los ingresos y egresos relacionados con combustible, agua de reposición y electricidad. También incorpora la dimensión medioambiental al calcular las emisiones a la atmósfera de CO₂, NO_x y SO_x provenientes de la combustión del combustible. A modo de ilustración, en la tabla 1 se muestra un resumen de los resultados obtenidos con el programa SSAT en la evaluación del sistema de vapor de una destilería de alcohol, en la que se consideraron como proyectos de mejoras un incremento del rendimiento térmico en la generación del vapor, la instalación de un turbogenerador de vapor de contrapresión, una reducción de las fugas de vapor en las tuberías de distribución, y un incremento en la recuperación de condensados puros.

Tabla 1. Resumen de los resultados obtenidos con el programa SSAT

Resumen de costos (miles de \$/año)	Operación actual	Con proyectos	Reducción	
Costo de la electricidad	48	-54	103	212,1%
Costo del combustible	301	252	49	16,3%
Costo del agua de reposición	6	4	3	41,1%
Costo total (en miles de \$/año)	356	201	154	43,4%
Emisiones locales	Operación actual	Con proyectos	Reducción	
De CO ₂	10 806 klb/año	9 041 klb/año	1 765 klb/año	16,3%
De SO _x	57 klb/año	47 klb/año	9 klb/año	16,3%
De NO _x	20 klb/año	16 klb/año	3 klb/año	16,3%

1 klb = 1 000 lb

El planteamiento de los proyectos de mejoras y su comparación con el caso base simulado, no solo permite el cálculo, sino también el análisis de todos los resultados.

El programa SSST es útil en la determinación primaria de potenciales de

ahorro en el sistema de vapor de la fábrica, lo que facilita el planteamiento de alternativas de solución como parte de la estrategia general de análisis. El grupo grande de explicaciones que brinda el programa, las cuales abarcan todas las áreas de un sistema de vapor, introduce elementos de análisis y ayuda mucho a la integración de los conceptos fundamentales necesarios.

El uso combinado de estas tres herramientas computacionales permite que la evaluación de los sistemas de vapor pueda integrar los aspectos técnico, económico y medioambiental, facilitándose grandemente las tareas, tanto de cálculo como de análisis, tal y como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Aspectos y tareas integradas con las herramientas computacionales

	Aspecto técnico	Aspecto económico	Aspecto medioambiental
Cálculo	TERMOAZÚCAR SSAT	SSAT	SSAT
Análisis	SSAT SSST	SSAT SSST	SSAT

Conclusiones

La aplicación combinada de las herramientas computacionales presentadas —Steam System Scoping Tool (SSST), Steam System Assessment Tool (SSAT) y programa de simulación TERMOAZÚCAR— facilita grandemente el planteamiento de un grupo de medidas, avaladas técnica y económicamente, que conllevan a un uso más eficiente de la energía en la fábrica y una reducción de su impacto ambiental. También contribuye a una mayor profundización e integración con enfoque sistémico de los conceptos fundamentales relacionados con el funcionamiento eficiente de los sistemas de vapor.

Bibliografía

GOZÁ LEÓN, O.; D. JIMÉNEZ, Y. ÁLVAREZ Y R. BANDERAS. «Evaluación del sistema termoenergético de la refinería Manuel Martínez Prieto». Publicación electrónica en las *Actas del VIII Congreso Internacional sobre Azúcar y Derivados de la Caña DIVERSIFICACIÓN 2004*, La Habana, junio de 2004. ISBN 959-7165-17-1.

GOZÁ LEÓN, O.; H. PÉREZ DE ALEJO Y J. J. FRÓMETA. «Simulación y análisis de los sistemas termoenergéticos azucareros». *Computación aplicada a la industria de procesos*. Actas del VI Congreso Interamericano de Computación Aplicada a la Industria de Procesos, CAIP'2003, celebrado del 20 al 23 de octubre de 2003 en la ciudad de Puebla, México. ISBN: 968-6254-61-7.

GOZÁ LEÓN, O.; H. PÉREZ DE ALEJO, O. PÉREZ Y T. CURBELO. «Estrategia

en el proceso de enseñanza y aprendizaje para el análisis del uso eficiente de la energía en las industrias de procesos». Pedagogía 2005, La Habana: 2005.

GOZÁ LEÓN, O.; HÉCTOR PÉREZ DE ALEJO Y MARCEL RIJCKAERT. «Use of Simulation and Expert Systems to Increase the Energy Efficiency in Cane Sugar Factories». *Developments in Chemical Engineering & Mineral Processing*. The Australasian Research Journal, Curtin University of Technology, Australia, Special Issue on Practical Applications of Process Systems Engineering, 10 (1/2), 2002. ISSN 0969-1855.

Modelación y simulación de un sistema de rueda desecante para el acondicionamiento del aire en Cuba

Modeling and simulation of an air conditioning system for Cuba based on a desiccant wheel

Yunesky Masip*, Tania Carbonell Morales* y Michel DePaepe**

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

** St.-Pietersnieuwstr. 41, B-9000 Gante, Bélgica.

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

Resumen

El trabajo presenta la modelación de un deshumidificador desecante rotatorio para la deshumidificación del aire de ventilación de un sistema de acondicionamiento de aire. Usando los métodos de solución de las ecuaciones diferenciales, se obtuvieron ecuaciones que permiten predecir el comportamiento de la rueda desecante, cuando se varían las condiciones de operación con el objetivo de obtener la mayor eficiencia en el proceso de acondicionamiento del aire. Para la simulación del sistema se desarrolló un software en Visual Basic 6.0, el cual permite obtener las condiciones del aire a la salida del deshumidificador como una función de variables físicamente medibles.

Palabras clave: Rueda desecante, deshumidificador desecante rotatorio, transferencia de calor y masa, sistema de acondicionamiento de aire y software.

Abstract

The paper presents the modeling of a desiccant wheel dehumidifier for the dehumidification of ventilation air in an air conditioning system. Using methods of solving differential equations, we obtained the differential equations that enable predicting the performance of the desiccative wheel, when the operating conditions are changed with the objective of augmenting the efficiency in the air conditioning process. For the simulation of the system it was developed a software in Visual Basic 6.0, which enables obtaining the conditions of the air at the outlet of the dehumidifier as a function of measurable variables.

Keywords: desiccant wheel, rotatory desiccant dehumidifier, heat and mass transfer, air conditioning system and software

Introducción

En el proceso de enfriamiento con sustancias desecantes, el aire fresco es deshumidificado y enfriado sensiblemente antes de ser enviado al espacio condicionado. Estos sistemas trabajan sin fluidos fluorocarbonados y además permite aprovechar fuentes de energía en desecho, fuentes de calor de baja temperatura o energía solar, como fuentes de calor para la etapa de reactivación del desecante. Esta tecnología ha despertado especial atención en los investigadores debido a que se considera que el uso de la misma provee

significativos ahorros en energía primaria y la reducción en el consumo de combustibles fósiles que esto conlleva. Además la energía eléctrica que ellos requieren pueden ser muy bajos comparados con los sistemas de convencionales de refrigeración.

En estos momentos la mayor desventaja de estos sistemas estriba en que tienen un COP (coeficiente de comportamiento) muy bajo, el que toma valores entre 0,8-1. El COP es definido por muchos autores como la carga de enfriamiento en el espacio a acondicionar dividido entre los requerimientos en energía térmica necesarios para regenerar el desecante.

Kang y Maclaine-Cross [1989] plantean que el deshumidificador es el componente clave de los sistemas de enfriamiento con desecantes y que el COP de estos sistemas puede ser considerablemente mejorado cuando se optimiza el funcionamiento de este componente. Desde la introducción de esta tecnología, muchos investigadores han estudiado cómo mejorar el COP y optimizar esta tecnología.

Maclaine-Cross y Banks [1972] desarrollaron un método basado en las analogías entre los procesos de transferencia de calor y masa para predecir el comportamiento de un deshumidificador de rueda desecante. Después, Banks [1972, 1985a Y 1985b] analizó los procesos de transferencia de calor y masa que ocurren en un medio poroso usando el método de las analogías no lineales y predijo el comportamiento de un secador de silicagel.

Neti y Wolf [2000] tienen reportado que el método de las analogías parece ser bueno solamente en un rango pequeño de condiciones. Van Den Bulck y otros [1985a y 1985b] introdujo el análisis de la onda para establecer un modelo transiente unidimensional de transferencia de calor y masa en un rotor con coeficientes de transferencia infinitos, empleando el método del NTU.

