



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTAL DE CUBASOLAR

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

9



Combustibles alternativos en el transporte de Cuba.....	1
Propiedades ópticas de filtros líquidos para climate controled chambers.....	14
Herramientas de análisis para simulación de sistemas híbridos.....	25
Método de los Grados-Día. Determinación de la temperatura base para la provincia de Camagüey.....	38
Mitigación del impacto ambiental que generan los residuales sólidos del beneficio de café a partir de la producción de abono orgánico.....	44
Sistema solar termosifónico de calentamiento de agua sanitaria en cayo Las Brujas.....	66

Combustibles alternativos en el transporte de Cuba

Alternative Fuels in Cuban Transportation

*José M. Villarroel Castro y Lino Ordieres Bouzareñs
Centro de Investigación y Desarrollo del Transporte, Ciudad de La Habana, Cuba.
Research Center and Transportation Development, Havana City, Cuba
e-mail: diagnostico@iitransp.transnet.cu y lino@iitransp.transnet.cu*

Resumen

En este artículo se analizan los combustibles alternativos que se emplean internacionalmente en el transporte y se determinan los más probables que se podrían emplear en Cuba; se describen los trabajos realizados al respecto por el Centro de Investigación y Desarrollo del Transporte, y se mencionan los que han desarrollado otras entidades. En los últimos años, en el transporte se han introducido parcialmente algunos de estos combustibles, como son el gas natural comprimido y el alcohol, lo que ha posibilitado sustituir una pequeña parte de los que tradicionalmente se utilizan con este fin en el país (gasolina y diésel).

Palabras clave: Combustibles alternativos, combustibles fósiles, petróleo, biodiésel, fuentes renovables de energía, combustibles limpios.

Abstract

In this paper we analyze the alternative fuels used in transportation worldwide and those likely to be used in Cuba are also reviewed in this article. Works carried out in this regard in the Transportation and Research Center and others performed in other entities are here described. Some of these fuels have been partially introduced in the transport sector in recent years like compressed natural gas and alcohol, replacing a small part of those traditionally used with this purpose in Cuba (gasoline and diesel).

Key words: Alternative fuels, fossil fuels, biodiesel, oil, energy renovated fuels, clean fuels.

Introducción

En el mundo contemporáneo el incremento del consumo de energía se debe, entre otras razones, a la demanda de gasolina y diésel para el uso de los vehículos terrestres.

Desde principios del siglo XX los combustibles derivados del petróleo se impusieron a otras fuentes que ya habían sido utilizadas ampliamente en el transporte, como fue el caso de la energía eléctrica. Esto se debió a la política adoptada por muchos países sobre el uso de los combustibles derivados del petróleo, lo que propició también el desarrollo de la industria automovilística y conllevó a la proliferación del empleo de estos combustibles en el transporte.

Sólo en tiempos de crisis, como durante la Segunda Guerra Mundial, el uso del alcohol

y la energía eléctrica tomaron nuevo auge, que desapareció o disminuyó posteriormente al concluir esta. A partir de la crisis del petróleo de los años setenta, debido al alza del precio de los combustibles fósiles y la incipiente preocupación por disminuir la contaminación ambiental provocada por el transporte, en el mundo se intensificaron los estudios para la introducción de los combustibles alternativos. Se conocen como tal aquellos combustibles que no son el diésel y la gasolina, tradicionalmente empleados por los medios de transporte.

El objetivo de este trabajo consiste en ofrecer una panorámica general del consumo de este tipo de portador energético y los resultados obtenidos en Cuba, a partir de la década del noventa, cuando se comenzaron a desarrollar en el país diferentes estudios y trabajos para la introducción de nuevos tipos de combustibles en el transporte.

Consumo de energía en el transporte

En Cuba el consumo de energía ha disminuido en los últimos años a causa del llamado Período Especial, lo que ha afectado todas las ramas de la economía, incluyendo el transporte. Hasta el 2002 las medidas adoptadas en el país, encaminadas al ahorro de los carburantes, estuvieron dirigidas fundamentalmente a disminuir el consumo de la gasolina, lo que motivó realizar estudios encaminados a la sustitución de dicho combustible.

El transporte absorbe hoy 22 % de la energía secundaria consumida en el país, y como muestra la figura 1, recae sobre el diésel 67 % de la utilizada por estos equipos.

Esto conlleva a que las mayores limitaciones de disponibilidad correspondan a este combustible, lo que demanda la importación de cuotas adicionales.

La figura 1 muestra, además, la participación de todos los combustibles empleados en el transporte, donde se denota que la participación de los combustibles alternativos en este sector es muy bajo, ya que no sobrepasa 0,014 %.

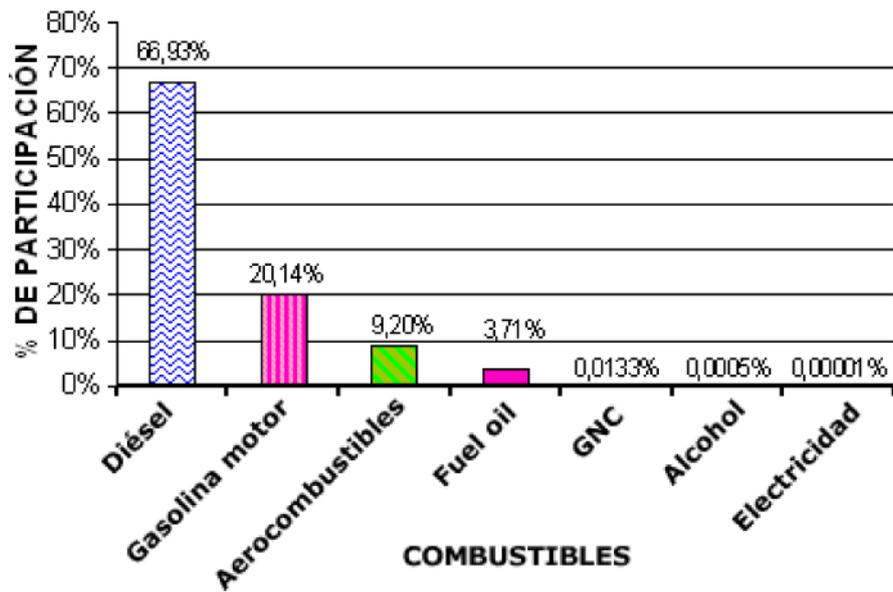


Fig. 1. Participación de los combustibles alternativos en el transporte.

Por otra parte, aunque la cantidad de combustible diésel consumido en el transporte durante los últimos años ha disminuido, existe una ligera tendencia al incremento del tanto por ciento asignado a esta rama de la economía, debido a la política de ahorro y a la sustitución del uso de derivados del petróleo de importación en otras esferas, por productos de producción nacional (Fig. 2). Un ejemplo de ello es la electrificación de diferentes procesos en la agricultura.

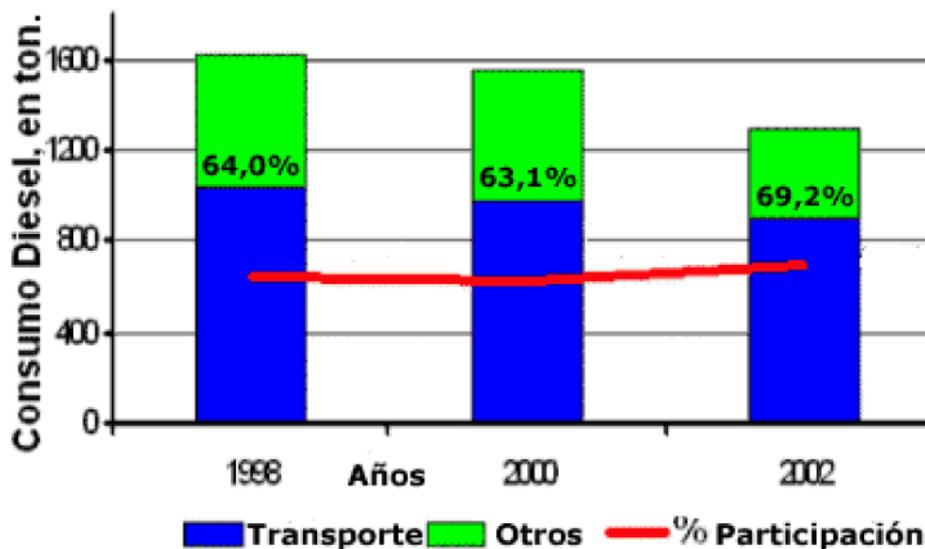


Fig. 2. Consumo de diésel en el transporte y otros en el período 1998-2002.

Para su análisis podemos clasificar los combustibles alternativos en tres grandes grupos: los que proceden de fuentes renovables, los de origen fósil y los limpios, considerando dentro de estos el hidrógeno y la electricidad.

Combustibles obtenidos de fuentes renovables

Se consideran energías renovables aquellas que son capaces de reponerse en un período no superior al requerido para su formación. Las más conocidas y empleadas por el hombre son la energía hidráulica, la eólica, la solar y la procedente de la biomasa.

La energía hidráulica no tiene prácticamente aplicación directa en los medios de transporte. La eólica, a pesar de haber mantenido la comunicación entre continentes por varios siglos con una tecnología tan simple como una vela, desafortunadamente cayó en desuso casi total.

La aplicación de la energía solar en el transporte se limita sólo al uso de los paneles solares en los sistemas de señalización (vial, ferroviario y naval) y en algunas instalaciones de comunicaciones, en lugares donde no es económicamente rentable la construcción de una línea de suministro de energía o de comunicaciones.

En Cuba la amplia red de las líneas de distribución de energía eléctrica, unido al bajo costo de esta, no hacen rentables el uso de los paneles solares para el sector, con excepción de su utilización en boyas y faroles en los cayos y zonas muy aisladas.

En los últimos años en varios países se han fabricado diferentes tipos de vehículos ligeros que utilizan los paneles solares para suministrar energía eléctrica a los vehículos. Sin embargo, aún estos se encuentran en una fase primaria de experimentación, y son relativamente caros, frágiles, voluminosos y de baja capacidad de carga. En cuanto a la biomasa, sí puede ser de amplias posibilidades en medios de transporte mediante el etanol, el metanol, los biocombustibles sólidos, el biodiésel y el biogás.

Etanol

Se obtiene a partir de la fermentación y posterior destilación de jugos ricos en azúcares, tales como: la caña de azúcar, el maíz, la remolacha, el sorgo dulce y otros. Puede ser empleado como combustible puro (100 %) en motores diseñados con este fin, o en forma de mezclas, generalmente entre 5 y 25 %, con los combustibles tradicionales (diésel y gasolina). También puede emplearse como aditivo antidetonante (sustituyendo al tetraetilo de plomo) en la gasolina.

El uso de las mezclas etanol-gasolina, en motores con encendido por bujías de ignición, son conocidas desde principios del siglo pasado; alcanzaron su mayor auge a mediados de la década de los setenta con el Programa Proalcohol de Brasil; también en esa época se desarrolló el motor de alcohol. El etanol en los motores diésel se comienza a utilizar a partir de la década del ochenta, motivado por el interés de disminuir la contaminación atmosférica. Países como

los Estados Unidos, Suecia, Alemania, India, Kenya y Zimbabwe, entre otros, también han ejecutado programas al respecto.

En general, el uso del etanol como combustible presenta las ventajas siguientes:

- Sustitución de derivados del petróleo.
- Se obtiene a partir de fuentes renovables.
- Tiene un índice de octano superior al de la gasolina.
- Fácil manipulación.
- Su costo de producción en Cuba es menor que el de la gasolina y el diésel.

No obstante, el empleo del etanol tiene algunas desventajas, como su menor poder calórico (menos energía para un mismo volumen que los combustibles fósiles) y presenta algunos problemas de corrosión en las partes mecánicas y en los elastómeros (sellos de goma).

En Cuba se comenzó a utilizar el etanol como combustible a partir de 1948, conocido con varias denominaciones, como mofuco o gasohol. En 1961 cesó su utilización al incrementarse la importación, a precios módicos, de combustibles fósiles derivados del petróleo, procedentes de la Unión Soviética.

El Centro de Investigaciones y Desarrollo del Transporte (CETRA), desde 1995 comenzó a desarrollar investigaciones preliminares sobre el uso del alcohol como combustible [Bueno, 1995]. A partir de 1997 esta misma entidad empezó a trabajar de conjunto con el Ministerio del Azúcar (MINAZ). Los primeros proyectos estuvieron dirigidos al empleo de los alcoholes hidratados por ser los de mayor producción en el país en los últimos diez años (99 % como promedio), los de más bajo costo y los más proclives al surgimiento de excedente en los próximos años, debido a la ejecución del plan de gasificación de las viviendas.

Los primeros estudios de mezclas de alcohol hidratado (técnico A) a 25 % con gasolina se concluyeron en el 2000 [Alea, *et al.*; 2000]. Se comenzó a utilizar en once vehículos de la empresa Camilo Cienfuegos y después se incorporaron otras empresas azucareras a lo largo del país (Héctor Molina y Antonio Guiteras a partir del 2002 y Manuel Martínez Prieto desde el 2003), hasta llegar a 83 vehículos de todos los tipos.

Como resultado se han acumulado más de un millón y medio de kilómetros recorridos. Algunos equipos han circulado con esta mezcla entre 60 000 y 80 000 km. La tecnología empleada requiere del almacenaje y suministro por separado del alcohol y la gasolina. Durante el 2005 se iniciará una escalada de aplicación en trece empresas del MINAZ, asociadas a destilerías de alcohol y en los vehículos pertenecientes a este mismo organismo en Ciudad de La Habana. Esto permite emplear las mezclas de alcohol hidratado técnico A-gasolina en más de 400 equipos, lo que podrá sustituir anualmente alrededor de 110 000 L de gasolina para un efecto económico aproximado de 100,0 MP convertibles anuales. Actualmente se están realizando investigaciones de conjunto CETRA-MINAZ para el uso de alcoholes hidratados (alcohol técnico

B) al 30-40 % con combustible diésel, mediante el desarrollo de la tecnología de la inyección directa del alcohol y el diésel [Alea, *et al.*; 2003]. Este método, aunque implica modificaciones permanentes en el motor, no impide el funcionamiento normal del vehículo cuando sólo utiliza el combustible de diseño. El proyecto se encuentra en la fase de perfeccionamiento de la tecnología.

Además, CETRA ejecuta otro proyecto de conjunto con el MINAZ y el ICINAZ que tiene como objetivo evaluar las dosificaciones de alcohol anhidro más apropiadas en mezclas con diésel y el empleo de aditivos cubanos, el que se encuentra en etapa de ensayos de laboratorio.

El empleo del alcohol hidratado en sustitución de la gasolina y el diésel resulta económicamente ventajoso en las flotas cautivas del MINAZ. Sin embargo, su aplicación a nivel de país y la utilización del alcohol anhidro en las condiciones de producción futura requiere de análisis y evaluaciones más profundas, de la factibilidad de producción en grandes cantidades, de los costos y posibles uso del etanol, entre otros.

Metanol

El alcohol metílico o de madera recibe este nombre por su obtención original a partir de la viruta de la madera, aunque en estos momentos las grandes producciones de metanol se logran a partir de la hidrólisis del metano. Puede ser empleado como combustible puro (al 100 %), en mezclas, como antidetonantes y como portador de hidrógeno.

Existe una amplia experiencia internacional (Brasil, Estados Unidos, Canadá, Alemania, Suecia) sobre su uso en los vehículos automotores. En Cuba se han realizado algunos estudios al respecto y hay una experiencia muy interesante de su empleo como portador del H₂, en un automóvil Volga 24 [Ordieres, 2003].

Sin embargo, a pesar de que puede ser un combustible renovable (según su origen) y tener efectos ambientales muy favorables, su alto costo no lo hace recomendable al país, además de ser altamente tóxico.

Biocombustibles sólidos

Fue uno de los primeros combustibles que emplearon las locomotoras de vapor en forma de troncos de madera (leña). En la actualidad este combustible lo utilizan trenes de algunos países como India y Pakistán, vinculados a la producción de azúcar. Su empleo está limitado al ferrocarril.

La forma más eficiente del uso de este portador es utilizando los residuos agro-industriales, como la paja de la caña, el bagazo, la cáscara del arroz y los residuos de aserrío, entre otros. Generalmente se aplican en un proceso de quema directa. Sin embargo, el limitado poder calórico y su baja densidad obligan a emplear técnicas de compactación al combustible y de modernizaciones termo-energéticas en las locomotoras.

El uso de los biocombustibles sólidos presenta las ventajas siguientes:

- Sustitución sustancial de derivados del petróleo.
- Su aplicación favorece el medio ambiente.
- Reducción de los costos de transporte ferroviario.
- Para Cuba, permite el empleo de locomotoras de vapor, que pueden construirse y repararse en el país.
- Aprovechamiento del residual que se quema en el campo sin utilización (se consume menos de 5 % de los residuos agrícolas de la caña de azúcar).
- Inversiones menores que en cualquier otra solución ferroviaria para el país.
- La modernización de la locomotora de vapor conduce a la automatización de su operación.

Con el objetivo de utilizar los residuos cañeros en el transporte, el Ministerio del Transporte, desde 1993 y en coordinación con otros ministerios, fundamentalmente el MINAZ, comenzó a trabajar en la modernización de la locomotora de vapor 1816 y en la implementación de briqueteadoras de paja de caña.

Los trabajos de modernización estuvieron dirigidos a elevar la potencia de la locomotora y que el ciclo termodinámico tuviera el mayor rendimiento posible, para lo cual se definió y elevó la presión de trabajo de la caldera hasta el máximo, según la calidad de sus materiales, espesores de chapas, así como el eje y las muñequillas motrices; se redujo al máximo la contrapresión al escape, aplicando el eyector LEMPOR de último modelo; se elevó al máximo la temperatura del vapor según posibilidades de la tribología del cilindro, y se concibió la alimentación de la caldera con agua precalentada.

Estos trabajos se concluyeron [Olmo, *et al.*; 2000], y se ejecutaron las pruebas de explotación durante las zafas azucareras de 1999-2000 y 2001-2002 en las empresas Eduardo García Lavandero y Héctor Molina. Como resultado se obtuvo que los consumos de fuel oil con la locomotora 1816, son tres veces menores que en similares equipos de vapor (locomotora 1823) después de haberle ejecutado una reparación capital a esta última. En la figura 3 se muestran los resultados de diferentes pruebas realizadas a ambas locomotoras.

Durante el 2005 se comenzará la transformación de la locomotora 1816 para que pueda quemar residuos cañeros. Con el fin de solventar el problema de la baja densidad se ha empleado una briqueteadora, lo que resulta una solución de carácter local. La briqueteadora se encuentra en explotación desde el 2003 en la empresa Abel Santa María, de Villa Clara, perteneciente al MINAZ. Las briquetas se queman de forma muy satisfactoria en las calderas bagaceras.

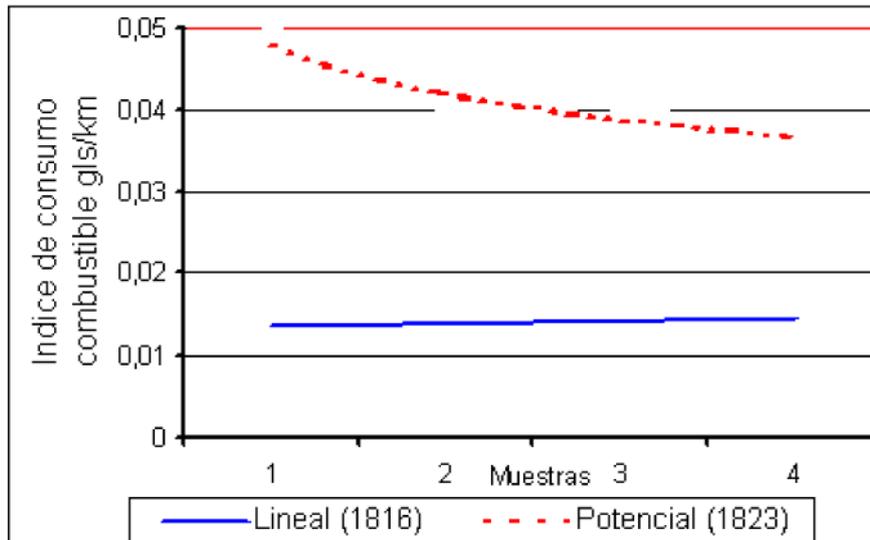


Fig. 3. Resultados de las pruebas ejecutadas entre las locomotoras 1816 y 1823.

Biodiésel

Es un combustible similar al diésel, producido a partir de oleaginosas, tales como la soya, el girasol, el maní, la colza, el coco, el maíz, la semilla de algodón, la palma, aceites usados, sebos y otros. Cuando la grasa vegetal o animal reacciona con el metanol o el etanol, en presencia de un catalizador, se produce un éster (que es el combustible) y glicerina como un subproducto.

Aunque puede emplearse puro (100 %) sin modificar los motores, generalmente brinda los mejores resultados en mezclas de 20-30 % de éster con 80-70 % de diésel común. El tanto por ciento que se debe utilizar, así como la oleaginosa tomada como base dependen de las disponibilidades y posibilidades de cada territorio. Existen experiencias a diferentes escalas en Alemania, Austria y otros países de Europa Central, en Brasil, España, Filipinas, los Estados Unidos y Francia. Se puede utilizar en cualquier tipo de transporte automotor de carretera, el ferrocarril e incluso en la navegación marítima.

El uso del biodiésel como combustible presenta las ventajas siguientes:

- Se obtiene de fuentes renovables.
- Sustitución de derivados del petróleo.
- No se requiere de modificaciones en los motores ni para el suministro y abastecimiento.
- Disminuye la contaminación ambiental.

En Cuba se ha comenzado a trabajar en la obtención de biodiésel a partir de la *Jatropha curca* (Piñón de Botija). En este proyecto participarán varias instituciones cubanas y se desarrollará en colaboración con la firma brasileña PETROBRAS. Se esperan resultados halagadores, ya que las semillas son un subproducto del árbol que se utiliza contra la desertificación en la parte más

oriental del país y además se obtiene glicerina, por lo que su cultivo representa un beneficio doble para la sociedad.

Biogás

Este combustible se obtiene a partir de la descomposición anaerobia de materias orgánicas. Habitualmente contiene cerca de 35-40 % de CO₂ y 60-65 % de metano (CH₄). Con esta composición tiene un reconocido empleo para la iluminación y la cocción de alimentos en zonas rurales. También es posible aplicarlo al transporte, para lo cual es necesario extraer el CO₂; el resultado es un gas con más de 90 % de CH₄.

La obtención controlada del biogás reduce las emisiones de gases de efecto invernadero, y su aplicación en el transporte reduce los contaminantes que emiten los vehículos. Sin embargo, la reducida autonomía de los automóviles que trabajan con este tipo de combustible conlleva a que su aplicación sea relativamente cara y de aplicación local. En Cuba el ICINAZ ha trabajado al respecto.

Combustibles alternativos de origen fósil

Desde que el mundo tomó conciencia de que un elevado porcentaje de los contaminantes presentes en la atmósfera son emitidos por los vehículos de combustión interna, que consumen combustibles fósiles, se comenzaron a diseñar diferentes alternativas tendientes a generar compuestos o desarrollar sistemas que dañen menos al medio ambiente y permitan sustituir los combustibles tradicionales. Entre ellos se encuentran: el gas natural comprimido (GNC) y el gas licuado de petróleo (GLP).

Gas licuado de petróleo (GLP)

El propano o gas licuado de petróleo, como se conoce, es el combustible alternativo más desarrollado tecnológicamente y comercialmente; se emplea por más de diez millones de vehículos en el mundo, y los países que se destacan son Corea del Sur, Japón, Italia, Australia y Holanda, entre otros. Se obtiene en cantidades limitadas del proceso de refinación del petróleo (gases producidos en el *cracking*).

En Cuba es empleado solamente por los vehículos que reparten este propio gas a domicilio. Su reducida disponibilidad limita su generalización, ya que esta disponibilidad se encuentra destinada a la población (plan de gasificación) y a servicios sociales, como escuelas, círculos infantiles, etc., para la cocción de alimentos. La Resolución 47 del MITRANS prohíbe el uso de este portador en los vehículos de motor.

