



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTAL DE CUBASOLAR

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

**11**



<b>Metodología de cálculo para la determinación del impacto integral de los colectores solares.....</b>	<b>1</b>
<b>Análisis estructural. Cargas aerodinámicas en el rotor de un aerogenerador.....</b>	<b>11</b>
<b>Ecuaciones para la transferencia de la cantidad de movimiento vorticial de partículas de bagazo en forma de capa.....</b>	<b>19</b>
<b>Caracterización de una biomasa agroforestal para la obtención de carbón activado y energía.....</b>	<b>30</b>
<b>Factibilidad del empleo de los residuos de la industria de la madera para la obtención de energía eléctrica.....</b>	<b>39</b>
<b>Diseño y construcción de un gasificador de lecho fluidizado a escala de laboratorio para el tratamiento térmico de los residuos de tabaco.....</b>	<b>49</b>

## **Metodología de cálculo para la determinación del impacto integral de los colectores solares**

### **Calculation methodology for determining the comprehensive impact of solar collectors**

*Dr. Lisandro Vázquez Hernández  
Investigador Auxiliar del Centro de Gestión  
de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGÍA)  
Calle 20 No. 4111 esq. a 47, Playa,  
Ciudad de La Habana , Cuba. CP 10300.  
Tel.: (537) 2062064.  
e-mail: lisandro@cubaenergia.cu*

#### **Resumen**

La detención de la contaminación ambiental actual y el comienzo de la recuperación de la biosfera están en manos de la humanidad, que, si quiere salvar su propia existencia, tiene que obligatoriamente proceder al cambio de los paradigmas actuales y eliminar lo más rápidamente posible las causas que la ocasionan. Para ello se han realizado esfuerzos desde la Cumbre de Río hasta el Protocolo de Montreal, donde cobra cada vez más fuerza el control y la determinación de GEI producto del uso de equipos energéticos. Incluso las cantidades de CO<sub>2</sub> emitido o evitado son hoy día elementos principales para la aprobación de proyectos vinculados a los mecanismos de desarrollo limpio y de Implementación de la colaboración, y constituyen unidades básicas para el intercambio financiero generado alrededor de esta actividad.

**Palabras clave:** Colector solar, calentador solar compacto, emisiones de dióxido de carbono.

#### **Abstract**

Stopping polluting the environment and the beginning of the restoration of the biosphere is Humanity's most important responsibility in order to save itself from extinction. It is necessary that humankind changes present-day paradigms eliminating its causes in the shortest period of time possible. Some examples of the efforts made in the last decades are Río Summit and Montreal Protocol, where the control of GHG due to the use of energy equipment is increasingly important. Even the amount of CO<sub>2</sub> emitted or avoided are currently key major elements for the approval of projects linked to the mechanisms of clean development and Implementación de colaboración, and constitute basic units for the financial interchange generated around this activity.

**Keywords:** solar collector, compact solar water heater, carbon dioxide emissions

## **Introducción**

Actualmente el desarrollo de equipos, instalaciones y sistemas energéticos requiere del doble imperativo de la eficiencia energética y de la eliminación o al menos la disminución del impacto ambiental negativo.

Aún en el caso de los equipos que utilizan fuentes de energía renovable estos dos factores son elementos clave para su desarrollo.

Por otra parte, se han desarrollado varios indicadores para evaluar el impacto ambiental de los sistemas energéticos, tales como el GWP y el TEWÍ, así como indicadores del grado de sustitución energética o del grado de evasión de los gases de efecto invernadero, por citar un caso.

Para ello se han realizado esfuerzos desde la Cumbre de Río hasta el Protocolo de Montreal, donde cobra cada vez más fuerza el control y la determinación de GEI producto del uso de equipos energéticos. Incluso las cantidades de CO<sub>2</sub> emitido o evitado son hoy día elementos principales para la aprobación de proyectos vinculados a los mecanismos de desarrollo limpio y de implementación de la colaboración (MDL e IC), y constituyen unidades básicas para el intercambio financiero generado alrededor de esta actividad.

Las emanaciones de gases de efecto invernadero (GEI) han sido ampliamente analizadas, donde se encuentran el CO<sub>2</sub>, los NO<sub>x</sub>, el SO<sub>2</sub> y otros cuya acción nociva se extiende hasta la provocación de las lluvias ácidas y la desertificación, así como el agotamiento de la capa de ozono. Pero todos ellos están relacionados entre sí y muy estrechamente vinculados con los indicadores de rendimiento energético de las instalaciones.

Considerando la complejidad de estos cálculos, generalmente con un valor preventivo, se hace énfasis últimamente en las cantidades de CO<sub>2</sub> que se emiten a la atmósfera o de las cantidades de este tipo de GEI que se puede evadir producto del incremento de la eficiencia energética y/o del uso de las fuentes renovables de energía, teniendo en cuenta además que los otros tipos de GEI pueden tener sus equivalencias con éste.

Incluso hoy día existe intercambio financiero entre diferentes países donde se transfiere la cantidad de CO<sub>2</sub> evitado al aplicar nuevas tecnologías o sustituir las menos modernas por otras más avanzadas.

Atendiendo a los elementos antes expuestos como motivaciones principales, se destaca la necesidad de ser cada vez más rigurosos en el cálculo y determinación del CO<sub>2</sub> directo o equivalente emitido o evitado por una instalación o sistema energético.

El objetivo principal del presente trabajo consiste en presentar una propuesta de metodología analítica simple para el cálculo de las cantidades de CO<sub>2</sub> que se evitan al utilizar un calentador solar compacto,

a partir de la determinación de su aporte energético anual y considerando que éste pueda sustituir la satisfacción de esa demanda energética por otras vías que contemplan el uso de combustibles fósiles. Esta metodología se presenta lo más explícita posible para que se pueda

adaptar a las condiciones locales y específicas donde se requiera, a fin de ajustar los valores de los indicadores propuestos casuísticamente.

## **Desarrollo**

Para facilitar la mejor comprensión de la metodología general propuesta y precisar los elementos fundamentales que pueden permitir y facilitar su uso, se realiza un análisis energético donde se especifica el aporte específico del equipo en cuanto a energía útil y su diferenciación con respecto al concepto de ahorro energético por sustitución de otra forma de lograr esa misma cantidad de energía útil, todo lo cual se expresa detalladamente a continuación.

### **1. Energético**

Datos:

Vt: Volumen total de agua caliente que aporta durante su explotación en todo el día un CSC [litros/día]. Generalmente es un dato del fabricante. También es igual a la suma de los volúmenes de todas las extracciones horaria (Vi) que se realicen.  $V_t = \sum V_i$ .

Tf: Temperatura promedio de entrega del agua caliente [°C]. Generalmente es un dato del fabricante.

Ta: Temperatura promedio del agua fría a la entrada del tanque termo acumulador [°C]. Puede asumirse la temperatura ambiente del agua. Generalmente puede asumirse un valor aproximado de 20 °C como promedio anual.

$\rho$ : Densidad del agua caliente extraída a la temperatura Tf [kg/m<sup>3</sup>].

#### **1.1. Energía aportada**

Diaria:

$$Q_d = M \cdot C_p \cdot DT = V_t \cdot \rho \cdot C_p \cdot DT \quad (1)$$

Donde:

Qd: Cantidad de calor, en forma de calor sensible, que aporta como promedio diario un CSC a partir del volumen total de extracciones Vt en litros/día durante su explotación [kcal/día].

M: Masa total diaria de agua caliente, a la temperatura Tf, que se extrae del CSC [kg/día].

$$M = Vt.\Sigma = S Vi. Si \text{ [kg/día]} \quad (2)$$

Cp: Valor promedio del calor específico a presión constante, correspondiente al agua caliente de extracción a la temperatura Tf.

Puede utilizarse el valor de 1 kcal/kg°C para este rango de temperaturas de trabajo.

DT: Diferencia de temperaturas entre el agua caliente de extracción que entrega el CSC y el agua fría a la entrada del recipiente termoacumulador.

$$DT = Tf - Ta \text{ [°C]} \quad (3)$$

Finalmente, el aporte anual de calor Qa entregado por la instalación de CSC será el producto del aporte diario de calor Qd por la cantidad de días productivos durante el año, Dp. Así:

$$Qa = Qd.Dp.N \text{ [kcal/año]} \quad (4)$$

Donde:

Qd: Se determina por la ecuación 1 y está expresado en kcal/día.

Dp: Días productivos que durante el año el CSC aportó agua caliente. Generalmente se pueden tomar 330 días efectivos para 90 % de efectividad al considerar la utilizabilidad de la instalación por tener en cuenta el período de vacaciones. Otros cálculos más conservadores consideran 300 días para 82 % de efectividad al tener en cuenta otras dificultades asociadas al suministro de agua fría y paros por mantenimiento de las líneas conductoras de agua, así como los fines de semana que no se usa la instalación.

N: Número de CSC de la instalación.

Este aporte de energía calorífica anual puede expresarse en toneladas equivalentes de Petróleo (TEP), definidas según el *Anuario Estadístico de Cuba* [Anuario..., 2002] sobre la base de un combustible equivalente con valor calórico bajo de 10 000 kcal/kg. Es decir, que 1 TEP es equivalente a 107 kcal. O sea que:

$$Qa_{TEP} = Qd.Dp.N/107 \text{ [TEP/año]} \quad (5)$$

## 1.2. Ahorro por sustitución

Este cálculo está referido, según sea el caso, al tipo de energía primaria que se va a sustituir.

### 1.2.1. Para el caso de la electricidad

Se establecen las siguientes consideraciones:

- La cantidad de calor total aportada por el CSC sustituye el trabajo de una resistencia eléctrica equivalente con un rendimiento de conversión de 100 % de electricidad en calor, que es aprovechado en 90 %.
- Se trabaja con coeficiente de consumo específico de combustible equivalente general de cálculo de 279,2 g de combustible equivalente por cada kWh de electricidad generada [gce/kWh<sub>eg</sub>], (1).
- El insumo reportado para el año 2002 es de 986,0 GWH que representa 7 % de la generación bruta [Anuario..., 2002].
- Se considera 18 % de pérdidas por distribución y transmisión para el SEN, lo cual obliga a considerarlas para determinar la cantidad real de energía eléctrica que se generó para suplir esta demanda energética de calor. Es decir, que a partir de la electricidad equivalente consumida (kWh<sub>ec</sub>), ésta debe afectarse por el factor 1,22 para determinar la electricidad generada correspondiente a la satisfacción de esta demanda de agua caliente (kWh<sub>eg</sub>) [Pérez, 2003].

La cantidad de electricidad equivalente consumida (E<sub>ec</sub>) para calentar la masa de agua M anteriormente definida debe aportar anualmente la misma cantidad de calor Q<sub>a</sub> a esa masa de agua. Es decir:

$$E_{ec} = Q_a / (Y_{re} \cdot F_c) \text{ [kWh}_{ec}/\text{año]} \quad (6)$$

Donde:

Y<sub>re</sub>: Rendimiento de conversión y aprovechamiento de la energía liberada por la resistencia eléctrica que en forma de calor llega al agua y es recibida por ésta.  
Se considera 90 %.

F<sub>c</sub>: Factor de conversión equivalente de la electricidad en calor = 860 kcal/kWh.

Sustituyendo en la ecuación 7 por los valores correspondientes tenemos:

$$E_{ec} = Q_a / 774 \text{ [kWh}_{ec}/\text{año]} \quad (7)$$

La cantidad de electricidad generada (E<sub>eg</sub>) necesaria para consumir E<sub>ec</sub> se calcula como sigue:

$$E_{eg} = 1,33 \cdot E_{ec} \text{ [kWh}_{eg}/\text{año]} \quad (8)$$

El factor 1,33 considera el insumo en la generación y las pérdidas por distribución y transmisión de la electricidad desde donde se genera (CTE) hasta el consumidor.

Considerando el índice de consumo específico de combustible equivalente (CECe) considerado anteriormente se puede expresar que la cantidad anual de combustible equivalente consumido en la generación (CCG) es:

$$CECG = E_{eg} \cdot CECe \cdot [TEP/año] \quad (9)$$

Y en nuestro caso específico:

$$CECG = E_{eg} \cdot 279,2 \cdot 10^{-6} [TEP/año] \quad (10)$$

### 1.2.2. Para el caso de combustible doméstico

Se establecen las siguientes consideraciones:

- La cantidad de calor total aportada por el CSC sustituye el efecto de la combustión de un combustible doméstico con un rendimiento de conversión en la combustión de 100 % de la energía química expresada como valor calórico en calor, que es aprovechado en 90 %.

La cantidad de combustible consumida se calcula por una fórmula similar a la ecuación 6, pero arreglada a las nuevas condiciones:

$$E_{qc} = Q_a / Y_c [kcal/año] \quad (11)$$

Donde:

$Y_c$ : Rendimiento en el uso del calor producido por la combustión para el calentamiento de agua. Se ha considerado 80 % como rendimiento global desde el proceso de combustión hasta el de calentamiento del agua

Nota: En este caso el factor de conversión  $F_c = 1$  y no se escribe porque se trabaja sólo con las mismas unidades de calor.

Sustituyendo en la ecuación 11 tenemos:

$$E_{qc} = 1,25 \cdot Q_a \cdot [kcal/año] \quad (12)$$

Finalmente se puede calcular el consumo total de combustible en su combustión directa (CTCD), a partir de la energía  $E_{qc}$  demandada para el calentamiento de agua requerido y según el valor calórico del combustible de que se trate (VCC). Es decir:

$$CTCD = E_{qc} / VCC [kg/año] \quad (13)$$

En el caso específico de que se sustituya el VCC por el del combustible equivalente (10 000 kcal/kg), es fácil encontrar las TEP. O sea:

$$CTCD = \text{Eqc. 10-7 [TEP/año]} \quad (14)$$

### 1.2.3. Para el caso de leña combustible de uso doméstico

$$VL = QaTEP / (Ycl. 0,1414) \quad (15)$$

Donde:

QaTEP : Calor anual aportado por la fuente energética sustituyente, en este caso los dos calentadores solares, en TEP.

VL : Volumen de leña utilizada como combustible doméstico, en m<sup>3</sup>, correspondiente al calor Qa.

Ycl: Rendimiento en la combustión y uso del calor de la leña para calentamiento de fluidos y otros. Se puede considerar 60 % como valor promedio en fogones normales sin afectación del viento.

$$\begin{aligned} VL &= QaTEP / (0,6 \cdot 0,1414) \\ VL &= 11,787 \cdot Qa \text{ [m}^3 \text{ /año]} \end{aligned} \quad (16)$$

## 2. Ambiental

### 2.1. Cálculo de la emisión de CO<sub>2</sub> evitada por consumo de electricidad

Según las estadísticas del año 2002, éstas reflejan que el índice de emisión de dióxido de carbono por electricidad generada es de aproximadamente 750 toneladas CO<sub>2</sub> por cada GWh generado. O sea, 0,75 kg CO<sub>2</sub> /kWh<sub>eg</sub>.

A partir de aquí, y considerando 7 % invertido en el insumo y 18 % de pérdidas por distribución y transmisión de la electricidad, se puede definir el índice de emisión de dióxido de carbono por cada unidad de electricidad consumida.