Zheng y Worek [1993] analizaron los efectos de la velocidad de rotación en el desempeño de la rueda desecante mediante la simulación numérica, usando el método implícito de diferencias finitas. Dai y otros [2001] emplearon un modelo en diferencias finitas para analizar y explicar en detalle la onda de concentración, la onda térmica y la rueda desecante; además, las reglas para mejorar el comportamiento de la deshumidificación fueron discutidas usando la carta psicrométrica.

Zhang y Niu [2002] presentaron un modelo bidimensional que combina los procesos de transferencia de calor y masa, además de que toma en cuenta el calor de conducción y el fenómeno de la difusión en la dirección axial y radial. Ellos también compararon el comportamiento de una rueda desecante y el de una rueda entálpica. Fatemeh y otros [2006] desarrollan un modelo unidimensional transiente para una rueda desecante del tipo 1:1, y obtienen las soluciones para los procesos de transferencia de calor y masa en una rueda desecante que usa silicagel como sustancia adsorbente, simulando su comportamiento y logrando predecir los valores de temperatura y humedad a la salida de la rueda desecante. Ellos también abordaron el tema de la influencia de la velocidad de rotación de la rueda desecante en el desempeño de esta.

Este artículo tiene como objetivo presentar un modelo que combine los fenómenos de transferencia de calor y masa para una rueda desecante 3:1 (75% de la rueda es para el sector de deshumidificación y 25% para el sector de regeneración) y obtener su solución de forma tal que podamos predecir el comportamiento de un sistema de enfriamiento con rueda desecante y estudiar la posibilidad de usar esta tecnología en el acondicionamiento del aire para las condiciones climáticas cubanas.

Modelo de rueda desecante

El deshumidificador o rueda desecante es una rueda cilíndrica de longitud L y radio R , con pequeños canales en los cuales se encuentra adherida la sustancia adsorbente, en nuestro caso la sustancia desecante utilizada será la silicagel. La rueda desecante esta dividida en tres sectores de la rueda para el proceso de deshumidificación y un sector de la misma para la etapa de regeneración, esto se conoce como 3:1.

Las corrientes de regeneración y de aire de proceso fluyen en sentido contrario, contraflujo.

La figura 1 muestra un esquema de la rueda desecante.

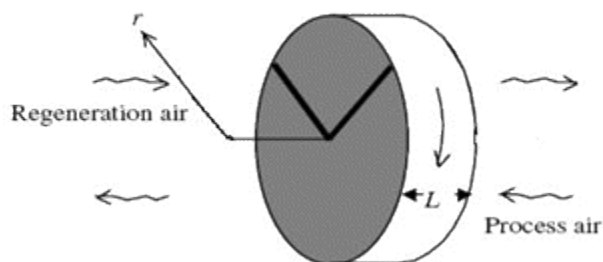


Fig. 1. Rueda desecante 3:1.

El análisis fue hecho teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

1. La transferencia de calor y la difusión del vapor de agua en el aire son despreciables en la dirección axial.
 2. La difusión molecular axial dentro del desecante es despreciable.
 3. No hay gradientes de temperatura ni de humedad en la matriz en la dirección radial.
 4. Calor de absorción constante.
 5. Todos los canales de la rueda son idénticos y con áreas de transferencia de calor y transferencia de masa constante.
 6. Las propiedades térmicas y de humedad en la matriz son constantes.
 7. Los canales son considerados adiabáticos e impermeables.
 8. Coeficiente de transferencia de calor y transferencia de masa constantes.
 9. El calor de absorción J/kg de agua adsorbido es constante.
- Basado en lo anterior, el modelo usado es transiente y unidimensional.

Ecuaciones

Ecuaciones de transferencia de masa para la corriente de aire de proceso:

$$\frac{d\left(\rho_g \frac{\rho_v}{\rho_g} A_g L\right)}{dt} = U_g A_g \rho_g (\omega_i - \omega_0) + h_m A_c (\omega_s - \omega) \quad (1)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{U_g}{L} (\omega_i - \omega_0) + \frac{h_m A_c}{\rho_g A_g L} (\omega_s - \omega) \quad (2)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = B_1 (\omega_i - \omega_0) + B_2 (\omega_s - \omega)$$

Donde: $B_1 = \frac{U_g}{L}$

$$B_2 = \frac{h_m A_c}{\rho_g L A_g}$$

$$A_c = \frac{3}{4} \pi D_k L = 1.1 \times 10^{-3} m^2 \quad A_g = \frac{3}{16} \pi D^2 h^2 = 3.2 \times 10^{-6} m^2$$

$$\left. \begin{array}{l} D_k = 2,33 \times 10^{-3} m \\ H = 1,8 \times 10^{-3} m \\ \varnothing = 3,5 \times 10^{-3} m \end{array} \right\} \text{Rueda } 370 \times 200 \text{ mm}$$

Ecuación de transferencia de calor para la corriente de aire de proceso:

$$\frac{d(\rho_g A_g L C_{p,g} T_g)}{dt} = \rho_g U_g A_g C_{p,g} (T_{gi} - T_{go}) + h A_c (T_s - T_g) \quad (3)$$

$$\frac{dT_g}{dt} = B_1 (T_{gi} - T_{go}) + B_3 (T_s - T_g) \quad (4)$$

$$B_3 = \frac{h A_c}{\rho_g L A_g C_{p,g}} \quad B_3 = L_e B_2 \quad L_e = 1$$

$$B_3 = B_2$$

$$\left. h = \frac{N_u k}{D_h} \right\} \text{ kaire} = 26,4 \times 10^{-3} \text{ W/m-K}$$

$$N_u [3,63 - 4,36]$$

$$h = \frac{3,63 \times 26,4 \times 10^{-3}}{2,33 \times 10^{-3}} = 41,13 \text{ W/m}^2\text{K}$$

Ecuaciones de transferencia de masa en la capa del desecante:

$$\frac{d(\rho_d w A_d L)}{dt} = h_m A_c (w - w_s) \quad (5)$$

Donde:

W: Contenido de agua en el material desecante.

$$w = \frac{\rho_{vd}}{\rho_d}$$

$$\frac{dw}{dt} = \frac{h_m A_c}{\rho_d A_d L} (w - w_s) \quad (6)$$

$$A_d = \frac{3}{16} \pi [(D_h + dt)^2 - D_h^2]$$

$$B_4 = \frac{h_m A_c}{\rho_d L A_d} = \frac{0,058 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \text{s}} * 1,1 \times 10^{-3} \text{ m}^2}{700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,2 \text{ m} * 6,3 \times 10^{-7} \text{ m}^2}$$

$$h_m = \frac{h}{C_g L_e} \quad L_{e, \text{aire}} = 1 \quad h = 41,13 \text{ W/m}^2\text{K} \quad h_m = \frac{h}{C_g} \quad W = \text{J/s}$$

Cg= Calor específico del aire a velocidad constante.

$$h_m = \frac{h}{0,71 \frac{\text{kJ}}{\text{kgK}}} \quad h = 0,04113 \text{ kJ/sm}^2\text{K}$$

$$dw = S_1(w_s, T_s) dw_s + S_2(w_s, T_s) dT_s \quad (7)$$

$$\frac{dw_s}{dt} = \frac{-S_2}{S_1} \frac{dT_s}{dt} + \frac{B_4}{S_1} (w - w_s) \quad (8)$$

$$S_1(w_s, T_s) = \left[\left[(2,9e - 9) A \frac{RT_s}{\varphi} \exp \left[- \left(\frac{A}{8590} \right)^2 \right] + (4,9e - 8) \frac{ART_s}{\varphi} \exp \left[- \left(\frac{A}{3140} \right)^2 \right] \right] \right] \quad (9)$$

$$S_1(w_s, T_s) = \left[\left[(2,9e - 9) A \frac{RT_s}{\varphi} \exp \left[- \left(\frac{A}{8590} \right)^2 \right] + (4,9e - 8) \frac{ART_s}{\varphi} \exp \left[- \left(\frac{A}{3140} \right)^2 \right] \right] \right] \frac{5294 \varphi}{T_s} + \left[(2,9e - 9) AR \ln \varphi \exp \left[\left(\frac{A}{8590} \right)^2 \right] \right] + \quad (10)$$

$$\varphi = \frac{\omega_s P_0}{(0,622 + \omega_s) P_s} \quad (11)$$

$$P_s = e^{\left(19,016 - \frac{4064,95}{32,01 + 236,25} \right)} \quad (12)$$

$$A = -RT_0 \ln \varphi \quad R = 0,287 \text{ kJ/kg} \quad (13)$$

Las ecuaciones de S_1 y S_2 fueron tomadas de la fórmula (13).