Gas natural comprimido (GNC)

Es el combustible de origen fósil de más baja emisión de contaminantes. Actualmente más de cincuenta países y de 3,5 millones de vehículos lo emplean como combustible automotor, y los países que se destacan son

Argentina, Italia, Pakistán, Brasil, los Estados Unidos, Venezuela y la India, entre otros. Esta tecnología también es utilizada en el ferrocarril.

El uso del GNC como combustible presenta las ventajas siguientes:

- Sustituye derivados del petróleo.
- Disminuye sustancialmente la contaminación ambiental.
- Reduce los gastos de mantenimiento.
- Solo requiere ligeras modificaciones en los motores y muchas firmas reconocidas del sector ofertan motores diseñados expresamente para GNC.

Como desventaja se considera que su implementación requiere de cierta inversión inicial en las estaciones de suministro y en el equipamiento que se debe adicionar al vehículo automotor para los casos de adaptación. También el incremento del peso de los cilindros empleados para el almacenaje del GNC a bordo.

En Cuba, a partir de una donación de la ONG alemana «Pan para el Mundo» y el «Fondo Mundial para la Naturaleza», se desarrolló el Proyecto Jarugas. Una parte de este proyecto estuvo destinada a la implementación del gas natural en el transporte.

En consecuencia con ello, desde 1996 el CETRA inició algunos trabajos investigativos al respecto.

En 1998 se creó la Unidad Básica (UB) Transeco, perteneciente al Grupo de Investigaciones del Transporte, con el fin de desarrollar en el país, a mayor escala, tecnologías tendientes al empleo del GNC en el transporte [Ordieres, 2001]. En estos momentos esa unidad cuenta con una infraestructura consistente en un taller de conversión y dos estaciones de servicio que ofrecen GNC.

Una investigación encaminada a valorar el uso del GNC en el transporte automotor, bajo las condiciones de Cuba, arrojó, entre otros resultados, que los vehículos de gasolina adaptados reducían su potencia entre 8 y 12 %, las prestaciones del vehículo en 5 %, los costos de mantenimiento (vinculados a la combustión) en 33 % y que medioambientalmente era mucho menos contaminante [Díaz, *et al.*; 1999]. Estos resultados están en el entorno de lo reportado por la bibliografía internacional.

En el país se encuentran en explotación aproximadamente un centenar de vehículos de gasolina, los que consumen como promedio, 300 m³ al mes. Se prevé la incorporación de diferentes flotas de taxis, ómnibus y otros servicios locales de Ciudad de La Habana, Habana y Matanzas. También está prevista la adaptación de flotas de taxis, ómnibus y otros servicios locales en Ciego de Ávila.

Con el pleno aprovechamiento de la capacidad instalada en Ciudad de La Habana se podrían abarcar 827 taxis de gasolina en una primera etapa y 114 ómnibus diésel en una segunda fase, lo que posibilitaría sustituir alrededor de 2 650 t de gasolina anuales y ahorros de 324,3 MUSD; mientras que con la gasificación de los ómnibus se sustituirían alrededor de 2 117 t de diésel anuales y se lograrían ahorros de 340,7 MUSD en igual período; o sea, un

ahorro de 3,2 t vehículo/año para la gasolina y 18,5 t vehículo/año para el diésel [Alea, *et al.*; 2003].

Combustibles limpios

Los combustibles limpios que se utilizan en el transporte son la electricidad y el hidrógeno.

Electricidad

La electricidad ha sido empleada en el transporte ferroviario desde finales del siglo XIX

y principios del XX, en el servicio colectivo. Su mayor auge mundial lo logran los tranvías en los años veinte y treinta del siglo pasado; disminuye considerablemente su empleo debido a las facilidades que ofrecían los vehículos automotores con el uso de combustibles fósiles y la imposibilidad institucional de hacer coexistir este tipo de transporte con el automotor.

Durante la Segunda Guerra Mundial y la crisis del petróleo de la década del setenta, algunos países retomaron este medio de transporte y trabajaron en su perfeccionamiento. Sin embargo, no es hasta finales del siglo pasado que se logran resultados significativos, lo que ha conllevado a la electrificación de una gran cantidad vías férreas en Europa del Este y en los países asiáticos, utilizándose fundamentalmente en la transportación de pasajeros.

En Cuba, a mediados de los años ochenta, se estudió la factibilidad de electrificar la Línea Central Habana-Santiago de Cuba [Cruz y Villarroel, 1984-1986], requiriéndose para su ejecución un incremento sustancial de la carga que había que transportar por esta línea, lo que se lograría después de 2020. La diversificación de la entrada de las cargas al país por diferentes puertos y el impacto del Período Especial alejan aún mucho más esta fecha.

Por otra parte, los avances tecnológicos obtenidos a nivel internacional y la nueva tendencia de empleo de este medio de transporte reactivaron, a partir de 2001, el interés por el estudio de la factibilidad de la electrificación de las vías férreas suburbanas de Ciudad de La Habana [Villarroel, *et al.*; 2003], determinándose que:

- El territorio dispone de la infraestructura requerida para la introducción de este medio de transporte (vías férreas), y la demanda de transportación de pasajeros supera los límites mínimos necesarios para que su introducción sea económicamente rentable.
- La aplicación de los resultados de este proyecto representa ahorros sustanciales en inversiones en medios de transporte, amplía el uso de una nueva tecnología, y disminuye la fuerza de trabajo requerida para el mantenimiento y reparaciones de los medios de transporte que se necesitan para el movimiento de los pasajeros en la zona suburbana de Ciudad de La Habana.
- Se requieren de elevadas inversiones iniciales para su aplicación, fundamentalmente en el material rodante.

También se realizó un estudio de prefactibilidad para la introducción de trolebuses en Ciudad de La Habana [MITRANS, 2002], cuyo resultado fue que

existía la posibilidad de un ahorro anual de diésel de 900 t al sustituirse treinta ómnibus grandes en líneas de fuerte demanda por un número similar de trolebuses. A ello se añade un ahorro de 36 t de aceite motor. De igual forma, la introducción de este medio de transporte requiere de inversiones sustanciales para su aplicación, las que desde el punto de vista económico no son posibles actualmente.

En el transporte por carretera, los vehículos eléctricos también datan de principios de siglo, pero el exceso de peso aportado por las baterías de la época y la limitada autonomía fueron, por décadas, prerrogativas determinantes para su empleo, a pesar de sus ventajas ecológicas.

En Cuba, el Instituto de Desarrollo Automotor y el Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría han trabajado en el desarrollo de vehículos eléctricos, que pueden tener aplicación en sectores específicos de la economía, como el turismo o zonas de altos requerimientos ambientales.

En los últimos años, dos nuevas tecnologías que se están imponiendo mundialmente están destinadas a servir de soporte a la implementación de los vehículos con motores de tracción eléctricos. Estos son los vehículos híbridos y la célula de combustible. Ambas tecnologías están destinadas a imponerse en el transporte automotor y el ferroviario, al reducir los consumos de combustibles y las emisiones, además de ser cada día más factible su implementación. Cuba está obligada a iniciar estudios al respecto para no verse relegada.

Hidrógeno

A pesar del alto contenido de energía por unidad de peso, la abundancia de hidrógeno y su combustión completamente limpia, su obtención de forma industrial requiere de un proceso altamente consumidor de energía, además de que el almacenamiento y la transportación son procesos complejos y costosos.

Durante décadas innumerables empresas internacionales trabajaron en la aplicación del H₂ a los motores de combustión interna (MCI) convencionales; sin embargo, no se ha logrado su producción a precios comerciales.

En Cuba, entre 1985 y 1987, el entonces Instituto de Investigaciones del Transporte desarrolló un tema de investigación al respecto: se adaptó el MCI de un Volga 24, en el que se ejecutaron ensayos de campo, con resultados satisfactorios.

En los últimos años se ha producido un giro casi absoluto a la aplicación del hidrógeno mediante las células de combustible, a tenor de la elevada eficiencia lograda por estas, y se comercializaron vehículos de este tipo por las más prestigiosas firmas del sector. La aplicación de esta tecnología aún es relativamente cara, por lo que su empleo no se prevé de inmediato [Salcines, *et al.*; 1999].

Conclusiones y recomendaciones

1. En Cuba se han realizado estudios que han permitido determinar los combustibles alternativos más factibles de utilizar en el país.
2. Los alternativos que ofrecen las mayores perspectivas para el transporte nacional son: el gas natural comprimido y el etanol. Otros pueden brindar soluciones locales o a más largo plazo.
3. Es necesario incrementar en los próximos años el nivel de participación de estos combustibles en el balance energético nacional.

Bibliografía

- ALEA DÍAZ J. J., *ET AL.* «Estudio sobre el uso del gas natural en el transporte». Informe del Centro de Investigaciones del Transporte. La Habana: 2003.
- ALEA DÍAZ J. J.; J. E. PADRÓN Y P. P. RAVELO. Evaluación del motor YUCHAY adaptado a la tecnología alcohol-diésel mediante pruebas estáticas y pruebas de banco. Desarrollo de tecnología para el uso de alcohol-diésel en motores diésel. Informe parcial No. 2. La Habana: Centro de Investigaciones del Transporte, 2003.
- ALEA DÍAZ, J. J.; R. E. DÍAZ Y K. SOCARRÁS. Uso del alcohol como combustible en el transporte. Informe final. La Habana: Centro de Investigaciones del Transporte, 2000.
- BUENO CAPOTE, J. Uso de etanol como combustible en el autotransporte. Informe del Instituto de Investigaciones del Transporte. La Habana: diciembre de 1995.
- CRUZ, ARAMÍS Y J. M. VILLARROEL CASTRO. Investigaciones sobre la factibilidad y efectividad de la electrificación de las líneas férreas del país. Informes Técnicos. La Habana: Instituto de Investigaciones del Transporte. Parte I. Consideraciones fundamentales relacionadas con las perspectivas de desarrollo de la electrificación en los Ferrocarriles. 1984. Parte II. Elección del sistema prospectivo de tracción eléctrica en los Ferrocarriles. 1985. Parte III. Efectividad combustible energética de la electrificación en las vías férreas del país. 1986.
- DÍAZ DÍAZ, G.; L. ORDIERES BOUSAREÑS, *ET AL.* «Influencia del gas natural comprimido en el transporte automotor». Informe de un proyecto del Programa Territorial «Perfeccionamiento de la gestión del transporte público de la capital». La Habana: Grupo I.T., diciembre de 1999.
- OLMO PÉREZ J., *ET AL.* Proyecto de modernización de la locomotora 1816. Informe del Centro de Investigaciones del Transporte. La Habana: 2000.
- ORDIERES BOUSAREÑS, L. «Cuba en el contexto mundial de los combustibles alternativos» Ponencia de la I Convención Internacional del Transporte. La Habana: septiembre de 2001. Resolución 47-03 del Ministerio del Transporte de la República de Cuba.
- SALCINES SOLER, F.; L. ORDIERES, *ET AL.* «Posibilidades de utilización del hidrógeno en los motores de combustión interna». Trabajo investigativo desarrollado por un grupo multidisciplinario de especialistas de distintos Órganos de la Administración Central del Estado. La Habana: diciembre de 1999. Términos de referencia para el estudio de factibilidad del sistema de trolebuses de la Ciudad de La Habana. La Habana: Ministerio del Transporte de la República de Cuba, 2002.
- VILLARROEL CASTRO, J. M., *ET AL.* Electrificación de las vías férreas suburbanas. Caso Ciudad de La Habana. Informe final. La Habana: 2003.

Propiedades ópticas de filtros líquidos para climate controled chambers

Optical Properties of Liquid Filters for Climate controled chambers (Solar-Energy Controlled Weather Chamber)

*Manuel Álvarez González, Luis Bérriz Pérez
y Lisandro Vázquez Hernández*

*Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGÍA),
La Habana, Cuba.*

*Information Management and Energy Development Center (CUBAENERGÍA),
Havana, Cuba.*

e-mail: malvarez@cubaenergia.cu

Resumen

La transmisividad espectral de soluciones acuosas de productos químicos seleccionados en el agua desionizada con varios niveles de concentración se miden para determinar sus efectos en la transmisividad de la radiación solar. Se calcula la trasmisividad total del techo de un climate controled chamber en el rango de la longitud de onda medida. Los datos experimentales indican que las soluciones acuosas coloreadas permiten el filtraje de la radiación solar y que solamente pase la radiación fotosintéticamente activa (PAR) para una mayor eficiencia en la fotosíntesis de las plantas bajo condiciones controladas. Los datos experimentales indican que el sulfato de cobre y el cloruro de cobre pueden considerarse como los mejores candidatos entre los productos químicos analizados para su aplicación en el climate controled chamber.

Palabras clave: Climate controled chamber, radiación, transmisividad espectral, filtros.

Abstract

Spectral transmissibility of aqueous solutions of chemical products chosen in the deionized water with several levels of concentration is measured to determine their effects on transmissibility on solar radiation. Total transmissibility of a climate controled chamber roof in the middle-wave range. Experimental data indicate that colored aqueous solutions allow solar radiation filtration and that only the active photosynthetic radiation goes through (PAR) for a better efficiency in the plant photosynthesis under controlled conditions. Experimental data indicate that copper sulfate and copper chloride can be regarded as the best candidates among the chemical products reviewed for their application in the climate controled chamber.

Key words: Climate controled chamber, radiation, spectral transmissibility, filters.

Introducción

En los países templados donde se requiere el cultivo de plantas tropicales o plantas de verano en los meses de invierno, cuando las temperaturas son inferiores a 0 0C, se utilizan cámaras llamadas invernaderos [Soto y Sánchez-Juárez, 1994; y Santamouris y Argirioual, 1994], cuya función principal es

calentar el aire y las plantas que se cultivan en el mismo. Sin embargo, los requerimientos de los países tropicales para cultivar vegetales típicos de invierno o de clima frío, durante el verano o fuera de estación, son muy diferentes.

Por esto el uso de los invernaderos no es la solución adecuada, ya que se necesitarían grandes consumos de energía en la climatización para lograr la temperatura necesaria en el desarrollo fisiológico de las plantas. Una instalación diseñada según las características de un clima tropical, y por tanto para Cuba, debe dejar pasar a su interior exclusivamente la radiación solar en la zona fotosintéticamente activa (PAR) desde 400 a 700 nm y en la cantidad necesaria para el desarrollo de las plantas, evitando así que pase la radiación no útil que se convierte en calor y que sería obligatorio extraer por medio de la climatización. Este tipo de instalación es llamado en este trabajo «veranero». [Bérriz, *et al.*; 1992a, 1992b y 1995].

La propagación de la radiación en las capas de agua ha sido estudiada por muchos científicos, como se confirma en la literatura [Bérriz, *et al.*; 1992b y 1995], la cual permite conocer las características de la absorción electromagnéticas de agua líquida en cualquier región espectral.

Esta revisión confirma que el agua no sólo absorbe la radiación dónde nosotros lo queremos, sino también prácticamente no absorbe en la región del espectro PAR hasta un espesor de 10 a 15 cm [Curcio y Petty, 1951; Sullivan, 1963]. Sin embargo, la utilización sola del agua no elimina la zona del infrarrojo cercano desde 700 a 900 nm, por lo que es necesario añadir colorantes químicos que corten esta zona espectral. Todo lo anterior hace del agua el solvente apropiado para el desarrollo de filtros líquidos fotoselectivos añadiendo colorantes químicos que hagan posible que solamente pase al interior del veranero la radiación útil a la fotosíntesis.

Es conocido que las soluciones acuosas de sulfato de cobre pentahidratado y el cloruro de cobre se utilizan como filtros ópticos líquidos para cortar el espectro infrarrojo cercano [Mosalam y Ghetas, 1992; Muaddi y Jamal, 1992; y Záidel, 1979]. Sin embargo, no hay información suficiente sobre los efectos de los productos químicos en la transmisión de la radiación.

El objetivo del presente trabajo es presentar los resultados experimentales para la transmisión espectral de soluciones acuosas a varios niveles de concentración de algunos productos químicos, determinar los apropiados para el filtraje de la radiación solar y que las plantas reciban la radiación adecuada, tanto en intensidad como en longitudes de onda, para una mejor eficiencia de la fotosíntesis.

1. Ecuaciones del comportamiento del filtro óptico líquido

Una breve descripción del filtro óptico sería la siguiente: En la figura 1 se muestra el esquema de un veranero. El techo está formado por una doble lámina de cubierta transparente, con el objetivo de dejar pasar la luz solar y a la vez aislar el medio interior del exterior. El techo es horizontal y sobre él va una

capa de agua o solución acuosa que sirve de filtro a la radiación solar; esto es, dejar pasar hacia dentro solamente la radiación solar en la zona del espectro fotosintéticamente activo.

La cantidad de radiación solar que pasa a la cámara se regula variando la altura de la capa líquida absorbente. La capa líquida que está en el techo de la cámara se enfría por evaporación, llevándose 600 kcal por cada litro de agua evaporada. Durante el día pueden llegar a evaporarse hasta alrededor de 6 L/m² de superficie de agua en contacto con el aire, la cual es necesario reponer diariamente.

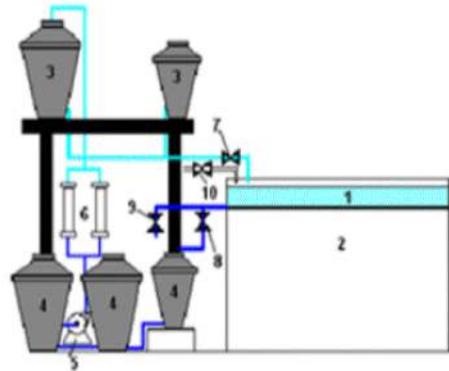


Fig. 1. Esquema de funcionamiento del filtro óptico del veranero: 1. Filtro óptico. 2. Interior de la cámara de clima controlado. 3. Tanques elevados de solución para la carga. 4. Tanques para la descarga. 5. Bomba centrífuga. 6. Filtro de línea. 7. Válvula para la carga. 8. Válvula de descarga. 9. Válvula de purga y toma de muestras. 10. Válvula para reposición de agua.

Tanto las propiedades del material que se utiliza como superficie transparente del techo como de la solución acuosa y que al mismo tiempo conforman básicamente el filtro óptico, inciden directamente en las características ópticas del filtro.

Todas las superficies interiores del veranero que están expuestas a la radiación deben estar pintadas de blanco para disminuir el efecto de la absorción de la luz y su posterior transformación en calor, lo que sería perjudicial para su funcionamiento. Las múltiples reflexiones que provocan las superficies blancas dentro del veranero ayudan a mantener un alto nivel de luminosidad y a aprovechar más la radiación solar en la fotosíntesis.

La solución es bombeada diariamente desde los tanques inferiores a los superiores por una bomba centrífuga de impelente plástico de 400 W de potencia. Después de esta bomba debe ir instalado en el sistema un filtro de solución, para eliminar las impurezas (polvos, insectos, etc.) que se acumulan en la solución durante el día.

1.1 Reflexión de la radiación

Aparte de la radiación solar incidente, el primer dato necesario para poder conocer la cantidad de radiación solar que pasa al interior del veranero es la transmisividad total del sistema óptico que constituye el techo.

Al pasar los rayos solares de un medio a otro surge la reflexión. Eso quiere decir que una determinada parte de la radiación vuelve a reflejarse en la superficie fronteriza entre los dos medios, mientras la otra parte penetra en el segundo medio.

La reflexividad de la luz que pasa a través de la frontera entre dos medios con índices de refracción n_1 y n_2 para cada componente de polarización se obtienen de las relaciones de Fresnel:

$$\rho = \frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (1)$$

$$\rho' = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (2)$$

Donde:

θ_1 y θ_2 son los ángulos de incidencia y refracción, respectivamente.

El ángulo de refracción para cada medio se obtiene de la ley de Snell.

$$\sin \theta_1 / \sin \theta_2 = n_1 / n_2 \quad (3)$$

La radiación incidente y transmitida a través del techo del veranero, supuesto éste no absorbente, encuentra cinco superficies de separación entre dos medios:

- La superficie de la frontera aire-solución donde incide la radiación solar después de atravesar la solución.
- La superficie de la frontera solución-superficie transparente, contacto del vidrio con la solución, y finalmente pasa a través de las fronteras formadas por las superficies transparentes y el aire.
- Las tres superficies del vidrio en contacto con el aire por donde sale la radiación transmitida.

Así, si la energía reflejada en la primera superficie, o sea, en la solución es ρ_s (componente paralela) la radiación transmitida que alcanza la superficie de salida de la solución será $1 - \rho_s$. A continuación habrá otra reflexión en la superficie solución-vidrio, de tal forma que la radiación reflejada será en este caso: $\rho_{sv}(1 - \rho_s)$, que alcanza la otra superficie solución-aire. En el primer vidrio la radiación transmitida es $(1 - \rho_s)(1 - \rho_{sv})$ que alcanza la superficie de separación del vidrio con el aire; la radiación transmitida en el primer vidrio es $(1 - \rho_s)(1 - \rho_{sv})(1 - \rho_{sv})$, y la que se trasmite en el segundo vidrio es $(1 - \rho_s)(1 - \rho_{sv})(1 - \rho_{sv})^2$, siendo la transmitida finalmente $(1 - \rho_s)(1 - \rho_{sv})(1 - \rho_{sv})^3$. El proceso se repite con una nueva reflexión, y así sucesivamente se generan las múltiples reflexiones (Fig. 2).

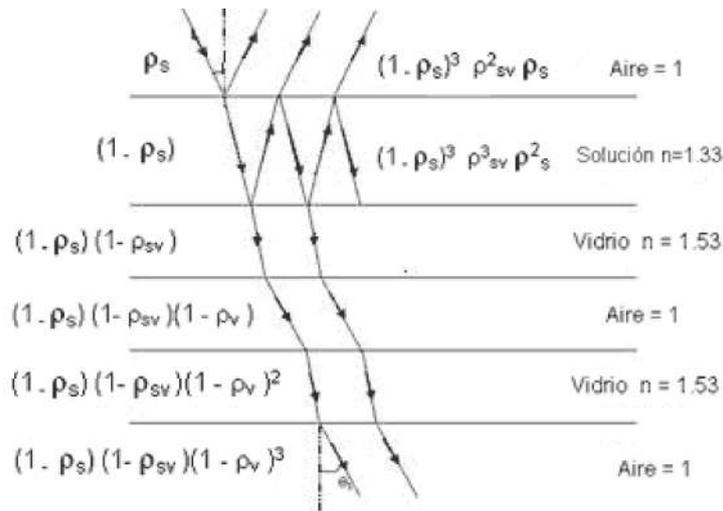


Fig. 2. Reflexiones múltiples en el techo del veranero.

La energía transmitida (componente perpendicular) será la suma de la serie geométrica infinita:

$$\tau_{\text{Perpendicular}} = (1 - \rho_s) (1 - \rho_{sv}) (1 - \rho_v)^3 \sum (\rho_{sv} \rho_v)^n \quad (4)$$

Es decir:

$$\tau_{\text{Perpendicular}} = (1 - \rho_s) (1 - \rho_{sv}) (1 - \rho_v) / (1 - \rho_{sv} \rho_v) \quad (5)$$

Análogamente se obtendrá la componente paralela τ_{paralela} y, por lo tanto, la transmitida media debido a la reflexión será:

$$\tau_r = 0,5 \{ (1 - \rho_s) (1 - \rho_{sv}) (1 - \rho_v)^3 / (1 - \rho_{sv} \rho_v) + (1 - \rho'_s) (1 - \rho'_{sv}) (1 - \rho'_v)^3 / (1 - \rho'_{sv} \rho'_v) \} \quad (6)$$

Donde:

ρ_s , ρ_{sv} , ρ_v son las reflexividades de la luz polarizada en el plano de incidencia en las fronteras aire-solución, solución-vidrio y aire-vidrio, respectivamente. Los símbolos con superíndices (') corresponden a la luz polarizada perpendicularmente al plano de incidencia.

En el caso de incidencia normal tendremos que $\rho' = \rho$ y, por tanto,

$$\tau_r = (1 - \rho_s) (1 - \rho_{sv}) (1 - \rho_v)^3 / (1 - \rho_{sv} \rho_v) \quad (7)$$

$$\rho = (n_1 - n_2)^2 / (n_1 + n_2)^2 \quad (8)$$

Donde n_1 y n_2 son los índices de refracción de los medios de separación.