Teniendo en cuenta 18 % de pérdidas y 7 % invertido en el insumo, por cada kWh generado se puede consumir 0,75 kWh. Y para consumir 1 kWh se necesita generar 1,33 kWh. Por consiguiente, haciendo una adaptación del indicador anterior en función de la electricidad consumida, se obtiene 0,9975 kg CO<sub>2</sub> /kWh<sub>ec</sub>. Finalmente la emisión de CO<sub>2</sub> correspondiente a una cantidad de electricidad consumida puede calcularse como sigue:

$$\text{Emisión CO}_2 = E_{ec} \cdot 0,9975 \text{ [kg CO}_2 \text{ /año]}. \quad (17)$$

La electricidad consumida  $E_{ec}$  debe estar expresada en kWh. Si se utilizan otras unidades se debe entonces corregir el factor de conversión utilizado en la ecuación anterior.

## 2.2. Cálculo de la emisión de CO<sub>2</sub> evitada por consumo de combustible doméstico diésel directo

De acuerdo con las estadísticas actuales sobre el tema [Pérez, 2003] el índice de emisión de CO<sub>2</sub> para este combustible es de 3,274 kg de CO<sub>2</sub> /kg de combustible. Entonces:

$$\text{Emisión de CO}_2 = CTCD \cdot 3,274 \text{ [kg CO}_2 \text{ /año]} \quad (18)$$

El combustible total consumido por la combustión directa del combustible en cuestión (CTCD) debe expresarse en kilogramo.

## 3. Ejemplo de cálculo

Una instalación de dos calentadores solares compactos tipo EcoSol 200 sirve agua caliente al hogar materno de Najasa, donde se utiliza toda su capacidad de suministro de 200 litros diarios a 45 grados como promedio, según datos de su comercializador.

### 3.1. Energía aportada

Consideraciones:

- 330 días de trabajo efectivo al año.
- Diferencia de temperatura promedio anual de 20 °C .

Diaria para cada equipo:

$$Q_d = M \cdot C_p \cdot \Delta T = V \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$Q_d = 200 \cdot 1 \cdot 20 = 4\,000 \text{ kcal/día} = 0,4 \cdot 10^{-3} \text{ TEP/día}.$$

Anual para la instalación:

$$Q_a = Q_d \cdot D_p \cdot N \text{ [kcal/año]}.$$

$$Q_a = 4\,000 \cdot 330 \cdot 2 = 2\,640\,000 \text{ kcal/año} = 0,264 \text{ TEP/año}.$$

### 3.2. Ahorro de energía

En el ejemplo que se presenta se desarrollan los casos de ahorro energético por sustitución de electricidad, diésel y leña como combustibles domésticos.

#### 3.2.1. Por sustitución de electricidad

Consideraciones:

- La cantidad de calor total aportada por el CSC sustituye el trabajo de una resistencia eléctrica equivalente con un rendimiento de conversión de 100 % de electricidad en calor, que es aprovechado en 90 %.

- Se trabaja con coeficiente de consumo específico de combustible equivalente general de 279,2 g/kWh<sub>ec</sub> [Anuario..., 2002].
- Se considera 18 % de pérdidas por distribución y transmisión para el SEN y 7 % de insumo. La electricidad equivalente consumida (kWh<sub>ec</sub>) debe afectarse por el factor 1,33 para calcular la electricidad generada (kWh<sub>eg</sub>) (ec. 6) [Pérez, 2003]:

$$E_{ec} = Q_a / (Y_{re} \cdot F_c) \text{ [kWh}_{ec}\text{/año]}.$$

$$E_{ec} = 2\,640\,000 / (0,9 \cdot 860) = 3\,410,85 \text{ kWh}_{ec}\text{/año (ec. 8).}$$

$$E_{eg} = 1,33 \cdot E_{ec} \text{ [kWh}_{eg}\text{/año]}.$$

$$E_{eg} = 1,33 \cdot 3\,410,85 = 4\,536,43 \text{ kWh}_{eg}\text{/año.}$$

Consumo equivalente de combustible por generación (CECG) (ec. 10):

$$CECG = E_{eg} \cdot 279,2 \cdot 10^{-6} \text{ [TEP/año]}$$

$$CECG = 4\,536,43 \cdot 279,2 \cdot 10^{-6} = 1,266 \text{ [TEP/año]}$$

### 3.2.2. Por sustitución de diésel como combustible doméstico

Consideraciones:

- La cantidad de calor total aportada por el CSC sustituye el efecto de la combustión de diésel con un rendimiento de conversión de la energía química del combustible en calor de 80 %.
- El valor calórico del diésel es de 10 850 kcal/kg [Oficina..., 2004]

$$E_{qc} = 1,25 \cdot Q_a \text{ [kcal/año] (ec. 12).}$$

$$E_{qc} = 1,25 \cdot 2\,640\,000 = 3\,300\,000 \text{ kcal/año.}$$

$$CTCD = E_{qc} / VCC \text{ [kg/año] (ec. 13).}$$

$$CTCD = 3\,300\,000 / 10\,850 = 304,15 \text{ kg de diésel.}$$

$$CTCD = E_{qc} \cdot 10^{-7} \text{ [TEP/año] (ec. 14)}$$

$$CTCD = 3\,300\,000 \cdot 10^{-7} = 0,33 \text{ TEP/año.}$$

### 3.2.3. Ahorro de leña combustible

Consideraciones:

- El valor calórico medio de la leña que se utiliza como combustible doméstico en nuestro país es de 1414 kcal/m<sup>3</sup>, según (4), por lo que el equivalente en TEP es de 0,1414 TEP/m<sup>3</sup>.
- El rendimiento promedio en la combustión de la leña y su uso para calentamiento de fluidos y otros es de 60 %.

$$Q_a = 264 \text{ kcal/año.}$$

$$V_L = 11,787 \cdot Q_a \text{ [m}^3\text{/año] (ec. 16)}$$

$$V_L = 11,787 \cdot 0,264 = 3,11 \text{ m}^3\text{/año.}$$

### 3.3. Emisión de CO<sub>2</sub>

Este tipo de cálculo se presenta en concordancia con las variantes anteriormente expuestas para la determinación del ahorro energético.

### 3.3.1. Por sustitución de electricidad

Emisión CO<sub>2</sub> = Eec. 0,9975 [kg CO<sub>2</sub> ] (ec. 17)

Emisión CO<sub>2</sub> = 3 410,85 X 0,9975 = 3 402 [ton CO<sub>2</sub> /año]

### 3.3.2. Por sustitución de diésel

Emisión de CO<sub>2</sub> = CTCD. 3,274 [kg CO<sub>2</sub> /año] (ec. 18)

Emisión de CO<sub>2</sub> = 304,15 X 3,274 = 995,79 kg CO<sub>2</sub> /año.

### 3.3.3. Por sustitución de leña

Este cálculo en general no se realiza si no hay interés específico de conocer la emisión bruta de CO<sub>2</sub> para casos específicos, ya que la leña está dentro del ciclo natural del CO<sub>2</sub> .

## Conclusiones

1. La metodología general presentada establece claramente la diferencia entre la energía útil que aporta el calentador solar compacto y el ahorro energético por sustitución de la fuente energética que desplaza.
2. Se expresan en cada caso las relaciones básicas de cálculo que permiten adaptarla a cada caso específico, según las condiciones de las transformaciones energéticas involucradas en cada proceso.
3. El ejemplo de cálculo presentado constituye una guía metodológica de fácil adaptación, incluso para otros equipos y dispositivos energéticos.
4. La metodología general presentada demuestra que los valores de rendimiento asumidos deben precisarse casuística y específicamente para lograr mayor rigor en el cálculo.

## Bibliografía

*Anuario Estadístico de Cuba 2002*. Ciudad de La Habana: Edición ONE, 2003. p. 180.

Oficina Nacional de Estadísticas. *Inventario Nacional de Fuentes de Energía Renovables*. Ciudad de La Habana : Dirección de industrias, Departamento de Energía, 2004.

PÉREZ MARTÍN, DAVID. «Use of ISED to develop energy sustainable projections in Cuba». Final Report. Research Contract Number: 302-I1-CUB-1203, B5-CUB-30747. La Habana : CUBAENERGÍA, 2003.

## **Análisis estructural. Cargas aerodinámicas en el rotor de un aerogenerador**

## **Structural annalysis. Aerodynamical loads in the rotor of an aerogenerator**

*M.Sc. Pedro Casanova Treto  
Centro de Estudios Energéticos y Tecnologías Ambientales (CEETA),  
Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba.  
Tel: 42 281194. Fax: 42 281608.  
e-mail: pcasanova@uclv.edu.cu*

### **Resumen**

Un aerogenerador es sin lugar a dudas un equipo que se encuentra funcionando en condiciones muy adversas; la humedad, los cambios de temperatura, y sobre todo, los efectos nocivos del viento con su constante variación en velocidad y dirección, hacen que estas máquinas necesiten de una atención extrema en su diseño y construcción. Uno de los agregados del aerogenerador que necesita más atención al momento de su diseño es el rotor, debiéndose tener en cuenta las cargas aerodinámicas e inerciales y el análisis dinámico. En este trabajo le prestaremos especial atención a las cargas aerodinámicas.

**Palabras clave:** Cargas aerodinámicas, aerogenerador, análisis estructural, energía eólica.

### **Abstract**

An aerogenerator is an equipment that works in very hostile conditions. Humidity, temperature changes, and above all, the pernicious effects of wind with its constant variation in speed and direction, make these machines require an extreme attention in their design and construction. One of the aggregates of the aerogenerator that needs more attention at the moment of his design is the rotor, taking into account the aerodynamical and inertial loads and the dynamic analysis. In this paper we will pay special attention to the aerodynamical loads.

**Keywords:** aerodynamic loads, aerogenerator, structural annalysis, wind energy

### **Desarrollo**

En el análisis de las cargas que actúan sobre un aerogenerador es muy importante comenzar por analizar qué ocurre sobre el rotor. En él ocurren los mayores esfuerzos, los cuales pueden llegar a destruir la máquina si no se diseña cuidadosamente teniendo en cuenta las cargas que pueden surgir debido al impacto del viento sobre las paletas, el movimiento, peso del equipo, etcétera.

A continuación se brinda un breve análisis de las cargas aerodinámicas presentes sobre el rotor de un aerogenerador.

### Cargas sobre la pala

Desde el punto de vista del análisis de cargas la pala se modela como una viga (Fig. 1):

Los grados de libertad asociados son:

- Flexión en el plano del rotor (LAG).
- Flexión en la dirección del viento dominante (FLAP).
- Torsión alrededor del eje de la pala.
- Tracción a lo largo del eje de la pala.

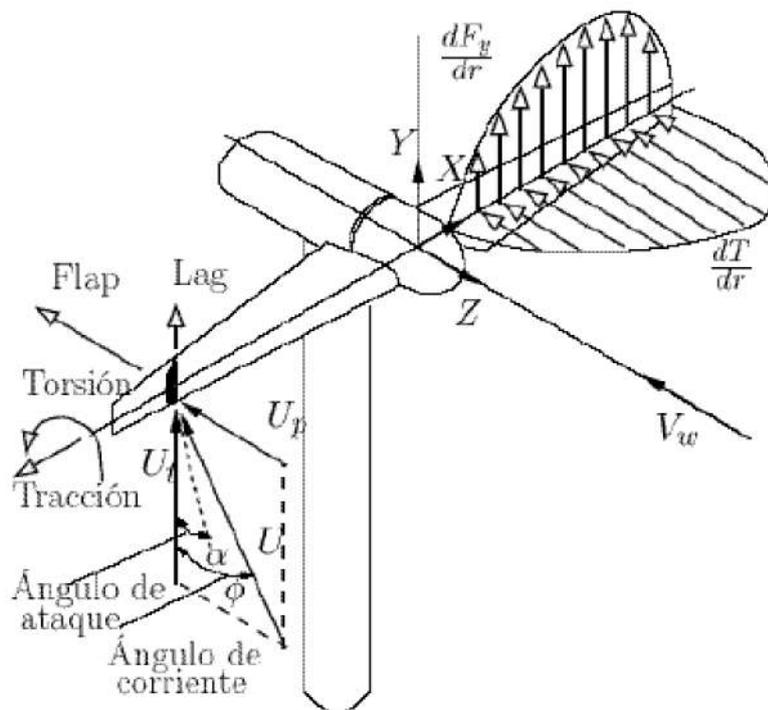


Fig. 1. Distribución de las cargas a lo largo de la pala.

### Variación del empuje con la velocidad

Se discuten básicamente dos tipos de variación de velocidad del viento:

- Variación de la velocidad axial.
- Variación de la velocidad en el plano del rotor.

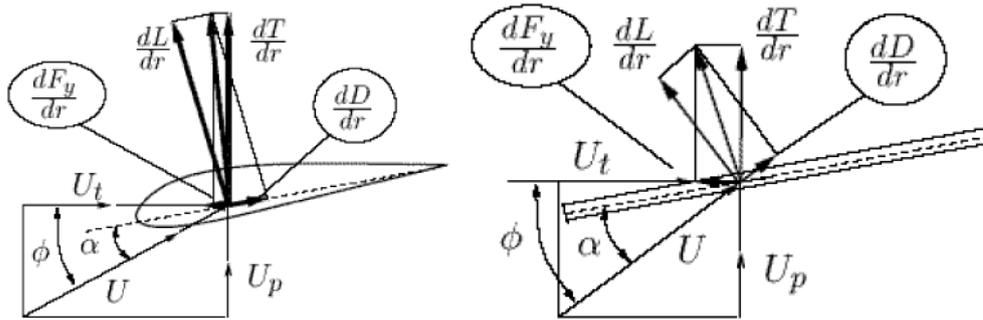


Fig. 2. Variación del empuje con la velocidad en la pala. a) Perfil. b) Viga.

#### Variación de la velocidad axial

El empuje se debe expresar como:

$$\frac{dT}{dr} = \frac{1}{2} \rho W^2 c (C_L \cos \phi + C_D \sin \phi)$$

Simplificaciones:

$$\left. \begin{array}{l} U_t \gg U_p \\ \phi \ll 1 \\ C_L \gg C_D \end{array} \right\} \quad \left. \begin{array}{l} \phi \approx \frac{U_p}{U_t} \\ d\phi \approx \frac{dU_p}{U_t} \\ dC_L \gg a d\phi \end{array} \right\} \rightarrow d \left( \frac{dT}{dr} \right) = \frac{1}{2} \rho U_t^2 c a dU_p$$

#### Variación de la velocidad en el plano del rotor

Incrementos en  $U_t$  producen efectos opuestos.

- Reducen  $C_L$  y por tanto  $T$ .
- Aumentan la velocidad total y por tanto aumentan  $T$ .