Ecuaciones de transferencia de calor para la capa de desecante:

$$\frac{dT_s}{dt} = \frac{h_m A_c q_{st}}{\rho_d A_d L C_d} (w - w_s) + \frac{h A_c}{C_d \rho_d A_d L} (T_g - T_s) \quad (14)$$

$$B_5 = \frac{q_{st}}{C_d} \frac{dT_s}{dt} = B_4 B_5 (w - w_s) + B_6 (T_g - T_s) \quad (15)$$

$$\left. \begin{array}{l} q_{st} = (2100 - 2300) \text{ kJ/kg} \\ q_{st} = 2300 \text{ kJ/kg} \\ C_d = 921 \text{ J/kgK} \end{array} \right\} \begin{array}{l} B_5 = \frac{2300 \text{ kJ/kg}}{0,921 \text{ kJ/kgK}} \\ B_5 = 2497,3 K \end{array}$$

$$B_6 = \frac{h A_c}{C_d \rho_d A_d L} \quad (16)$$

La solución de las ecuaciones anteriores se obtuvieron aplicando el método de las lineales. Para la simulación del sistema se desarrollo un software en Visual Basic 6.0, el cual permite obtener las condiciones del aire a la salida del deshumidificador como una función de variables físicamente medibles.

El software Soft Desiccant Wheel permite calcular la temperatura y la humedad absoluta de la corriente de aire de proceso a la salida de la rueda desecante. En las figuras 2 y 3 podemos ver la presentación de este software y la pantalla de opciones y cálculo.

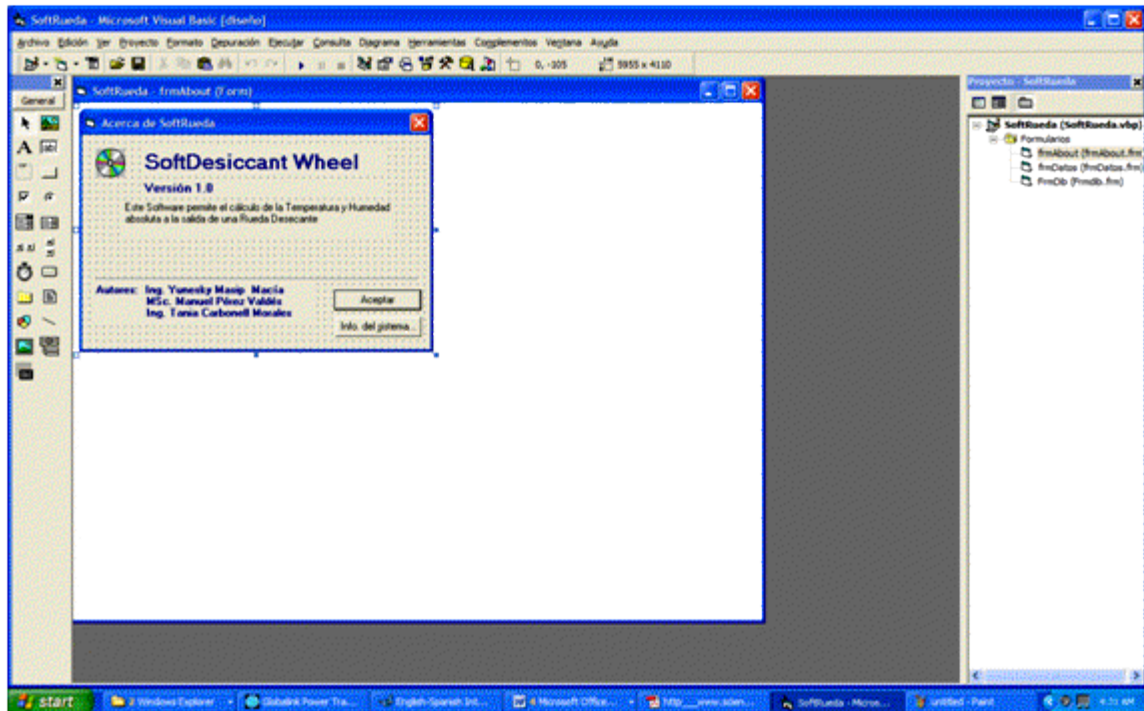


Fig. 2. Software Soft Desiccant Wheel.

Fig. 3. Hoja de cálculo del software.

Se conoce que la velocidad de rotación de la rueda desecante es inversamente proporcional al tiempo de adsorción. Este parámetro será óptimo cuando la humedad absoluta promedio del flujo de aire de proceso sea un mínimo. Cuando la rueda rota más rápido que el valor óptimo de rph, los procesos de adsorción y regeneración son muy cortos, lo que provoca un pobre desempeño de sistema. También si la velocidad de rotación es muy lenta, el proceso de adsorción y regeneración también es muy largo e inefectivo; por esta razón es tan importante obtener la velocidad de rotación óptima para la rueda desecante en función de las condiciones de operación, convirtiéndose ese parámetro en una importante variable de diseño.

En este trabajo el modelo será evaluado para dos velocidades de rotación de la rueda, 15 y 30 rph, respectivamente. La rueda desecante a evaluar tiene 370 mm de diámetro y 200 mm de longitud, el material desecante usado es la silicagel, las dimensiones de los canales es 3,5 x 1,8 mm. Deberá procesar un flujo de aire de 750 m³/h a una temperatura de 32 °C con una humedad relativa de 75%.

La figura 4 muestra los valores de temperatura y humedad absoluta obtenidos a la salida del deshumidificador o rueda desecante para una velocidad de 15 rph. En ella se puede apreciar que la temperatura toma valores entre 39 y 48 °C y la humedad se encuentra alrededor de 9 g/kg. En la figura 5 aparece el comportamiento de la temperatura y la humedad, pero para una velocidad de rotación de 30 rph.

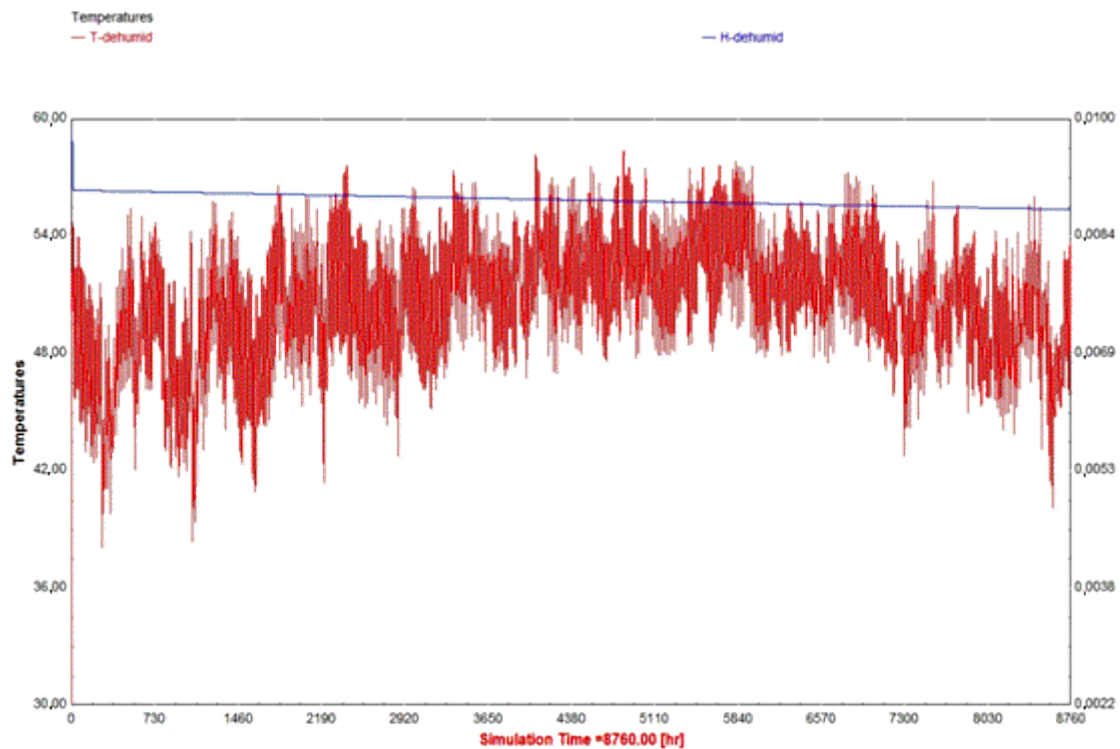


Fig. 4. Comportamiento de la temperatura y la humedad absoluta de la corriente de aire a la salida de la rueda desecante para 15 rph.