1.2 Absorción de la radiación

La absorción de la radiación solar por un medio parcialmente transparente, como puede ser el vidrio o la solución, se ajusta a la ley de Bouguer:

$$\tau_a^v = \exp(-K_v \cdot \delta_v / \cos \theta_2) \quad (9)$$

Donde:

K_v y δ son el coeficiente de extinción (cm-1) y el espesor (cm) del vidrio, respectivamente. Sin embargo, la absorción de la radiación solar por la solución acuosa no puede ser descrita a través de una simple exponencial, debido al fuerte carácter espectral que presenta. La transmisividad resultante debida a la absorción por el medio acuoso se obtiene por la siguiente expresión:

$$\tau_a = \sum \eta_i \exp(-K'_s \delta_s / \cos \theta_R) \quad (10)$$

Donde:

K'_s , δ_s , θ_R y η_i son el coeficiente de absorción de la solución en el intervalo de longitudes de ondas dadas (cm-1), el espesor de la solución (cm), ángulo de refracción en la solución y % de la radiación solar entre las longitudes de ondas dadas. Diferentes modelos han sido propuestos para calcular la transmisividad debida a la absorción del agua. Nosotros optamos por dividir el espectro en cuatro intervalos, como sigue: de 300 a 400 nm; de 400 a 700 nm, que corresponde a la PAR; de 700 a 900 nm y de 900 a 1 200 nm.

La transmisividad media del techo del veranero (filtro óptico) para la radiación directa es igual a:

$$\tau = \tau_d \tau_r \tau_a^v \tau_a^s \quad (11)$$

1.3 Radiación difusa

Hasta ahora hemos tratado la transmisividad para la radiación directa, siendo necesario ampliarla por la radiación difusa, con el objetivo de completar el cálculo de la radiación solar transmitida a través del techo del veranero. La distribución espacial de la radiación difusa H_d puede presentar anisotropía en dependencia de la distribución local de nubes y de los componentes atmosféricos que determinan la dispersión (scattering) de la radiación solar. Una buena aproximación, según Duffie y Beckman [1980], es considerar la radiación difusa H_d distribuida uniformemente con simetría semiesférica. Con esta aproximación se tendrá para el coeficiente τ_d de la radiación difusa la siguiente expresión:

$$\tau_d = 2 \int_0^{\pi/2} \tau \cos \theta_1 \sin \theta_1 d \theta_1 = 0,93 \quad (12)$$

En la figura 3 se muestra la distribución espacial (en el plano) de la radiación difusa en la superficie de separación aire-solución e inmediatamente por debajo de ella.

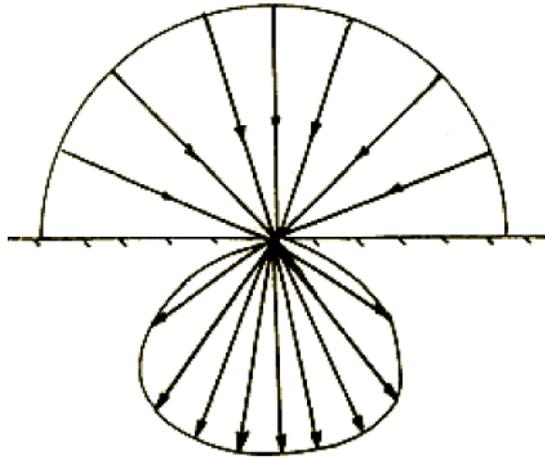


Fig. 3. Distribución espacial de la radiación difusa encima de la superficie de la solución en el veranero inmediatamente por debajo de ella.

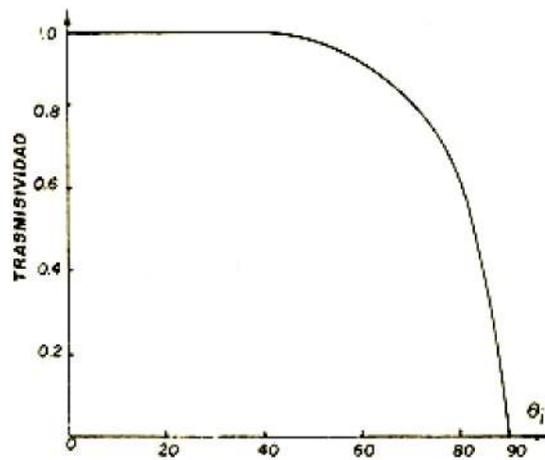


Fig. 4. Dependencia de la transmisividad de la radiación directa con el ángulo de incidencia para una superficie plana de separación aire-solución.

De acuerdo con el valor obtenido de 0,93 para τ_d en (12) se puede considerar la radiación difusa H_d como si fuera una radiación directa, cuyo ángulo de incidencia $(\theta)_d$, obtenido de la figura 4, es de 62° , y el de refracción $(\theta)_r$, obtenido por la ley de Snell es de 42° . Se debe destacar que estos ángulos de incidencia y refracción, así como la transmisividad τ_d son constantes, independientes de la posición del Sol, debido a la suposición hecha anteriormente de la isotropía en la distribución espacial de H_d . La intensidad de la radiación solar transmitida hacia el interior del veranero es:

$$I = \tau_r \tau_a \tau_s H_D + 0,92 H_d \quad (13)$$

Donde H_D y H_d son la radiación solar directa y difusa incidente en W/m^2 .

1.3.1 Procedimiento experimental

Las sales sólidas utilizadas en este trabajo son sulfatos de cobre, sulfato de níquel y cloruro de cobre, disueltas en agua destilada a concentraciones de 0,1 a 1 %. Las sales utilizadas tienen alta pureza ANALAR. A todas se les midió la transmisividad espectral en el intervalo de longitudes de onda desde 300 hasta 1 200 nm en un espectrofotómetro

SF-26. Las mediciones se realizaron tomando como referencia la misma solución a un espesor menor. Posteriormente, se procedió a calcular los coeficientes de absorción espectrales utilizando la siguiente expresión derivada de la ley de Bourger:

$$K_{\lambda} = (\delta - \delta_R)^{-1} \ln \tau_{\lambda} \quad (14)$$

Donde:

δ , δ_R y τ_{λ} son el espesor de la solución y de la referencia en cm ($\delta > \delta_R$) y la transmisividad para la longitud de onda dada, respectivamente.

Finalmente se calcularon los valores integrales del coeficiente de extinción para cada intervalo de longitudes de onda en que se dividió el espectro solar, por la expresión:

$$K_S = (\lambda_2 - \lambda_1)^{-1} \int K_{\lambda} d\lambda \quad (15)$$

1.3.2 Análisis de los resultados

En la figura 4 se muestra el espectro de transmisión óptica contra la longitud de onda en las zonas del visible e infrarrojo cercano del techo del veranero calculadas con la ecuación (9) a partir de las mediciones de transmisión espectral de las soluciones de las sales consideradas a un espesor de 10 cm.

En ellas podemos observar, por las formas de las curvas, que se comportan como filtros selectivos de banda ancha, adecuados para cortar las partes del infrarrojo cercano. Por esta razón resulta conveniente, con el objetivo de comparar las diferentes soluciones, utilizar la definición de longitud de onda de corte [Záidel, 1979], como aquella longitud de onda para la cual la transmisividad, en comparación con el valor máximo, disminuye a la mitad (Figs. 5 y 6).

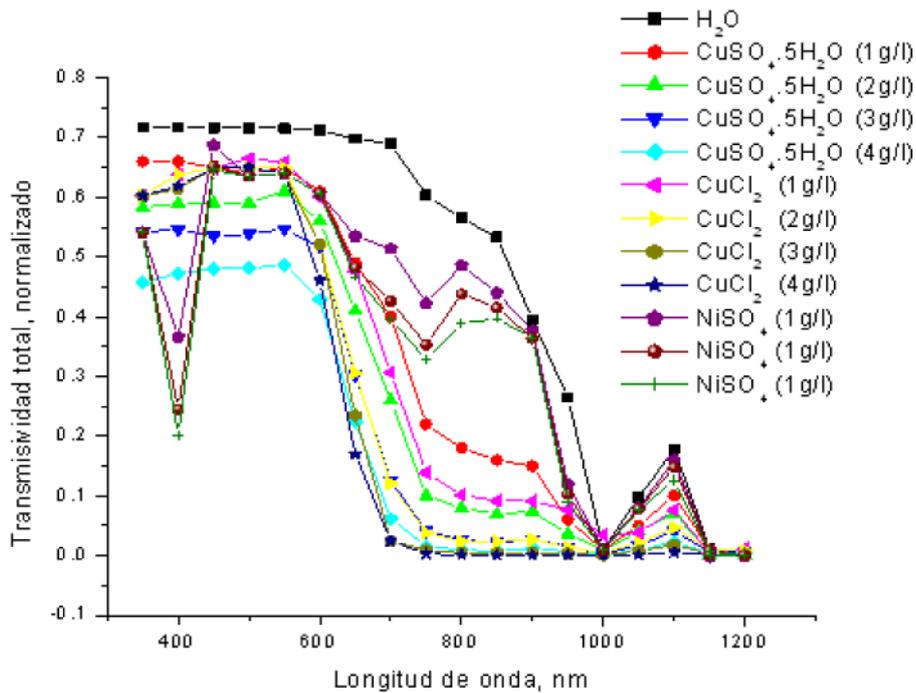


Fig. 5. Transmisividad total del techo del veranero utilizando H_2O y soluciones de $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $CuCl_2$ y $NiSO_4$ de 10 cm de espesor.

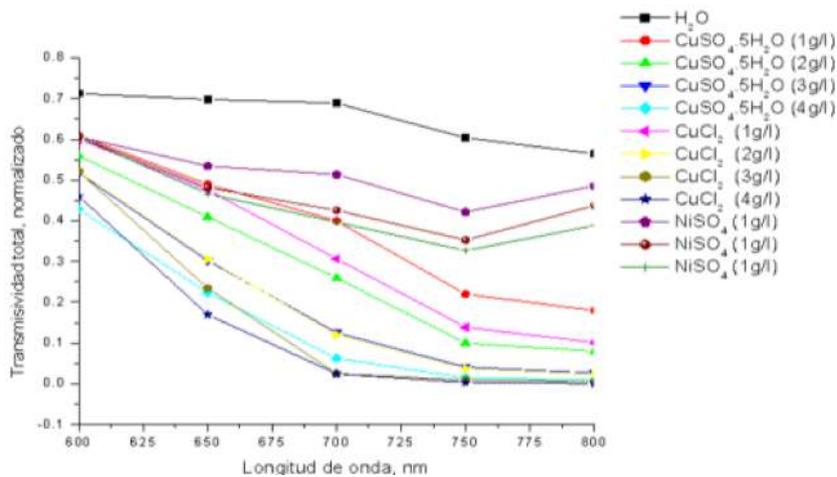


Fig. 6. Transmisividad total del techo del veranero utilizando H_2O y soluciones de $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, $CuCl_2$ y $NiSO_4$ de 10 cm de espesor en la zona de corte del espectro infrarrojo cercano.

Podemos apreciar que las soluciones de cloruro de cobre al 0,15 % y sulfato de cobre a 0,1 y 0,2 % tienen una longitud de onda de corte igual a 685, 720 y 675 nm, respectivamente, por lo que permiten dejar pasar casi toda la PAR. Por otra parte, las soluciones de sulfato de níquel fueron desechadas por presentar una longitud de onda de corte mayor de 740 nm. Además, la solución de sulfato de cobre a 0,3 % es desechada por tener una longitud de onda de corte de 650 nm y ser ésta precisamente el centro del intervalo donde la clorofila absorbe fuertemente la luz.

Tabla 1. Coeficiente de extinción del agua y soluciones de sales de sulfato de cobre y cloruro de cobre a diferentes concentraciones (cm-1)

DI (nm)	300-400	400-700	700-900	900-1200
Valor energético W/m ²	25	356	169,75	137,25
%	3	42,4	20,2	16,3
Agua	0,0001	0,0013	0,0260	0,2942
CuSO ₄ .5H ₂ O (1 g/L)	0,0087	0,0206	0,1282	0,3641
CuSO ₄ .5H ₂ O (2 g/L)	0,0103	0,0334	0,207	0,4022
CuCl ₂ (1 g/L)	0,0082	0,0214	0,12	0,35

En la figura 7 se muestra la radiación solar horaria para un día típico de verano en la ciudad de Santiago de Cuba, y la radiación que pasa a través del techo del veranero durante el día utilizando como capa absorbente 10 cm de espesor de agua y soluciones de sulfato de cobre y de cloruro de cobre a diferentes concentraciones.

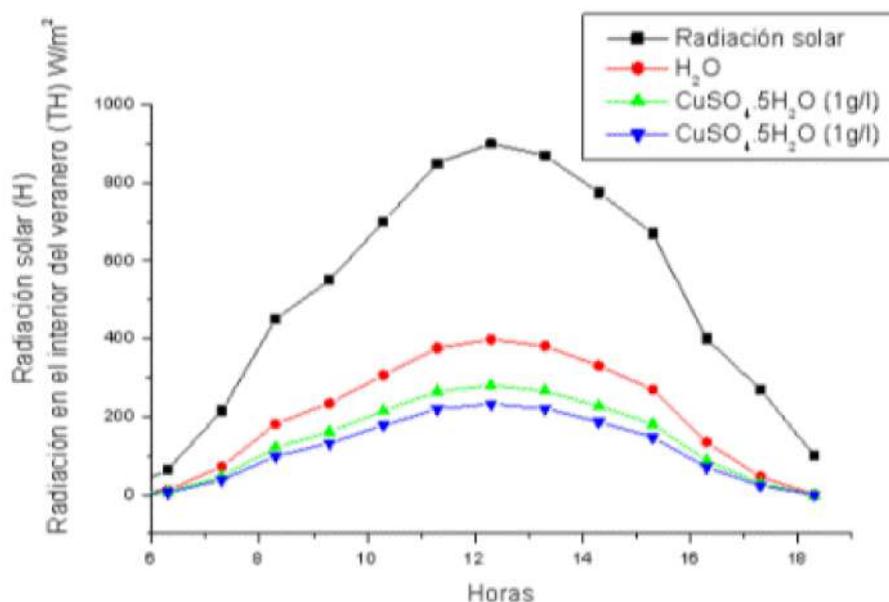


Fig. 7. Radiación solar en el exterior y la que atraviesa la cubierta hacia el interior del veranero.

1.4 Conclusiones

1. El empleo de la solución de sulfato de cobre con concentraciones de 0,1-0,2 % disminuye la carga térmica en la zona de 700 a 900 nm sin perjudicar en gran medida la radiación fotosintéticamente activa PAR en la intensidad necesaria para el desarrollo de las plantas.
2. La transmisividad de las soluciones de sulfato de cobre y de cloruro de cobre son muy similares en el rango de concentraciones analizado, reportando ambas valores muy superiores al que corresponde a la solución de sulfato de níquel.

1.5 Bibliografía

- BECKMAN, W. A. Y J. A. DUFFIE. *Solar Engineering Thermal Processes*. 1980.
- BÉRRIZ PÉREZ, LUIS, MANUEL ÁLVAREZ GONZÁLEZ Y LISANDRO VÁZQUEZ HERNÁNDEZ. «Veranero para el cultivo de vegetales en clima tropical. Propuesta de desarrollo». Informe CIES. Marzo 1992a.
- _____. «Veranero para el cultivo de vegetales en clima tropical. Principios básicos y concepción general». Informe CIES. Octubre 1992b.
- _____. «Veranero para el cultivo de vegetales en clima tropical». Certificado de autor de invención No. 22384. Clasif. Int.: A010 9/14. 25 de abril de 1995.
- CURCIO, J. A. Y C. C. PETTY. «The Near Infrared Absorption Spectrum of Liquid Water». *Journal of the Optical of Amerika*. Volume 41, No. 5, 1951. pp. 302-304.
- MOSALAM SHALTOUT, M. A. Y A. E. GHETTAS. «Using optical liquid filters to increase the solar cell performance». 11th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, 11-16 October, Montreux, Swizerland, 1992. pp. 1506-1808.
- MUADDI, J. A. Y JAMAL, M. A. «Spectral response and efficiency of a silicon solar cell below water surface». *Solar Energy*, Vol. 49, No 1, 1992. pp. 29-33.
- SANTAMOURIS, M. Y M. ARGIRIOUAL VALLINDRAS. «Design and operation of passive solar agricultural greenhouse». *Solar Energy*. Vol. 52. No. 5, mayo de 1994.
- SOTO, G. Y A. SÁNCHEZ-JUÁREZ. «Propiedades ópticas de cubiertas plásticas para invernaderos». LES-UNAM. *Proceedings de la Reunión Nacional de Energía Solar*. México: 1994. pp. 219-221.
- SULLIVAN, S. A. «The absorption o light in destilled, artificial sea water, and heavy water». *Journal of the Optical of America*, Volume 53, No. 8, 1963.pp. 962-968.
- ZÁIDEL, A. N.; G. A. OSTRÓSVSKAYA Y YU. I. OSTROSVKI. *Técnica y práctica de espectroscopia*. Moscú: Ed. Mir, 1979.

Herramientas de análisis para simulación de sistemas híbridos

Hybrid Simulation Systems Tools

Omar Guillén Solís
Instituto de Investigaciones Eléctricas,
Gerencia de Energías No Convencionales,
Avenida Reforma 113, Cuernavaca, Morelos, México. CP 62490
Electric Research Institute, Non Conventional Energy Management,
Avenida Reforma 113, Cuernavaca, Morelos, Mexico. CP 62490. .
Tel.: +52 (777) 362-38-11, ext. 7097.
Fax + 52 (777) 362-38-08.
e-mail: oguillen@jie.org.mx

Nota editorial: Este artículo fue publicado en las Memorias de la XXVII Semana Nacional de Energía Solar de la Asociación Nacional de Energía Solar de México (ANES)

Publisher's note: This article was published in the 27th Solar Energy Week of the National Association of Mexico's Solar Energy (ANES)..

□

Resumen

Para facilitar y simplificar el desarrollo y análisis de un sistema híbrido en lo referente a diseño, construcción, operación y mantenimiento resulta óptimo efectuar la simulación de éste por medio de software, con lo cual se obtiene una reducción significativa en los costos de inversión. Dada la mezcla de tecnologías de generación eléctrica que están involucradas en un sistema híbrido es muy importante disponer de una herramienta integrada con paquetes especializados de cómputo (software), que permitan efectuar las tareas de simulación del funcionamiento operacional de estos sistemas, sin dejar de considerar características de funcionamiento, facilidades al usuario, claridad en los resultados obtenidos y la posibilidad de su validación con respecto a prototipos instrumentados en campo. Asimismo, la identificación de tareas involucradas con relación al lugar de instalación de esta tecnología de electrificación. Actualmente la tecnología de sistemas híbridos se encuentra todavía en etapa de desarrollo en el plano internacional, y existen limitaciones importantes en cuanto a la disponibilidad de metodologías y herramientas ingenieriles para el diseño óptimo de estos sistemas. Con el desarrollo de este trabajo se pretende contribuir al avance de la tecnología y contar con herramientas propias para resolver la problemática descrita. En este artículo se describen las actividades que más impacto tienen en el diseño y desarrollo de sistemas híbridos, así como la identificación de variables, características principales y forma de validación de herramientas en la integración de una

metodología para la simulación de estos sistemas, facilitando su diseño y desarrollo.

Palabras clave: Sistemas híbridos, software, herramienta de análisis, metodología.

Abstract

The optimal solution to enable and simplify a hybrid system analysis as to design, construction, operation and maintenance is to do the simulation through a software since it entails a significant reduction in investment costs. Given the blend of electric generation technologies involved in a hybrid system, it is indispensable to have an integrated estimation package software enabling to do the operational simulation tasks of these systems, without considering the operational characteristics, user's facilities, clarification of the results obtained and the possibility of its validation in reference to prototypes made on the field and also the identification of tasks involved regarding the installation site of this electrification technology. Hybrid technology systems are currently in its development stage worldwide and there are important limitations regarding the availability of methodologies and engineering tools for the optimal design of these systems. This work is aimed at contributing to the progress of technology and to provide the related tools to solve the described problem. This article contains the activities which have the largest impact on design and hybrid systems development, as well as the identification of variables, main characteristics and tools validation forms in the integration of a methodology for the simulation of these systems, thus enabling their design and development.

Key words: Hybrid systems, software, analysis tools, methodology..

1. Antecedentes

Los sistemas híbridos son sistemas de generación de energía eléctrica que emplean alguna combinación de fuentes renovables de energía, como la eólica, solar, hidráulica, biomasa, etc.; opcionalmente auxiliadas con alguna fuente de generación a base de combustibles fósiles, y con almacenamiento en baterías.

El funcionamiento de un sistema híbrido es difícil de verificar por la intermitencia de recursos renovables, por la necesidad de equiparar el suministro eléctrico con la demanda, y por el gran número de combinaciones y tamaños de componentes que darán pie a configuraciones potenciales.

México es un país en el que actualmente existen comunidades donde el suministro eléctrico se proporciona solamente por unas cuantas horas al día por medio de generadores diesel, por lo que sus aplicaciones y actividades productivas son muy limitadas.

Para solucionar en gran parte esta problemática, el Instituto de Investigaciones Eléctricas desde hace algunos años tiene establecida una línea de investigación en la cual trabaja para desarrollar esta tecnología en aplicaciones productivas a nivel experimental.

2. Requerimientos y características que tienen más impacto en el diseño y desarrollo de sistemas híbridos

Para el desarrollo de sistemas híbridos ya se han identificado una serie de

requerimientos específicos y características para el abastecimiento de energía eléctrica; específicamente en comunidades rurales, gran parte de estos requerimientos se utilizan como una guía para definir y establecer el diseño de un sistema que garantice el abastecimiento energético requerido, a bajo costo, y sobre todo aceptado por la comunidad beneficiada.

A continuación se mencionan algunos de los requerimientos más importantes para que el sistema sea sostenible:

- Uso de energías renovables en sitios remotos y la disponibilidad de recursos energéticos locales.
- Potencia requerida definida y constante.
- El menor costo nivelado posible de la energía generada.
- Operación y mantenimiento.
- Operación desatendida.
- Aceptación local.
- Seguridad.
- Vida útil en servicio.
- Flexibilidad y facilidad de expansión de la capacidad.
- Funcionalidad ante severas condiciones ambientales.
- Reproducibilidad.
- Creación de las estructuras de organización en la comunidad para procurar cuidados al sistema.

Otros aspectos no menos importantes se presentan en la instalación, donde gran parte de la problemática es atribuible, al igual que en el diseño, a la falta de una guía metodológica y herramientas de software; por mencionar algunos se tienen:

2.1 Aspectos técnicos

- Falta de conocimiento suficiente respecto a la disponibilidad de recursos renovables (principalmente viento) en algunos proyectos, que conduce a subdimensionamiento de los sistemas.
- Selección de componentes sin tomar en cuenta el medio ambiente del lugar de instalación de los sistemas, que conduce a fallas prematuras de partes y componentes (principalmente en zonas costeras).
- En algunos diseños no se toma en cuenta el aumento en el consumo de energía una vez que los usuarios se acostumbran al servicio eléctrico.

2.2 Aspectos no técnicos

- No se dejan partes de repuesto y componentes críticos de los sistemas en las comunidades.
- Servicios técnicos especializados y refacciones provenientes del extranjero, sin representación en México.
- Algunos de los sistemas implementados han sido únicos en su tipo.
- La cuota pagada por el servicio eléctrico en las comunidades solamente cubre los costos de operación.
- En varias comunidades beneficiadas con sistemas híbridos no se crearon estructuras organizacionales.
- Costo del sistema.

3. Tecnología informática (software) aplicable a la simulación de sistemas híbridos

Para efectuar el análisis de identificación y funcionamiento de las herramientas de cómputo (paquetes especializados de software), se procedió a investigar por diversos medios cuáles paquetes especializados efectúan alguna o varias actividades para la simulación y dimensionamiento de los sistemas híbridos de electrificación a nivel mundial; y como resultado de este análisis se identificaron tareas que resultaron muy interesantes para establecer una metodología, algunas de ellas críticas e imprescindibles, y otras de tipo complementario:

- Factibilidad técnica y económica de un sistema híbrido (*crítica e imprescindible*).
- Funcionamiento operacional: Simulación (*crítica e imprescindible*).
- Cálculo de las emisiones contaminantes evitadas por el uso de tecnologías limpias (*complementaria*).
- Simulación de pequeñas redes eléctricas de distribución (*complementaria*).