Teniendo estas consideraciones y las anteriores:

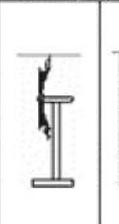
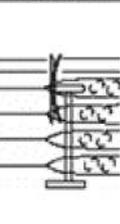
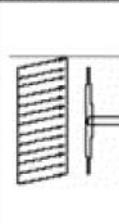
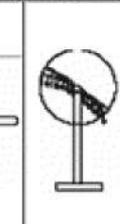
$$\frac{dT}{dr} = \rho c U_t^2 C_L \left( 1 - \frac{a}{2 \lambda C_L} \right) dU_t$$

Donde:

$$\lambda = U_p / U_t$$

Según la naturaleza de la carga que esté actuando sobre el rotor de un aerogenerador tendrá una clasificación tal y como se muestra a continuación.

Tabla. Clasificación del rotor de un aerogenerador según la carga que actúa él

Estacionarias		Dinámicas					
Estática		Cíclica				Estocástica	
Uniforme	Centrífuga	Cortadura	Sombra	Desalineación	Peso	Giroscópica	Turbulencia
							

### Sombra de torre

Efecto que la presencia de la torre del aerogenerador tiene sobre el flujo del viento:

- Barlovento: El efecto se aproxima mediante una solución potencial (Fig. 3).
- Sotavento: La corriente le llega al rotor totalmente desprendida (Fig. 4)

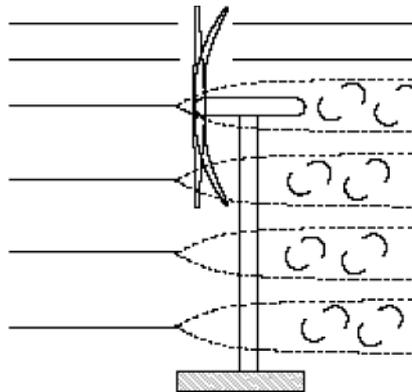


Fig. 3. Barlovento.

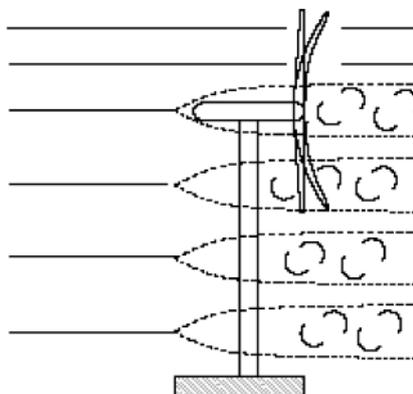


Fig. 4. Sotavento.

### Cortadura

La variación de la velocidad media con la altura varía debido a la capa límite atmosférica.

Si la cortadura fuera lineal, la variación de la velocidad axial sería sinusoidal. Cortaduras potenciales introducen armónicos múltiples de la velocidad de giro.

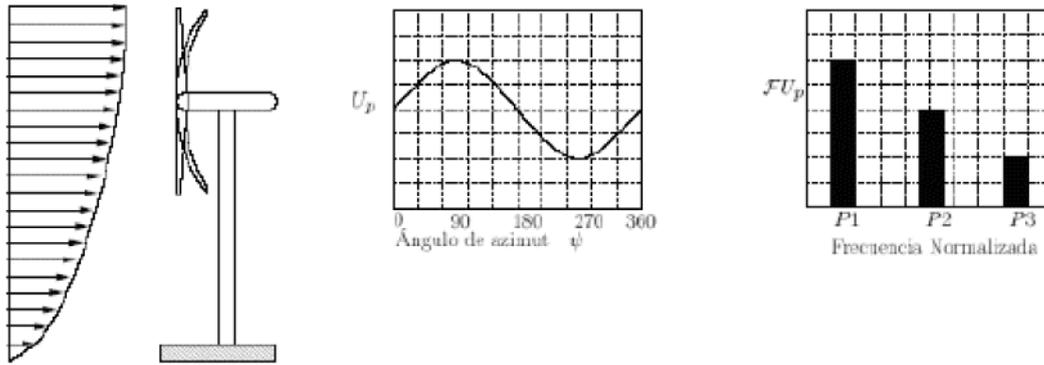


Fig. 5. Efecto cortadura.

### Desalineación

La variación del ángulo de alineación produce:

- Una variación en la velocidad perpendicular al plano del rotor.
- Aparece una variación de la velocidad en el plano del rotor

$$U_t = r \Omega + V_w \sin \chi \cos \psi$$

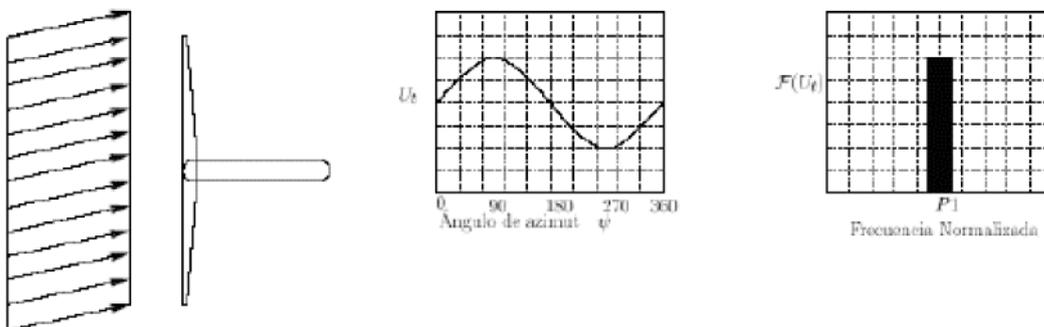
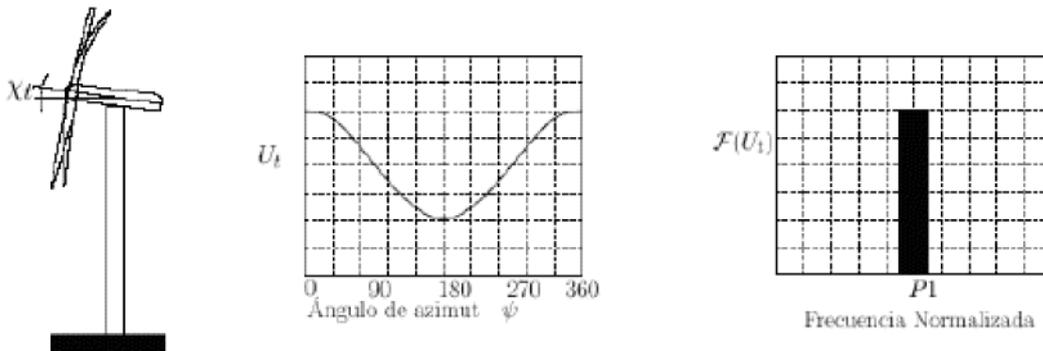


Fig. 6. Desalineación.

### *Inclinación del eje*

Para evitar problemas con el paso de las palas por la parte baja de la torre en las aeroturbinas es muy habitual que el eje esté inclinado un ángulo,  $X_t$ .

Esta inclinación produce un efecto similar a la desalineación, pero desplazando la respuesta en el tiempo 90 grados.



*Fig. 7. Inclinación del eje.*

### *Turbulencia*

La naturaleza turbulenta del viento es la fuente más importante del daño a fatiga que sufren los componentes de un aerogenerador. Para describir correctamente las cargas producidas por la turbulencia es necesario una correcta definición de las componentes de velocidad:

- Descripción correcta en el plano de la frecuencia para la variable espacial como para la variable temporal.
- Componentes de la velocidad acopladas mediante los esfuerzos de Reynolds.

La rotación de las palas produce una importante modificación del espectro de la velocidad turbulenta.

- Redistribución de la energía a bajas frecuencias hacia las altas frecuencias.
- Picos del espectro en los múltiplos enteros de la frecuencia de rotación.
- Los picos son mayores cuanto mayor es el radio del rotor del aerogenerador y la  $\lambda$ .

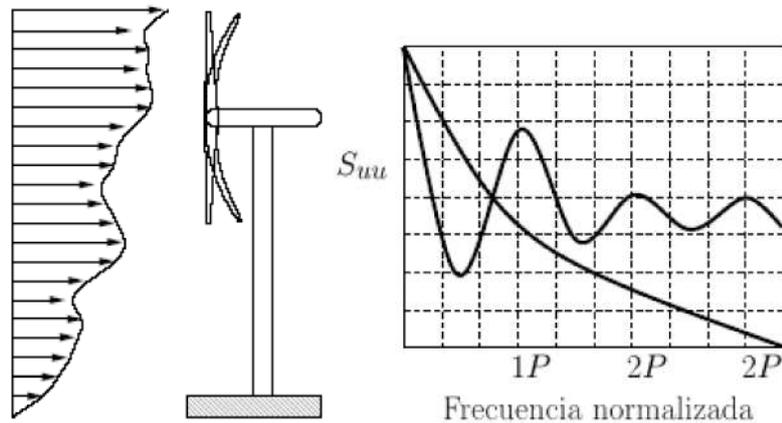


Fig. 8. Turbulencia.

### Cargas extremas

Normalmente una velocidad de 25 m/s suele considerarse la máxima velocidad de operación del aerogenerador.

Es necesario obtener valores de cargas para velocidades de vientos extremas.

Para obtener la distribución de probabilidad de viento extrema:

- Se obtienen los máximos valores horarios o la máxima velocidad de ráfaga que ocurren en un año.
- Con el valor de estos datos durante un período de 15 o 20 años, se ajustan para obtener una distribución.

Dos formas básicas existen para abordar esta variabilidad:

- Uso de ráfagas: aplicar de forma constante una variación de velocidad sinusoidal entre el valor medio y el valor máximo a la estructura.
- Emplear una descripción estocástica del viento y mediante este espectro alimentar el sistema dinámico que representa al aerogenerador.

Aerogeneradores poco rígidos deben emplear la aproximación basada en ráfagas

Aerogeneradores con dimensiones comparables a la longitud de escala asociada a la turbulencia ( 20 a 100 m ) deben emplear la descripción estocástica.

### Conclusiones

- Las variaciones en la fuerza de empuje son proporcionales a las variaciones en la velocidad axial.
- Los incrementos en la fuerza de empuje debidos al aumento de la velocidad total son más importantes que las disminuciones en la fuerza de empuje debidas a la reducción de sustentación.

- Se realiza un detallado estudio de las cargas aerodinámicas presentes en el rotor de un aerogenerador que permite al especialista analizar de manera rápida y eficiente la aerodinámica del rotor en cuestión.

### **Bibliografía**

- ARAUS, MARIA E.; ALDO A. MASSA y ALFREDO J. SOLELTI. *Energía eólica*. Universidad Católica de Córdoba, 1983.
- BASTIANON, R. *Energía del viento y diseño de generadores eólicos de electricidad y turbinas eólicas*. Argentina: Ed. Tiempo de Cultura, 1992.
- BUGGE, JACOB. *Regulation on the determination of loads on windmill*. 1989.
- FRERIS, L. L. *Wind energy conversion systems*. New York: Ed. Prentice Hall, 1995.
- RITTENHOUSE, DAVID. *La energía eólica*. Argentina: Ed. Fraterna, 1978.

## **Ecuaciones para la transferencia de la cantidad de movimiento vorticial de partículas de bagazo en forma de capa**

### **Equations for vortical momentum transfer of sugar cane bagasse layer type particles**

*M.Sc. Eugenio F. Bombino Matos  
Dr. Guillermo Roca Alarcón  
Dr. René Lesme Jaén  
Facultad de Ingeniería Mecánica,  
Centro de Estudio de Eficiencia Energética (CEEFE),  
Sede Mella, Santiago de Cuba, Cuba.  
Tel.: 644509.  
e-mail: bombino@ceefe.uo.edu.cu*

#### **Resumen**

Se propone un modelo matemático para describir el movimiento de un conjunto de partículas de bagazo de caña cuando se mueven en forma de espiral tridimensional ascendente teniendo en cuenta las principales fuerzas que actúan durante este tipo de movimiento en forma de capa, de lo que resulta un sistema de tres ecuaciones diferenciales no lineales de segundo orden, el cual se puede aplicar para describir fenómenos relacionados con el tratamiento neumático de esta biomasa, como por ejemplo el secado.

**Palabras clave:** Movimiento vorticial, bagazo de caña, secado neumático.

#### **Abstract**

In this paper we propose a mathematical model intended to describe the motion of a set of particles of sugar cane biomass when they move in a three-dimensional ascending spiral taking into account the main forces acting during this type of motion in a layer. The result is a system of three nonlinear second order differential equations, which can be applicable to describe phenomena related to the pneumatic treatment of this biomass, like for instance drying.

**Keywords:** vortical motion, sugar cane bagasse, pneumatic drying

#### **Introducción**

El correcto tratamiento y utilización del bagazo pueden proporcionar considerables beneficios no sólo desde el punto de vista ramal, sino también para sustituir importaciones. El bagazo se considera el subproducto no maderable más importante del mundo, y tiene un alto valor estratégico en el desarrollo energético del país. Sólo en bagazo y paja en los cañaverales se almacena el equivalente a cerca de una tonelada de petróleo por cada tonelada de azúcar producida [Torres, 1998]. La necesidad de secar el bagazo está dada con vistas a su ahorro, para mejorar sus características como materia prima y para su almacenamiento, ya que este se requiere para una amplia gama de procesos que van desde la industria de derivados hasta la generación de electricidad.

El correcto tratamiento y utilización del bagazo pueden proporcionar considerables beneficios no sólo desde el punto de vista ramal, sino también para sustituir importaciones. En el presente trabajo se presenta una parte de los estudios que se realizan en nuestro centro con vistas a lograr mayor satisfacción con respecto a los procesos de tratamiento y manipulación de esta importante biomasa.

### **Modelos de transferencia de la cantidad de movimiento**

El total de las fuerzas que intervienen en el movimiento de partículas que son transportadas por un flujo en espiral ascendente son más de quince. De estas sólo tendremos en cuenta las que ejercen mayor influencia y que resultan indispensables para la formación y desarrollo de un vórtice, capaz de transportar un flujo de partículas.

De estudios experimentales realizados en el laboratorio se definió el modelo físico del fenómeno analizado, como el movimiento de una capa de partículas que se desliza en forma de espiral ascendente por la pared de un cilindro.

De acuerdo con lo anterior, tendremos en cuenta:

1. La fuerza de resistencia frontal ( $F_T$ ).
2. Fuerza centrífuga ( $F_c$ ).
3. El peso ( $F_g$ ).
4. La fuerza de empuje ( $F_A$ ).
5. Fuerza de fricción partículas pared ( $F_1$ ).
6. Fuerza debido a la tensión provocada por la fricción gas-pared ( $F_{gp}$ ).
7. Fuerza debido a la tensión provocada por la fricción gas limpio-pared ( $F_{al}$ ).

Teniendo en cuenta lo anterior se pueden agrupar las fuerzas de fricción en un término denominado  $F_T$  o fuerza de fricción total:  $F_T = F_1 + F_{gp} + F_{al}$

### **Fundamentación teórica**

La ecuación de transferencia de la cantidad de movimiento se obtiene como resultado de la sumatoria de las siete fuerzas consideradas; esto queda de la forma general siguiente:

$m \frac{dV}{dt} = F_t + F_c - F_g + F_A - F_T$ , la cual puede escribirse:

$$m \cdot \frac{dV}{dt} = 0.5 \cdot C \cdot S \cdot \rho_r \cdot (W - V)^2 |W - V| - m g + V_a \cdot \rho_r \cdot g - F_T \quad (1)$$

Donde:

$W$ : Velocidad del gas.