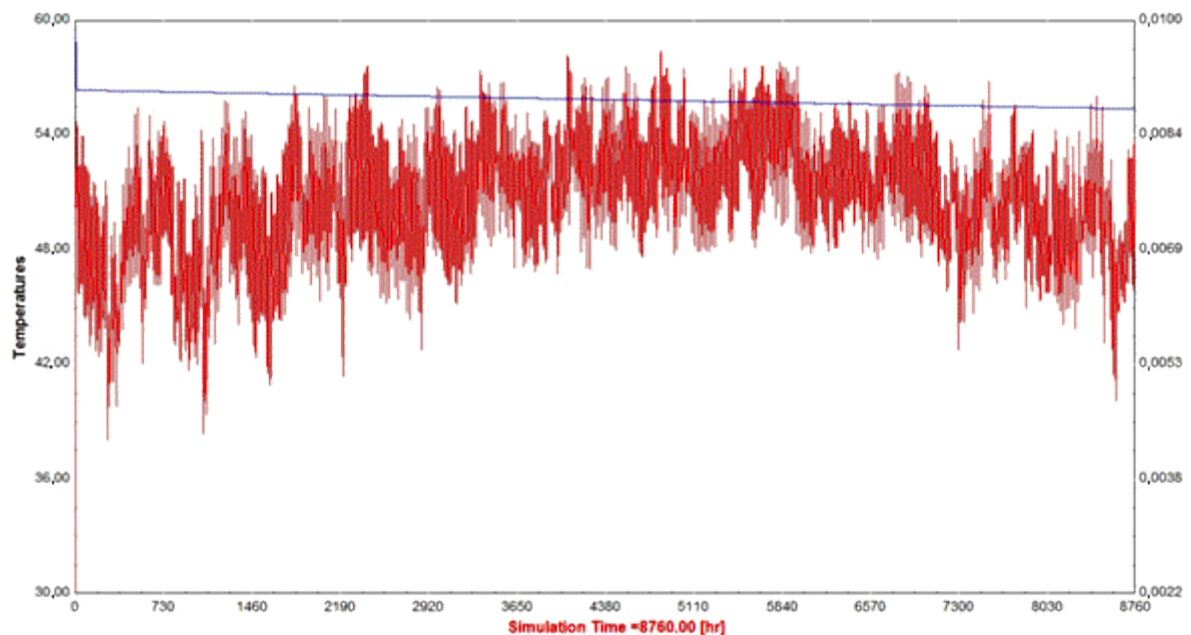


Fig. 5. Comportamiento de la temperatura y la humedad absoluta de la corriente de aire a la salida de la rueda desecante para 30 rph.

En este caso podemos ver que la temperatura toma valores entre 50 y 56 °C, y la humedad se encuentra entre 8 y 8,4 g/kg.

Los resultados obtenidos son lógicos, pues se conoce que el proceso de deshumidificación es un proceso exotérmico, lo cual justifica que para 30 rph se obtenga una mayor temperatura a la salida de la rueda, pues el proceso de deshumidificación ha sido más eficiente y se obtuvieron menores valores de humedad. No obstante, consideramos que estos resultados procedentes del software necesitan ser validados experimentalmente y prosimulación profundizándose más en este estudio.

Conclusiones

En este artículo se presentan los primeros resultados de la evaluación de un modelo de transferencia de calor y masa para una rueda desecante 3:1, el cual fue propuesto para predecir los valores de temperatura y humedad de la corriente de aire de proceso a la salida de la rueda desecante. El modelo fue evaluado para dos velocidades de rotación de la rueda, 15 y 30 rph.

Con el software se obtuvieron valores lógicos y que han sido reportados en la literatura para ruedas desecantes de similares características.

Mas nosotros consideramos que estos resultados no son absolutos, el modelo debe ser validado experimentalmente y nuevas simulaciones deben seguirse haciendo para probar la efectividad del software Soft Desiccant Wheel.

Nomenclatura

A_c : Área del intercambio de calor, m^2 .

A_d : Área de la sección transversal para la capa de desecante en el canal, m^2 .

A_g : Área de la sección cruce del flujo de aire, m^2 .

C : Calor específico volumétrico, J/kgK .

d_t : Espesor de la capa de desecante, m .

D_h : Diámetro hidráulico del canal, m .

h : Coeficiente de transferencia de calor, W/m^2K .

h_m : Coeficiente de transferencia de masa, kgm^2/s .

H : Entalpía, kJ/kg .

k : Conductividad térmica, W/mK .

L : Longitud de la rueda, m .

L_e : Número de Lewis.

N : Velocidad de la rueda, rph.

Nu : Número de Nusselt.

P : Presión, Pa .

q_{st} : Calor de absorción, J/kg .

R : Constante del gas, J/kgK .

t : Tiempo, s .

T : Temperatura, $^{\circ}C$.

V : Velocidad, m/s .

w : Contenido de agua en el material desecante, kg/kg .

Letras griegas

ϕ : Humedad relativa.

ρ : Densidad, kg/m^3 .

ω : Relación de humedad, kg/kg .

ω_s : Relación de humedad en la saturación.

Subíndices

d: Desecante.

e: Entalpías.

g: Gas.

i: Entrada.

l: Latente.

o: Salida.

s: Saturación.

Bibliografía

Banks, P. J. «Coupled Equilibrium Heat and Single Adsorbate Transfer in Fluid Flow Through a Porous Medium-2: Predictions for a Silica-Gel Air Drier Using Characteristic Charts», *Chemical Engineering Science* 27, pp.1157-1169, 1972.

———. «Prediction of Heat and Mass Regenerator Performance Using Nonlinear Analogy Method. Part 1. Basis», *ASME Journal of Heat Transfer* 107, pp. 222-229, 1985a.

———. «Prediction of Heat and Mass Regenerator Performance Using Nonlinear Analogy Method. Part 2. Comparison of Methods», *ASME Journal of Heat Transfer* 107, pp. 230-247, 1985b.

Dai, Y. J.; R. Z. Wang y H. F. Zhang. «Parameter analysis to improve rotary desiccant dehumidification using a mathematical model», *International Journal of Thermal Science* 40, pp. 400-408, 2001.

Fatemeh, et al. Modelling and Simulation of Desiccant Wheel for Air Conditioning, *Energy and Buildings*, 2006.

Kang, T. S. y I. L. Maclain-Cross. «High Performance Solid Desiccant Cooling Cycles», *Transactions of ASME* 111, pp. 176-183, 1989.

Maclaine-Cross, I. L. y P. J. Banks. «Coupled Heat and Mass Transfer in Regenerators-Prediction Using an Analogy with Heat Transfer». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 15, pp. 1225-1242, 1972.

Neti, S. y E. I. Wolfe. «Measurements of Effectiveness in a Silica Gel Rotary Exchanger», *Applied Thermal Engineering* 20, 309-322, 2000.

Van Den Bulck, E.; J. W. Mitchell y S. A. Klein. «Design Theory for Rotary Heat and Mass Exchangers. I. Wave Analysis of Rotary Heat and Mass Exchangers with Infinite Transfer Coefficients». *International Journal of Heat and Mass Transfer* 28, 1575-1586, 1985a.

———. «Design Theory for Rotary Heat and Mass Exchangers. II. Effectiveness-Number-of-Transfer-Units' Method for Rotary Heat and Mass Exchangers», *International Journal of Heat and Mass Transfer* 28, 1587-1595, 1985b.

Zhang, L. Z. y J. L. Niu. «Performance Comparisons of Desiccant Wheels for Air Dehumidification and Enthalpy Recovery», *Applied Thermal Engineering* 22, 1347-1367, 2002.