La identificación de las tareas fue resultado del análisis de cada uno de los paquetes especializados. Así se determinó que los paquetes de cómputo, que resultaron más favorables en la integración de una metodología para simulación de sistemas híbridos, son en cada caso: HOMER, HYBRID2, RETScreen y ViPOR; respectivamente.

3.1 Factibilidad técnica y económica de un sistema híbrido

Para cubrir la necesidad de una herramienta de planificación técnica y económica de valoración de sistemas híbridos, donde se pueda analizar y evaluar un gran número de opciones, así como la factibilidad de estas de una manera simple, se obtuvo una configuración óptima del sistema requerido y se identificó y se comprobó que el paquete de software que más se ajusta a las necesidades antes descritas es HOMER.

HOMER es el significado en inglés de «Modelo de optimización para sistemas híbridos eléctricos con base en energías renovables» (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*) desarrollado por NREL (*National Renewable Energies Laboratory, Estados Unidos*).

Como característica principal de HOMER se identifica que es una herramienta útil para determinar el menor costo de la energía generada a las comunidades remotas (\$/kWh).

Esto es realizado mediante simulaciones de cada hora de funcionamiento de miles de sistemas potenciales analizando los costos del ciclo de vida útil. También realiza análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de un cambio en cualquiera de los parámetros de entrada y proporciona resultados anuales, de cada hora, y en forma tabular y gráfica.

Entre las características principales del paquete se destacan las siguientes:

- Optimizar el diseño, llegando a la configuración de sistema con el costo nivelado de energía mínimo.
- Considerar generación hidráulica, biomasa e hidrógeno.
- Comparar sistemas híbridos a extensión de red convencional.

- Considerar mezclas de cargas en corriente alterna y corriente directa.
- Realizar análisis de sensibilidad.

Entre los datos proporcionados por HOMER, las principales variables indicativas de cada configuración son el valor presente neto del sistema (\$) y el costo nivelado de energía generada (\$/kWh), siendo la configuración óptima la de menor costo nivelado.

3.2 Funcionamiento operacional (simulación)

Para realizar la simulación del funcionamiento y operación de un sistema híbrido se identificó una herramienta ya utilizada en diferentes tipos de sistemas y en distintas condiciones de operación, así como de aplicaciones. Para utilizar esta herramienta es necesario establecer como características principales de entrada que se realice una evaluación preliminar de los componentes del sistema híbrido, como paneles fotovoltaicos, aerogeneradores y moto-generadores a diesel, controlador e inversor de carga (este último si se requiere).

También se debe realizar una evaluación y caracterización de los recursos disponibles de energías renovables y establecer un patrón de consumo energético de la aplicación en análisis: la demanda eléctrica de una comunidad o de un proceso productivo.

La herramienta identificada para estos fines es HYBRID2. Este paquete de cómputo utiliza un análisis estadístico para hacer más preciso su cálculo durante el tiempo de registro de los datos, y puede modelar sistemas con series de tiempo de cualquier tamaño (días, horas, minutos, etc.). HYBRID2 también fue desarrollado por NREL.

Entre las características principales del paquete se destacan las siguientes:

- Simular sistemas con más de un generador diesel.
- Realizar simulaciones con tiempos de análisis menores a una hora.
- Considerar variabilidad del recurso y valores de carga dentro de un solo intervalo.
- Simular mezclas de cargas en corriente alterna y corriente directa.
- Simular más estrategias de suministro.

Con la utilización de este programa se pretende disminuir los costos inherentes al diseño y desarrollo (proyecto de ingeniería) de los sistemas híbridos, dado que no es necesario implementar físicamente un prototipo para validar un diseño; y una sola persona puede manejar en la computadora el paquete de cómputo.

3.3. Emisiones contaminantes evitadas por el uso de fuentes renovables para generación eléctrica

Sobre este rubro, que resulta de gran importancia en la actualidad, es indispensable calcular los gases contaminantes no emitidos a la atmósfera por utilizar fuentes renovables de energía. Estos cálculos son la base para promover y en su caso solicitar instrumentos de financiamiento para el desarrollo y operación de los sistemas, como son los Bonos de Carbono de las

Naciones Unidas (entre otros mecanismos); además de contribuir a la mitigación de gases de efecto invernadero.

La herramienta identificada para realizar esta tarea es RETScreen. Este programa se distribuye gratuitamente (previo registro) por los sitios Web del Gobierno de Canadá, a través de su Ministerio de Recursos Naturales (CANMET) y su Laboratorio de Investigación en Diversificación de Energía (CEDRL).

El programa está diseñado en hojas de cálculo interactivas de Microsoft-Excel®. Provee una plataforma común, tanto para toma y soporte de decisiones como para propuestas de incremento de capacidad de generación ante sistemas ya construidos. Evalúa y analiza la producción de energía, costos en el ciclo de vida útil y emisiones evitadas de gases de efecto invernadero; todo para las distintas tecnologías de generación eléctrica disponibles con base en energías renovables: solar (fotovoltaico y térmico), eólica, biomasa e hidráulica; cada una con su propia hoja de cálculo y por separado.

Entre las características principales del paquete resaltan:

- Algunos costos de equipos ya cargados por definición.
- Análisis de emisiones evitadas de gases de efecto invernadero por utilizar fuentes renovables de energía.
- Flujos de caja (ingresos y egresos en el tiempo).
- Tipos de cambio monetario para varias divisas de trabajo.
- Acceso a su propia base de datos climatológicos mundiales en línea.
- Acceso a la base de datos climatológicos mundiales de la NASA en línea.

Es importante resaltar que cada uno de los módulos de RETScreen está diseñado para analizar una tecnología de energía renovable por separado; es decir, si se analiza un proyecto híbrido, tendrán que ingresarse las características de la componente fotovoltaica en el módulo correspondiente, las componentes eólicas en otro módulo; y así con las otras fuentes de energía, para finalmente obtener como resultado la suma de todos los efectos.

3.4 Simulación de pequeñas redes eléctricas de distribución

Se consideró útil incluir esta tarea como integración completa del sistema híbrido a las comunidades que vayan a ser objeto del proyecto de electrificación. Una vez configurado y construido un sistema híbrido, deben concebirse también los medios para hacer llegar su energía a las aplicaciones requeridas: electrificación general a una pequeña comunidad, sistemas de bombeo de agua, telecomunicaciones, etc. Para tal fin, es necesaria una herramienta de cómputo que simule la optimización de la pequeña red de distribución transportadora del fluido eléctrico a las aplicaciones solicitadas.

La herramienta identificada para realizar esta tarea es ViPOR. Este es un modelo de optimización para sistemas de electrificación de pequeñas

comunidades. ViPOR significa «Modelo de optimización para electrificación de pequeñas comunidades con energías renovables» (*Village Power Optimization Model for Renewables*). También fue creado por NREL.

Dado un mapa de la pequeña comunidad e información sobre los tamaños de carga y costos de equipos, ViPOR determina cuáles viviendas deben alimentarse por sistemas aislados, generalmente fotovoltaicos, y cuáles deben ser incluidos en la red centralizada de distribución. La red de distribución se diseña de manera óptima con consideración a costos y topografía del sitio.

El paquete también efectúa comparaciones de una mini-red optimizada con respecto a electrificar la comunidad en estudio con únicamente sistemas aislados domiciliarios. Estos sistemas son generalmente fotovoltaicos.

4. Metodología para la simulación y evaluación de sistemas híbridos

Una vez concluida la revisión de las herramientas de cómputo se procedió a conformar una metodología que involucrara el software evaluado, mediante pasos establecidos con base en el análisis habitualmente realizado para el diseño, desarrollo y pruebas experimentales, así como también el análisis de factibilidad técnica y económica de proyectos de esta naturaleza.

Se concibió como el objetivo principal en el desarrollo de la presente metodología, la sistematización de una serie de pasos por módulos que conlleven al diseño y dimensionamiento de un sistema híbrido para electrificación rural, considerando como premisas tener un rendimiento óptimo y funcional. Dentro de la serie de pasos principales para el establecimiento de una metodología, queda implícita la aplicación de los paquetes de cómputo en el módulo correspondiente, teniendo así la estructura siguiente:

4.1 Módulo 1. Información

- Conocer las necesidades de electrificación.
- Obtener de alguna fuente o generar información de los recursos energéticos aplicables.
- Procesamiento de la información.
- Visitas de campo para la obtención de información de proyecto.
- Cálculo de las necesidades de energía.
- Obtención de costos de componentes de sistemas de electrificación rural.
- Diseño preliminar de las instalaciones necesarias.

4.2 Módulo 2. Ejecución de programas (software)

- Análisis de sensibilidad de costos. Obtención de costos nivelados de energía (utilización de HOMER).
- Simulación preliminar del sistema. Obtención de la configuración óptima (utilización de HOMER).
- Simulación operacional. Refinamiento del sistema (utilización de HYBRID2).
- Análisis económico y financiero.
- Análisis de mitigación de gases de efecto invernadero (utilización de RETScreen).

- Si se requiere diseño e implementación de la pequeña red de distribución eléctrica (utilización de ViPOR), deberá definirse al inicio de la aplicación de la metodología, es decir, cuando se definen las necesidades de electrificación.

4.3 Módulo 3. Resultados

- Presentación del anteproyecto

En este último módulo se describe un anteproyecto completo con su análisis técnico

y económico, listo para desarrollar un proyecto ejecutivo y posteriormente establecer

los convenios para su desarrollo y operación.

En el siguiente diagrama de flujo se muestra de manera secuencial los pasos de la metodología:

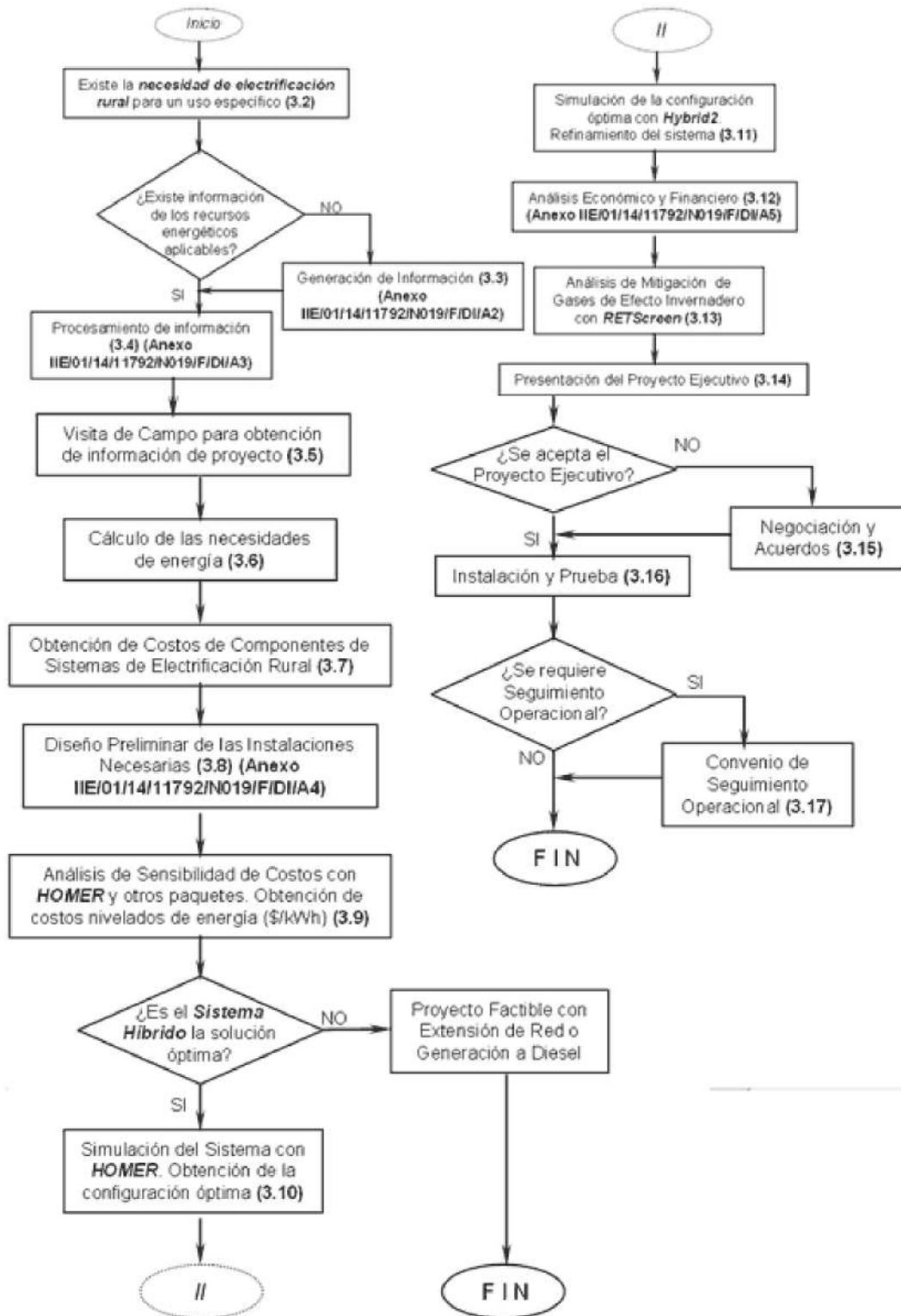


Fig. 1. Diagrama de flujo de la metodología.

5. Aplicación de la metodología (ejemplo)

Para ejemplificar la aplicación de la metodología se realizó una comparación entre la información generada por un programa y la obtenida de un sistema híbrido experimental.

Se efectuó una comparación general de los parámetros generados en campo en un sistema híbrido experimental y datos generados por el software HYBRID2, comparando ambas fuentes de información por medio de diferencias absolutas y relativas; obteniendo indicadores estadísticos y gráficas del análisis efectuado.

El sistema híbrido experimental contra el cual se compara la información generada por software está ubicado en la ciudad de Pachuca, estado de Hidalgo, a 70 km al Norte de la ciudad de México; y tiene una capacidad instalada de 2,7 kW en paneles fotovoltaicos, 2,5 kW en pequeñas turbinas eólicas, un banco de baterías de 1 500 Ah a 12 V y un motogenerador de gasolina de 6,4 kW.



Fig. 2. Sistema híbrido experimental ubicado en la ciudad de Pachuca, Hidalgo.

Los parámetros de comparación entre el sistema experimental y el programa de simulación HYBRID2 corresponde a las variables radiación solar (W/m^2), generación FV (W), velocidad del viento (m/s), generación eoloeléctrica (W), temperatura ($^{\circ}C$), potencia de entrada a las baterías (W) y potencia de salida de las baterías (W).

Para poder realizar la comparación entre ambas fuentes de información se definieron dos condiciones que utilizan el cálculo de diferencias entre valores: La diferencia absoluta parte de la diferencia en valor absoluto entre valores de una misma variable para ambas fuentes de información y en un mismo período de análisis. Posteriormente se calculan los promedios de los valores obtenidos.

Por otra parte, la diferencia relativa, se obtiene calculando la diferencia en tanto por ciento entre valores de una misma variable de ambas fuentes de información. Los valores expresados en tanto por ciento, o mejor dicho, de manera adimensional, permiten calcular promedios de comportamiento entre

distintas variables, y también poder estimar un índice de comportamiento general del sistema híbrido.

Otro parámetro necesario en la validación es la definición del índice de confiabilidad entre fuentes de información, que equivale al complemento de la diferencia relativa para llegar a 100 %.

Para entender mejor estos conceptos se utiliza un ejemplo: HYBRID2 en el que se estimó una temperatura de 12 °C en un tiempo, y el sistema experimental reportó para el mismo período de análisis una temperatura de 14 °C. La diferencia absoluta entre estos dos valores es de 2 °C y la relativa es de 14 %. El complemento a 100 % de este último valor es 86 %, y precisamente éste es el índice de confiabilidad entre ambas fuentes de información.

Una confiabilidad entre fuentes más cercana a 100 % indica una menor diferencia comparativa entre datos calculados (HYBRID2) y datos colectados en campo (sistema híbrido de Pachuca). A mayor diferencia, menor confiabilidad entre fuentes, y viceversa.

Para el caso de la variable «temperatura», el análisis arrojó los resultados mostrados en la gráfica de la figura 3.

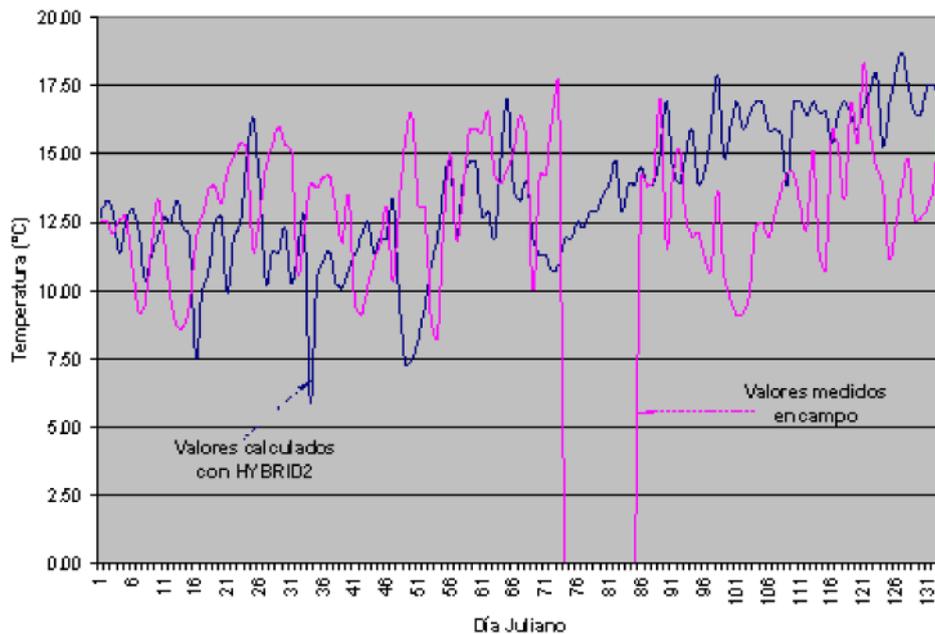


Fig. 3. Comparación gráfica entre parámetros de funcionamiento de la variable «temperatura».

En este caso particular, la diferencia promedio entre fuentes de información para la variable temperatura es de 20 %, lo que trae como consecuencia una correspondiente confiabilidad de 80 %.

6. Conclusiones

La metodología de trabajo expuesta estará en constante proceso de revisión, ya que es susceptible de actualizarse o adaptarse según las necesidades de quien la aplique.

En el análisis comparativo, HYBRID2 no toma en cuenta algunos sucesos de variables que se ven en las gráficas, como la probabilidad de que se presenten ráfagas instantáneas de altas velocidades de viento, frecuentes en Pachuca.

Es destacable que la mayoría de los paquetes utilizados provienen de NREL (*National Renewable Energies Laboratory, EE.UU.*). Esto no significa que se esté haciendo una abierta propaganda hacia esta institución, pero es de hacer notar la disponibilidad de acceso a sus herramientas de cómputo y la claridad con la cual es posible trabajar con ellas, y que ninguna otra institución mostró dentro del análisis. Otras instituciones poseen paquetes a nivel experimental, sin disponer de versiones comerciales o de evaluación, por lo que no fue conveniente incluirlas en el desarrollo de la metodología de diseño e implementación de sistemas híbridos de electrificación aislada de la red convencional.

Las herramientas de análisis (software) deben tomarse como ayudas que posibilitan efectuar las tareas pesadas del diseño y evaluación de los sistemas híbridos. Tales herramientas permiten afinar el criterio y la sensibilidad para juzgar los resultados que presentan y canalizarlos así a un buen diseño. Con base en la experiencia se mejora este criterio.

7. Bibliografía

AVIA ARANDA, FÉLIX. Principios de conversión de la energía eólica. Madrid: CIEMAT, 1994.

BORJA, MARCO A., ET AL. *Estado del arte y tendencias de la tecnología eoloeléctrica*. México: Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) y Programa Universitario de Energía, Universidad Nacional Autónoma de México (PUE-UNAM), 1998.

Comisión Nacional para el Ahorro de la Energía, a través de su página en Internet: www.conae.gob.mx.

Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas (CONADEPI), a través

de su página en Internet: www.ini.gob.mx.

ENRÍQUEZ HARPER, GILBERTO. *Fundamentos de sistemas de energía eléctrica*. México: Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Instituto Politécnico Nacional (ESIME-IPN), Ed. Limusa, 1985.

GUILLÉN SOLÍS, OMAR. *Energías renovables. Una perspectiva ingenieril*. México: Ed. Trillas, 2004.

«Integración de un sistema de adquisición de datos base, para evaluación de comportamiento y seguimiento operacional de sistemas convertidores de fuentes no convencionales de energía orientados a la generación de electricidad».

Informe IIE/FE/FNCE/5520/107/P; enero de 1995.

Manual de diseño de obras civiles. Área de Estructuras, Criterios de Diseño, C.1.4

Diseño por viento. México: Comisión Federal de Electricidad, 1983.
MCMULLAN, J. T., *ET AL.* Recursos Energéticos. Barcelona: Ed. Blume, 1981.
Norma Internacional: IEC 61400-12. «Wind turbine generator systems. Part 12: Wind turbine power performance testing». 1998-2002.
Norma Internacional: IEC 61724. «Photovoltaic system performance monitoring. Guidelines for measurement, data exchange and analysis», 1998-2011.
«Notas recabadas por Omar Guillén Solís en el Módulo Presencial de la «IV Maestría en Energías Renovables: Aplicaciones al ámbito rural», Universidad Internacional de Andalucía, Santa María de La Rábida, España, 1999.
Paquete de cómputo del Gobierno de Canadá, Ministerio de Recursos Naturales (CANMET), Laboratorio de Investigación en Diversificación de Energía (CEDRL), Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas, RETScreen 2000®.
Paquetes de cómputo de NREL (National Renewable Energies Laboratory, Estados Unidos): HOMER®, HYBRID2® y ViPOR®.

Método de los Grados-Día. Determinación de la temperatura base para la provincia de Camagüey

Degree-Days Method. Temperature Determination for Camagüey Province

*Aramís Fonte Hernández y Zoltan Rivero Jaspe
Departamento Científico del Centro Meteorológico de Camagüey,
Camagüey, Cuba
Scientific Department of Camagüey's Meteorological Center, Cuba .
e-mail: aramis@met.cmw.inf.cu*

Resumen

Actualmente, debido a la intensa labor de los medios de difusión, no resulta extraño que la mayoría de las personas acepten la interacción energía-clima como algo que forma parte de la vida cotidiana, aunque probablemente la razón primaria de tan amplia divulgación se deba a la triste situación del calentamiento global del planeta, en cuyo caso el peso predominante de sus causas lo llevan los gases producidos por un desmedido uso de los combustibles fósiles. En todo esto se encuentran involucrados los gases de combustión de las grandes centrales termoeléctricas y las industrias en general, además de la fuerte contribución de los equipos automotores y maquinaria de diversa índole. Entre los distintos métodos empleados para analizar la interacción del clima con el consumo de energía, sobre todo en procesos de climatización, refrigeración, acondicionamiento de locales, etc., se encuentra el denominado Método de los Grados-Día, el cual se basa en el análisis de un denominado valor de temperatura base, que es el punto en el cual debe existir un equilibrio dinámico entre el objeto o sistema en estudio y el ambiente. Con este fin se dedicó el presente trabajo, como parte de un proyecto de investigación que estudia, entre otras cosas, la relación entre el consumo de energía y las variables climáticas fundamentales, en la provincia de Camagüey, Cuba. Como resultado del trabajo se logró establecer que el valor de temperatura base para esta zona es de 23,6 °C, valor muy superior al establecido para países de Europa y Norteamérica, pero que se corresponde con la teoría, pues parece tener una determinada relación con la latitud.

Palabras clave: Grados-día, temperatura base, clima, energía.