$V$ : Velocidad del material.

$M$ : Masa de la fase dispersa (material).

$C$ : Coeficiente de resistencia aerodinámica.

$S$ : Área proyectada de la fase dispersa (material).

$\rho_f$  -: Densidad del fluido.

$\rho g=(0,0,g)$ . Aceleración gravitatoria

$V_0$ : Volumen de la fase dispersa (material).

$FT$ : Fricción total.

En forma escalar y haciendo  $b = \frac{1}{2 \cdot m} \cdot C \cdot S \cdot \rho_f$  obtenemos:

$$\frac{dV_x}{dt} = b(W_x - V_x) \sqrt{(W_x - V_x)^2 + (W_y - V_y)^2 + (W_z - V_z)^2} - F_{Tx} \quad (2)$$

$$\frac{dV_y}{dt} = b(W_y - V_y) \sqrt{(W_x - V_x)^2 + (W_y - V_y)^2 + (W_z - V_z)^2} - F_{Ty} \quad (3)$$

$$\frac{dV_z}{dt} = b(W_z - V_z) \sqrt{(W_x - V_x)^2 + (W_y - V_y)^2 + (W_z - V_z)^2} - F_{Tz} - C^*g \quad (4)$$

Donde:  $C^* = \left( \frac{\rho_f}{\rho_p} - 1 \right)$

$C^*g$ : Factor que tiene en cuenta el peso y la fuerza de empuje.

Trataremos el movimiento de una capa de partículas dentro de un cilindro (condición de frontera), en el cual se mueve un flujo en forma de espiral (Fig. 1).

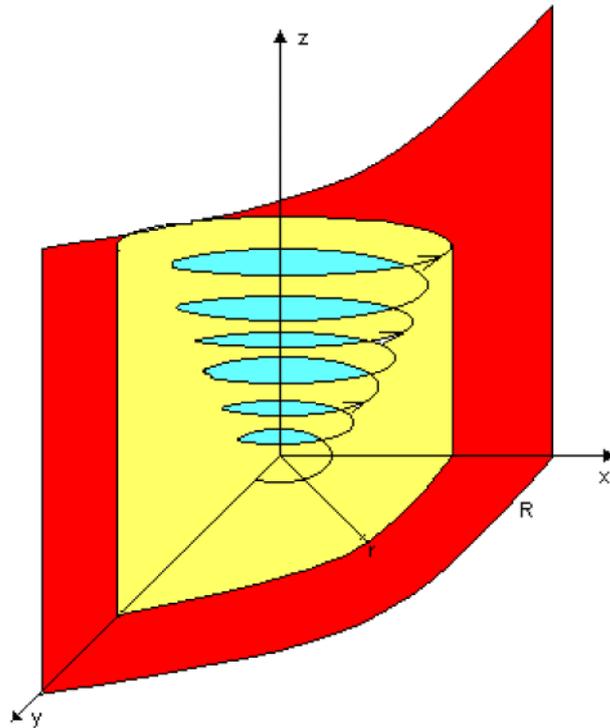


Fig. 1. Trayectoria de un movimiento vorticial en el espacio.

### Hipótesis fundamental

Para  $r$  fijo  $0 < r \leq R$ , donde  $R$  es el radio del cilindro, una partícula  $P$  realiza un movimiento en espiral  $F(P) = [x(P), y(P), z(P)]$ . Hagamos la parametrización siguiente:

$$x = r \times \cos wt \tag{5}$$

$$y = r \times \text{sen } wt \tag{6}$$

$$z = a \times t \tag{7}$$

$$w = \tag{8}$$

Donde  $t$  es el tiempo transcurrido hasta que la partícula está en la posición  $P(x,y,z)$ . Entonces:

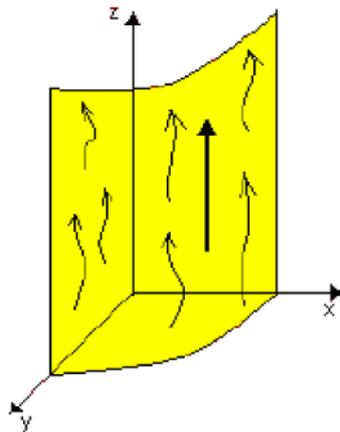
$$\vec{V}_p(x, y, z) = \frac{dF}{dt} = (-wr \text{sen } wt, wr \text{ cos } wt, a) = (-y, x, a). \tag{9}$$

$$\text{Considerando: } \frac{a}{r^2} = \frac{a}{x^2 + y^2} \quad \text{En general, } a = a(r) \quad (10)$$

El campo vectorial  $\vec{W}_p$  lo consideraremos como la superposición de dos campos vectoriales;

$$\vec{W}_p(x, y, z) = (-wy, wx, a) = (-wy, wx, 0) + (0, 0, a) \quad (11)$$

El campo  $\vec{W}_p(x, y, z) = (-wy, wx, a) = (-wy, wx, 0) + (0, 0, a)$  es un campo plano, y  $\vec{V}_p(x, y, z) = (-wy, wx, 0)$  es el campo de velocidades de un flujo uniforme paralelo al eje z, como se muestra en la figura 2.



*Fig. 2. Campo de velocidades del flujo vertical paralelo al eje Z.*

Para resolver el modelo obtenido se necesita información sobre las propiedades físicas y geométricas del material, las propiedades físicas del gas, así como el cálculo de coeficientes y números adimensionales como son: los números de Reynolds y Arquímedes, el coeficiente de arrastre en función del número de Reynolds, el contenido de humedad y el factor b que agrupa el coeficiente de arrastre, el área proyectada de la partícula y la densidad del gas.

Un parámetro importante que se calcula es la velocidad de arrastre en función de los criterios de Reynolds y Arquímedes, y en función de esta velocidad se calcula el campo de velocidades del gas,  $W$ .

Con esto se procede al cálculo de la velocidad de la partícula mediante la solución del modelo planteado, por métodos numéricos, concretamente el método de Runge Kutta cuarto orden, y con esto a su vez se calcula la trayectoria de la partícula para régimen estacionario, utilizando el método de diferencias finitas. Pero antes pasemos a la demostración de que el flujo que origina al campo de velocidades  $\vec{W}_p$  es plano.

Sea  $\Gamma(t)$  una línea de corriente cualquiera del flujo. Como las velocidades son tangentes a dicha línea, debe cumplirse:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{W}_p, \text{ es decir, } \left\{ \begin{array}{l} \frac{dx}{dt} = -wy \\ \frac{dy}{dt} = wx \\ \frac{dz}{dt} = 0 \end{array} \right. \quad (12)$$

Luego,  $z(t) = \text{constante}$  y por tanto el flujo es plano.

⇒ Resolvamos el sistema:

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -y(t) \\ \frac{dy}{dt} &= x(t) \\ \frac{d^2x}{dt^2} - \frac{dy}{dt} &= -x(t) \Rightarrow \frac{d^2x}{dt^2} + x(t) = 0 \\ k^2 + 1 &= 0 \end{aligned} \quad (13)$$

$$k = \pm i \Rightarrow x(t) = C_1 \cdot \cos t + C_2 \cdot \sin t \quad (14)$$

$$\text{De modo que: } y(t) = -\frac{dx}{dt} = C_1 \cdot \sin t + C_2 \cdot \cos t \quad (15)$$

Estas son las ecuaciones paramétricas que describen el movimiento de una partícula de fluido en el plano. Claramente  $x^2 + y^2 = C_1^2 + C_2^2$ , de modo que estas trayectorias están contenidas en una circunferencia.

Estas son las proyecciones de las trayectorias espirales. Por eso,  $x(0) = 0$ ,  $y(0) = 0$ , lo que implica que:

$$\begin{cases} x(0) = C_1 \\ y(0) = C_2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x(t) = r \cdot \cos t \\ y(t) = r \cdot \sin t \end{cases} \quad (16)$$

De esta forma queda demostrado que estas trayectorias son circunferencias. Es decir, el campo  $\vec{W}_p(x, y, z)$  es un torbellino según se muestra en la figura 3.

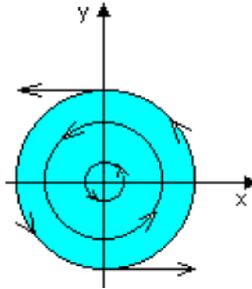


Fig. 3. Proyecciones de las trayectorias espirales en el plano x-y.

### Algunas consideraciones sobre las fuerzas de fricción

Para incluir en nuestro modelo las fuerzas de fricción, adoptamos un modelo físico consistente en el movimiento de las partículas en forma de capa, de acuerdo con las observaciones realizadas del proceso estudiado en el laboratorio.

La fuerza generada por la fricción partículas pared ( $F_1$ ) se determina a partir de la aplicación de la ecuación de Euler en el eje perpendicular a la dirección del movimiento, de la forma siguiente:

$$F_1 = \left( m \frac{V^2}{R} + mg \cdot f(\theta) \right) \cdot f'_m \quad (17)$$

Donde:

$V$ : Velocidad de las partículas.

$m$ : Masa de la capa de partículas.

$R$ : Radio de curvatura.

$f'_m$ : Coeficiente de fricción dinámico partículas pared.

$f(\theta)$ : Función trigonométrica que define el ángulo de ataque de la capa de partículas, de forma normal a la pared del cilindro exterior y según la dirección del movimiento.

### Tensión generada por la fricción gas pared ( $\tau_{gp}$ )

La tensión gas-pared para analizarla debemos examinar el comportamiento de la capa de material al deslizarse por la superficie interior del cilindro exterior. Esta capa arrastra consigo una significativa cantidad de gas en el espacio libre entre las partículas, lo cual trae consigo la posibilidad de la existencia de fricción viscosa entre el gas contenido por el conglomerado de partículas a través de la capa límite y la superficie del

cilindro. Este gas en su movimiento a la misma velocidad que las partículas que forman la capa, experimenta dicha fuerza de rozamiento con la superficie del tubo a través de una capa límite de espesor  $d_{ec}$ .

A partir de la Ley de rozamiento, de Newton.

$$\tau_{gp} = \nu \cdot \rho_f \cdot \frac{V}{d_{ec}} \quad (18)$$

Donde:

$\nu$ : Viscosidad cinemática del gas.  
 $d_{ec}$ : Espesor de la capa límite.

El espesor de la capa límite puede determinarse a partir del cálculo de la superficie de contacto de ambas fases.

$$S_v = \frac{2 \cdot S}{d_{ec} \cdot S} \varepsilon \cdot S_g = (1 - \varepsilon) \cdot S_d \quad (19)$$

Donde:

$\varepsilon$ : Porosidad.  
 $S_g$ : Área superficial específica de la fase gaseosa.  
 $S_d$ : De la fase dispersa (material).

$$S_v = \frac{2 \cdot S}{d_{ec} \cdot S} \quad (20)$$

Donde:

$S$ : Área superficial de la ranura o canal.

Sustituyendo (20) en (19)

$$S_v = \frac{2 \cdot S}{d_{ec} \cdot S}$$

Teniendo en cuenta que  $S_d = 6/d_e$  obtenemos que el espesor de la capa límite es:

$$d_{ec} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\varepsilon \cdot d_e}{(1 - \varepsilon)} \quad (21)$$

Donde:

$d_e$  : Diámetro equivalente de la esfera con similar comportamiento hidrodinámico que la partícula.

$d_{ec}$  : Espesor de la capa límite.

Cálculo de la porosidad ( $\varepsilon$ ):

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_o}{V_A} \quad (22)$$

Donde:

$V_o$  : Volumen del material

$V_A$  : Volumen del aparato

$$\varepsilon = 1 - \frac{V_o}{V_A}$$

Donde:

$d_{ext}$  : Diámetro interior del cilindro exterior.

$d$  : Diámetro exterior del cilindro interior.

$H$ : Altura del aparato (Fig. 4).

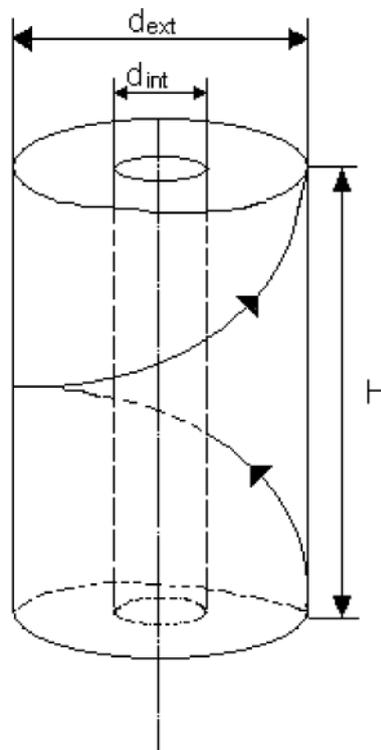


Fig. 4. Espiral en tubos concéntricos.

Sustituyendo en 22:

$$\varepsilon = 1 - \frac{4V_o}{H \cdot \pi(d_{ext}^2 - d_{int}^2)} \quad (23)$$

Si  $V_o = m/\rho p$ , sustituyendo en 23:

$$\varepsilon = 1 - \frac{4V_o}{H \cdot \pi(d_{ext}^2 - d_{int}^2)} \quad (24)$$

Tensión provocada por la fricción del gas limpio con la pared ( $\tau_{al}$ ):

$$\tau_{al} = C_g \cdot \rho \cdot \frac{\left(\frac{W}{\varepsilon}\right)^2}{8} \quad (25)$$

Donde:

$C_g$ : Coeficiente de fricción

$$C_g = \frac{0.316}{R_{cg}^{0.25}} \quad (26)$$

$$R_{cg} = \frac{\left(\frac{W}{\varepsilon}\right) \cdot (D_o - D_{int})}{\nu} \quad (27)$$

Donde:

$D_o$  : Diámetro del cilindro exterior.

$D_{int}$  : Diámetro del cilindro interior.

### Conclusiones

1. Con este estudio se definieron las principales fuerzas que actúan durante el movimiento en espiral ascendente de partículas de biomasa.

2. Se establece por primera vez un modelo matemático que tiene en cuenta la interacción del gas y las partículas con las paredes del equipo, para describir tridimensionalmente este tipo de movimiento.

3. Se realiza la modelación matemática a partir de un modelo físico de movimiento de las partículas en forma de capa, el cual se obtuvo a partir de las observaciones realizadas en el laboratorio.

4. Con este trabajo quedan establecidas las condiciones para la inclusión en

el modelo, de las ecuaciones de transferencia de calor y masa, con vistas al estudio y su aplicación en el secado neumático.

### **Bibliografía**

Bombino, M. E. «Modelación matemática del movimiento vorticial en el espacio de partículas de bagazo» . Tesis presentada en opción al título académico de Máster en Ciencias. Octubre de 1999.

Bombino, M. E.; A. G. Roca A.G. y J. R. Lesme. «Análisis de los principales trabajos reportados sobre el secado de bagazo, problemas presentados y perspectivas» . Primera Convención Internacional de Energía y Medio Ambiente, 2003. ISBN 959-207-096-2.