Zheng, W. y W. M. Worek. «Numerical Simulation of Combined Heat and Mass Transfer Process in a Rotary Dehumidifier». *Numerical Heat Transfer Part A* 23, pp. 211-232, 1993.

Propuesta para la adecuación de las instalaciones del CETER a las técnicas y tecnologías de ahorro energético y agua

Proposal for introducing energy and water efficient technologies and techniques in CETER facilities

Carlos Fernández-Aballí Altamirano, Dania González Couret, Adonis Senra Ramírez, Zerguey Castellanos Rosales, Hieu Bui Duc. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (ISPJAE), La Habana, Cuba e-mail: carlos@ceter.cujae.edu.cu .

Resumen

Lograr la sustentabilidad económica y medioambiental de nuestro modo de vida tiene muchos matices y retos, que abarcan desde la inexistencia de medios tecnológicos para suplir de forma sustentable todas nuestras necesidades, hasta la inercia cultural de toda sociedad. Quizá el mayor reto de la necesaria migración hacia una explotación sostenible de nuestros medios será cómo convertir, de forma rentable y escalonada, las instalaciones ya existentes en sistemas más ahorrativos, en especial los ambientes urbanos. Se presenta el trabajo transdisciplinario de arquitectos, ingenieros, estudiantes y profesores en función de una primera propuesta para hacer sustentables las instalaciones del Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER). Este proyecto propone 100% de autonomía energética para el edificio e integra a sus sistemas las instalaciones demostrativas y docentes, haciendo del centro un laboratorio viviente. El objetivo es mejorar la calidad de vida del Centro, hacer más ilustrativas las prácticas docentes y optimizar el uso de los recursos en función de la inversión. Se propone energizar el edificio con tres fuentes renovables de energía: un biodigestor de desechos urbanos, un sistema híbrido eólico-fotovoltaico y un sistema puramente fotovoltaico. También se estudia el uso de baterías e hidrógeno para almacenar energía, imprescindible en estos sistemas. Además, se propone una solución de clima novedosa a partir de un sistema combinado de potencia y calor (CHP) con un generador Stirling. Finalmente, para minimizar el consumo y optimizar la inversión, se toman en consideración los sistemas de iluminación, climatización, ventilación, constructivos y energéticos.

Palabras clave: Edificio autónomo, edificio sustentable, ahorro energético, motores Stirling, sistemas híbridos, sistema combinado de potencia y calor, climatización, LEDs, iluminación natural, ventilación pasiva, arquitectura, laboratorio viviente, PiTAD y trabajo transdisciplinario.

Abstract

Achieving the economic and environmental sustainability of our civilization has many challenges that embrace from the inexistence of technological means to meeting all our needs in a sustainable way, to the cultural apathy of a society. Perhaps the biggest challenge of the necessary migration toward a sustainable exploitation of our means will be how to convert, in a profitable and stepped

way, the now existing facilities in more efficient systems, specially the urban environments. This paper presents the transdisciplinary work of architects, engineers, students and scholars in terms of presenting a first proposal to transform the Center of Studies of Renewable Energy Technologies (CETER, in Spanish) into a sustainable facility. The proposal of the project is achieving full energy autonomy of the building and integrates the demonstration and teaching facilities into its systems, turning the center into a living laboratory. The objective is improving the quality of life and teaching activities optimizing the use of resources in terms of investment. It is intended to meet 100% of the electricity demand of the building from three renewable energy sources: a biogas digester that uses urban solid waste, a wind-photovoltaic hybrid system and a photovoltaic system. The study also considers the use of batteries and hydrogen to store energy, something essential in these cases. Furthermore, an innovative air conditioning solution is proposed based on a combined heat and power (CHP) engine with a Stirling engine. Finally, in order to minimize consumption and optimize investment, the systems of lighting, air conditioning, ventilation, constructive and energy supply are taken in consideration.

Keywords: Self-sufficient building, sustainable building, energy saving, Stirling engines, hybrid systems, combined heat and power system, air conditioning, LEDs, natural lighting, passive ventilation, architecture, living laboratory, PiTAD and transdisciplinary work.

Introducción

En este trabajo se presenta una propuesta para la adecuación de las instalaciones del Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER) a las técnicas y tecnologías de ahorro energético. Se propone hacer de este un centro demostrativo que sea consecuente con la política que promueve, integrar estas tecnologías a los sistemas del edificio y hacer del CETER un laboratorio viviente. El fin es mejorar la calidad de vida de los trabajadores, hacer más ilustrativas las prácticas docentes y optimizar el uso de los recursos en función de la inversión y la mantenibilidad. Se toman en consideración los sistemas de iluminación, climatización, ventilación, agua, constructivos y energéticos existentes y futuros del edificio, para tratar de minimizar su consumo, aprovechar al máximo los recursos reales y narrar de forma aplicada la filosofía de lo sostenible.

El CETER, como el resto de la infraestructura de la humanidad, está creado bajo una concepción de dependencia energética y excluyente del medio ambiente. Hoy en día es fácilmente demostrable la insustentabilidad de esa concepción, motivo por el cual es imprescindible modificarla. Sin embargo, adecuar los ambientes urbanos ya existentes para que sean sustentables presenta uno de los problemas más difíciles e interesantes de nuestros tiempos.

Con vistas a aportar una primera aproximación a la problemática del CETER se integró un equipo de arquitectos e ingenieros que basaron su solución en un diagnóstico global de las instalaciones. En él se midieron parámetros subjetivos y objetivos, buscando una solución que realmente estuviese acorde con las necesidades de los usuarios del edificio. El diagnóstico también estudia las fuentes renovables de energía al alcance del edificio y cómo integrar todos sus

sistemas para utilizar al máximo la energía útil a disposición. Se utilizan técnicas de cogeneración y sistemas híbridos para lograr una propuesta con 100% de autonomía energética y económicamente factible. Además, todas las soluciones tienen la doble finalidad de servir el edificio y apoyar la docencia. Esto es consecuente con el objetivo del Centro de formar profesionales demostrándoles la aplicación de la energía renovable y haciendo del edificio un laboratorio viviente.

Se propone la instalación de un sistema que costaría, en su variante más completa, alrededor de 850 000 CUC. Esto incluiría las modificaciones arquitectónicas y los sistemas-laboratorio de: clima, digestión anaeróbica de desechos urbanos, motores de combustión externa, solar térmica, solar fotovoltaica, híbridos eólico-fotovoltaicos, ruedas desencantes, refrigeración por absorción, acumulación de frío, almacenamiento de hidrógeno, celdas de combustible, iluminación con diodos de emisión de luz (LED), reutilización de agua, recolección pluvial; también facilitaría la autonomía energética del edificio con: tres aulas climatizadas, un laboratorio de computación para los estudiantes, los locales imprescindibles climatizados y la rehabilitación de la cafetería de la Facultad de Ingeniería Mecánica. La vida útil del sistema se estima en más de 20 años y en este tiempo se prepararían miles de ingenieros entusiastas y bien forjados en la cultura de lo sustentable, algo imprescindible e invaluable para una sociedad que aspira a vivir cada vez mejor y a su vez ser sustentable.

PiTAD: Diseñando en equipo

Hoy en día para diseñar soluciones aceptables con sus matices sociales y técnicos, se hace imprescindible trabajar en equipos transdisciplinarios e interculturales que integren de forma dinámica y sistémica la toma de decisiones en función de lograr el mejor compromiso entre las variables en juego.

La rama de la ingeniería moderna que estudia cómo lograr esta integración se denomina Diseño de Sistemas de Ingeniería. Dando respuesta a esta necesidad, en la CUJAE nace PiTAD (Plataforma de Implementación de Tecnologías Adecuadas para el Desarrollo). PiTAD integra estudiantes y profesores de diversas facultades en la CUJAE y otras universidades en el extranjero, como la Universidad de Bristol en Inglaterra y la Universidad Politécnica de Cataluña. El propósito es proponer soluciones tecnológicas apropiadas para impulsar el desarrollo sustentable. El enfoque es transcultural, multidisciplinario y sistémico, buscando acercar la docencia e investigación a las necesidades socioeconómicas y tecnológicas del momento, priorizando sobre todo la incubación de ideas novedosas hacia su implementación en la industria. Hoy integran PiTAD en la CUJAE:

- Facultad de Ingeniería Civil:

CECAT: Centro de Estudio de la Construcción y Arquitectura Tropical.
 CIH: Centro de Investigaciones Hidráulicas.