Abstract

It is not wonder that most people currently accept the energy-weather interaction as something which belongs to everyday life, though probably the first reason of such a wide dissemination is due to the sad fact of the global warming of the planet in which case the predominant weight of its causes is the gases released by the ruthless use of fossil fuels, information which has been widely disseminated by the mass media. The combustion gases of the large thermal electric generating centers and industries in general, in addition to the strong contribution of the motor vehicles and machineries of all kinds. Among the different methods used to analyze weather-energy consumption interaction, especially with air-conditioning, heating systems and so forth is the Grade-Day

Method, based on the analysis of a given value base temperature, which is the point where a dynamic balance should prevail between the topic under review and the environment. This was the purpose of this paper as a part of a research project which studies among other things, the relation between energy consumption and the fundamental weather variables in Camagüey, Cuba. Thanks to this research, the value of the base temperature of 23.6 °C for this area was established, a higher value to that established for countries in Europe and North America, but it corresponds to the theory, since it seems to have certain relationship with the latitude.

Key words: Degree-days, base temperature, weather, energy.

Introducción

Desde épocas tan tempranas como en la segunda mitad del siglo XX se notó la necesidad de introducir un parámetro que, estando ligado a la temperatura ambiental, permitiera relacionar de manera práctica el sistema energía-clima, destacándose para ello el término grados-día [Thom, 1966]. Aunque actualmente este método resulta bien conocido por los ingenieros termoenergéticos, ya que fue usado inicialmente por ellos, más tarde pasó también a ser empleado por un sector más amplio de la comunidad científica, con vista a establecer relaciones y efectuar pronósticos de consumo de energía para propósitos de calefacción de edificios y/o climatización de locales, aplicación de aire acondicionado, etc. Este método, denominado precisamente como método de los grados-día, requiere discernir entre los grados-día de calentamiento (GDC), y los grados-día de enfriamiento (GDE), tomando como criterio de comparación una llamada «temperatura base» (TB), la cual viene a ser una magnitud familiar para cada país o región donde se ha estado aplicando este método, pero que no puede ni debe ser considerado una constante aplicable a cualquier punto del planeta.

Esta temperatura base representa la temperatura en la cual debe existir un balance energético tal en el objeto de análisis (edificios residenciales, comerciales, industriales, etc.) en que no se requiera calefacción ni enfriamiento para obtener una sensación agradable para sus ocupantes, aunque esta no dependa íntegramente del parámetro temperatura, pero sí de factores relacionados con ella directa o indirectamente [UNEP/IES, 1998].

Por ello debe quedar claro que la temperatura base no puede ser un valor constante para todo el planeta, ni aún para regiones de mediana magnitud y tiende a variar, sobre todo con la latitud. Tan es así, que por ejemplo, para el Reino Unido la TB que se usa es 15,5 °C [Vesma, 2001], mientras que en los Estados Unidos se ha determinado que para los estados del Norte, esta es de 14 °C, y para los del Sur, de 17 °C; sin embargo, Sailor y Muñoz [1997] demostraron que para el estado de la Florida, la TB debe ser de 21 °C.

Por esta razón resulta de interés la determinación de la TB para la provincia de Camagüey, teniendo en cuenta que en el presente trabajo se trata de establecer las bases y herramientas para el desarrollo del proyecto de investigación titulado «ENERCLIMA. Implicaciones del cambio climático sobre el sector energético en la provincia de Camagüey», y que estudia la interacción clima-energía en dicho territorio.

El método de los grados-día resulta un elemento fundamental para la aplicación de los denominados «Métodos cuantitativos para la realización de evaluaciones de impacto del cambio climático», como son en el método de las analogías, en los métodos estadístico-econométricos, así como en los métodos ingenieriles del uso final de la energía, todo lo cual refuerza el criterio de la necesidad de instrumentar un estudio al respecto, al menos para esta área, o sea, la provincia de Camagüey, territorio ubicado entre los 76° 57'00" y 78° 38'59" de longitud Oeste, y los 20° 31'01" y 22° 29'00" de latitud Norte, no sólo porque resulta necesario como parte de las tareas que se deben acometer dentro del mencionado proyecto de investigación, sino también por el significativo peso que esta provincia tiene en el balance energético nacional.

Materiales y métodos

Como se planteó anteriormente, en otros países como Inglaterra y los Estados Unidos, resulta habitual que se elaboren reportes de los GDE y GDC por las oficinas meteorológicas territoriales y nacionales, como forma de ofrecer un servicio más a clientes específicos del sector energético. Por ello, la definición que se encuentra en la literatura sobre el método [Thom, 1966; ASHRAE, 1997; Sailor y Muñoz, 1997] toma para su implementación, la temperatura «media» promediada a partir de la temperatura máxima y la mínima del día, o sea:

$$T_m = \frac{1}{2} (t_{\max} + t_{\min})$$

y luego según el caso,

$$GDE = T_m - T_b$$

$$GDC = T_b - T_m$$

En este proceso no puede haber valores negativos, por ello, cuando en el caso de los GDE, si $T_m \leq T_b$, esto implica que $GDE=0$. De manera similar, para el caso de los GDC, si $T_m \geq T_b$, entonces esto significa que $GDC=0$. Ahora bien, debido a las características particulares del presente caso de estudio, sólo resulta de interés el cálculo de los GDE, y en ello se centrará el trabajo.

A su vez, también la literatura consultada establece ejemplificación de la aplicación de estos parámetros y diferencia las categorías de GDE semanal total, GDE mensual total, GDE anual acumulado como la suma de los GDE diarios correspondientes a cada uno de estos períodos. Sin embargo, para la aplicación del método en el presente trabajo se establecieron dos modificaciones:

1. Se trabajó con el valor de la temperatura media diaria calculada como la media aritmética de valores de las temperaturas medias trihorarias provenientes de las estaciones meteorológicas provinciales.

2. En lugar de hacer posibles ponderaciones para aplicar una temperatura media ponderada provincial se realizó un análisis de la temperatura media trihoraria en el período en estudio (1994-2001), y se determinó por prueba de hipótesis que no existen diferencias significativas entre las temperaturas medias de las estaciones meteorológicas involucradas (seis), y la media provincial obtenida como la media aritmética de dichas temperaturas para cada día durante todo el período de estudio señalado, lo cual se corresponde con lo que se ha de esperar para un entorno de territorio, de topografía eminentemente llana en que las estaciones están en un radio menor de 100 km [Sailor, 2001].

Ahora bien, teniendo establecidas estas bases sólo falta enfocar cuál es el campo de aplicación de los GDE para poder determinar la TB de cálculo. Esto debe corresponderse con los objetivos del proyecto al cual tributa sus resultados este trabajo, por lo que debe ser el consumo de energía eléctrica, razón por la cual se plantea que el consumo de energía eléctrica diario (EED) debe estar en función de las GDE y los GDC como variables independientes, por lo que quedaría una expresión de la forma:

$$EED = A+B*GDE+C*GDC$$

Donde A, B y C son las constantes que se deben obtener en la ecuación de ajuste. Para facilitar los cálculos se desarrolló un software (DIAS-GRAD2) que, tomando como datos los valores de consumo diario de energía eléctrica, y la temperatura media, fue ajustando por regresión lineal, expresiones que daban distintos valores de la sumatoria del cuadrado del error residual, y se minimizó el valor del cuadrado del error residual por variación del valor de la TB asumido en el cálculo de los GDE y GDC.

El valor del consumo de energía eléctrica considerado aquí se corresponde con lo reportado como consumo en barra diario de la provincia, según el Despacho Eléctrico Territorial (debe recordarse que el consumo en barra diario provincial tiene en cuenta el consumo total de energía eléctrica del Sistema Electroenergético Nacional, incluyendo tanto lo que se aprovecha como uso final de energía, como las pérdidas).

Resultados

Los datos de temperatura media diaria de cada una de las seis estaciones meteorológicas con que cuenta la provincia, fueron sometidos a tratamiento estadístico por el método de análisis de varianza, y se comprobó que no existen diferencias significativas entre la temperatura media provincial, hallada como media aritmética, y la de las estaciones involucradas, al menos para el período comprendido en este estudio (Tabla 1); resulta válida la sugerencia dada por Sailor [2001(a)] sobre el tratamiento de casos con áreas de estudio relativamente pequeñas, por lo que puede emplearse el valor propuesto, obtenido como media provincial para cada caso del período analizado.

Esta cuestión permite simplificar el procedimiento de cálculo para el caso particular del período en estudio. Si no fuera así, sería necesario recurrir a algún tipo de ponderación, como puede ser la adoptada por Sailor y Muñoz [1997].

Tabla 1. Resultados del Análisis de Varianza para la Temperatura Media ($\alpha=0.05$)

Estación	Camagüey	Esmeralda	Florida	Santa Cruz	Palo Seco	Nuevitas	Media Prov.
Camagüey		0.6796	0.5423	0.1599	0.6342	0.1388	0.6073
Esmeralda	0.6796		0.3382	0.0801	0.9222	0.0672	0.3862
Florida	0.5423	0.3382		0.3695	0.3090	0.3393	0.8891
Sta. Cruz	0.1599	0.0801	0.3695		0.0709	0.9014	0.3319
Palo Seco	0.6342	0.9222	0.3090	0.0709		0.0585	0.3578
Nuevitas	0.1388	0.0672	0.3393	0.9014	0.0585		0.2965
Media Pro	0.6073	0.3862	0.8891	0.3319	0.3578	0.2965	

De la aplicación de este método, y considerando todas las particularidades señaladas, se obtuvo que, el valor que cumple adecuadamente estos requisitos para la zona en estudio, es el de 23,6 °C, lo cual se acerca bastante a lo obtenido por otros investigadores al realizar un estudio sobre la temática de los grados-día para la ciudad de Santa Clara en la región central de Cuba [Saura y Osés, 2002], en el cual se demostró que los mejores valores se obtenían en el entorno de los 22 a 24 °C. A primera vista este valor pudiera parecer relativamente alto si se compara con los de otros países que aparecen habitualmente en la literatura.

Así, por ejemplo, se había señalado el caso del Reino Unido, en que la temperatura base empleada es de 15,5 °C, valor aparentemente bajo, pero que debe analizarse de conjunto con que, por un lado, se trata de un país ubicado en latitudes mucho más elevadas, y por otro lado, ese no es más que un valor base tradicionalmente tomado en ese país y mantenido actualmente [Vesma, 2001], al igual que en los Estados Unidos tradicionalmente se toma el valor de 18,3 °C [Department of Agronomy and Horticulture, 1999; Climate Prediction Center, 2000; National Climate Data Center, 2002] a pesar de que ya ha sido determinado que este valor cambia y se hace significativamente mayor a medida que disminuye la latitud del sitio en estudio [Sailor y Muñoz, 1997].

No obstante, se ha señalado que la temperatura de balance para el enfriamiento puede variar de manera considerable en dependencia del uso de la ventilación natural [UNEP/IES, 1998], cuestión esta que reafirma el porqué dicho método es tan empleado en la práctica ingenieril de conjunto por los arquitectos, ingenieros civiles y termoenergéticos cuando realizan proyectos de nuevas edificaciones y sistemas de ventilación, climatización y refrigeración. Este método pudiera constituir una herramienta más al igual que los probados

en trabajos realizados por otros especialistas en el área del clima y la energía, lo que ampliaría la diversidad de métodos a las condiciones específicas de este país [Acosta, 1999].

Conclusiones

El valor obtenido de Temperatura Base para los efectos de estudiar cuestiones de consumo de energía eléctrica en la provincia de Camagüey, puede considerarse como consistente y acorde a lo que se ha obtenido para regiones cercanas.

Bibliografía

- ACOSTA MARRERO G. (1999). *Sicrometría Práctica del Aire Exterior*. Editorial Científico-Técnica, La Habana, 126 págs.
- AROCHE R. R. (2001). Comunicación personal. Centro Meteorológico de Camagüey.
- ASHRAE (1997). *Handbook of Fundamentals*. American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, Georgia, USA.
- CLIMATE PREDICTION CENTER(2000). *Explanation of the weekly and monthly degree day data summaries*. En el sitio Web http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis-monitoring/cdus/degree_days/ddayexp.html. Last Updated April 18, 2000.
- DEPARTMENT OF AGRONOMY AND HORTICULTURE (1999). Heat and Cooling (Growing) Degree days. En el sitio Web <http://weather.nmsu.edu/construction/gdd.htm>. Last Updated: March 11, 1999.
- NATIONAL CLIMATIC DATA CENTER (2002). *Historical Climatology Series 5-2. Monthly State, regional, and National Cooling Degree days Weighted by Population (includess aerielly weighted temperature and precipitation*. En el sitio Web <http://lwf.ncdc.noaa.gov/oa/documentlibrary/hcs.html#tol>. Last Updated April 2002.
- SAILOR D.J., MUÑOZ R. (1997). Sensitivity of electricity and natural gas consumption to climate in the USA- Methodology and results for eight states. *Energy*, vol. 22, Nº 10, pp. 987-998.
- SAILOR D.J. (2001). Relating residential and commercial sector electricity loads to climate-evaluating state level sensitivities and vulnerabilities. *Energy* (In press).
- SAILOR D.J. (2001a). Comunicación personal por e-mail.
- SAURA G., OSÉS J. (2002). Estudio de los Días-Grado con fines térmicos en Santa Clara. . *Revista ECOSOLAR*, Nº2, Oct-Dic, 2002, ISSN-1028-6004, en el sitio web: <http://www.cubasolar.cu/solar02.zip>.
- THOM H. (1996). Normal degree days above any point by the universal truncation coefficient. *Monthly Weather Review*, 94,(7), pp. 461-465.
- UNEP/IES (1998). Energy. In *Handbook on Methods for Climate Change Impact Assessment and Adaptation Strategies*. UNEP/IES, Vrije, The Netherlands, 11-1 to 11-32 pp.
- VESMA V. (2001). *Degree Days Direct. What are the degree days?*. En el sitio Web <http://vesma.com/ddd/whatthey.htm>. Last Updated October 24, 2001.

Mitigación del impacto ambiental que generan los residuales sólidos del beneficio de café a partir de la producción de abono orgánico

Mitigation of the Environmental Impact Caused by Solid Wastes Generated from Coffee Residuals in the Organic Fertilizer Production

*Ing. Soraya García Pavón
Unidad de Control y Gestión de Conocimiento (CATEDES)
Control Department and Knowledge Management (CATEDES)
Calle Oriente No. 756, e/ Jesús del Sol y Prado, Guantánamo, Cuba. CP.95100
Tel. y Fax: (53 21)32-6489.
e-mail: soraya@cubasolar.co.cu*

Resumen

La experiencia se llevó a cabo en las despulpadoras de café Guayabal y La Deseada, de la Empresa Cafetalera Guantánamo, a 715 y 700 msnm, respectivamente, con dos modalidades de compostaje: compostaje en fosos de 3 x 2 x 1 m, y vermicompostaje en canteros de 3 x 1,20 x 0,40 m. Estos centros generan 74,1 y 64,2 TM de pulpa de café fresca por campaña, que se acumula en caja de cáscaras; alrededor de las plantas se abrieron tres fosos para el compostaje y un pozo de descarga del agua residual entre ellos; es decir, dos pozos. Cercano a los fosos se prepararon los canteros para el vermicompostaje. Se han procesado aproximadamente 139,1 t de pulpa fresca promedio anual y se obtuvieron 34,09 t de abono orgánico de primera calidad entre fosos y canteros, promedio anual en las dos despulpadoras; dicho abono se aplicó a 28,5 hectáreas de café a razón de 2,5 t /ha, en los que se incrementaron los rendimientos agrícolas de 1,88 t/cab. en 1998 a 5,43 t/cab. en el 2001. Se creó además un sistema de capacitación para el personal que labora en la actividad de beneficio, con magníficos resultados y son sustanciales los alcanzados sobre el medio ambiente y el aporte a la producción de café orgánico en el territorio.

Palabras clave: Compostaje, vermicompostaje, fosos, abono orgánico.

Abstract

This article deals with the experience gathered in two coffee-producing centers by the name of Guayabal and La Deseada belonging to the Coffee Enterprise located in the eastern Cuban province of Guantánamo, at 715 and 700 msnm, respectively with two compost modalities: one related to holes of 3 x 2 x 1 m, and wormcompost in small cultivated lands of 3 x 1.20 x 0.40 m. These centers generate 74.1 and 64.2 t of fresh coffee pulp per harvest, gathered in boxes which contain the peels resulting from the coffee process, three holes were opened near the coffee plants for compost and a discharge hole of the residual water among one another, near the holes the area. Near 139.1 t of fresh pulp per year has been processed, obtaining 34.09 t of first-quality organic fertilizer among holes and cultivated small areas, this is the annual average of the two processor units, applied to 28.5 coffee hectares, some 2.5 t/ha. where

agricultural yields have increased from 1,88 t/cab in 1998 to 5.43 t/cab in 2001. A training system was also set up for the workers of the residual collecting unit with extraordinary results where significant positive results have been gathered on environment and for the contribution of organic coffee in the area.

Key words: Compost, wormcompost, holes, organic fertilizer.

Introducción

La industria cafetalera es uno de los principales contaminadores del continente latinoamericano, por medio de los beneficios de café, y a menor escala de las fábricas de café soluble. En los beneficios de café se implementan sistemas nuevos para reducir los consumos de agua y en consecuencia la generación de aguas residuales (despulpado en seco, recirculación de las aguas de transporte, desmucilaginado en seco, etc.). Los beneficios ecológicos (de bajo consumo de agua por tonelada de café procesado) producen una pulpa relativamente seca que puede ser transportada por ventiladores (sopladores) y para la cual es práctico el procesamiento por compostaje. Las aguas residuales tienen una concentración superior a 2.000 ppm de DQO, y en algunos casos se produce una miel semipastosa.

En este último caso el procesamiento por compostaje, junto con la pulpa y otros desechos fibrosos de la región es una manera simple y elegante de disponer de este contaminante.

En los demás casos de tratamiento anaerobio han mostrado ser adecuadas (mejor relación costo/beneficio), aunque su puesta en operación es demorada y delicada (aproximadamente seis meses si no se dispone de inóculo adaptado) . Un post-tratamiento aerobio, por lagunas o percoladores permite el pulimento del efluente final [Biotec., 2001].

Estudios realizados en Cuba reseñan que la producción cafetalera representa para el país la actividad económica y social más importante; sin embargo, la pulpa de café resulta ser uno de los contaminantes más agresivos de las montañas debido al contenido de diferentes componentes orgánicos, que provocan fuerte impacto sobre la fauna, el plancton acuático y la flora del suelo [González, *et al.*; 1999].

El café maduro presenta una composición en la cual el grano, que es la parte aprovechable para el proceso, representa 20 % del volumen total de la fruta, de manera tal que, el procesamiento de beneficiado genera un 80 % del volumen procesado en calidad de desechos; cada uno en un grado diferente constituye un riesgo para el medio ambiente si no se reutiliza de una manera inteligente para otros propósitos utilizando los principios de producción más limpia. Pero existe otro subproducto generado por el proceso de separación del café-oro: el agua residual.

La oxidación de la materia orgánica contenida en el agua se efectúa por medio de una microflora de bacterias que se alimentan de la materia y consumen el oxígeno disuelto en el agua.

En caso de descarga importante de materia, como es el caso del vertido de aguas mieles, se agota el oxígeno (anaerobiosis), y se destruye por asfixia la fauna y flora acuáticas: peces, cangrejos, microorganismos y plantas diversas

de los ríos [Pujols, *et al.*; 1999].

En la provincia de Guantánamo, Cuba, según los estudios realizados por Sotolongo, *et al.* (1998) se ha estimado que los centros de beneficios generan 20 588 kg de carga orgánica por día; en ésta el beneficio de un kilogramo de café cereza provoca mediante generación de aguas residuales una contaminación equivalente a la generada por 5,6 personas adultas.

Por otra parte, investigaciones realizadas en CICAFFE (Centro de Investigación del Café) indican que existe una buena respuesta a la aplicación de un kilogramo de abono orgánico por planta (7 000 kg por ha) que supera a la aplicación de 500 kg de abono químico por hectárea. Sin embargo, las mayores producciones se obtienen utilizando dosis medias de ambos fertilizantes. El composteo con lombrices (vermicompostaje) empieza a ser una opción importante [Pujols, *et al.*; 1999].

Materiales y métodos

La experiencia se realizó en dos despulpadoras de la Empresa Cafetalera Guantánamo: despulpadora Guayabal y despulpadora La Deseada, ubicadas a 715 y 700 msnm, respectivamente.

Estas despulpadoras procesan más 15 000 y 13 000 latas respectivamente de café cereza por campaña y generan aproximadamente 74,1 y 64,2 TM de pulpa de café.

Los materiales utilizados para el desarrollo de la experiencia fueron, entre otros, pulpa de café, tierra, ceniza o cal, lombriz roja californiana (*E. foetida*), madera rolliza, guano de palma, palas, picos y tenedor, vagón y agua.

Impacto ambiental

Se analizó el diagnóstico del impacto ambiental que provocan los residuales sólidos del beneficio del café, para lo que se realizó el cálculo estimado de carga contaminante para proceso de beneficio húmedo (agua-pulpa), según la metodología de estimación de la carga contaminante en la actividad de despulpe de café [CITMA, 1996], que establece los indicadores siguientes:

- Para la estimación de la carga contaminante de las despulpadoras de café estamos recomendando tomar cifras de concentración aproximadas dentro de cada uno de los dos procesos (Tabla 1).
- Los índices de consumo de agua para el proceso agua-pulpa es el siguiente: 20 litros de agua/kg de café cereza procesado (proceso agua-pulpa).
- Concentraciones medias estimadas:

Tabla 1. Proceso (agua- pulpa)

DQO	= 15 000 mg/L	= 15 kg/L
DBO ₅	= 8 500 mg/L	= 8,5 kg/L
Sólidos totales	= 8 000 mg/L	= 8 kg/L
Nitrógeno como N-NH ₃	= 15 mg/L	= 0,015 kg/L
Fósforo total	= 25 mg/L	= 0,025 kg/L

A partir de estos indicadores se realizó el cálculo estimado a través de un software.

Proceso tecnológico

Para la producción del compost y el lombricompost se trabajó con dos tecnologías de producción:

- Compostaje en fosos de 3 x 2 x 1 m.
- Lombricompostaje en canteros de 3 x 1,20 x 0,40 m.

El procedimiento utilizado fue el siguiente:

- Se excavaron tres fosos con las medidas expuestas anteriormente (3 x 2 x 1 m), con un pozo de drenaje intermedio, en cada despulpadora (Fig. 1).
- Se llenaron dos fosos solamente, por capas, con la proporción siguiente: 25 cm de pulpa, 10 cm de tierra y 5 cm de cal o ceniza, sucesivamente, hasta llenarlo por completo, se cubrió la superficie del foso con una última capa de tierra.
- Para ventilar los fosos se colocaron tramos de caña bambú (tres en cada foso) a un metro de distancia cada uno. Además de la remoción, que al mes se practica al vaciar un foso lleno en el foso vacío de al lado (ver Fig. 3), se les aplicó un riego ligero, que se repitió semanalmente a discreción teniendo en cuenta la humedad propia del material.

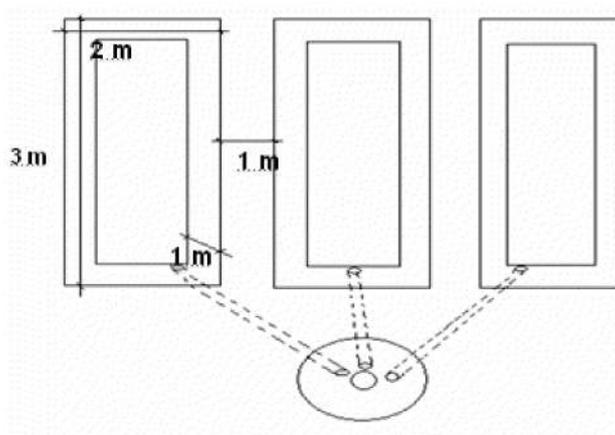


Fig. 1. Medidas de los fosos.

Al mes el contenido de los fosos llenos se trasladó al foso que se había dejado vacío, operación que sirvió de remoción; se dejó de regar semanalmente durante tres meses, período en que el producto está listo (maduro) para ser utilizado. Después se repitió el proceso operacional. (Figs. 2 y 3). El proceso de compostaje se muestra en la figura 4.