\_\_\_\_\_. «Estudio teórico-práctico sobre el movimiento en espiral ascendente de partículas de biomasa» . Revista *Tecnología Química*. vol. XXIII, No 1, 2003.

\_\_\_\_\_. «Perspectivas del secado de bagazo» . Revista *Tecnología Química*.

vol. XXIII, No 2, 2003.

Bombino, M. E.; A. G. Roca, J. R. Lesme y P. L. Brossard. «Estudio de la longitud de la trayectoria y la altura alcanzadas por partículas de bagazo durante su movimiento en forma de espiral ascendente » . Revista *Tecnología Química*. vol. XXII No. 2, 2002.

Roca, A. G.; M. E. Bombino, J. R. Lesme y P. L. Vaillant. « Mathematical Modelling of the Space Helical Movement» . Four International Congress SIHTOK-4. Mayo de 2000.

**para la obtención de carbón activado y energía**

**Characterization of an agroforestry biomass for obtaining activated carbon and energy**

*M.Sc. Bárbaro Fidel Medina Álvarez*

*Dr. Pedro Julio Villegas Aguilar*

*Centro Estudios de Energía y Tecnologías Ambientales (CEETA),*

*Facultad de Ingeniería Mecánica Universidad Central de las Villas,*

*Santa Clara, 54830, Cuba.*

*Tel.: 42 281194.*

*Fax: 42 281608.*

*e-mail: bfmolina@fim.uclv.edu.cu y pjva@fim.uclv.edu.cu*

**Resumen**

La termoconversión de la biomasa es una forma adecuada de convertir los residuos agrícolas en energía y productos químicos. La conversión de la biomasa es una tecnología que transforma la biomasa sólida en gas, mediante el uso de tecnologías de conversión avanzadas; ofrece la ruta de un concepto integrado de bioenergía que es necesario para modernizar y extender el uso global de biomasa y resulta una manera eficaz de obtener los productos químicos para la protección ambiental. En este trabajo se presenta un estudio sobre la conversión termal de una biomasa cubana para obtener un buen combustible y carbonos activados, que son productos muy útiles para eliminar contaminantes de efluentes líquidos y/o gaseosos. La caracterización se hace fundamentalmente mediante la técnica de análisis termogravimétrico para obtener los parámetros cinéticos de la reacción estudiada y se determinan las características del producto sólido de la termoconversión (carbón) como fuente de carbonos activados de aproximadamente  $900\text{m}^2/\text{g}$  de área específica, los cuales son adecuados como adsorbentes.

**Palabras clave:** Biomasa, conversión termal, fuente de energía, carbonos activados.

**Abstract**

Thermal conversion of biomass is an adequate way to transform agricultural residues into useful energy and chemical products. Biomass conversion is a technology that converts solid biomass into gas, by means of advanced conversion technologies. It offers the route of an integrated concept of bioenergy that is necessary to modernize and to extend the global use of biomass and an effective way to obtain the necessary chemical products for environmental protection. In this paper we present a study on the thermal conversion of biomass in Cuba to obtain good fuel and activated carbons, which are very useful products to eliminate pollutants from liquid or gaseous effluents. The characterization is done by means of the thermo-gravimetric analysis technique in order to get the kinetic parameters of the studied

reaction and determine the characteristics of the solid product of the thermal conversion as a source of activated carbons of approximately 900m<sup>2</sup>/g of specific area, which are adequate like adsorbents.

**Keywords:** biomass, thermal conversion, energy source, activated carbon

## I. Introducción

La pirólisis lenta de residuos agroforestales constituye una alternativa sustentable para la obtención de productos con mayor valor agregado y simultáneamente una vía para disminuir los daños ambientales ocasionados por la acumulación de estos residuos o su incineración a cielo abierto. Es de particular interés el carbonizado obtenido después de la pirólisis de la biomasa vegetal, el cual puede utilizarse directamente como combustible o someterse a tratamientos adicionales para obtener carbón activado [Bahrton, *et al.*, 1998; Tancredi, *et al.*, 1996; Villegas Aguilar, *et al.*, 2003].

El marabú (*Dichostachys cinerea*) es un arbusto espinoso, de rápido crecimiento y fácil propagación. Su tronco alcanza diámetros superiores a los 10 cm y su madera es semidura. En Cuba existen importantes extensiones de tierras agrícolas y de ganadería invadidas por este arbusto, que constituye una plaga. Su eliminación se realiza mediante corte mecánico del arbusto y la quema intensiva de los desechos impacta negativamente sobre el medio ambiente. Existen experiencias de fabricación de carbón vegetal a partir de los residuos de esta madera; sin embargo, en la bibliografía consultada no se reportan datos sobre el proceso de descomposición térmica de ésta y la influencia sobre los rendimientos del carbonizado que ocasionan la variación de la temperatura y tiempo del tratamiento térmico.

## II. Parte experimental

Se emplearon muestras vírgenes de madera de marabú, molidas y tamizadas utilizándose la fracción de diámetros de partícula comprendidos entre 0,8 y 2 mm. Después de un proceso de homogeneización y secado, la pirólisis se llevó a cabo en un reactor de lecho fijo de 50 cm de diámetro y 30 cm de altura, inertizado mediante circulación de nitrógeno con flujo de 100 mL/min. El reactor se ubicó en el interior de un horno eléctrico con controlador automático de temperatura, marca Thermoline-21100.

Se elevó la temperatura a una velocidad de calentamiento de 5 0C/min hasta alcanzar la temperaturas finales de 400, 600 y 800 oC, prolongando este tratamiento térmico durante 60 minutos. Después los carbonizados se enfriaron hasta temperatura ambiente, manteniendo la circulación de N<sub>2</sub>.

En este trabajo se llevó a cabo el análisis inmediato de la madera virgen de marabú y del carbonizado preparado a partir de ésta a las distintas temperaturas de pirólisis seleccionadas, siguiendo las normas *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

Se determinó el análisis elemental de las muestras vírgenes y sus

carbonizados a la temperatura de 600 oC, con el fin de determinar el contenido porcentual de los elementos carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno. Los resultados del análisis elemental se informan libres de humedad y también cenizas. Para la realización de estos análisis, se empleó un analizador elemental CARLO ERBA-FISONS EA-1108.

Las mediciones de la cinética de la pirólisis del marabú se realizaron mediante análisis termogravimétrico no isotérmico en una termobalanza tipo Netzsch STA 409, con flujo de nitrógeno de 80 mL/min.

Las características superficiales de la madera de marabú y sus carbonizados se determinaron utilizando una sortómetro Micromeritics Gemini 2360.

### III. Resultados y discusión

Los resultados de los análisis inmediato y elemental de la madera de marabú y sus carbonizados a la temperatura de 600 °C se muestran en la tabla 1.

*Tabla 1. Análisis inmediato y elemental del marabú y su carbonizado (char) después de la pirólisis a 600 °C*

Muestra	%Vv (lh)	%Cf (lh)	%A (lh)	%C (lhc)	%H (lhc)	%O* (lhc)	%N (lhc)
Marabú	75,8	23,0	1,2	51,3	5,4	43,1	1,9
Char	16,2	80,3	3,5	82,1	3,4	14,2	0,2

Como era de esperar, la pirólisis provoca la disminución del contenido de volátiles y a su vez un aumento en el contenido de carbono fijo y las cenizas. Igualmente, ocurren variaciones significativas en la composición química de la madera, las que se reflejan en el resultado obtenido para el carbonizado.

#### III.1. Poder calórico

A partir de los datos del análisis elemental reflejados en la tabla 1 se calculó el poder calórico de la madera del marabú y de su carbonizado, empleando la correlación establecida por Cukierman y colaboradores [1996], lo cual es un parámetro importante en la valoración de esta biomasa como fuente de energía.

Poder calórico de la madera del marabú virgen: 19,2 MJ-kg.  
 Poder calórico del carbonizado a 600 o C: 28,8 MJ-kg.

#### III.2. Influencia de la temperatura de la pirólisis sobre los rendimientos de los carbonizados

En la tabla 2 se muestran los valores obtenidos de rendimiento en masa del carbonizado, expresados en tanto por ciento.

*Tabla 2. Rendimientos de los carbonizados*

a diferentes temperaturas durante 60 minutos

Rendimiento (%)		
T = 400 °C	T = 600 °C	T = 800 °C
36	26	25

Las mayores pérdidas de peso ocurren en el rango de 400 a 600 °C. Sin embargo, con el posterior aumento de la temperatura hasta 800 °C, los rendimientos prácticamente no varían y experimentan una ligera disminución, lo que indica que por encima de 600 °C el contenido de volátiles es prácticamente nulo.

### III.3. Resistencia mecánica del carbonizado

Se determinó la resistencia mecánica de los carbonizados a temperatura de 600 °C y 60 minutos. El método utilizado es de tipo comparativo. La resistencia mecánica de los carbonizados se valora a partir del fraccionamiento de una masa inicial de los mismos por la acción del golpeo y fricción de seis bolas de vidrio en un recipiente semiesférico de acero inoxidable. La masa fraccionada que no pasa por un tamiz con dimensiones de malla de 0,5 mm se compara con la masa inicial y se toma como medida en tanto por ciento de la resistencia mecánica de los carbonizados.

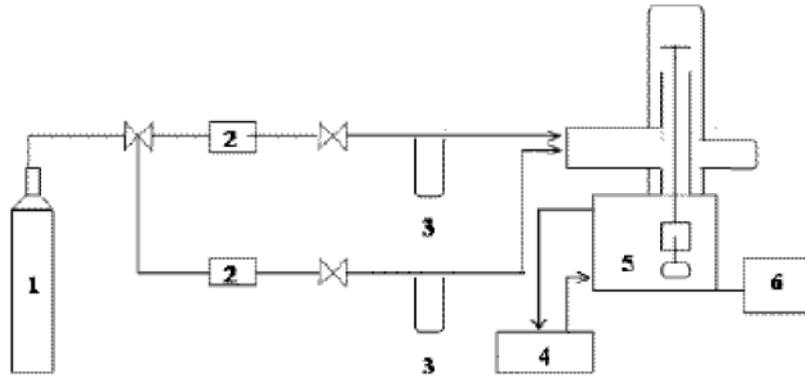
En la tabla 3 se muestran los datos obtenidos de resistencia mecánica de los carbonizados de madera de marabú y comparativamente de coco y caoba hondureña.

Tabla 3. Resistencia mecánica de carbonizados

Materia prima	Resistencia mecánica (%)
Marabú	91,1
Caoba hondureña	86,5
Coco	96,1

### III.4. Mediciones cinéticas

El conocimiento de la cinética de pirólisis es primordial para el diseño y modelado de combustores y gasificadores. Las mediciones de la cinética de la pirólisis de los materiales estudiados se realizaron mediante termogravimetría no isotérmica, desde temperatura ambiente hasta 900 oC. Las experiencias se realizaron en una termobalanza marca NETZSCH, modelo STA 409. En la figura 1 se presenta un esquema del equipo utilizado. Los flujos gaseosos se regulaban mediante válvulas de aguja y se medían con caudalímetros capilares que permitían verificar la constancia de los caudales durante el transcurso de cada experiencia. El N<sub>2</sub> se introducía en la termobalanza a través de dos corrientes, a fin de lograr la atmósfera inerte deseada y proteger el sistema de pesada.



*Fig. 1. Esquema del reactor termobalanza utilizado en los estudios de pirólisis.*

1. Cilindro de N<sub>2</sub>.
2. Filtros de sílica gel.
3. Caudalímetros capilares.
4. Termostato-criostato.
5. Termobalanza.
6. PC-Sistema de adquisición de datos.

Para los análisis, la muestra pesada se coloca en el portamuestra dentro del horno; se fija el caudal de N<sub>2</sub>; se hace circular la corriente de N<sub>2</sub> durante 30 minutos, a fin de desplazar el aire del recinto donde se halla el portamuestras, y después se calienta la muestra en atmósfera de N<sub>2</sub> a la velocidad de calentamiento deseada hasta la temperatura final del experimento 900 °C .

Los parámetros establecidos para la realización de las mediciones cinéticas fueron:

- Masa de las muestras: 10 mg.
- Diámetro de partículas: 0,03 < dp < 0,1 mm
- Flujo de nitrógeno: 50 mL/min.
- Velocidad de calentamiento: 10 °C/min.

En la figura 2 se muestra la curva termogravimétrica típica (TG) obtenida para la pirólisis del marabú, con las condiciones de operación definidas anteriormente, en la cual se observa la variación de la fracción másica instantánea ( $w = m/m_0$ ) con la variación de temperatura ( $T$ ), donde  $m$  es la masa del sólido a diferentes tiempos y  $m_0$ , la masa inicial del sólido libre de humedad desde la temperatura ambiente hasta 900 °C. El termograma muestra que la degradación térmica del marabú comienza a tener valores notables de pérdidas de masa a partir de los 200 °C; ocurre la mayor pérdida de masa (aproximadamente 60 % de la masa original) en el rango de temperatura comprendido entre 250 y 340 °C. A temperaturas superiores, la degradación térmica continúa, aunque más lentamente, alcanzándose una fracción residual de 0,25 a la temperatura de 800 °C.

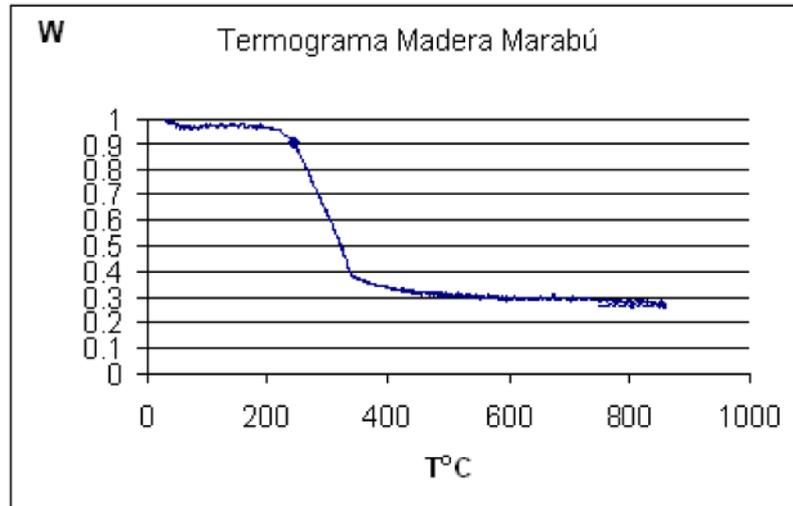


Fig. 2. Termograma de la pirólisis del marabú bajo condiciones no isotérmicas.

Para valorar la cinética de la pirólisis, en el presente trabajo se utilizó un modelo simple en el que se considera la pirólisis como una reacción de una sola etapa, de orden  $r$  respecto al sólido que responde a la expresión cinética siguiente [Villegas, *et al.*, 2004]:

$$\frac{dw}{dt} = k (w - w_0) \quad (1)$$

Donde:

$w$ : Pérdida de peso de la muestra en función de la temperatura.