- Facultad de Ingeniería Eléctrica:

Departamento de Telecomunicaciones.

- Facultad de Arquitectura.
- Facultad de Ingeniería Mecánica:

CETER: Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables.
 Este trabajo es uno de los resultados de PiTAD este año, el que ha aportado tanto a la labor investigativa como a la docente. De él surgió la tesis de cuatro estudiantes de quinto año de la Facultad de Arquitectura e Ingeniería Mecánica. Además, fue el tema del trabajo de seis estudiantes de Arquitectura en su asignatura sobre Edificaciones Sustentables. También se los estudiantes presentaron una ponencia en la V Conferencia Internacional de Energía Renovable (CIER) que obtuvo mención de Relevante en el Fórum del Científico Estudiantil en la Facultad de Ingeniería Mecánica. O sea, el desarrollo de este trabajo ha abierto oportunidades investigativas de temas de actualidad y ha permitido, a un grupo de estudiantes, aportar soluciones hacia un problema con aplicación real. Proyectarse hacia el sueño de una universidad mejor ha aportado el primer paso para mejorar la calidad del trabajo en el CETER, tanto para su claustro de profesores como para los estudiantes. Los integrantes del equipo, hasta hoy día, son los que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Integrantes del equipomultidisciplinario

Arquitectura	
Proyecto arquitectónico-Análisis de ventilación e iluminación natural	
Prof. Dr. Dania González	Hieu Bui Duc
Arquitectura-Diagnóstico, ingeniería de sistemas e ideas conceptuales	
Prof. Dr. Dania González Couret, Prof. Dr. Antonio Sarmiento, MSc. Carlos Fernández-Aballí Altamirano	Yanet Alemán, Handler Milán, Abel Cubillas, Fabián López, Ulises Boffill, Hieu Bui Duc.
Ingeniería Mecánica	
Sistemas del edificio	
MSc. Carlos Fernández-Aballí	Adonis Senra, Zerguey Castellanos
Estudio de clima	
Prof. Yuniesky Masip	Andrew Williams

Edificaciones sostenibles

La edificación sustentable tiene como objetivo la reducción progresiva del impacto ambiental que produce, analizando aspectos como los materiales de construcción, el agua empleada, los residuos generados y la energía para

cubrir sus necesidades. Hablamos de edificaciones sustentables cuando, además de ser estéticas, los edificios consiguen que la gente se sienta verdaderamente cómoda. El fin último del urbanismo y de la edificación debería ser el de proporcionar a los ciudadanos un bienestar sostenible, esto es, bienestar para todos, hoy y mañana (Fig. 1).



Fig. 1. Biblioteca indígena Tierra Adentro, en Colombia.

El CETER

El CETER pertenece a la Facultad de Ingeniería Mecánica del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría. Fue creado el 13 de diciembre de 1992, con lo que se cumplió una de las proyecciones más importantes del país en la búsqueda de soluciones energéticas autóctonas; su función es formar profesionales de alta calificación forjados en la cultura de lo sostenible y capaces de proponer soluciones en nuestras empresas e instituciones.

El edificio lleva alrededor de 45 años de construido. Cuenta con una planta baja; una primera planta, pero de espacio muy reducido; dos terrazas techo que dan al Sur y al Norte, y el techo, a donde se puede llegar por la escalera.

Con la ayuda de los trabajadores del Centro se realizó el levantamiento de todos los locales y equipos que se encuentran en él, cuyos resultados fueron los siguientes (Anexo 1).

Primero se examinaron los espacios y las aulas, definiendo sus actuales usos y en otros casos sus posibles utilizaciones futuras. También se hizo el levantamiento de todos los equipos técnicos que se encuentran en el edificio.

Tabla 2. Número de personas y equipos por locales actuales

Locales	Cantidad de personas	Lámparas de 40 W	Computadoras	Aire acondicionado
Tensoactivos	3	3	-	1
Dirección	2	3	2	1

Aula	20	6	-	1
Local de Energía Renovable	5	3	2	-
Lab. Motores	5	4	3	1
Termoenergética	4	4	1	1
Local biomasa	4	3	1	-
Baños	-	4	-	-

Potencial de la edificación

El potencial energético existente en el edificio consta del viento, el sol y los desechos urbanos de la CUJAE. El edificio tiene 1 960 m² de azoteas de fácil acceso y poca incidencia de sobra de estructuras colindantes; su posición permite la ubicación a aplicaciones solares y eólicas, como es el sistema híbrido, eólico-fotovoltaico, sin aprovecharse el que ya existe.

Las funciones del CETER en sí no generan residuos de consideración para ubicar un biodigestor, pero en su área aledaña se encuentra la cafetería de la Facultad de Ingeniería Mecánica, que aunque hoy brinda pocos servicios se prevé su revitalización. También en los comedores de la CUJAE se cocina diariamente para más de 5 000 personas lo que genera una cantidad considerable de desechos orgánicos. Además, existen otras fuentes de desechos orgánicos, como los residuos de la jardinería, todos posibles fuentes de alimentación para un digestor de residuos urbanos.

A fin de que las potencialidades energéticas del edificio sean suficientes y económicamente factibles, se hace imprescindible ahorrar energía. Para esto se propone utilizar la iluminación natural en todos los lugares posibles y sustituir el sistema de iluminación actual de tubos fluorescentes, que además está muy deteriorado, por uno con LEDs. Esto es de vital importancia para mejorar la calidad de vida de los trabajadores; asimismo, sería el primer sistema de su tipo en país, diez veces más económico y duradero que el hoy existente en el edificio. También permitiría impulsar una industria nacional, pues las lámparas se producirían en el Combinado de Componentes Electrónicos de Pinar del Río. La reducción de la carga de clima presenta otro potencial importante de ahorro energético con soluciones relativamente económicas. Tener un ambiente fresco es de alta prioridad para los trabajadores, pero el clima es uno de los sistemas más consumidores. Afortunadamente, el doble puntal del centro del edificio y sus orificios en la placa, antiguamente concebidos como entradas de equipos, permiten pensar en un sistema de ventilación pasiva o asistida por ventiladores. Esto facilitaría tener un clima agradable en el edificio para solo climatizar los lugares imprescindibles. También se propone proteger el edificio de la irradiación solar mediante una estructura externa.

Soluciones

Las soluciones para el CETER tienen como centro el ahorro, el confort, la docencia y el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía. Para el

CETER es posible lograr un 100% de autonomía energética para sus funciones cotidianas, y de construirse la instalación sería el primer edificio de su tipo en el país. La demanda energética normal del inmueble con su funcionalidad plena es de 316 497 kWh/año desde el combustible primario y el 63% de este gasto lo aporta el sistema de clima. En un sistema convencional conectado a la red la demanda sería de 175 494 kWh/año, y el sistema de clima aportaría el 48% de este gasto. Además del ahorro energético, está previsto para un futuro la recolección de pluviales y reutilización de agua haciendo la edificación aún más ahorrativa. Junto a los laboratorios ya existentes, como lo son los de tensoactivos y motores alternativos, proponemos crear los siguientes sistemas laboratorio.

Modificaciones arquitectónicas

Las modificaciones arquitectónicas están basadas en lograr un desarrollo escalonado en el que se aprovechen al máximo las estructuras ya existentes. Se propone el uso de materiales de la industria nacional, materiales renovables y ecológicos, como el bambú para el inmueble, y materiales reciclados. También se hizo un estudio de funcionalidad del edificio y una encuesta para poder adecuar las modificaciones a las necesidades reales del Centro. El resultado de este estudio se puede ver en la planta final del edificio, en el Anexo 2.

Las modificaciones arquitectónicas buscan hacer la edificación más económica mediante el uso de la protección solar, la iluminación natural y la ventilación pasiva. El principio es crear transparencia ambiental entre los locales sin perder la privacidad, y climatizar solo los locales imprescindibles, como los laboratorios de computación.

En el caso de la iluminación natural y la ventilación pasiva se hicieron simulaciones con lo que se demostró que es posible pensar en estas soluciones para el CETER. Se pretende utilizar los efectos de chimenea por las claraboyas existentes en los tejados para drenar el calor por convección y asistir a este proceso con ventiladores de techo; esto daría más velocidad al aire y aumentaría la sensación de confort. Finalmente, se propone evitar la irradiación solar a través de las ventanas en la fachada sur del edificio con una doble piel, la cual permitirá techar la terraza sur y ayudará a hacer el edificio más fresco sin sacrificar las visuales o la capacidad de iluminar los espacios interiores de forma pasiva.