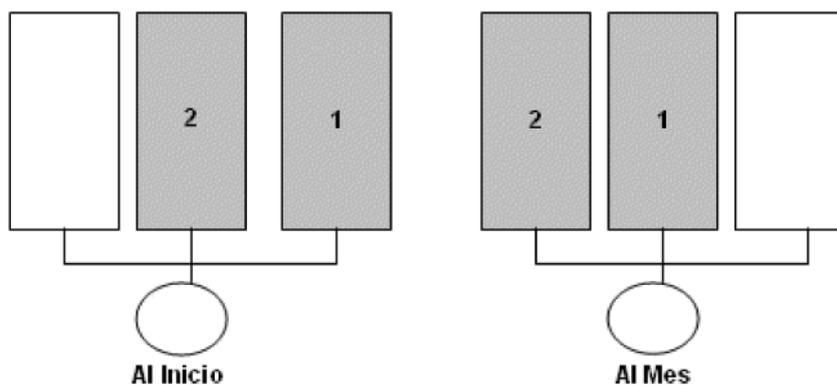


Fig. 2. Diseño del llenado de los fosos.

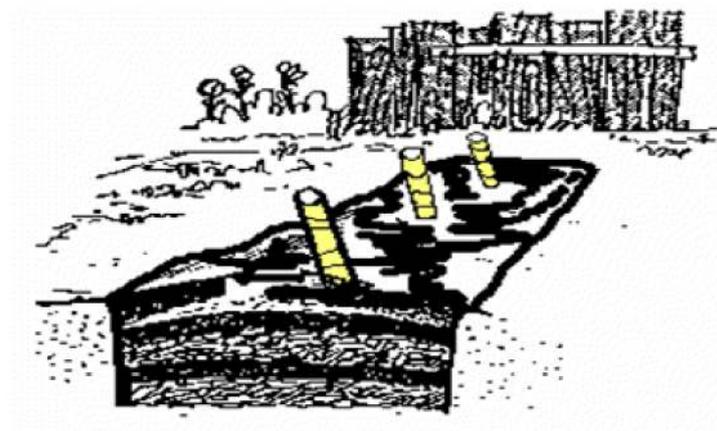


Fig. 3. Estructura de llenado de un foso por capas.

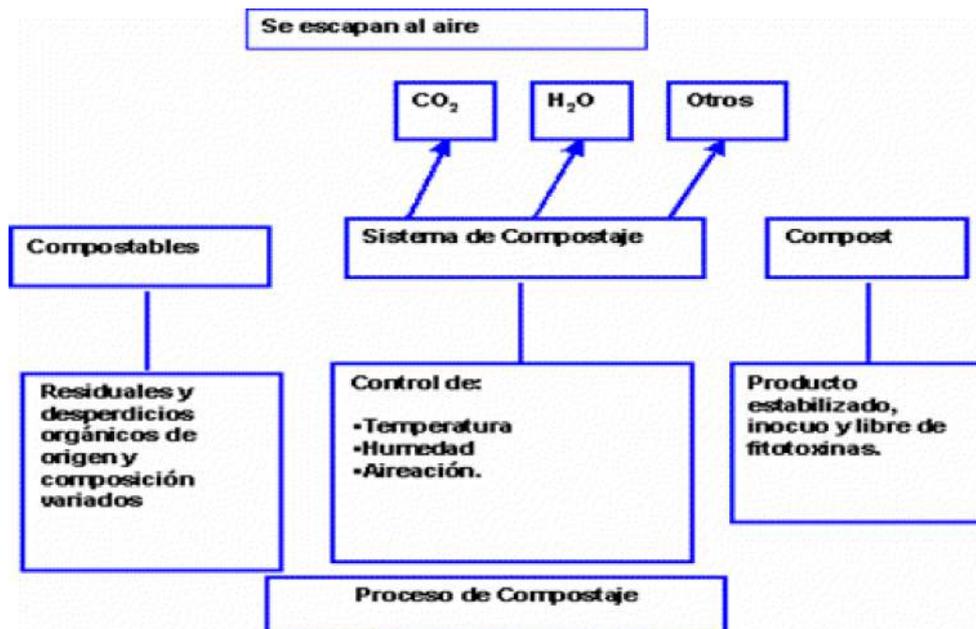


Fig. 4. Proceso de compostaje.

Lombricompostaje en canteros

A cinco canteros protegidos del sol por un techo preparado con recursos naturales (pencas de palma) en las dos despulpadoras, se les aplicó a cada uno 1,2 m³ de pulpa de café inicialmente y 60 000 lombrices rojas californianas aproximadamente; a continuación, cada quince días se les aplicó 1,2 m³ de pulpa; cada setenta días se extrajo el humus de lombriz de cada cantero.

Se colocó para la cosecha una capa delgada de alimento nuevo en cada cantero y se tapó durante dos o tres días. Se retiró la parte superficial, con alta concentración de lombrices y se llevó a otro cantero preparado para recibirlas. La operación se puede repetir para obtener la mayor cantidad de lombrices posibles; así queda en el cantero el lombricompostaje listo para ser usado. El proceso de lombricompostaje se representa en la figura 5.

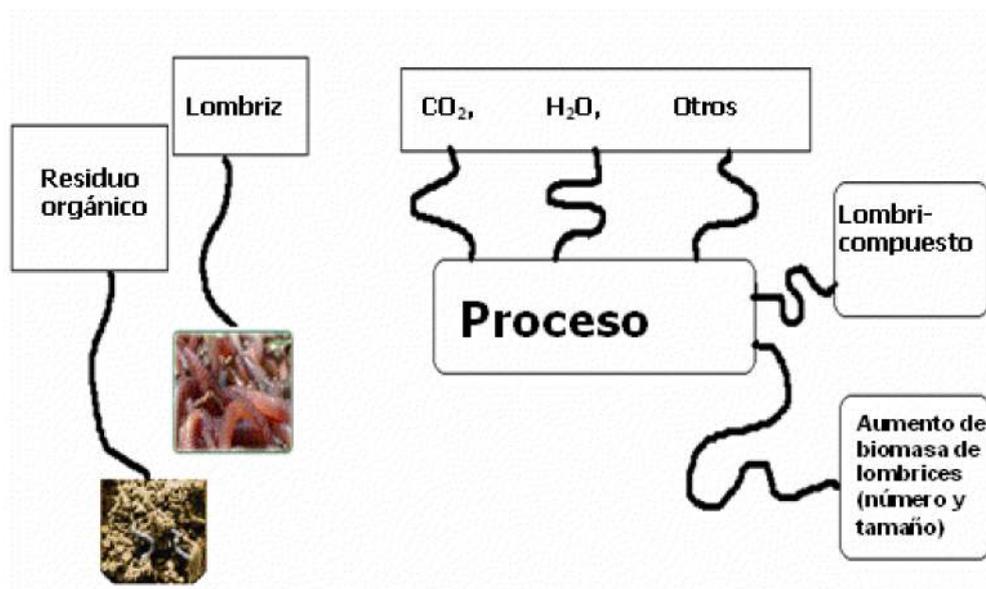


Fig. 5. Proceso de lombricompostaje.

Al compuesto de cada tecnología se les realizó la prueba para conocer la calidad nutricional, para lo que en ambos casos se tomaron muestras de cada foso o cantero y se homogeneizaron hasta lograr muestras representativas de cada tecnología, las cuales se enviaron al laboratorio; aquí se realizaron las evaluaciones de la calidad nutricional, tanto de las fuentes de materia orgánica como de humus obtenido, mediante análisis de laboratorio atendiendo a las normas ramales establecidas por el MINAG (1997) e IS (2000).

Aplicación del bioabono

Para evaluar el efecto de la aplicación del bioabono obtenido se escogieron tres parcelas de una hectárea aproximadamente en tres cafetales (Tabla 2), en los que se aplicaron los tratamientos siguientes:

Tratamiento 0. Sin aplicación.

Tratamiento 1. 2,5 t/ha de compostaje.

Tratamiento 2. 2,5 t/ha de lombricompostaje.

Tabla 2. Diseño de aplicación del bioabono por campo

Cafetal	Parcelas		
	1	2	3
Alto de la Tagua	0	1	2
Guayabal	2	0	1
La Deseada	1	2	0

Los cafetales escogidos fueron: Alto de la Tagua con la variedad Típica; Guayabal con Caturra Amarillo y La Deseada con Bourbon. Los rendimientos productivos antes de la experiencia estaban en 0,21; 0,14 y 0,14 t/ha, respectivamente. La sombra de los cafetales Búcaro (*Erythrina* sp.) para Alto de la Tagua y Piñón Florido; *Gliricidia sepium*, para Guayabal y La Deseada (Tabla 3). Las temperaturas promedio anual de 22 0C, y las precipitaciones promedio anual entre 1 200 y 1 000 mm.

Tabla 3. Temperaturas y precipitaciones promedio

Cafetal	MSNM	Precipit. mm	Temp. °C	Suelo	Árbol sombra
Alto de la Tagua	720	1 200	22	Ferralítico	Búcaro
Guayabal	705	1 100	22	Pardo s/c	Piñón
La Deseada	700	1 000	22	Pardo s/c	Piñón

Impacto económico

Para evaluar el impacto económico se realizó el análisis mediante el cálculo del valor de la producción, costos totales y flujo de caja por año y promedio anual.

Resultados y discusión

Impacto ambiental

Los resultados del diagnóstico inicial del impacto que provocan los residuales sobre el medio ambiente en el entorno de las dos despulpadoras se reflejan a continuación; se observó que los mayores impactos son, entre otros, los que provoca la pulpa de café y las aguas de despulpado y lavado.

Impactos que provoca la pulpa del café

Contaminación de las aguas por escorrentía de las mieles de la pulpa contenida en las cajas de cáscara:

- Malos olores.
- Proliferación de insectos.
- Aumento de la concentración de metano.

Impactos que provocan las aguas de despulpado y lavado

- Contaminación por vertido directo de las aguas.
- Aguas coloreadas con pH mayor de 7.
- Imposibilidad de uso para consumo.
- Aspecto del paisaje desagradable.
- Excesivo consumos de agua, ésta entra ampliamente (sin necesidad) en contacto con la pulpa, provocando que una parte de la materia orgánica de ésta sea extraída en el agua de despulpe.

La actividad cafetalera representa un quehacer económico-social importante para Cuba; sin embargo, al decir de estos autores, en nuestras montañas uno de los contaminantes más agresivos es la pulpa de café, debido a que contiene diferentes componentes orgánicos y, por tanto, constituye una fuente de contaminación apreciable; causa daños en la fauna, el plancton acuático y la flora del suelo [González y Navas, 1999].

Convencionalmente, la pulpa al ser transportada con el agua durante la operación de despulpado, lixivia compuestos que contaminan el agua; por ello se generan las aguas residuales de despulpado, y como consecuencia queda en las fosas una pulpa lavada que se utiliza para su descomposición [Zambrano y Zuluaga, 1993].

El beneficio húmedo de café genera tres diferentes contaminantes: aguas de despulpe, aguas de lavado y la pulpa cuando es vertida a los ríos. El beneficio húmedo de un kilogramo de café verde provoca, mediante la generación de las aguas de lavado y despulpado, una contaminación equivalente a la generada por 5,6 personas adultas durante un día [Pujol, *et al.*; 1999].

El cálculo estimado de la carga contaminante para centros de beneficio con proceso de agua-pulpa (húmedo), se efectuó para ambas despulpadoras por año, los parámetros fueron estimados según la metodología CITMA (1996) y pueden observarse en la tabla 4, en la que se ponen de manifiesto la carga estimada en kg/día y en kg/zafra para cada despulpadora de acuerdo con los indicadores contenidos en la metodología citada.

Tabla 4. Carga contaminante estimada para el proceso de beneficio húmedo

Despulpadora Guayabal						
	kg/día			kg/zafra		
Parámetro	1999	2000	2001	1999	2000	2001
DQO	186,1	172	170	20 471	19 608	20 400
DBO ₅	105,4	97,4	96,3	11 594	10 875	11 556
Sólidos totales	99,2	91,7	90,6	10 912	10 453	10 872
N c/ N-NHN	0,18	0,17	0,17	19,8	19,38	20,4
Fósforo total	0,31	0,28	0,28	34,1	31,9	33,6
Despulpadora La Deseada						
	kg/d			kg/zafra		
Parámetro	1999	2000	2001	1999	2000	2001
DQO	166,2	153,3	170,9	17 783,4	16 863	17 602,7

DBO ₅	94,1	86,8	96,8	10 068,7	9 548	9 970,4
Sólidos totales	88,6	81,7	91,1	9 480,2	8 987	9 383,3
N c/ N-NHN	0,16	0,15	0,17	17,12	16,5	17,5
Fósforo total	0,27	0,25	0,28	28,8	27,5	28,8

Para el cálculo de las aguas residuales que se generan se tomó el indicador que corresponde al proceso de agua-pulpa, que es de 7 L/kg de café cereza procesado (Tabla 5), la que multiplicamos por los kilogramos de café cereza procesados; se obtiene el caudal de agua (volumen) generado en un día de producción para el proceso de beneficio húmedo (agua-pulpa).

Tabla 5. Cálculo estimado del caudal de agua

Caudal de agua	L/día		
	1999	2000	2001
Guayabal	12 411	11 470	11 334
La Deseada	11 081	10 220	11 397

En este sentido, la cuantificación de la DQO en subproductos del proceso de beneficiado húmedo del café ha permitido a CENICAFÉ, según señalan; plantean estrategias para disminuir la contaminación que producen la pulpa y el mucílago cuando se disponen directamente sobre las corrientes de agua; evaluaron durante cinco años, el día y la semana de máxima producción que resultaron equivalentes al 1,9 y 8,3 % de la cosecha anual y han propuesto una nueva tecnología que ha mostrado eficiencias de la remoción de la carga orgánica superiores al 80 % de la DBO₅ [Zambrano e Isaza, 1998].

Tradicionalmente la pulpa de café que resulta del beneficio ha sido depositada en las corrientes de agua, lo que genera un aumento considerable de la demanda bioquímica de oxígeno (DQO), aumento de la carga de sólidos totales, incremento de la temperatura del agua, generación de olores y pérdida de la calidad visual. Se trata de una forma de contaminación severa del agua que se da en las épocas de cosecha y que imposibilita su aprovechamiento para acueductos, afecta la fauna acuática y limita los usos recreativos [Vázquez, 2000],

La pulpa de café puede perder hasta 26 % de su peso seco mientras es transportado fuera del beneficio; esta pérdida de peso no sólo es una importante fuente de contaminación, sino que también representa un gran empobrecimiento de la pulpa, lo que limita seriamente su uso futuro; estas investigaciones determinaron, además, que las aguas de despulpe en el beneficiado húmedo convencional aportan una carga contaminante de 160 g DQO por kg de café verde y que el lavado de las mieles que rodean las

semillas del café, operación que debe ser realizada previo al secado, aporta 170 g de DQO [Dietrich, 1999].

En este sentido el informe «Sello Verde» plantea que la contaminación de ríos y fuentes de agua es el segundo problema ambiental en América Central; así, durante el procesamiento del café (cien días por año aproximadamente) el beneficio es el responsable del 60 % de la contaminación de los ríos. El beneficio húmedo del café contamina más que toda la población de América Central durante un año [PEICCE, 1993].

Con respecto al consumo de agua que para nuestro caso utilizamos como indicador 7 L/kg de café cereza procesado, coincidimos con Zambrano e Isaza (1998), quienes reportan que para efectuar el lavado y/o clasificación del café fermentado se utilizan métodos hidráulicos con consumo de agua entre 7,3 y 19,3 L/kg para el lavado y de 8,7 L/kg de café pergamino seco.

Proceso tecnológico

En la tabla 6 se refleja la producción de café cereza y de pulpa de café que se obtuvieron en las despulpadoras Guayabal y La Deseada (centros de beneficios pequeños) por año y promedio anual. La producción de pulpa se comportó anualmente en el rango de conversión de café cereza a pulpa en 38,8 %.

Tabla 6. Producción anual de café cereza y pulpa de café por despulpadora

Despulpadora	Producción	U/ M	Años			Promedio anual
			1	2	3	
Guayabal	Café cereza	ton.	195,0	186,8	194,3	192,2
	Pulpa de café	ton.	75,6	72,5	75,4	74,1
La Deseada	Café cereza	ton.	169,4	160,6	167,7	165,9
	Pulpa de café	ton.	64,2	61,0	63,7	62,9
Total	Café cereza	ton.	364,4	347,4	362,0	358,1
	Pulpa de café	ton.	139,8	133,5	139,1	137,0

En los países cafetaleros se producen cada año miles de toneladas de café en fruto; la producción de ese café conlleva la generación de miles de toneladas de pulpa, de miles de toneladas de mucílago, así como de pergamino-cascarilla. Los dos primeros subproductos tienen un gran potencial contaminante. El manejo de la broza o pulpa de café ha sido más difícil, pues

es un desecho de gran volumen que si no se trata se conserva por mucho tiempo, expide malos olores y se convierte en un medio propicio para la reproducción de moscas y otras plagas [Coocafé, 2001].

Al respecto, en Guatemala existen más de 5 000 beneficios húmedos con diferentes grados de tecnología; estos procesan alrededor de 5,81 millones de quintales oro al año y a su vez generan 11,6 millones quintales de pulpa al año, lo que nos conduce a un potencial de contaminación y/o aprovechamiento de estos desechos, ya que la mayor parte de esa pulpa es amontonada y/o distribuida en los cafetales, generalmente en forma superficial, con lo que se pierde gran parte de su potencial nutricional, y ocasiona problemas de mal olor, proliferación de moscas; además, los altos volúmenes de humedad contenidos (85 %) provoca dificultades para su transporte, manejo, tratamiento, y distribución al campo [Medina, 2001].

Teniendo en cuenta que el café maduro presenta una composición de la cual el grano –que es la parte aprovechable para el proceso– representa el 20 % del volumen total de la fruta, de manera tal que el procesamiento de beneficiado genera un 80 % del volumen procesado en calidad de desechos; cada uno en un grado diferente constituyen un riesgo para el medio ambiente; por lo que estos resultados se corresponden con un 38,8 % de pulpa del volumen total del grano procesado, lo que corroborando los resultados obtenidos en Costa Rica, para la que esta conversión estaba en el orden de los 38,4 y 40 %, en dependencia de la variedad, el clima y la altura de procedencia de la cereza [Pujol, *et al.*, 1999]. En el caso de la presente investigación los centros de beneficios se encontraban a altura de 700 y 715 msnm, con clima favorable de temperaturas medias entre 23 y 26 0C y una pluviometría en el rango de los 1 200 a 1 300 mm bien distribuidos.

Los residuales agroindustriales constituyen una fuente concentrada de materiales, que además, van en aumento con los procesos de modernización de la sociedad. En estudios realizados por él en Venezuela, plantea que, por ejemplo la agroindustria de la caña de azúcar genera por cada tonelada de tallos molidos, 250 kg de bagazo, 6 kg de ceniza, 45 kg de melaza y 30 kg de cachaza, y que la cachaza o bagacillo es acumulada en los alrededores de la fábrica causando efectos ambientales adversos, sin una estrategia de reciclaje para estos subproductos [Quintero, 1994].

En la tabla 7 se expresan las características del compost que indican su estado inicial y final del proceso, para lo que se midió temperatura, pH, presencia de microorganismos y olor, entre 8 y 15 días, y entre 80 y 110 días. *Tabla 7. Características del compost que indican su estado inicial y final del proceso*

Parámetros	Inicio (8-15 días)	Final (90-110 días)
Temperatura (a 30 cm)	70 °C	27 °C
pH acidez	9	6,5
Presencia de hongos	Superficial	Generalizado
Olores	Fuerte (amoníaco)	A tierra fresca

En las mediciones que indican las características iniciales del proceso se observó que las temperaturas superaron el límite biológico al alcanzar hasta 70 °C, indicando así una perfecta etapa termófila, con un pH de 9, presencia de hongos propios de la microflora del suelo en la superficie y fuerte olor amoniacal.

En la etapa final (entre 80 y 110 días), las temperaturas estaban niveladas con las del ambiente, que para la zona de estudio promedian 26 °C, el pH de 6,5, presencia de una fuerte asociación de hongos del suelo (entre los que se observaron, *aspergillus*, *rhizobium*, *penicilium* y *trichodermas*, determinados por el método de cámara húmeda), generalizada y olor a tierra fresca de bosque indicador de que el compost está listo para ser utilizado.

Es posible convertir los residuos orgánicos en biofertilizantes de excelente calidad agrícola mediante la técnica del compostaje. Si se controlan adecuadamente los factores del compostaje, se obtiene al final del proceso de descomposición un compostaje maduro, el cual, es un abono orgánico altamente humificado, seguro desde el punto de vista sanitario, libre de sustancias fitotóxicas y los nutrientes que contiene estarán disponibles para las plantas después de un proceso gradual de mineralización [Datzall, *et al.*; 1991; y Costa, *et al.*; 1991].

El perfil de temperatura del compostaje es un factor que orienta sobre la evolución del proceso; a tal efecto se comprobó que un día después de elaborados los cúmulos, las temperaturas se ubicaron en el rango termófilo (54-60 °C). En esta etapa ocurre la biooxidación acumulada de la materia orgánica [Madrid y Castellanos, 1998]

Para este proceso se señala que entre 8 y 36 días las temperaturas superan el límite biológico 55-60 °C y que a partir de los 51 días comienzan a disminuir, pues pasada la etapa termófila (que es la que define si un proceso corresponde o no al compostaje) la temperatura desciende gradualmente hasta casi nivelarse con la del ambiente [Gómez, 2000].

La producción de compost en fosos de las dos despulpadoras se refleja en la tabla 8; en ella se puede observar la producción en t/año y promedio anual. Conscientes del potencial contaminante de los residuales del beneficio húmedo del café, se han desarrollado tecnologías con el fin de reducir el consumo de agua en el proceso, pero en el caso que nos ocupa, se ha tratado de

transformar la pulpa y el mucílago por medios biológicos, o sea con la intervención de microorganismos en el compostaje y de la lombricultura.

Tabla 8. Producción de bioabono (compostaje) en fosos y despulpadoras por año

Despulpadora	U/M	Años			Promedio Anual
		1	2	3	
Guayabal	ton.	6,76	6,00	6,70	6,40
La Deseada	ton.	3,92	3,12	3,79	3,61
Total	ton.	10,68	9,12	10,49	10,09

Al respecto se reporta que en los beneficios costarricenses, la disposición final adecuada de la pulpa requiere de maquinaria grande, como tractores y camiones, para su transporte, demanda igualmente de terrenos suficientemente grandes para el vertido de esa pulpa, para darle movimiento periódico y finalmente para envasarla y comercializarla; señala, además, que la conversión de las 350 mil toneladas de pulpa supondría una producción de 87 mil toneladas de compostaje; de esa forma se puede devolver al cafetal 780 kg de abono orgánico a cada una de las 115 mil ha de café [Dietrich, 1999].

Las fincas de café son agrosistemas de mediana economía y alta eficiencia en la producción de biomasa. La alta generación de materia orgánica durante el proceso de beneficio hace necesario plantear esquemas de procesamiento y reutilización dentro de la finca, lo que reduce las emisiones, los contaminantes y mantiene las condiciones del suelo, por lo que se implementan unidades de transformación de los residuos sólidos orgánicos mediante composteras.

El producto que se obtiene regresa al suelo como complemento de la fertilización química tradicional; de ahí que a finales de 1999, quedaron instaladas en Colombia 30 composteras en la zona cafetalera para el procesamiento de 60 mil toneladas de pulpa y la obtención de 25 mil toneladas de compostaje; es así cómo las tecnologías ecoeficientes tienen un impacto social, económico y ambiental en la actividad de la caficultora tradicional [Leal y Madrid, 1998; y Emisión, 2001].

En la tabla 9 se exponen los resultados de la producción obtenida por despulpadora, para el caso del lombricompostaje, obtenido en canchales con nidos iniciales de 60 000 lombrices por metro cuadrado.

Tabla 9. Producción de bioabono (lombricompostaje) en canteros y despulpadoras por año

Despulpadora	U/M	Años			Promedio anual
		1	2	3	
Guayabal	ton.	12,00	12,00	12,00	12,00
La Deseada	ton.	12,00	12,00	12,00	12,00
Total	ton.	24,00	24,00	24,00	24,00

Para la cosecha se tuvieron en cuenta los hábitos alimentarios de la lombriz (ésta come desplazándose desde la profundidad a la superficie) y su reacción heliófoba. Teniendo en cuenta este comportamiento utilizamos el siguiente método de cosecha:

La lombricultura es una tecnología en virtud de la cual se aplican determinadas normas y técnicas de producción; se utilizan las lombrices rojas californianas (*Eisenia foetida*) para reciclar residuos orgánicos biodegradables y como fruto de su ingestión, los anélidos efectúan sus deyecciones, que es el fertilizante orgánico más importante disponible sobre la tierra [Torres, 2000].