$w_0$ : Fracción másica residual.

$t$ : Tiempo.

$k$ : Constante cinética de la pirólisis.

El ajuste de los datos experimentales  $w$  vs.  $t$  se realizó mediante análisis de regresión no lineal.

Los valores del logaritmo de las constantes de reacción se representaron en función del inverso de la temperatura con el fin de calcular la energía de activación (EA) del proceso de acuerdo con la ecuación de Arrhenius:

$$k = k_0 \exp\left\{-\frac{EA}{RT}\right\} \quad (2)$$

Donde:

$k_0$  : Factor pre exponencial.

EA: Energía de activación de la reacción estudiada.

R: Constante universal de los gases.

En la tabla 4 se presentan los valores de los parámetros cinéticos estimados a partir de la aplicación del modelo simple a los datos experimentales obtenidos de las termogramas en el intervalo de temperaturas desde la ambiente hasta 400 oC.

El rango escogido de temperatura para aplicar el modelo es donde ocurre prácticamente la totalidad de las pérdidas de masa referente a la masa residual de cada material estudiado y por tanto el de mayor influencia sobre los parámetros cinéticos de todo el proceso.

Tabla 4. Parámetros cinéticos de la pirólisis del marabú

Material virgen	EA (kJ/mol)	k 0 (min -1 )	Dv. Std (%)
Marabú	38	2,1 x10 2	1,3

El bajo valor de la desviación estándar indica que los parámetros estimados según el modelo teórico usado, se ajustan adecuadamente a los datos experimentales obtenidos del termograma en el intervalo de temperaturas estudiado.

A partir de los parámetros cinéticos reportados en la tabla 4, puede formularse la ley de velocidad que caracteriza la pirólisis del marabú:

$$\frac{dw}{dt} = 2.1 \times 10^2 \exp\left\{-\frac{38.}{RT}\right\} (w - w_0) \quad (3)$$

### III.5. Activación del carbonizado

El producto sólido de la pirólisis o carbonizado se activó a diferentes temperaturas y tiempos de activación en un reactor de lecho fijo de acero inoxidable de 30 cm de longitud y 3 cm de diámetro, calefaccionado por un horno eléctrico provisto de un sistema de programación y control de temperatura, al cual se suministra un flujo de vapor de agua de 0,3 mL/min a través de un tubo de 0,8 cm de diámetro del mismo material conectado a la parte inferior del reactor; los gases producto de la reacción se evacuan por la parte superior del reactor a través de un conducto de diámetro similar.

La determinación de la superficie específica de los carbones activados se realizó por método de BET a partir de las isothermas de adsorción de nitrógeno a -196 °C [Brunauer, *et al.*, 1938; Gregg y Sing, 1982]. Un ejemplo de ellas se presenta en la figura 3.

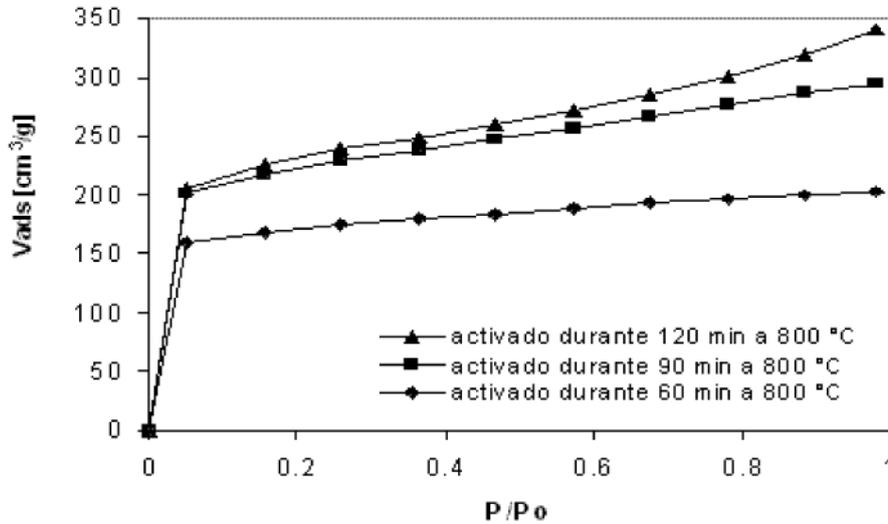


Fig. 3. Isotermas de adsorción de N<sub>2</sub> a -196 °C de los carbones activados preparados a partir del Marabú a 800 °C y distintos tiempos de activación.

Como puede apreciarse a partir de la figura 3, los volúmenes de N<sub>2</sub> adsorbidos aumentan al incrementarse el tiempo de activación, aunque las diferencias entre los volúmenes determinados para los carbones activados obtenidos a 90 y 120 minutos son mínimas. Los resultados indican una marcada influencia de la temperatura sobre la capacidad de adsorción de los carbones obtenidos. Los carbones activados adsorben volúmenes de N<sub>2</sub> progresivamente más altos al incrementar la temperatura de activación. Este comportamiento puede atribuirse a que el incremento de la temperatura favorece la reacción de gasificación entre el carbono del precursor pirolizado con el vapor de agua, lo que genera un mayor desarrollo de poros.

Las isotermas de adsorción, determinadas para los carbones activados obtenidos a 800 °C y los distintos tiempos de activación, presentan una forma bien definida y extendida en un amplio rango de presiones relativas. Para el menor tiempo de activación de 60 min tienen forma tipo I, correspondiente a sólidos microporosos. Para estas temperaturas y tiempos de activación más prolongados, las isotermas presentan una forma intermedia entre las de tipo I y II indicando la presencia de microporos y de poros de mayor tamaño (mesoporos). Asimismo, puede apreciarse que el volumen adsorbido se desplaza hacia valores más altos de presión relativa al emplear condiciones más severas de activación [Kyotani, 2000].

### Conclusiones

1. La pirólisis lenta de la madera de marabú provoca cambios significativos en su composición como consecuencia de la remoción de volátiles, que se reflejan en el aumento de los contenidos de carbono fijo y cenizas y en un incremento pronunciado en el porcentaje de carbono elemental al aumentar la temperatura, llegando este valor a 82,1 %.

2. Se determinaron parámetros del carbonizado obtenido después de la pirólisis de la madera de marabú que permiten valorar a esta biomasa como un combustible de alto poder calórico, buenos rendimientos y resistencia mecánica.

3. Mediante el estudio de la cinética del proceso de pirólisis por métodos termogravimétricos se estableció un modelo de descomposición térmica del marabú, determinándose las constantes cinéticas y la energía de activación, parámetros que son de gran importancia en el diseño y construcción de hornos y gasificadores.

4. A partir de la activación con vapor de agua del carbonizado de la madera de marabú se obtuvieron carbones activados de alta superficie específica (próximas a los 900 m<sup>2</sup>/g), lo cual confirma las potencialidades del empleo de la pirólisis lenta del marabú como una vía sustentable de la eliminación de esta plaga y por consiguiente la obtención de productos químicos de alto valor agregado.

### **Bibliografía**

- BAHRTON, A.; G. I. HOROWITZ, P. R. BONELLI, E. G. CERRELLA, M. C. CASSANELLO y A. L. Cukierman. «Residuos forestales como precursores para la preparación de carbones activados» . *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 2, 1, pp. 93-96, 1998. BRUNAUER, S. y P. H. EMMETT. *American Chemical Society*, 60, 309, 1938. Cukierman, A. L.; P. A. DELLA ROCCA, P. R. BONELLI Y M. C. CASSANELLO. «On the Study of Thermochemical Biomass Conversion» . *Trends in Chemical Engineering* , 3, 129-144, 1996. GREGG, S. J. Y K. S. W. SING. «Adsorption Surface Area and Porosity» . Academic Press Inc., London, 1982. Kyotani, T. « Control of pore structure » . *Carbon*, 38, pp. 269-286, 2000.
- TANCREDI, N.; T. CORDERO, T., J. Rodríguez-Mirasol y J. J. Rodríguez. «Activated carbons from uruguayan eucalyptus wood chars» . *Fuel*, 75, 15, 1996. pp. 1701-1706.
- VILLEGAS AGUILAR, P. J.; M. QUINCOCES SUÁREZ, J. C. LLÓPIZ BURELL y J. O. PRIETO GARCÍA. «Producción de carbón activado a partir de residuos de la industria azucarera» . *Revista española Afinidad* . Julio-agosto, Vol. 60, No. 506, 2003. pp. 338-343,
- \_\_\_\_\_. «Estudio cinético de la gasificación de los residuos fibrosos de la industria azucarera» . *Revista española Afinidad*. Marzo-abril, vol. 61, No. 510, 2004. pp. 139-146. ISSN 0001-9704.

## **Factibilidad del empleo de los residuos de la industria de la madera para la obtención de energía eléctrica**

### **Feasibility of the use of wood industry residues for electricity generation**

*Dr. René Lesme Jaén*

*Dr. Luis Oliva Ruiz*

*Centro de Estudios de Eficiencia Energética,*

*Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad de Oriente,*

*Sede Mella, Avenida de Las Américas s/n, Santiago de Cuba, Cuba.*

*Tel.: 644509.*

*e-mail: lesme@ceefe.uo.edu.cu*

#### **Resumen**

Para el uso de los residuos forestales como portadores energéticos es necesario valorar su volumen anual disponible, así como la factibilidad económica de su empleo. En el presente trabajo se exponen las investigaciones desarrolladas por el Centro de Estudios de Eficiencia Energética de la Universidad de Oriente en aserríos de la provincia Santiago de Cuba, donde se determinaron los coeficientes de residuos de estas industrias forestales, se evaluó el volumen y potencial anual de éstos, y se realizaron los análisis de factibilidad económica para su empleo en la generación de energía eléctrica.

**Palabras clave:** Residuos forestales, energía eléctrica, madera.

#### **Abstract**

In order to use forest residues as energy carriers it is necessary to evaluate their yearly available volume, as well as the economic feasibility of its use. In the present paper we expose the investigations carried out by the Center of Studies on Energy Efficiency of the Universidad de Oriente in sawmills of the province Santiago de Cuba, where the coefficients of residues of these industries were determined. It was also evaluated their volume and annual potential of these facilities, and we carried out economic feasibility analyses for the utilization of the residues for power generation.

**Keywords:** forest residues, electrical energy, wood

#### **Introducción**

La industria de la madera tiene la característica de generar grandes volúmenes de residuos durante el proceso de explotación y elaboración de la misma; esta generación ocurre antes de la madera ser introducida en el proceso propiamente dicho, hasta la obtención del producto final.

El aprovechamiento de estos residuos en los procesos industriales, de

servicios, así como en la esfera residencial, es una necesidad social, en aras de disminuir el consumo de combustibles fósiles y el impacto ambiental que ellos producen.

Existen una serie de vías para el aprovechamiento de los residuos forestales y especialmente el aserrín, el cual es frecuentemente utilizado para la producción de pulpas, papel, tableros, fertilizantes etc., pero en los países que no cuentan con estas tecnologías su utilización como combustible es lo más corriente [Kollmann, 2001; Zaror, 1998].

### **Residuos de la industria forestal**

La actividad forestal en los países subdesarrollados se basa en la explotación de los bosques naturales y de plantaciones forestales de especies de crecimiento rápido, en un ciclo constituido por tres grandes componentes, la actividad silvícola y las industrias o talleres de procesamiento primario y secundario [Horta, et al., 2002].

Los residuos forestales obtenidos en la producción de la madera pueden ser clasificados en dos tipos: subproductos de las actividades de silvicultura y residuos del procesamiento de la madera, estos últimos por estar concentrados en un lugar determinado, su utilización resulta más factible y menos costosa.

La elaboración de la madera incluye: aserrado, descortezado y despulpe, en estos procesos se producen determinados desechos o subproductos, como aserrín y pedazos de madera de pequeñas dimensiones (astillas, virutas, cotaneras). En la determinación del volumen de estos residuos se utilizan determinados conceptos y coeficientes que estiman la relación entre la cantidad de subproducto y el producto principal cosechado, como son: el coeficiente de residuos y el coeficiente de disponibilidad; ellos varían con las prácticas culturales y las peculiaridades climáticas de cada región [Horta, et al., 2002; Barbosa y Silva, 1997].

*Coeficiente de residuos ( $C_R$ ):* Relación entre las cantidades de residuos totales y la masa de cosecha con humedad de campo.

*Coeficiente de disponibilidad ( $C_D$ ):* Relación entre la cantidad de residuos disponibles y la masa total de residuos.

*Evaluación experimental de los coeficientes de residuos. [Lesme y Oliva, 2003]*

La evaluación de los coeficientes de residuos se llevó a cabo en dos establecimientos de la provincia Santiago de Cuba, los aserríos Felipe Ahuar y Martí, ambos cuentan con talleres primarios para el aserrado de los bolos procedentes de las fincas forestales y talleres secundarios para la elaboración de la madera hasta obtener el producto final.

Para efectuar las mediciones experimentales se tomaron varias muestras (bolos) de diferentes dimensiones, con el objetivo de disminuir los posibles errores de medición producto de la variedad de forma en ellos; se determinó el volumen de los bolos por la expresión [Colectivo, 1999]:

$$V = C^2 * L / 12.556$$

Donde:

V : Volumen de los bolos (m<sup>3</sup>).

C : Circunferencia de los bolos (m).

L : Longitud de los bolos (m).

En los talleres primarios el volumen total de bolos muestreados fue de 11,46 m<sup>3</sup> para el aserrío Felipe Ahuar y 9,40 m<sup>3</sup> para el aserrío Martí, y el volumen de cada uno de los residuos generados por estos bolos fue determinado mediante una cubeta dimensionada, considerando un factor de 0,42 m<sup>3</sup> /m<sup>3</sup> estéreo para llevarlo a metros cúbicos normales en el caso de las astillas, virutas y cotaneras [Horta, *et al.*, 2000; Proyecto, 2001].

Para determinar la masa de residuos (M) por unidad de volumen se tomó la densidad aparente del aserrín de 200 kg/m<sup>3</sup> y la densidad de la leña como 952 kg/m<sup>3</sup> [Lesme y Oliva, 2003; Lesme y Roca, 2001].

En el caso de los talleres secundarios o carpinterías, la materia prima con la cual ellos trabajan, primero es elaborada en la sierra principal del aserrío primario y convertida en tabloncillos rectangulares de diferentes dimensiones, a los cuales matemáticamente puede determinarse su volumen, en este caso en el aserrío Felipe Ahuar se tomó una muestra de 4,90 m<sup>3</sup> de madera o tablas y en el aserrío Martí 1,9 m<sup>3</sup> en ambos casos se obtuvo como residuos aserrín, virutas y astillas.

Los resultados de los experimentos para la determinación de los coeficientes de residuos aparecen en los anexos I y II.

### **Potencial energético de los residuos**

La cantidad de madera elaborada por los aserríos objeto de estudio, el consumo, los gastos anuales, los costos unitarios de electricidad, así como la cantidad total de residuos, su potencial anual y las toneladas de petróleo equivalentes aparecen representados en el anexo III.