Fig. 2. Imagen actual y Modelo virtual del CETER.

Laboratorio de digestión anaeróbica, generación y clima

Todo establecimiento humano tiene la necesidad de frío, calor y energía motriz; el CETER no es la excepción. Cuando se genera energía motriz desde un combustible químico, necesariamente se genera calor y a partir de ese calor también se puede generar frío. Por lo tanto, la superdescentralización de la generación eléctrica permite un mejor aprovechamiento del combustible, aportando una fuente de electricidad y calor en donde ambas son útiles sin más transformaciones. Estos sistemas de cogeneración se denominan CHP (Combined Heat and Power) y llegan a tener eficiencias de más de 80%.

Para el CETER se propone un sistema CHP para el clima, energizado por el biogás de un digestor urbano.

El digestor, trabajando en rango termofílico para reducir sus tiempos de retención, será capaz de digerir todo tipo de desechos orgánicos y generará teóricamente 150 m³/día de biogás a partir de 2 m³/día de desechos urbanos con 100 kg de sólidos volátiles. Esto es suficiente para asumir la carga de clima de 827 kWh/día. El sistema consta de dos motores Stirling Whispergen MKV AC, que generan 12 kW de calor y 1,2 kWe. Impulsa un sistema de refrigeración por absorción y otro por compresión. Juntos enfrían un acumulador de hielo dentro de la cámara frigorífica de la cafetería.

Con los calores residuales del equipo de absorción se estudia la posibilidad de operar una rueda desecante generando una reducción teórica de la carga de clima de 30% al reducir la demanda por condensación. Para completar el suministro de frío requerido se propone tomar 0,1 kWe de la red o del sistema FV, el cual resulta relativamente económico con un costo de 0,04 CUC por kWh equivalente entregado durante su vida útil, similar a una termoeléctrica convencional. El sistema asumiría 50% de la demanda energética del edificio, proporcionaría confort para todos los usuarios y permitiría el acceso a un grupo de laboratorios y sistemas demostrativos de gran valor para la preparación de nuestros ingenieros.

Laboratorio Eólico-Solar

En la cubierta del CETER se piensa colocar un laboratorio solar y eólico para asumir la demanda de electricidad de 179,72 kWh/día y el agua caliente del edificio. Este sistema constaría de una batería de siete calentadores solares Chromagen tanque-colector de 1,9 m² para el digestor termofílico, un sistema híbrido eólico-fotovoltaico con una potencia nominal de 36 kW, y un laboratorio actinométrico para la investigación. El dimensionamiento de este sistema híbrido está en desarrollo, pero el sistema que se ha calculado asume la utilización de un pequeño sistema eólico-fotovoltaico (450 Wp), ya existente en el CETER, y la instalación de paneles FV asumiendo el resto de la demanda. Se estudiaron dos sistemas de almacenamiento, requisito imprescindible de estos sistemas cuando están desconectados de la red debido a la intermitencia de la fuente: un sistema de almacenamiento de hidrógeno y celdas de combustible y uno de baterías. El costo del sistema completo con baterías es 278 259 CUC, y el de hidrógeno, de 791 016 CUC. Sin embargo, el sistema de hidrógeno respondería a una de las líneas estratégicas del CETER como el Centro encargado de reunir las investigaciones alrededor de este portador energético.

Conclusiones

En el trabajo se presenta una propuesta para adecuar las instalaciones del CETER a las tecnologías de aprovechamiento de las fuentes renovables de energía, ahorro energético y agua. La obra busca hacer del CETER un edificio sostenible considerando no solo su eficiencia energética, sino también el confort de los usuarios.

Las tablas 3 y 4 muestran en resumen las distintas configuraciones estudiadas para este sistema, sus costos, el ahorro, el tiempo de amortización y la comparación económica frente a un sistema convencional. En el caso del sistema de clima la inversión es realmente competitiva, incluso para un sistema tan próximo al suministro eléctrico. También resalta el sistema LED, permitiendo con una inversión de 5 500 CUC ahorrar más de 26 645 kWh/año con un costo aproximado de 2 665 CUC/año. Finalmente, el proyecto busca hacer del edificio una plataforma integral para propiciar la investigación, la docencia y el desarrollo de estas tecnologías narrando con hechos la cultura de lo sostenible.

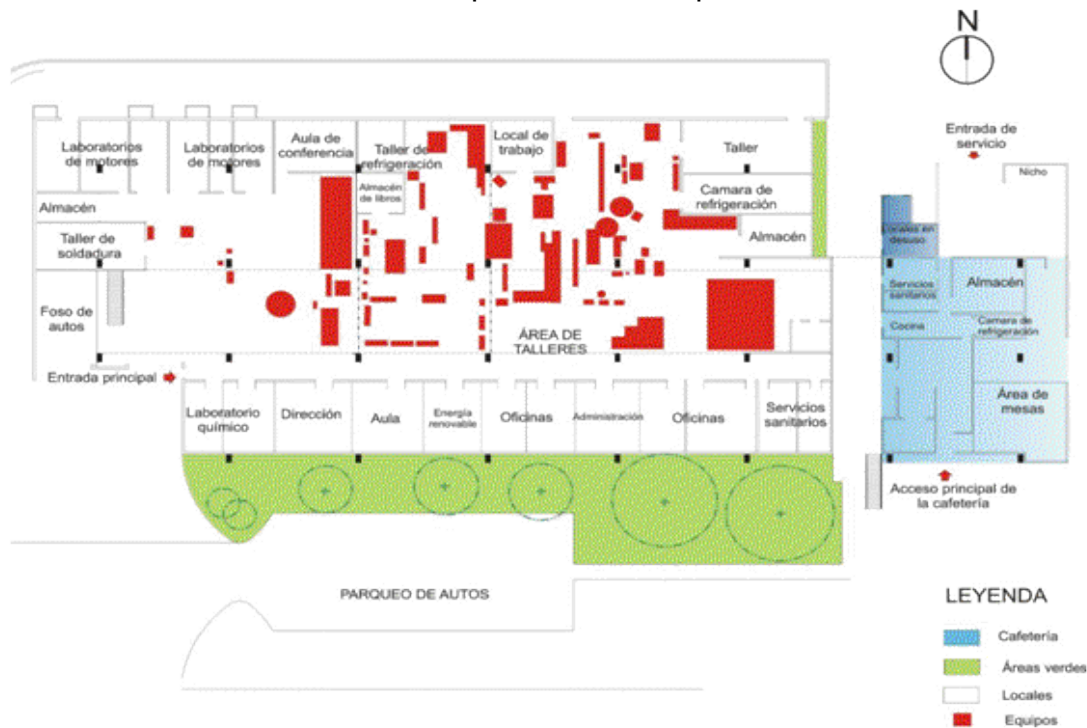
Tabla 3. Costo de las distintas configuraciones del sistema

	Costo (CUC)	Ahorro (kWh/año equivalente)	Ahorro (CUC/año)	Tiempo de amortización	Autonomía
Todos los equipos (hidrógeno)	791 016	17 849	17 849	45,07	100%
Todos los equipos (baterías)	278 259	17 849	17 849	15,86	100%
Solo clima e iluminación	76 760	11 290	11 290	6,80	63%