El lombricomposteo de la pulpa, comienza a perfilarse como una importante actividad donde se generan dos valiosos subproductos: lombrices rojas y vermicompostaje [Dietrich, 1999].

El producto resultante de las deyecciones de la lombriz roja es un abono orgánico con características muy propias, que lo hacen prácticamente insuperable, ya que puede incrementar hasta en un 300 % la producción de hortalizas y otros productos vegetales.

En cálculos promediados una lombriz produce aproximadamente 0,3 g de humus diariamente, lo que demuestra que en pequeñas superficies se pueden obtener grandes cantidades de humus.

El lombricompostaje es el mejor abono orgánico que existe: completo, equilibrado y de fácil manejo. Concentra los nutrientes: más calcio, potasio, magnesio, nitratos y fosfatos; la carga microbiana es un millón de veces superior al estiércol [OIRSA, 2001].

El humus no es un fertilizante con fines nutricionales, sino un activador biológico del suelo de primer orden, por contener una población grande de microorganismos, sustancias como vitaminas, enzimas, ácidos y además por facilitar la disponibilidad de los elementos nutritivos para las plantas [Gomero y Velásquez, 2001].

En la tabla 10 se expresan los niveles totales de producción de ambas tecnologías en las dos despulpadoras, que como se puede observar lo volúmenes obtenidos por año lograron una conversión de 24,8 %.

Tabla 10. Producción de bioabono total por tecnología y despulpadoras por año

Despulpadora	Tecnología	U/M	Años			Promedio anual
			1	2	3	
Total	Fosos	ton.	10,68	9,12	10,49	10,09
	Canteros	ton.	24,00	24,00	24,00	24,00
Total general		ton.	34,68	33,12	34,49	34,09

La conversión de 350 mil toneladas de pulpa genera aproximadamente 87 mil toneladas de abono orgánico, con un poder nutricional valiosísimo para la agricultura [Pujol, *et al.*; 1999].

El compostaje y vermicompostaje no sólo es bueno para la tierra, sino que protege el medio ambiente, pues supone una solución al inquietante problema de los residuos sólidos y permite reciclar la parte orgánica de estos [Rodríguez y Zuluaga, 1994].

En la tabla 11 se pone de manifiesto el contenido de nutriente del abono obtenido de cada tecnología; como se observa, todos los parámetros están dentro de los niveles apropiados y estabilizados, por lo que el producto final de ambas tecnologías está en el rango de primera calidad. Como se puede observar, los porcentajes de materia orgánica están en los niveles requeridos, así como los macroelementos, expresados en mg/kg, se reportaron en los niveles óptimos, lo que le confieren al producto final la categoría de primera calidad.

Tabla 11. Contenido de nutriente del abono obtenido de cada tecnología

Despulp.	Tecnol.	M.O	N	P	K	Mg	S	Ca	Fe	Cu	Zn	Mn	Calid.
		%						mg/kg					
Guayabal	Fosos	40,0	1,11	0,26	0,20	0,35	0,30	1,47	41,5	180	145	880	I
	Canteros	42,0	1,30	0,34	0,54	0,40	0,35	1,54	43,8	182	149	887	I
La Deseada	Fosos	40,1	1,10	0,25	0,20	0,35	0,31	1,44	41,3	178	144	880	I
	Canteros	44,0	1,35	0,30	0,52	0,40	0,33	1,51	44,0	180	148	885	I

Un abono orgánico es un recurso capaz de proporcionar al suelo o a las plantas cantidades notables de nutrientes esenciales, principalmente nitrógeno, fósforo y potasio; una fortaleza de los abonos orgánicos es que además de materia orgánica y N, P, K tienen todos los otros elementos esenciales en niveles apropiados, lo que corrobora los resultados obtenidos de las pruebas de contenido de nutrientes [Gómez, 2000]).

El nitrógeno es el elemento más apreciado para valorar la calidad de un abono orgánico por su importancia en la producción de fitomasa. Lo deseable para una buena calidad de abono orgánico es que su contenido en este elemento sea de 1,12 a 3 % y se encuentre estabilizado.

En el abonamiento orgánico, debido a la liberación lenta de los nutrientes, no se pueden imitar los fertilizantes químicos altos, pero sí aproximarse con muy buenos resultados económicos a las dosis bajas. El nitrógeno es el elemento más importante en el abonamiento del cafetal y el abonamiento orgánico se puede lograr con base en el aporte de los árboles de sombra [OIRSA, 2001].

Para el caso del fósforo su liberación se encuentra vinculada a la descomposición del abono orgánico en el suelo. Los vegetales tienen como norma general un bajo contenido de fósforo, alrededor de 0,5 % o menos en base a materia seca. Valores por encima de 0,15 %, se consideran buenos y por encima de 2 %, excelentes [Gómez, 2000].

El potasio es propio de los residuales suculentos (residuales de frutas, verduras y pulpa de café); es el elemento de mayor disponibilidad por cuanto es de carácter funcional, no constitutivo de la arquitectura vegetal.

En el análisis químico realizado a diferentes compostajes, se reporta para el compostaje de broza de café manejado en la Estación Fabio Baudrit; 1,04 % de N, 0,4 % de P, 0,6 % de K y 40,55 % de materia orgánica [Sasaki y Alvarado, 1994].

Por su lado Bravo (2001), reporta para el lombricompostaje haber obtenido contenidos de nitrógeno de 1,7 %; 0,22 % de fósforo; 0,20 % de potasio, y pH de 7,9 con 54 % de materia orgánica.

Los valores nutricionales del humus obtenido a partir de pulpa de 1,7 % de N, 0,27 % de P y 0,14 % K más 53 % de materia orgánica, todos los autores citados coinciden en plantear que el producto obtenido a partir de la pulpa de café es muy estable y nutritivo [Respeño y Cuniolo, 1996].

Aplicación del bioabono

La tabla 12 expresa el efecto de las dosis de aplicación del abono orgánico sobre la producción de café, en tres parcelas de tres zonas con características climáticas diferentes en cuanto a altura, variedad, sombra y rendimientos agrícolas muy deprimidos; se observa que conforme aplicábamos el abono orgánico se incrementaban los rendimientos, teniendo en cuenta de que se trata de cafetales que por más de diez años han estado sin tratamiento nutricional. Como se observa en dicha Tabla los rendimientos en relación con las dosis aplicadas fueron en incremento paulatino desde el año 1 hasta el año 3, con respecto a las áreas sin tratamiento en que los rendimientos en toneladas por hectárea no pasaron de 20 %.

Tabla 12. Efecto de las dosis de aplicación del abono orgánico sobre la producción de café cereza por año (ton. /ha)

Año	Tratamiento	Producción de café cereza ton./ha		
		Alto de la Tagua	Guayabal	La Deseada
Antes de comenzar la experiencia		0,21	0,14	0,14
1	0	0,22	0,14	0,14
	1	0,23	0,17	0,15
	2	0,23	0,18	0,16
2	0	0,24	0,18	0,17
	1	0,30	0,25	0,23
	2	0,31	0,26	0,24
3	0	0,29	0,23	0,20
	1	0,38	0,35	0,31
	2	0,40	0,38	0,37

En los nueve ensayos regionales realizados en Colombia por Franco (1958), se comprobó que el compostaje de la pulpa de café aumenta las cosechas en una proporción cercana a 22 % con relación al testigo [Obando, *et al.*; 1998].

Estudios realizados en Colombia indican que las aplicaciones superficiales (sin incorporar), entre 6 y 12 kg de pulpa descompuesta, produce rendimientos similares a cafetos que recibieron fertilizantes químicos. Los mismos autores hacen referencia de que el poder residual de las aplicaciones de pulpa es a corto plazo, lo que hace necesario se aplique todos los años [Obando, *et al.*; 1998].

A tal efecto obtendrían buena ganancia los beneficiadores de café si venden la composta, pero mejor aún si la utilizan en sus propios cafetales, podrían comenzar reduciendo la cantidad de fertilizantes químicos en un porcentaje importante y podrían cultivar café orgánico, obteniendo mayores ganancias, dado a que los precios del café orgánico es entre 15 y 30 % mayor que el del café normal [Olguín, *et al.*; 1999].

Medina (2001) reporta al efecto que los beneficios directos de la utilización de la pulpa como abono son entre otros:

1. Reducción de costos por insumos de fertilización hasta 40 % en los primeros cuatro años de establecimiento; y en almácigos hasta 30 %.
2. Mejora la biodiversidad física, química y biológica del suelo, por el aporte de materia orgánica, elementos minerales, y como consecuencia mejora también la biodiversidad de los suelos.
3. Reduce la dependencia de insumos externos y da valor agregado a los subproductos del cultivo.
4. Es una vía para disminuir la contaminación ambiental y la degradación de las cuencas hidrográficas

Impacto económico

Se realizó un análisis económico del producto obtenido de ambas tecnologías, para conocer el valor estimado de dichas producciones teniendo en cuenta los precios actuales a que acceden estos productos en nuestro mercado interno. En la tabla 13 se puede observar que mediante la comercialización del bioabono obtenido en las dos despulpadoras se obtuvo de la venta del compost de los fosos tamizados y a granel.

Tabla 13. Valor de la producción de ambas tecnologías por año y promedio anual

Concepto	Precio (\$)	Valor de la Producción por año			
		I	II	III	Promedio
Compostaje de fosos	1t/100,00	1 068,00	912,00	1 049,00	1 009,66
Vermicompostaje	1 kg/2,00	48 000,00	48 000,00	48 000,00	48 000,00

Los costos totales de la producción por año y promedio anual se expresan en la tabla 14, en la que se puede observar que la actividad de reciclar los residuales sólidos no es solo una actividad que mejora el medio ambiente, sino también que es rentable para la propia planta de beneficio.

Tabla 14. Costos totales de la producción de bioabono por año

Concepto	U/M	Producción por año			
		I	II	III	Promedio
I. Materia prima	\$	25,00			25,00
Compra de lombríz	\$	25,00			25

II. Servicio a la producción	\$	3 500,00	3 500,00	3 500,00	3 500,00
Consumo de agua	\$	500,00	500,00	500,00	500,00
Electricidad		3 000,00	3 000,00	3 000,00	3000
III. Otros gastos	\$	3 846,64	3 846,64	3 846,64	3 846,64
Salario	\$	3 434,5	3 434,5	3 434,5	3 434,5
Seguridad social	\$	412,14	412,14	412,14	412,14
IV. Total	\$	7 371,64	7 346,64	7 346,64	7 371,64

Teniendo en cuenta el análisis estimado del valor de la producción y sus costos reales, de la misma, en la tabla 15 se propone un flujo de caja estimado de la producción de bioabono por año y promedio anual, en el que se pone de manifiesto que además de rentable la actividad recupera la inversión desde el primer año de ejecución.

Tabla 15. Flujo de caja de los ingresos de la producción de bioabono obtenida por año y promedio anual

Concepto	U/M	I	II	III	Promedio
Ingresos	\$	49 068,00	48 912,00	49 049,00	49 009,66
Egresos	\$	7 371,14	7 346,14	7 346,64	7 354,64
Saldo	\$	41 696,86	41 565,86	41 702,36	41 655,02
Saldo Acumulado	\$	41 696,86	83 262,72	124 965,08	249 924,66

La pulpa y otros subproductos del beneficiado del café, son utilizados como abono en Costa Rica, en las propias plantaciones de donde se han obtenido, y también en otros cultivos; ello ha generado ganancias adicionales en los beneficios que ofertan fertilizantes 100 % naturales. [ICAFÉ, 2001].

El abonamiento orgánico al cafetal se paga con una fanega (47 kg) de café de aumento en la producción, con todos los demás efectos que brinda el abono orgánico y que no aporta el fertilizante químico [OIRSA, 2001].

La utilización de la pulpa de café en la producción de bioabono reduce el costo de la fertilización química, por lo que de hecho disminuye la contaminación que generan tanto el residuo orgánico como la propia fertilización y puede representar un ingreso extra para aquellos centros que lo desarrollen a mediana o gran escala [Medina, 2001].

Bibliografía

- BIOTEC. «Industria cafetalera. Fábrica de Café Liofilizado». Chinchina, Colombia. 2001. <http://www.bio-tec.net/>
- CITMA. «Metodología para la estimación aproximada de la carga contaminante de la actividad de despulpe de café». Documento, 1996.
- COOCAFÉ. «Manejo de desechos». 2001. <http://www.coocafe.com/>
- COSTA. F., C. GARCÍA., T. HERNÁNDEZ Y A. POLO. «Residuos orgánicos Urbanos. Manejo y utilización». CSIC. Edit.. Centro de ecología y Biología Aplicada del Segura (CEBAS). Murcia, España, 1991. 181 pp.
- DIETRICH. Z. V. «Proyecto de café». Colegio La Salle. Costa Rica. 1999. <http://www.monografias.com/>
- «Emisión. Medioambiente. Compostaje industrial». 2001. <http://www.emision.com/>
- GOMERO. O. L. Y H. VELÁSQUEZ. «Bases conceptuales y programáticas para el manejo ecológico de suelos». 1999. <http://www.ciedperu.org/>
- GÓMEZ. Z. J. *Abonos orgánicos*. Feriva.SA. Santiago de Cali. Colombia, 2000. 107 pp.
- GONZÁLEZ. MA. ESTHER Y R. NAVAS. «El impacto de los residuales del beneficio industrial del café. Perspectivas como bioestimulador del crecimiento vegetal para sistemas productivos». INCA-ECICC, 1999.
- ICAFÉ. «Café de Costa Rica». 2001. <http://www.icafe.go.cr/>
- IS. *Metodología para realizar el balance de materia orgánica*. División de Fertilizantes. Folleto 5. MINAG. 2000.
- MEDINA, B. «La importancia de la utilización integral de la pulpa de café como una alternativa ecológica para reducir la contaminación». 2001. <http://www.anacafe.org/>
- MINAG. Manual de Técnicas de Análisis Químico para humus de lombriz. 24 p. 1997.
- Obando. J.. J.; C. C. FONSECA Y M. G.. RAMÍREZ. «Efecto de la interacción de la fertilización química y orgánica sobre la producción de café». Costa Rica. 1998. <http://www.infoagro.go.cr/>
- OLGUIN. E. J.; G. SÁNCHEZ, E. ALARCÓN, S. GALICIA, E. HERNÁNDEZ, S. MERCADO, R. MARIN Y P. OLMOS. «Estrategia intersectorial de tecnologías innovativas para el control de la contaminación por agroindustrias». México. 1999. <http://www.ecologia.edu.mex/>
- OIRSA. Manual Buenas prácticas en cultivo de café orgánico. Organismo Internacional Regional de sanidad Agropecuaria. Costa Rica. 63p. 2001.
- PEICCE. Programa energético del Istmo Centroamericano. "Informe Final" Sello Verde. Costa Rica, 1993.
- PUJOL. R.; L. ZAMORA, MARIA LUZ SANARRUSIA Y F. BONILLA. *Estudio de*

Impacto ambiental del cultivo y procesamiento de café. Programa de Desarrollo Urbano Sostenible. Universidad de Costa Rica. 1998.

<http://www.mideplan.gov.cr/>

RESPEÑO, NORMA Y M. CUNIOLO. «Lombricultura-Compost». *Revista Procampo*. No 27. Venezuela. 1996.

RODRÍGUEZ, V. N. Y V. J. ZULUAGA. «Cultivo de *Pleurotus pulmonarius* (F).Quéel». *Pulpa de café*. 45(3):81-92. Cenicafé. Colombia, 1994.

SASAKI. S. Y M. ALVARADO. *Manual del curso básico de agricultura orgánica*. Estación Experimental Agrícola Favio Baudrit M. Alajuela. 1992. 30 pp.

ZAMBRANO, F, D. A.; ZULUAGA, J. «Balance de materia en un proceso de beneficio húmedo del café». 44(2): 45-46. Cenicafé Colombia, 1993.

ZAMBRANO, F, D. A.; ISAZA, H.,J. D. «Demanda química de oxígeno o nitrógeno total, de los subproductos del proceso tradicional del beneficio húmedo de café». *Cenicafé* 49(4): 279-289. 1998. Colombia.

Sistema solar termosifónico de calentamiento de agua sanitaria en cayo Las Brujas

Sanitary Water Heating Solar Thermal Syphonic System (natural conversion for density differences) at Las Brujas Cay

*H. Despaigne Wilson, Alonso Torres Ten, S. Fabre Maceo y F. Senon Cobián
Centro de Investigaciones de Energía Solar. Micro 3,
Reparto Abel Santamaría, Santiago de Cuba, Cuba. CP 90800.
Solar Energy Research Center. Micro 3,
Reparto Abel Santamaría, Santiago de Cuba, Cuba. CP 90800.
Tel.: (53 022) 671131.
Fax: (53 022) 671131.
e-mail: husseyn@cies.ciges.inf.cu y alonso@att.ciges.inf.cu*

Resumen

Proponemos un sistema de agua caliente sanitaria con energía solar utilizando colectores solares termosifónicos en las cabañas de cayo Las Brujas, localizado al Norte de la provincia de Villa Clara. Se realiza la comparación del comportamiento térmico de los sistemas termosifónicos con fuente auxiliar de energía en el interior del tanque termo y en la línea de distribución (exterior), obteniéndose que con la fuente auxiliar de energía en el exterior la fracción solar anual es 15 % superior que con fuente en el interior. Se obtienen curvas de comportamiento térmico de la instalación para diferentes condiciones de trabajo, tales como ángulo de incidencia y número de colectores. Se realiza un estudio técnico económico que demuestran la viabilidad de los sistemas solares termosifónicos en instalaciones turísticas.

Palabras clave: Colectores solares termosifónicos, comportamiento térmico, instalación solar.

Abstract

A system of heating sanitary water with solar energy is proposed, using thermal-syphonic solar collectors at the cabanas of Las Brujas Cay, located in northern Villa Clara province. The comparison of the thermal behavior of the thermal syphonic systems (sistemas termosifónicos) are reviewed with an additional energy source in the interior of the thermal tank and in the exterior distribution line (exterior), resulting, with the additional energy source, in an annual solar fraction 15% higher than with the source located in the interior. Thermal behavior curves of the installation for different work conditions are gathered, such as the incidence angle and the collector number. A technical economic study is carried out, thus showing the feasibility of the solar thermal syphonic systems in tourism facilities.

Key words: Thermal syphonic collectors, thermal behavior, solar installation

Introducción

Las fuentes renovables de energía coexisten, se ayudan y se suman en el desarrollo sostenible y en el respeto a la naturaleza. Es imposible hablar de un desarrollo sostenible basado en fuentes no renovables de energía.

Dentro de las aplicaciones de la energía solar se destaca por su fiabilidad técnica y su rendimiento el calentamiento de agua, con fines sanitarios, con colectores solares en instalaciones del turismo, donde se requiere disponibilidad de agua caliente a cualquier hora del día; además, para consumo de agua caliente sanitaria de hasta 500 litros al día se recomienda la utilización de colectores solares termosifónicos modulares. En este trabajo nos hemos planteado como objetivo el proyecto y cálculo de un sistema solar termosifónico de calentamiento de agua sanitaria en Cayo Las Brujas.

Desarrollo

Las cabañas están separadas una de las otras y sus espacios se hallan destinados a habitaciones. Se propone instalar un módulo termosifónico consistente en un colector solar de 2 m² y tanque termo-acumulador de 150 litros de capacidad para las cabañas individuales, y un módulo termosifónico compuesto por dos colectores solares de 4 m² y un tanque termo-acumulador de 300 litros de capacidad para las cabañas dobles. En el alero de 1,8 x 1,8 m se podrá instalar los módulos solares termosifónicos.

Datos iniciales para el proyecto

Los datos iniciales para el proyecto están asociados a las condiciones meteorológicas, actinométricas y los requerimientos de trabajo de la instalación, los cuales se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Datos iniciales para el cálculo de la instalación solar

No.	Indicadores	Valores
I	Tipo de edificio	Cabañas
II	Habitaciones · Sencillas · Dobles	19 4
III	Número de huéspedes por habitaciones	2
IV	Demanda diaria de agua caliente (litros/huéspedes)	75
V	Temperatura del agua caliente de consumo (°C)	50

VI	Sistema solar	Termosifónico
VII	Promedio de ocupación (%)	100
VIII	Ubicación de la obra	Zona de playa
IX	Localidad · Temperatura ambiente media anual (°C)* · Irradiación diaria media anual, (kJm ⁻² día ⁻¹)** · Temperatura media del agua fría, (°C)	Cayo Las Brujas 23,73 21 197 20,0
X	Inclinación de los colectores solares	30°
XI	Orientación de los colectores solares	Sur
XII	Régimen de carga	Turístico

*Atlas climático de Cuba, ACC, 1987.

**Manual de radiación solar para la República de Cuba, ACC, 1992.

Configuración de la instalación

La instalación está compuesta por los módulos colectores solares termosifónicos, fuente auxiliar y las redes de alimentación y distribución del agua. Se han estudiado dos tipos básicos de instalación: una con la fuente auxiliar en el interior del tanque termoacumulador (Fig. 1) y la otra con la fuente auxiliar exterior en la línea de distribución (Fig. 2).

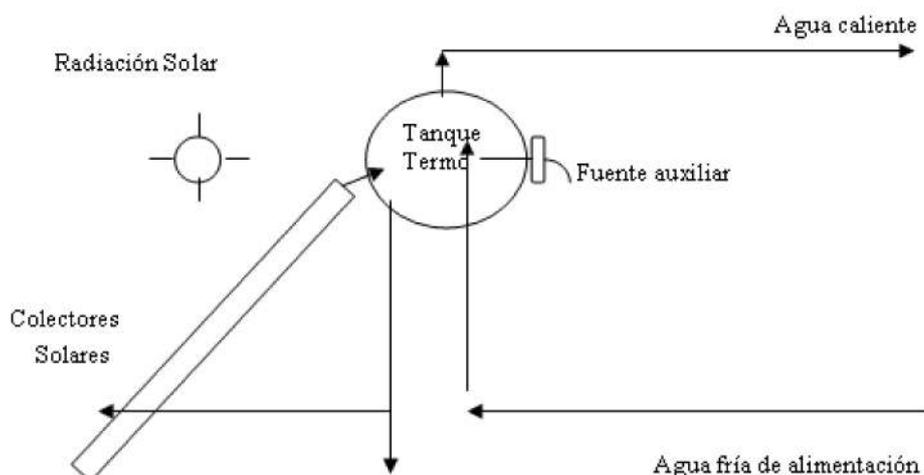


Fig. 1. Configuración con fuente auxiliar interior.

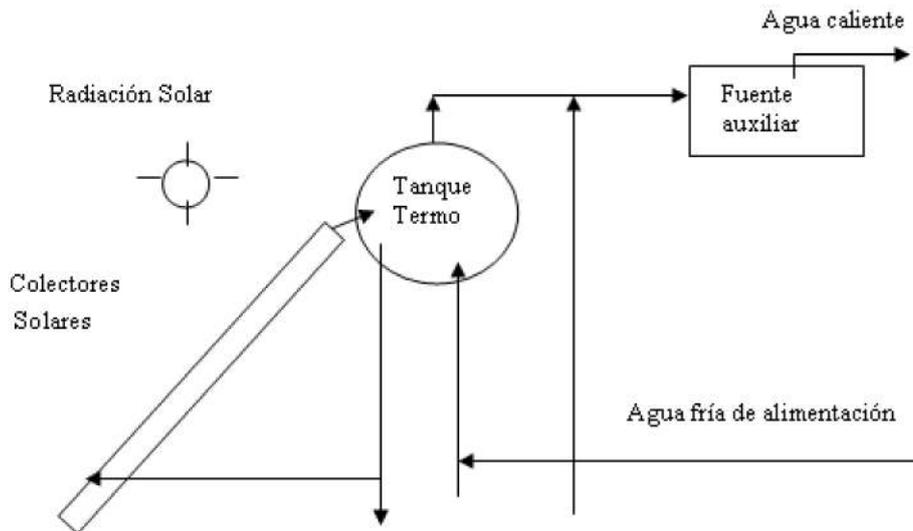


Fig. 2. Configuración con fuente auxiliar en la línea de distribución (exterior).