Para determinar el volumen de residuos se multiplicó la cantidad de madera elaborada en el año por el coeficiente total de residuos en el taller primario y se obtuvo la cantidad de residuos de este taller, la diferencia entre la cantidad de madera elaborada y la cantidad de residuos en el taller primario se multiplicó por el coeficiente total de residuos en el taller secundario y se obtuvo la cantidad de residuos en el taller secundario; la suma de ambas cantidades de residuos es el volumen anual de residuos del aserrío.

Para evaluar la masa total de residuos se determinó el volumen total de cada residuo para ambos talleres y se multiplicó por su densidad.

En la determinación del potencial anual de los residuos (terajoules) y las toneladas de petróleo equivalentes se tomaron valores calóricos bajos de la madera y el petróleo de 16,5 MJ/kg y 43,11 MJ/kg, respectivamente [Lesme Jaén y Oliva, 2003].

#### *Generación de electricidad a partir de los residuos. Análisis de factibilidad*

La utilización de los residuos de la industria forestal como combustible para la producción de electricidad y calor, requiere de ciclos térmicos de potencia con el empleo de calderas o gasificadores con turbinas de gas y/o vapor [Lesme Jaén y Oliva, 2003; Barbosa y Silva, 1997; Lesme y Oliva, 2003; Balerío, 2001].

*Ciclo simple de una turbina de gas, sistemas BIG/GT (Biomass Integrated Gasification-Gas Turbine) (Fig. 1).* En este ciclo el aire necesario para la gasificación es suministrado por un soplador (C), los gases generados en el gasificador (G) se someten a un proceso de enfriamiento en un intercambiador de calor (TC), para que resulte más fácil la limpieza antes de ser llevados a la cámara de combustión (CC) y para obtener una mayor eficiencia energética, ya que este calor se aprovecha en el calentamiento del agua de alimentación de la caldera recuperadora (CR), dispositivo que suministra vapor saturado para el secado de la madera.

Después de la limpieza de los gases se realiza su compresión, para luego ser introducidos en la cámara de combustión (CC) conjuntamente con aire a alta presión. En estas instalaciones la generación de electricidad alcanza como promedio 8,7 kW/m<sup>3</sup> de residuos de madera, para temperaturas de los gases de 1 200-1 400K y relaciones de presión de 10-25, con costos operativos de la instalación de 0,025 \$/kWh [Lesme Jaén y Oliva, 2003].

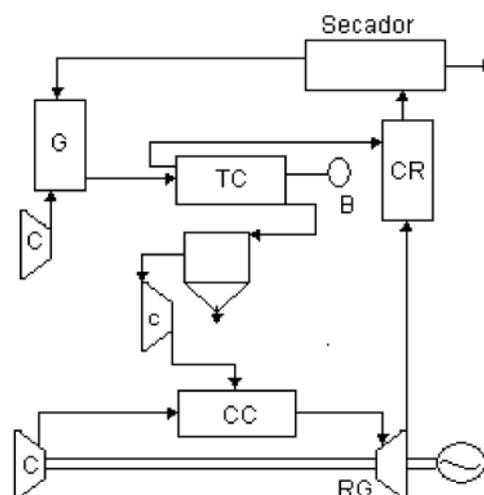


Fig. 1. Ciclo simple de turbinas de gas.

Tomando como referencia estos datos, proyectos similares instalados en los aserríos Felipe Ahuar y Martí mostrarían los indicadores reportados en el anexo IV.

En este anexo la generación anual de energía se obtuvo multiplicando el volumen anual de residuos por la capacidad de generación del ciclo analizado, y la potencia a instalar dividiendo esta cantidad por el tiempo de trabajo anual, 2 304 horas al año. Los costos unitarios de la instalación están referenciados en la bibliografía [Barbosa y Silva, 1997].

El tiempo de recuperación se determinó por la relación entre la ganancia por concepto de generación de electricidad (\$) y los costos totales anuales; o sea, la suma de los costos de instalación y los costos anuales operativos, sin tener en cuenta la ganancia producto del secado artificial de la madera, lo cual mejora su calidad y permite aumentar la productividad del proceso de elaboración de ésta.

Ciclo de turbina de gas con inyección de vapor. Sistema BIG/STIG (Biomass Integrated Gasification-Steam Injected Gas Turbine) (Fig.2). La diferencia fundamental con respecto al ciclo anterior radica en la inyección del vapor proveniente de la caldera en la descarga del compresor.

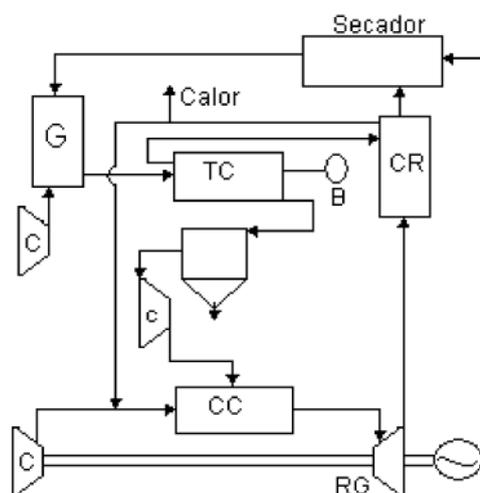


Fig. 2. Ciclo de turbina de gas con inyección de vapor.

El aumento del flujo másico que pasa por la turbina, con relación al que pasa por el compresor aumenta la potencia y la eficiencia del ciclo, lográndose generar como promedio 1 650 kW/m<sup>3</sup> de residuos de madera con iguales temperaturas de los gases que le ciclo anterior, y relaciones de presión entre 10-30.

Un análisis de factibilidad igual que el realizado al ciclo anterior arrojaría los resultados reportados en el anexo V.

### Ciclo combinado de turbina de gas y de vapor con calderas recuperadoras y cámara de combustión

Este ciclo consta de cámara de combustión (G), en la cual se produce la combustión de la biomasa. De la cámara de combustión se trasladan los gases al intercambiador (TC) donde se calienta el aire proveniente del compresor (C), para después pasar a la turbina de gas (RG). El aire que sale de esta turbina junto con los gases que provienen del intercambiador es introducido en la caldera recuperativa (CR) para la producción de vapor (Fig. 3).

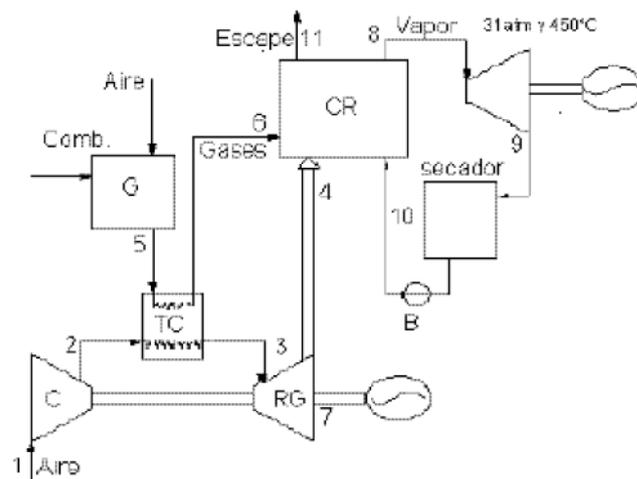


Fig. 3. Ciclo combinado de gas vapor.

Este vapor es utilizado en la producción de energía en la turbina y el vapor de escape de esta se utiliza en el secador de madera. El condensado del proceso de secado es alimentado a la caldera recuperadora por la bomba (B). Un ciclo de este tipo puede producir 69,13 kW/m<sup>3</sup> de residuos con intervalos de temperaturas de los gases similares a los anteriores, relación de presión de 10 y temperatura y presión del vapor de 31 atm y 450 °C.

El anexo VI reporta los resultados del análisis de factibilidad de esta instalación.

### Conclusiones

1. En el mundo hay una tendencia cada vez más marcada a utilizar los residuos de la industria forestal, ya sea como materia prima para obtener otros productos, o como portador energético. Estas aplicaciones obedecen no sólo a la solución de encontrar una vía factible para el uso de estos desechos, sino a la necesidad de proteger el medio ambiente, pues estos residuos en los depósitos constituyen una fuente de contaminación.

2. El volumen de residuos generado por la industria forestal es superior al volumen de madera elaborada. En los talleres de elaboración primaria son producidos alrededor de  $0,5 \text{ m}^3$  de residuos por metro cúbico de madera en bolos. En la elaboración secundaria de la madera se producen entre  $1,5 \text{ m}^3$  de residuos por metro cúbico de madera elaborada. Estos coeficientes de residuos sirven como indicadores para estimar volúmenes de residuos en otras industrias forestales de la región.

3. En la industria forestal se obtienen por concepto de residuos un potencial energético anual que equivale a 0,3 toneladas de petróleo por metros cúbicos de madera en bolos.

4. La factibilidad de la utilización de los residuos para la generación eléctrica depende de sus volúmenes, y en su efecto de la cantidad de madera elaborada por la industria. De los ciclos analizados el que requiere menor inversión es el del sistema BIG/GT, pero su tiempo de recuperación excede los cinco años, no así el sistema BIG/STIG, que su tiempo de recuperación es menor, por su gran producción de energía eléctrica, pero su inversión excede casi en ciento cincuenta veces al sistema anterior. El ciclo combinado de turbinas de gas y vapor con esos parámetros no es factible en ninguno de los casos.

#### **Bibliografía**

BALERÍO, GUSTAVO. Forestadora y maderera del Norte S.A.

(FYMNSA), Uruguay. Caso de producción de energía eléctrica en un aserradero, 2001.

BARBOSA CORTEZ, L. A. y SILVA LORA E. *Tecnologías de Conversión Energética de la biomasa. Serie Sistemas Energéticos II*. Editado en la Universidad de Amazonas 1997.

Colectivo de autores. *Manual de dasonometría*. Centro Universitario de Pinar del Río Hermanos Saíz Montes de Oca, 1999.

HORTA NOGUEIRA, L. A., et al. *Dendroenergía: Fundamentos y aplicaciones*. Brasilia. Agencia Nacional de Energía Eléctrica (ANEEL), 2000.

KOLLMANN, F. F. P. «La promesa de la tecnología» . Trabajo presentado en VI Congreso Forestal Mundial por el Profesor Kollmann, de la Universidad de Munich, y presidente de la International Academy of Wood Science, 2001.

LESME JAÉN R. y L. OLIVA RUIZ. «Evaluación del potencial de residuos de la Industria Forestal Gran Piedra Baconao» . I Convención Internacional de Energía y Medio Ambiente. Universidad de Oriente, 2003. ISBN: 959-207-096-2.

LESME JAÉN, R. y G. ROCA ALARCÓN. «Dendroenergía. Potencialidades y limitaciones. Consumo de leña y carbón». II Conferencia Internacional de Eficiencia Energética y Refrigeración. Universidad de Oriente. ISBN: 959-207-017-3 Año 2001

*Proyecto: Oportunidad de la dendroenergía en el desarrollo energético sostenible en Cuba*. TCP/CUB/8925(A), 2001.

ZAROR, CLAUDIO, *et al.* «Desafíos tecnológicos para la gestión sustentable del sector forestal en los países de América Latina y el Caribe». Mesa Redonda sobre Reforestación. Santiago de Chile 1998.

## Anexos

### Anexo I. Volumen y coeficientes de residuos en los aserríos primarios

Residuos	Aserrío F. Ahuar	Aserrío Martí
Aserrín	1,81 m <sup>3</sup>	1,22 m <sup>3</sup>
Cotaneras	2,45 m <sup>3</sup>	2,73 m <sup>3</sup>
Astillas	1,44 m <sup>3</sup>	1,01 m <sup>3</sup>
Total	5,70 m <sup>3</sup>	4,96 m <sup>3</sup>
CR aserrín	0,16 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> bolos	0,13 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> bolos
CR cotaneras	0,21 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> bolos	0,29 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> bolos
CR astillas	0,13 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> bolos	0,11 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> bolos
CR total	0,50 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> bolos	0,53 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> bolos
CD aserrín	0,32 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> residuos	0,25 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> residuos
CD cotaneras	0,43 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> residuos	0,55 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> residuos
CD astillas	0,25 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> residuos	0,20 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> residuos
Maserrín	32,00 kg/m <sup>3</sup> bolos	26,00 kg/m <sup>3</sup> bolos
Mcotaneras	199,92 kg/m <sup>3</sup> bolos	276,08 kg/m <sup>3</sup> bolos
Mastillas	123,76 kg/m <sup>3</sup> bolos	104,72 kg/m <sup>3</sup> bolos
Mresiduos	355,68 kg/m <sup>3</sup> bolos	406,80 kg/m <sup>3</sup> bolos

### Anexo II. Volumen y coeficientes de residuos en los aserríos secundarios

Residuos	Aserrío F. Ahuar	Aserrío Martí
Aserrín	4,44 m <sup>3</sup>	1,65 m <sup>3</sup>
Virutas	1,89 m <sup>3</sup>	0,78 m <sup>3</sup>
Astillas	1,10 m <sup>3</sup>	0,47 m <sup>3</sup>
Total	7,43 m <sup>3</sup>	2,90 m <sup>3</sup>
CR aserrín	0,91 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> madera	0,87 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> madera
CR virutas	0,39 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> madera	0,25 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> madera
CR astillas	0,22 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> madera	0,30 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> madera
CR total	1,52 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> madera	1,53 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> madera
CD aserrín	0,60 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> residuos	0,57 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> residuos
CD virutas	0,25 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> residuos	0,27 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> residuos
CD astillas	0,15 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> residuos	0,16 m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> residuos
Maserrín	182,00 kg/m <sup>3</sup> madera	174,00 kg/m <sup>3</sup> madera

Mvirutas	371,28 kg/m <sup>3</sup> madera	238,00 kg/m <sup>3</sup> madera
Mastillas	209,44 kg/m <sup>3</sup> madera	285,60 kg/m <sup>3</sup> madera
Mresiduos	762,72 kg/m <sup>3</sup> madera	697,60 kg/m <sup>3</sup> madera

*Anexo III. Potencial energético de los residuos*

<b>Indicadores</b>	<b>F. Ahuar Año 2002</b>	<b>Martí Año 2003</b>
Madera elaborada (m <sup>3</sup> )	7 193,28	1 798,48
Consumo anual de electricidad (Mw)	140,48	68,89
Gasto anual de electricidad (\$)	23 643,26	12 425,47
Costos unitarios de electricidad (\$/kW-h)	0,17	0,18
Volumen anual de residuos (m <sup>3</sup> )	9 063,53	2 246,47
Total de residuos (ton)	5 301,64	1 396,57
Coficiente total de residuos (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> de madera)	1,26	1,25
Coficiente total de residuos (ton/m <sup>3</sup> de madera)	0,73	0,78
Potencial anual (TJ)	87,50	23,04
Petróleo equivalente (Ton)	2 029,69	534,45

*Anexo IV. Indicadores de generación de energía eléctrica para un sistema BIG/GT*

<b>Indicadores</b>	<b>Felipe Ahuar</b>	<b>Martí</b>
Generación anual de energía (MW)	78,85	19,54
Potencia a instalar (kW)	30	10
Costos unitarios de instalación (USD/kW)	2 400	2 500
Costos de instalación (USD)	72 000	25 000
Tiempo de recuperación (años)	7	9

*Anexo V. Indicadores de generación de energía eléctrica para un sistema BIG/STIG*

<b>Indicadores</b>	<b>Felipe Ahuar</b>	<b>Martí</b>
Generación anual de energía (GW)	14,95	3,70
Potencia a instalar (MW)	6.5	1.6
Costos unitarios de instalación. (USD/kW)	1 650	2 200
Costos de instalación (USD)	10 725 000	3 520 000
Tiempo de recuperación (años)	5	7

*Anexo VI. Indicadores de generación de energía eléctrica para un ciclo combinado de turbina de gas y de vapor*

<b>Indicadores</b>	<b>Felipe Ahuar</b>	<b>Martí</b>
Generación anual de energía (GW)	0,63	0,15
Potencia a instalar (kW)	270	67
Costos unitarios de instalación. (USD/kW)	6 000	5 500
Costos de instalación (USD)	1 890 000	368 500
Tiempo de recuperación (años)	18	18

## **Diseño y construcción de un gasificador de lecho fluidizado a escala de laboratorio para el tratamiento térmico de los residuos de tabaco**

### **Design and construction of a fluidized bed gasifier at laboratory scale for the heat treatment of tobacco residues**

*Ing. Luis Manuel García Rojas  
Ing. Leonardo Aguiar Trujillo  
Ing. Elier González Hernández  
Dr. Francisco Márquez Montesino  
Dra. Leyla R. Carballo Abreu  
Universidad de Pinar del Río, calle Martí,  
No. 270, Pinar del Río, CP 20100 , Cuba.  
Tel.: 779661 y 775452.  
FAX: 825479.  
e-mail: luism@meca.upr.edu.cu*

#### **Resumen**

A partir del análisis inmediato y elemental de los residuos del tabaco se estudió la posibilidad de su descomposición térmica mediante un método termoquímico, en este caso la gasificación. Esto permitió diseñar y construir un gasificador de lecho fluidizado capaz de lograr estos requerimientos; tiene como fuente de calor una resistencia eléctrica y para garantizar una correcta fluidización de la biomasa se utilizó arena en la proporción de 20 gramos cada 100 g de biomasa.