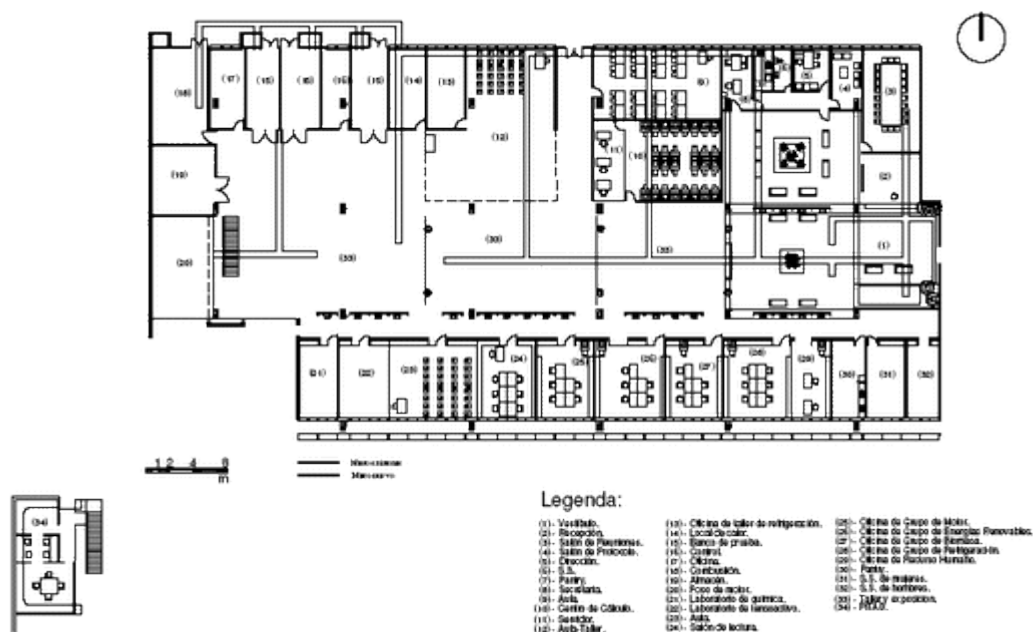
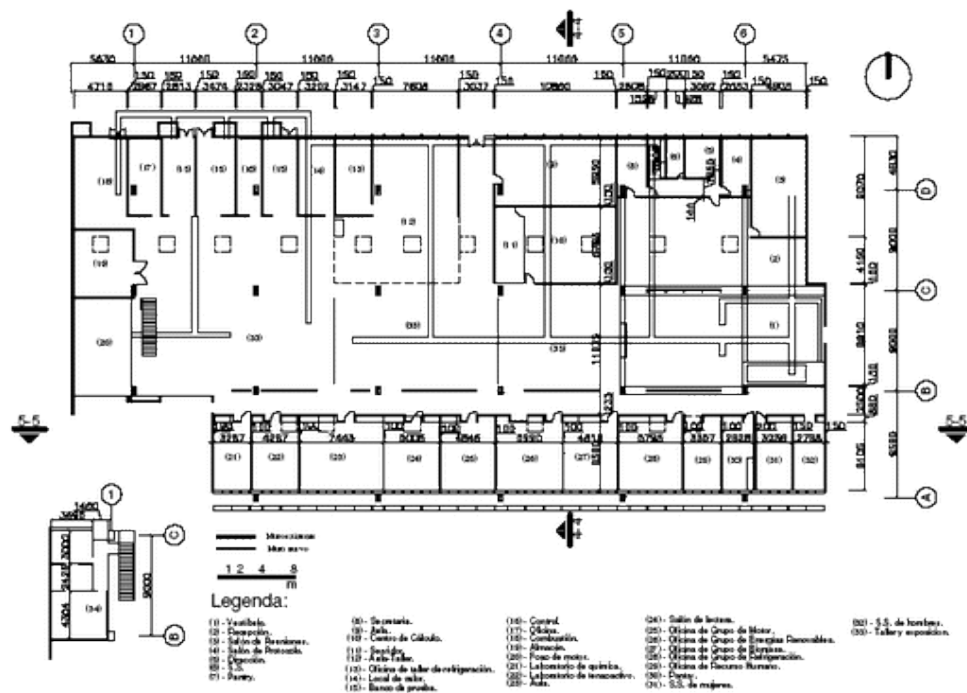
Tabla 4. Comparación económica con un sistema convencional

	Demanda eléctrica equivalente			Demanda de fuel equivalente		CUC/kWh equivalente producido durante vida útil		
			Ahorro					
	Fracción	kWh/año	CUC/año	Fuel (kg)	kWh fuel	Convencional	Baterías	Hidrógeno
Todo el Sistema	1,00	175 494	17 549	9 750	877 470	0,04	0,08	0,23
Clima	0,49	86 252	8 625	4 792	431 258	0,04	0,04	0,04
Iluminación	0,15	26 645	2 665	1 480	133 225	0,04	0,01	0,01
Otros	0,36	62 598	6 260	3 478	312 988	0,04	0,16	0,57

Anexo 1. Vista en planta de los espacios actuales



Anexo 2. Vista en planta de las modificaciones al CETER



Anexo 3. Algunas imágenes finales del proyecto.



Izquierda arriba, vista desde la calle de entrada.
Derecha arriba, vista general del conjunto desde el sur. Izquierda abajo, detalle de la protección solar. Derecha abajo, vista del conjunto desde los bajos de la cafetería.

Bibliografía

BÉRRIZ, LUIS. «Perspectivas del aprovechamiento de la energía solar». La Habana: Academia de Ciencias de Cuba, 1981.
Catálogo Técnico Unidades Refrigerantes TECHNOBLOCK. Italia: 2003.
COLECTIVO DE AUTORES. «Guía de oportunidades de inversión en el sector hotelero». La Habana: 2000.
COLECTIVO DE AUTORES. «Memoria descriptiva del CETER». La Habana: Facultad de Arquitectura, CUJAE, 2007.
COLECTIVO DE AUTORES. «Propuesta de fortalecimiento del CETER». La Habana: CETER. 2007.
COLECTIVO DE AUTORES. «Gestión de Proyecto Edificio CETER». La Habana: CETER. 2007.
COLECTIVO DE AUTORES. «Las energías renovables en Cuba», en *Energía y tú* No. 13, ene.-mar., 2001.

COLECTIVO DE AUTORES. «Las energías renovables en Cuba», en *Energía y tú* No. 22, abr.-jun., 2003.

COMISIÓN NACIONAL DE ENERGÍA. *Biogás: Construcción, producción y utilización*. La Habana: 1987.

Instituto de Investigaciones Tecnológicas. *Planta de Biogás: Diseño, construcción y operación*. La Habana, 1987.

LEÓN PÉREZ, BOREAL. «Uso de la energía solar en Cuba», en *Bohemía*, La Habana, 27 de febrero de 1981. pp. 90-91.

Manual de alumbrado Westinghouse, segunda edición, 1973.

Manual de aire acondicionado. vol.1. Edición Revolucionaria, 1987.

Manual de alumbrado de la Philips.

MONTALVO, M. SILVIO, Producción de biogás. Universidad Técnica Federico Santa María.

Introducción al enfriamiento por desecante avanzado y programa de deshumidificación. Departamento de Energía de Estados Unidos de América. «Solar Photovoltaic Report 2005». 2da. edición. Londres: ABS Energy Research, 2005.

SLAYZAK, S. J. Y J. P. RYAN. «Desiccant Deshumidification Wheel Test Guide». Laboratorio Nacional de Energía Renovable. Golden, Colorado, 2000.

Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Tomos I, II y III.

Internet:

<http://www.solardirect.com>
<http://www.idae.es>
<http://www.cener.com>
<http://www.energiasinfronteras.org>
<http://www.absenergyresearch.com>
<http://www.phywe.com>
<http://www.dixell.com.com>
<http://www.whispergen.com>
<http://www.wikipedia.com>
<http://www.asifunciona.com>
<http://www.nrel.gov>

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

DIRECTOR GENERAL:

Dr. Luis Bérriz Pérez.

DIRECTOR:

Lic. Manuel Álvarez
González.

EDITOR:

Lic. Alejandro Montecinos
Larrosa.

CORRECCIÓN:

M Sc. Roberto Manzano
Díaz.

Ing. Jorge Santamarina

DISEÑO ELECTRÓNICO:

D.I. Antonio Romillo Polaino.

TRADUCCIÓN:

Lic. Lázaro O'Farril Lazo.

CONSEJO ASESOR:

Dr. Luis Hernández (Energía fotovoltaica)

Dr. Conrado Moreno Figueredo (Energía
eólica)

Lic. Bruno Henríquez Pérez (Física
ambiental)

Dr. Jorge Luis Paretas (Energía hidráulica)

Dr. Dania González Couret (Arquitectura
bioclimática)

Dr. Jorge Guardado (Biomasa)

Dr. Sergio Corp Linares (Energía solar
térmica)

Lic. Leonor Turtós Carbonell (Impacto
ambiental)

Lic. Alejandro Montecinos Larrosa (Energía
humana)

Lic. Ricardo Bérriz Valle (Educación
ambiental)



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

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

Teléfono: (537) 205-9949.

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

e-mail: editora@cubasolar.cu

<http://www.cubasolar.cu>