En la figura 3 se muestra el comportamiento térmico anual de las configuraciones, representadas en las figuras 1 y 2, con fuente auxiliar interior y exterior respectivamente.

Como se muestra, la configuración con fuente auxiliar exterior satisface la demanda térmica anual en 88,62 %, superior en 15,00 % al sistema con fuente auxiliar en el interior del tanque termo.

A partir de estos resultados se recomienda la utilización de fuente auxiliar exterior. En el presente trabajo los resultados obtenidos serán en un sistema con fuente auxiliar exterior.

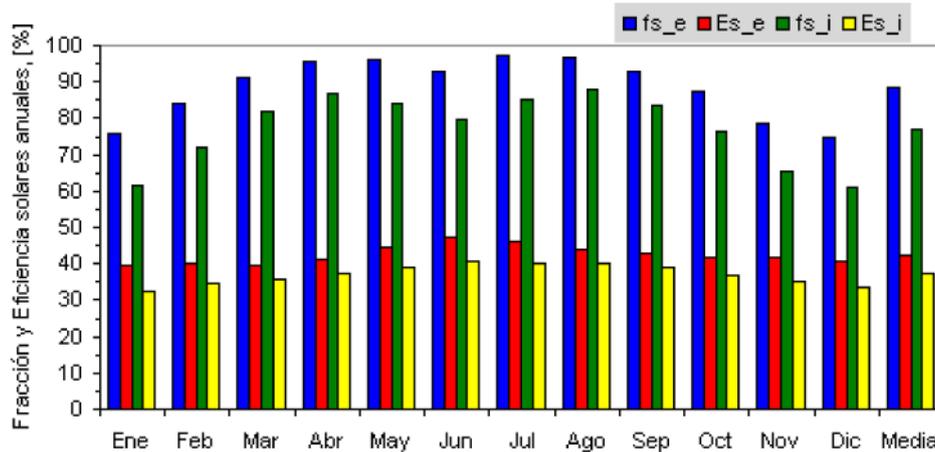


Fig. 3. Comportamiento de las configuraciones 1 y 2.

Protección contra quemaduras

Se ha instalado en el circuito una válvula térmica mezcladora de tres vías, que limita la temperatura de salida del agua caliente sanitaria a la salida del tanque termoacumulador, para la configuración con la fuente auxiliar exterior. En relación con la fuente auxiliar existe un termostato en su interior que controla los valores de temperatura del agua.

Protección contra sobrepresión

La red de alimentación esta limitada a 3 bar por válvulas de sobrepresión, instaladas a la entrada del módulo del colector solar termosifónico.

Protección contra la corrosión

En los casos que los análisis del agua de alimentación manifiesta una alta acción corrosiva, se ha concebido la utilización de un circuito solar independiente entre el colector solar plano y el tanque termoacumulador; ello requiere de algún intercambiador de calor. Por otra parte, actualmente están disponibles en el mercado tanques termo de doble carcasa que permiten independizar ambos circuitos del fluido. Una alternativa actual e interesante es la utilización de magnetizadores para disminuir la agresividad del fluido.

Planificación del proyecto

La planificación del proyecto, en conformidad con los recursos existentes y posibles de financiar es del tipo modular, con el objeto de facilitar la construcción progresiva y por cabañas, que en su concepción es independiente de cada módulo solar.

Demanda diaria de energía

De acuerdo con el número de huéspedes por cabaña y los requerimientos del tipo de instalación turística (estrellas) se tiene un consumo planificado de agua caliente sanitaria, que en nuestro caso es de 75 litros por huésped. Por otra parte, se tiene en las cabañas individuales dos huéspedes y en las cabañas dobles cuatro huéspedes. Considerando la temperatura media del agua de alimentación de 20 °C y la temperatura del agua caliente de 50 °C, la demanda diaria de energía (carga térmica) ED, es aproximadamente 18 806 kJ para las cabañas individuales y 37 611 kJ para las cabañas dobles.

Condiciones climáticas

Las condiciones climáticas vienen dadas, fundamentalmente, por la radiación solar global incidente y la temperatura ambiente media del lugar donde se encuentra la instalación solar. Se muestran en la tabla 2 los valores medios mensuales de la temperatura ambiente y la irradiación solar global para el lugar donde se halla la instalación solar, ubicada a una latitud de 22,75° N y una longitud de 79,68' W, al nivel del mar.

Tabla 2. Temperatura ambiente e irradiación solar global medias mensuales

	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
Ta (°C)	21,1	21,3	22,2	23,3	24,7	25,8	26,0	26,1	25,1	24,0	23,1	22,0
H _T (MJm ²)	15,26	17,75	21,59	24,41	24,61	23,56	24,83	24,02	21,16	18,30	15,33	14,31

Dimensionado básico

A los efectos de este proyecto, el dimensionado básico de la instalación se refiere a la selección del número de colectores solares termosifónicos y al volumen del tanque de acumulación, en función del comportamiento térmico de la instalación solar, que toma como criterios la fracción solar y el rendimiento de la instalación solar, tanto mensual como anual.

Se entiende como fracción solar la fracción de la demanda de energía cubierta con energía solar. Se consideran satisfactorias fracciones solares mensual mayores de 60 % y anuales mayores de 70 %, para las condiciones de nuestro país.

En la figura 4 se muestra el comportamiento térmico del sistema solar con colectores solares termosifónicos para una cabaña y área de captación de 0,95, 1,9, 2,85 y 3,8 m². Las áreas de 0,95 y 2,85 m² corresponden a 0,5 y 1,5 unidades de colectores solares; es obvio que físicamente no es posible, pero resulta muy ilustrativo en este estudio. Como se observa, hay un aumento significativo de la eficiencia solar anual entre 0,5 y 1 unidades de colectores; el incremento es mucho menor entre 1 y 1,5 unidades y prácticamente despreciable entre 1,5 y 2 unidades de colectores. De aquí se puede seleccionar una unidad de colectores solares como la óptima, ya que la fracción solar anual está cercana a 90 % de la demanda anual. Por otra parte, un aumento a dos unidades no traería proporcionalmente un aumento significativo de la fracción solar.

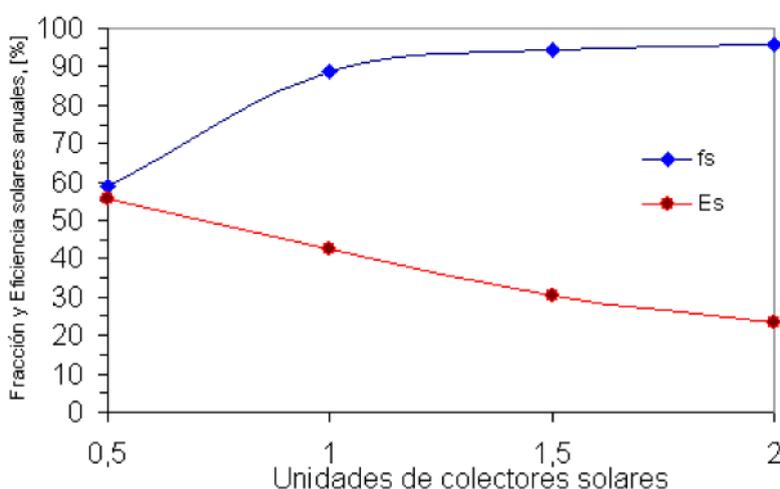


Fig. 4. Fracciones y eficiencias solares anuales en función del área de captación.

Volumen del tanque termoacumulador

El volumen de agua caliente demandada se determina a partir del número de habitaciones y de huéspedes por habitación. Para las cabañas sencillas tenemos dos personas, con un consumo específico diario de 75 litros por persona, que hace un total de 150 litros diarios de agua caliente, y para las cabañas dobles el consumo de agua caliente alcanza los 300 litros diarios. El volumen del tanque de acumulación de los sistemas solares termosifónicos se ha seleccionado 1,5 veces superior al consumo diario de agua caliente sanitaria por cabañas, por lo que tenemos para las cabañas sencillas tanques termo de 225 litros y para las cabañas dobles tanques termo de 450 litros.

Selección del colector solar plano

Para la selección del tipo de colector solar se realizó un estudio de los disponibles en el mercado nacional; fue seleccionado por su comportamiento térmico en otras instalaciones turísticas realizadas por el grupo GITSOL del CIES el colector solar plano Roldan, cuyas características técnicas son:

- Presión de trabajo: 3 bar.
- Área de captación: 1,9 m².
- Garantía de la casa expendedora: 7 años.
- Rendimiento óptico: $\eta_0 = 0,715$.
- Coeficiente global de pérdidas de calor: $U_{L0} = 6,5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$.

El rendimiento del colector solar para la temperatura media del agua (35 °C) en el colector solar, una irradiancia de 500 W/m² y una temperatura ambiente de 23,73 °C es de aproximadamente 56,85 %.

Integración arquitectónica

La batería de colectores solares se encuentra ubicada en la parte superior de las cabañas lo que no incide en la arquitectura de estas. La orientación de los colectores solares es en la dirección Sur-Norte, su azimut es de 0° y la inclinación con respecto al plano horizontal es de 30 grados. En la figura 2 se hace un estudio, para diferentes inclinaciones (1, 10, 20, 30, 40 y 50 grados), del comportamiento térmico de los colectores solares. Como se muestra en la figura 5 no hay diferencia significativa para inclinaciones entre 20 y 30 grados, por lo que se decidió escoger una inclinación de 30 grados, que presenta una distribución mensual más homogénea.

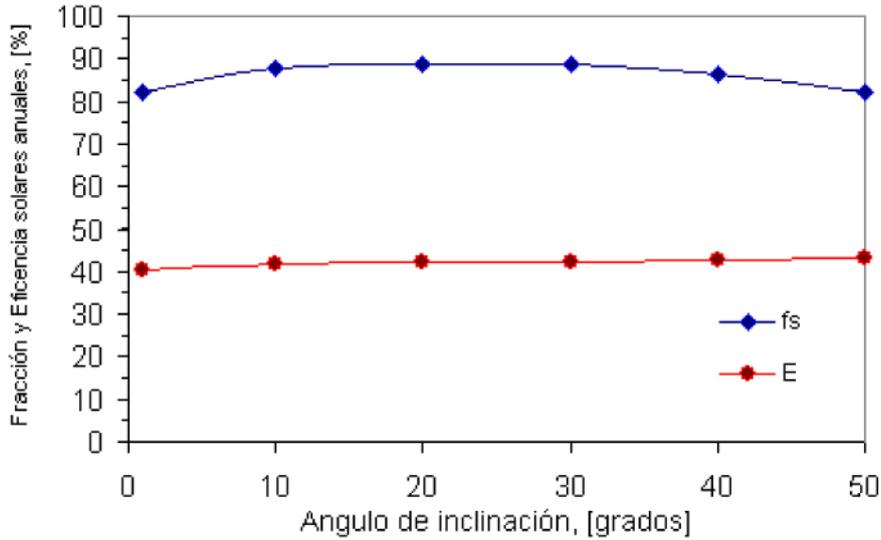


Fig.5. Fracción y eficiencia solares anuales en función del ángulo de inclinación.

Conexión

Los colectores solares planos están dispuestos en paralelo cuando su número excede de un colector solar. La configuración del circuito hidráulico se representa en las figuras 1 y 2.

Tanque termoacumulador

El tanque acumulador de agua caliente se encuentra integrado, en posición horizontal a la estructura del colector solar formando una unidad con él, y todo el conjunto se halla expuesto las acciones del medio ambiente. Se debe señalar que el agua en el tanque termo, en momentos de su funcionamiento anual, alcanza temperaturas igual o mayores que 60 °C con el objetivo de eliminar la legionela (Fig. 6).

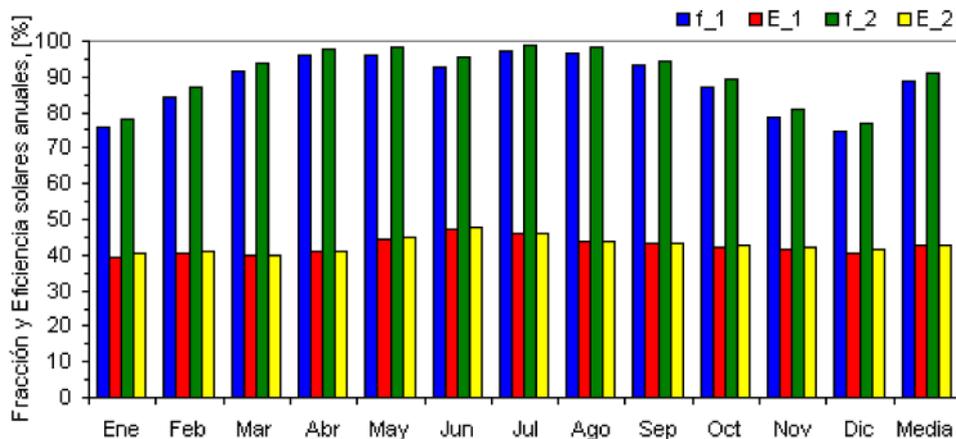


Fig. 6. Comportamiento térmico de los sistemas para una y dos cabañas.

Intercambiador de calor

En caso de requerimientos técnicos, se recomienda la utilización de tanques termo de doble carcasa que realiza la función de intercambiador de calor exterior y soporta las temperaturas y presiones máximas de trabajo de la instalación solar. Para nuestras condiciones de trabajo, la potencia máxima de intercambio de calor es de 1 500 W y 3 000 W para los sistemas de uno y dos colectores solares respectivamente.

Tuberías y válvulas

Para disminuir las pérdidas térmicas se ha concebido el circuito hidráulico con el menor recorrido posible. La parte de las tuberías que se encuentra en el exterior ha sido aislada térmicamente y protegida contra los efectos agresivos del ambiente. La tubería externa está constituida por tubos de plástico de 20 x 2 mm. Se han utilizado válvulas de dos vías y de seguridad para trabajos de mantenimiento y funcionamiento.

Vaso de expansión

El vaso de expansión tiene la función de asimilar el incremento de volumen del fluido debido al aumento de la temperatura y mantener estable la presión en el circuito primario, que es cerrado. El vaso de expansión está conectado a la salida de los colectores solares y su volumen es de 5 litros.

Purga de aire

Para eliminar el aire del circuito, de forma manual o automática, se colocará a la salida de los colectores solares un purgador de aire. Los purgadores automáticos serán del tipo de flotador, adecuados para la presión del circuito.

Drenaje

Se han concebido conductos de drenaje del circuito primario y del tanque termo para labores de mantenimiento.

Llenado del circuito solar

El circuito solar se llena directamente de la red o manualmente cuando es independiente.

Sistema de energía auxiliar

Para asegurar la continuidad en el abastecimiento del agua caliente sanitaria, en días de muy baja irradiación, la instalación solar dispone de un sistema de energía auxiliar. La potencia de la fuente auxiliar permite satisfacer al menos 25 % de la demanda diaria en una hora a la temperatura de consumo. La potencia eléctrica de la fuente auxiliar para las cabañas sencillas y dobles es de 1 500 W y 3 000 W respectivamente.

Sistema eléctrico y de control

El sistema de control de la temperatura se realiza a través de los termostatos que tiene incorporado la fuente auxiliar. Otras formas de control que lleva incorporado el sistema es la protección contra el sobrecalentamiento del agua en el tanque termo, que se realiza por medio de los purgadores de aire y las válvulas de seguridad.

Funcionamiento de la instalación solar

El funcionamiento de la instalación solar es autónomo y no requiere de ningún dispositivo o equipo de bombeo. Como su nombre lo indica, termosifónico, es debido a las diferencias de densidad del fluido durante su calentamiento en el colector solar.

Mantenimiento

El mantenimiento básico de la instalación estará en función del estado técnico y del nivel de explotación de la instalación solar, y comprende:

- Limpieza de la cubierta de los colectores solares planos.
- Comprobación del estado del vidrio de la cubierta de los colectores solares.
- Comprobación del estado técnico de la red de tuberías, accesorios y equipos.

Comportamiento térmico

En la figura 6 se muestra el comportamiento térmico mensual y anual de los sistemas solares termosifónicos para las instalaciones de una y dos cabañas respectivamente. Como se muestra, este comportamiento en ambos casos tiene la misma trayectoria, siendo los meses diciembre y enero con más bajas fracciones solares; sin embargo, en ambos las fracciones solares mensuales sobrepasan 70 %, lo que resulta un indicador muy ilustrativo de la viabilidad técnica de estos sistemas solares. La fracción solar media anual es superior de 85 % y garantiza una base sólida para el uso extensivo de esta tecnología solar.

Por otra parte, en la tabla 3 se muestran los resultados estimados, a modo de ejemplo, de la instalación solar para una cabaña, del comportamiento térmico del sistema solar termosifónico. La demanda térmica es la suma de las producciones solar y de la fuente de energía solar en su equivalente térmico.

Tabla 3. Resultados estimados de instalación solar para una cabaña

Meses	Energía solar incidente (MJ)·10 ⁶	Producción solar (MJ)·10 ⁶	Producción auxiliar (MJ)·10 ⁶	Demanda de energía (MJ)·10 ⁶	Fracción solar (%)	Eficiencia solar (%)
Enero	1,148	0,453	0,146	0,599	75,67	39,48
Febrero	1,135	0,457	0,085	0,542	84,24	40,22
Marzo	1,387	0,550	0,052	0,602	91,30	39,64
Abril	1,360	0,559	0,025	0,584	95,80	41,06
Mayo	1,291	0,576	0,024	0,600	96,02	44,62
Junio	1,142	0,538	0,041	0,579	92,92	47,10
Julio	1,266	0,582	0,017	0,599	97,10	45,95

Agosto	1,325	0,582	0,019	0,601	96,91	43,88
Septiembre	1,252	0,540	0,041	0,581	93,00	43,12
Octubre	1,243	0,522	0,077	0,599	87,14	42,03
Noviembre	1,094	0,454	0,125	0,579	78,45	41,50
Diciembre	1,100	0,446	0,152	0,598	74,60	40,56
Total o media	14,74	6,257	0,803	7,060	88,62	42,44

En resumen, los indicadores técnicos de los sistemas solares termosifónicos de las cabañas de una y dos habitaciones se muestra en la tabla 4. En la cabaña individual se utilizaría un módulo solar termosifónico

Tabla 4. Características técnicas de los módulos solares de las cabañas individuales y dobles

No.	Magnitudes y/o parámetros de la instalación	Módulo	
		1	2
I	Tipo de colectores solares	Roldan LR-D	Roldan LR-D
II	Número de colectores solares	1	2
III	Área total de captación (m ²)	1,9	3,8
IV	Volumen del tanque termoacumulador (litros)	225	450
V	Demanda diaria de agua caliente (litros)	150	300
V	Calentador auxiliar eléctrico (kW)	1,5	3,0
VI	Temperatura del termostato (°C)	50	50
VII	Costo del kWh (USD kWh ⁻¹)	0,160	0,160
VIII	Fracción solar anual (%)	88,62	90,79
IX	Rendimiento solar anual de la instalación solar (%)	42,44	42,92
X	Rendimiento solar anual de los colectores solares (%)	51,70	50,45
XI	Demanda anual de energía térmica (MWh)	1,961	3,871

Indicadores técnico-económicos

El estudio de la inversión inicial del sistema solar ha tenido en cuenta el costo de los equipos, montaje y proyecto. En las tablas 5 y 6 se muestra un estimado de los indicadores técnico-económicos de la instalación solar, que reflejan la factibilidad de estos sistemas solares termosifónicos en instalaciones turísticas.

Tabla 5. Inversión inicial del sistema solar en Cayo Las Brujas Indicadores de inversión Instalación hotelera

Indicadores de inversión	Instalación hotelera	
	MN	USD
1. Proyecto, construcción y montaje	21 050,00	230,00
2. Colectores solares	1 755,00	8 775,00
3. Base soporte para colectores	595,00	1 460,00
4. Tanque termoacumulador	1 986,00	9 525,00
5. Accesorios hidráulicos	345,00	1 265,00
6. Calentador auxiliar de apoyo	828,00	2760,00
7. Aislantes térmicos de tuberías	247,00	575,00
8. Insumo del constructor	-	920,00
9. Transportación a la obra	-	805,00
10. Total	26 806,00	26 315,00

Tabla 6. Indicadores técnico-económicos de la instalación solar del cayo Las Brujas

No.	Indicadores	Valores
I	Número de sistemas solares (unidades)	23
II	Área de captación (m ²)	51,30
III	Volumen de almacenamiento (litros)	6075
IV	Demanda total anual de energía térmica (MWh)	52,74
V	Fracción solar anual de la instalación (%)	89,62
VI	Ahorro anual solar en energía térmica (MWh)	47,08

VII	Costo total de la energía demandada (USD)	8438,00
VIII	Ahorro anual de la instalación solar (USD)	7533,00
IX	Inversión en la instalación solar (USD)	26315,00
	(MN)	26806,00
X	Vida útil de la instalación solar (años)	20,00
XI	Tiempo de amortización (años)	3,49
XII	Costo del litro de agua caliente instalado (USD)	4,33
	(MN)	4,41
XIII	Inversión solar por turista (USD)	487,00
	(MN)	496,00
XIV	Inversión solar por habitación (USD)	975,00
	(MN)	993,00

Salida gráfica

En la figura 7 se muestran las temperaturas del ambiente, del agua en el tanque, de la red y caliente de consumo a lo largo del año de la instalación solar. Como se observa, en muchos momentos del año la temperatura del agua en el tanque termo supera los 60 °C.

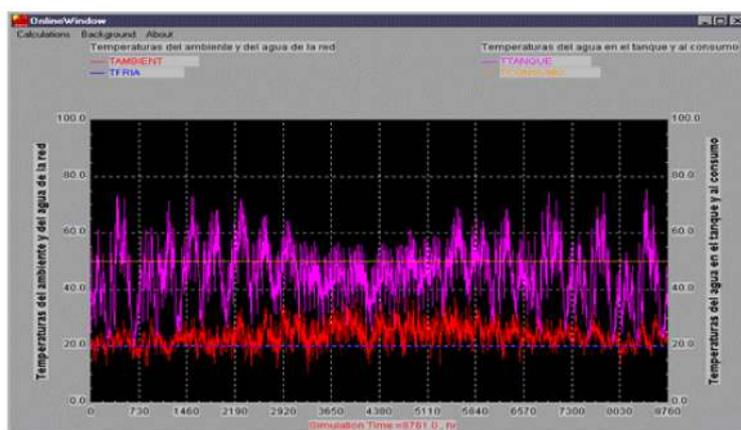


Fig. 7. Distribución de temperaturas a lo largo del año.

Conclusiones

- Se propone el proyecto de una instalación de agua caliente sanitaria centralizada para la instalación turística de Cayo Las Brujas, compuesta por módulos de colectores solares termosifónicos con una y dos unidades de captación, y tanques de 225 y 450 litros respectivamente para cubrir la demanda de 4 050 litros diarios de agua a 50 °C cubriendo en 89,62 % la demanda de energía térmica anual.
- Se ha realizado un estudio técnico-económico preliminar que demuestra la viabilidad de llevar a término de forma satisfactoria el proyecto para cubrir la demanda de agua caliente sanitaria con energía solar de instalaciones turísticas.

Bibliografía

- CUEVA GONZÁLEZ, W., J. R. MASSIPE HERNÁNDEZ, A. TORRES TEN, M. GARCÍA RENTÉ Y H. DESPAIGNE WILSON. Sistema solar de calentamiento de agua sanitaria para el hospital de Loja Ecuador. Memorias Primera Convención Internacional de Energía y Medio Ambiente. Santiago de Cuba: 13-17 de noviembre de 2003.
- DUFFIE J. Y W. BECKMAN. *Solar Energy Thermal Processes*. Estados Unidos: Solar Energy, 1990.
- MASSIPE HERNÁNDEZ J. R.; A. TORRES TEN Y H. DESPAIGNE WILSON. *Proyectos de agua caliente sanitaria en instalaciones turísticas*. Informe técnico CIES, CITMA, 2002.
- Norma Cubana NC 68-05. *Colectores solares planos para líquidos. Métodos de ensayos*. Cuba, 1985.

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>