**Palabras clave:** Gasificador de lecho fluidizado, residuos de tabaco, gasificación termoquímica.

#### **Abstract**

Starting from a basic analysis of the tobacco residues it was studied the possibility of its thermal degradation through a thermochemical method, in this case gasification. This allowed designing and constructing a fluidized bed gasifier of with the following requests: the heat source is an electrical resistance and to guarantee a correct fluidization of the biomass it was used sand in a proportion of 20 g every 100 g of biomass.

**Keywords:** fluidized bed gasifier, tobacco residues, thermochemical gasification

#### **Introducción**

La comunidad científica a nivel mundial trabaja en el desarrollo de nuevas tecnologías que permiten el aprovechamiento energético de los agrícolas e industriales, permitiendo incrementar el valor económico de diferentes materiales.

Nuestro país se ha incorporado a trabajar en este sentido llevando a cabo diferentes tecnologías que permitan el aprovechamiento de estos

residuos como nuevas vías de energía, y de esta forma sustituir importaciones y obtener nuevas fuentes de ingresos.

La gasificación forma parte de estas tecnologías y en este caso se utilizará como materia sólida los residuos de tabaco. En un gasificador de lecho fluidizado se sopla aire a través de un lecho de partículas sólidas a la velocidad suficiente para mantenerlas en estado de suspensión, comenzando por calentar externamente el lecho, en nuestro caso con una resistencia eléctrica; el material de alimentación (residuos de tabaco) se introduce tan rápido como se alcanza una temperatura suficientemente elevada. Las partículas del combustible se introducen en el lecho del reactor, se mezclan rápidamente con el material del lecho y se calientan casi instantáneamente, alcanzando así la temperatura de este.

Como resultado de este tratamiento, el combustible se pirolisa muy rápidamente, dando como resultado una mezcla de componentes con una cantidad relativamente elevada de materiales gaseosos, la fase de gas se reproduce una nueva gasificación y reacciones de los alquitranes. Nuestra instalación va equipada con un ciclón interno, a fin de reducir el mínimo de escape de partículas sólidas por soplado. Las partículas de ceniza se extraen también por la parte inferior del reactor y en el ciclón, debiendo extraerse de la corriente de gas si este se emplea en aplicaciones para motores.

La industria tabacalera en Cuba genera anualmente alrededor de cinco mil toneladas métricas de residuos sólidos en forma de rapé, vena, polvos y otros que no son utilizados.

### **Objetivo**

Diseñar y construir un reactor de lecho fluidizado para el aprovechamiento energético de los residuos de tabaco.

### **Materiales y métodos**

Inicialmente se tomaron varias muestras de residuos de tabaco en diferentes instalaciones donde se procesa el tabaco; se reducen a partícula; la muestra homogeneizada se seca al aire y se tamiza; se toma la porción menor de 200 micras de diámetro. Se guarda en frascos con tapa para su conservación y posterior análisis inmediato (volátiles, ceniza, carbono fijo).

Para conocer la composición química de estos residuos se tomó el análisis elemental que aparece en el sitio de Internet [www.ecn.nl/phyllis](http://www.ecn.nl/phyllis). Conociendo los elementos fundamentales que componían el residuo se le determinó el aire estequiométrico que necesitaba para su combustión, este valor es necesario para que una vez fijada la relación estequiométrica con déficit de oxígeno óptima para la gasificación (alrededor de 30 %) y el flujo de residuos que se va a alimentar, poder determinar la cantidad de aire que se introduce en el lecho del gasificador, que garantiza el correcto funcionamiento de la instalación, a

partir de fijarle una temperatura con que se debe trabajar, que en nuestro caso se tomó 800 °C .

Según la metodología propuesta por Kunii y Daizo [1991] se determinaron los parámetros fundamentales del gasificador (diámetro del reactor, diámetro del tubo de extracción de ceniza, altura del lecho, altura total del gasificador, diseño del ciclón, etc.).

Como fuente de calor para el gasificador se utiliza un horno con resistencias eléctricas construido para estos fines.

### Resultados y discusión

El valor en tanto por ciento en base seca del análisis inmediato obtenido después de un procesamiento estadístico, es el siguiente:

*Tabla 1. Análisis inmediato de los residuos de tabaco*

<b>Materia</b>	<b>% volátiles y carbono fijo</b>	<b>% ceniza</b>	<b>% humedad</b>
Residuos de tabaco	92,76	2,40	4,84

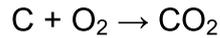
Como se demuestra, el residuo aporta más de 90 % de su composición a gas, lo que lo favorece a la hora de gasificarlo.

El análisis elemental de la muestra es el siguiente:

*Tabla 2. Análisis inmediato de los residuos de tabaco*

<b>Composición</b>	<b>Análisis en base seca %</b>	<b>Peso en gramos con respecto a los 405 g/h de residuos alimentados</b>
Hidrógeno	4,28	19,3
Carbono	40,92	184,1
Nitrógeno	0,48	2,1
Azufre	0,00	0,00
Oxígeno	47,08	211,9
Ceniza	2,40	10,8
Humedad	4,84	21,8

En la descomposición térmica a partir de la combustión el oxígeno reacciona con el hidrógeno, carbono ya que no hay azufre en estos residuos; esto permite obtener el aire estequiométrico para que aparezca la combustión.



Para obtener los mol/h de oxígeno en estas reacciones debemos primeramente dividir el flujo de carbono y de hidrogeno (los flujos de los compuestos químicos dependen del valor total de residuo que se asume y será alimentado, cuyo valor es de 450 g/h) por sus respectivas masas moleculares (12 y 4, respectivamente); sumarlos después y el resultado sería el oxígeno estequiométrico igual a 20,2 mol/h. Con este valor se calcula el caudal de aire que se debe introducir en la instalación a partir de la siguiente expresión:

$$Ga = (RE * \text{mol/h } O_2 / 100) * (1 + (100 - \%O_2) / \%O_2) * 22,4 / 1000.$$

Donde:

Ga: Caudal de aire Nm<sup>3</sup>/h.

RE: Relación estequiométrica óptima para gasificar (30 %).

Mol/h: Oxígeno son los calculados (20,2 mol /h).

% O<sub>2</sub> : % de oxígeno en el aire (21 %).

Sustituyendo los valores en la expresión anterior el caudal obtenido es de 0,645 Nm<sup>3</sup> /h. La N de la unidad de medida está referida a condiciones normales para el aire, o sea, 1 atm y 273 K.

A partir de este momento se comienzan a calcular los parámetros de diseño del gasificador a través de los pasos siguientes:

1. Superficie del reactor m<sup>2</sup> .

$$Srea = Ga * (273+Tg)/273/ Rvel/ vmf/3600$$

Donde:

Srea: Superficie del reactor (m<sup>2</sup> ).

Tg: Temperatura del gasificador 800 °C .

Rvel: Veces que la velocidad del aire es superior a la mínima de fluidización (6).

Vmf: Velocidad mínima de fluidización cuyo valor es función de las propiedades del aire y de la arena (la arena se mezcla con el residuo para facilitar la gasificación), del número de Reinol y de Arquímedes. Esta velocidad se calcula según Kunii y Daizo [1991] y el valor resultante fue de 0,006 m/s.

2. Superficie del tubo de extracción de ceniza.

$$Ste = 3,1416 * Dte^2 / 4.$$

Donde:

Ste: Superficie del tubo de extracción (m<sup>2</sup> ).

Dte: Diámetro del tubo de extracción (fijamos un valor 0,015 m )

3. Diámetro del reactor.

$$Dr = ((Srea + Ste) * 4 / 3,1416)^{0,5} .$$

4. Velocidad de trabajo.

$$Wt = Ga * (273 + Tg) / 273 / Srea / 3600$$

Donde:

Wt: Velocidad de trabajo (M/s).

5. Altura del gasificador

$$Hg = Ln ((1 - 0,4) / fag) * Wt / 5 + Hl$$

Donde:

Hg: Altura del gasificador (m).

Fag: Fracción de arena en gas ( 0,000010 g arena/ g gas).

Hl: Altura del lecho (se fija en 0,2 m ).

Los valores obtenidos para los siguientes parámetros fueron: Srea = 0,002, Ste = 0,0001767 m<sup>2</sup> , Dr = 0,053 m , Wt = 0,35 m/s y Hg = 0,98 m . El gasificador construido se muestra en la figura 1.

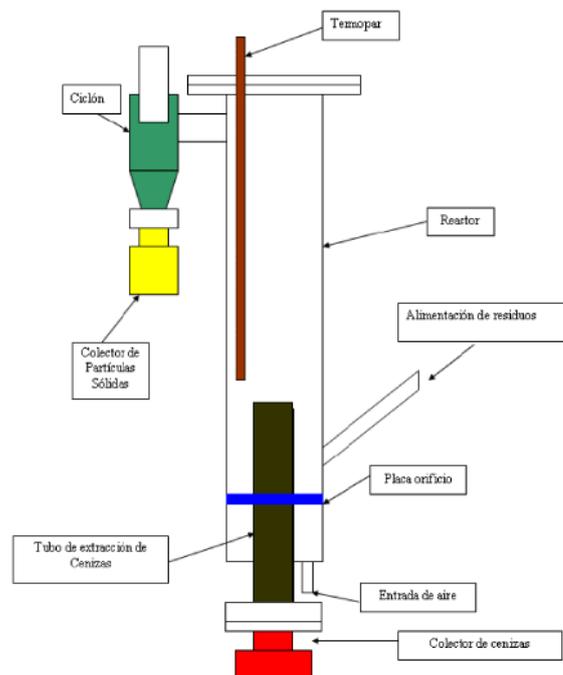


Fig. 1. Gasificador de lecho fluidizado.

## Conclusiones

1. A partir de esta metodología se puede diseñar y construir un gasificador en el cual se pueden estudiar, además de los residuos de tabaco, otras materias existentes en la provincia
2. Se puede utilizar el horno de resistencia eléctrica existente en nuestros laboratorios como fuente de calor.
3. Es necesario utilizar arena para facilitar la fluidización de los residuos de tabaco debido a la poca densidad de estos.

## Bibliografía

- ARAUZO, J.; D. RADLEIN, J. Piskorz, y D. S. Scott. (1997). «Catalytic Pyrogasification of Biomass. Evaluation of Modified Nickel Catalyst». *Ind. Eng. Chem. Res.*, 36, 1997.
- AZNAR, M.P.; J. CORELLA, J. DELGADO y J. LAHOZ. «Improved Steam Gasification of Lignocellulosic Residues in a Fluidized Bed with Commercial Steam Reforming Catalysts». *Ind. Eng. Chem. Res.*, 32, 1993.
- ALZUETA, M.U.; R. BILBAO, A. MILLERA, P. GLARBORG, M. OSTBERG y K. DAM-JOHANSEN. «Modelling Low Temperature Gas Reburning. NO<sub>x</sub> Reduction Potential and Effects of Mixing». *Energy & Fuels*, 12, 1998 (2).
- BRIDGWATER, A. V. «The Technical and Economic Feasibility of Biomass Gasification of Power Generation». *Fuel*, 74, 1995.
- GARCÍA, P.; R. BILBAO, J. ARAUZO Y M. L. SALVADOR. «Scale-up of Downdraft Moving Bed Gasifiers (25-300 kg/h)-Design Experimental Aspects and results». *Bioresource Technology*, 1994.
- GARCÍA, L. « Pirólisis y gasificación con vapor de agua de biomasa a bajas temperaturas en lecho fluidizado con catalizadores Ni/Al». Tesis Doctoral. Universidad de Zaragoza, 1997.
- GARCÍA, L.; M. L. SALVADOR, J. ARAUZO y R. BILBAO. «Catalytic Steam Gasification of Pine Sawdust. Effect of Catalyst Weight/Biomass Flow Rate and Steam/Biomass Ratios on Gas Production and Composition». *Energy & Fuels*, 13, 1999.
- GARCÍA, L.; M. L. SALVADOR, J. ARAUZO Y R. BILBAO. «CO<sub>2</sub> as a gasifying agent for gas production from pine sawdust at low temperatures using Ni/Al coprecipitated catalyst». *Fuel Process. Technol.*, 69, 2001.
- HERGUIDO, J.; J. CORELLA y J. GONZÁLEZ. «Steam Gasification of Lignocellulosic Residues in a Fluidized Bed at a Small Pilot Scale. Effect of the Type of Feedstock». *Ind. Eng. Chem. Res.*, 31, 1992.
- KUNII, D. Fluidization energuillering. 1991.
- PARKINSON, G. Y K. FOUHY. «Gasification: New Life for an Old Technology». *Chem. Eng.*, 1996.
- NARVÁEZ, I.; A. ORÍO, M. P. AZNAR y J. CORELLA. «Biomass Gasification with Air in an Atmospheric Bubbling Fluidized Bed». Effect of Six Operational, 1996.

**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](mailto:editora@cubasolar.cu)

<http://www.cubasolar.cu>