



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTRAL DE CUBASOLAR

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

**27**



<b>Elaboración de una metodología para el estudio experimental de la digestión anaerobia de agrosresiduos, en particular residuos cañeros.....</b>	<b>1</b>
<b>Propuesta de una metodología para la descripción de la rugosidad en Cuba.....</b>	<b>13</b>
<b>Metodología integral para el proyecto y la explotación de las centrales hidroeléctricas con embalse regulador.....</b>	<b>27</b>
<b>Efecto del espacio muerto e irreversibilidades del regenerador sobre el comportamiento del ciclo de un motor Stirling.....</b>	<b>38</b>
<b>Evaluación preliminar de las externalidades atmosféricas provocadas por el transporte automotor.....</b>	<b>52</b>
<b>Posicionamiento del rotor y la cola de un pequeño aerogenerador de eje horizontal debido a la influencia de los coeficientes de arrastre y sustentación que afectan la veleta de cola.....</b>	<b>62</b>

## **Elaboración de una metodología para el estudio experimental de la digestión anaerobia de agroresiduos, en particular residuos cañeros**

### **Development of a methodology for the experimental study of the anaerobic digestion of agricultural wastes, particularly sugar cane residues**

*Lic. Mabelin Benitez Fonseca\*, Dr. José Antonio Suárez Rodríguez\*  
y M.Sc. Maikel Fernández Boizán\*\* \*  
Centro de Estudio de Biotecnología Industrial, Cuba.\*\*  
Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES), Cuba.*

#### **Resumen**

En este trabajo se realiza una exposición sobre las características y el uso de la biomasa desde el punto de vista energético y medioambiental, en particular sobre la hoja de la caña. Se exponen, además, los aspectos teóricos de la digestión anaerobia y las perspectivas de este proceso para la producción de biogás en Cuba. Basado en la experiencia alcanzada en la degradación anaerobia de la hoja de la caña de azúcar, desarrollada en el Centro de Investigaciones de Energía Solar, además de otros resultados reportados en la literatura, se propone en este trabajo una metodología que permita conducir los estudios experimentales en condiciones de laboratorio de la biodegradabilidad de agroresiduos de interés energético para el país.

**Palabras clave:** Agroresiduos, digestión anaerobia, caña de azúcar.

#### **Abstract**

This paper presents a discussion on the characteristics and the use of biomass from the energy and environmental points of view, in particular on sugar cane leaves. Besides, the paper presents the theoretical aspects of the anaerobic digestion and the perspectives of this process for the production of biogas in Cuba. Based on the experience attained in the anaerobic degradation of the sugar cane leaves, at the Solar Energy Research Center, in addition to other results reported in the scientific literature, the paper also presents a methodology that enables conducting the experimental studies under laboratory conditions of biodegradable agricultural wastes energy carriers acknowledged as important for the country.

**Key words:** agricultural wastes, anaerobic digestion, sugar cane

#### **Introducción**

La generación de energía a partir de biomasa es una de las vías con mayor potencialidades en fuentes renovables para nuestro país, con un potencial estimado en el orden de las 176 000 toneladas de combustible equivalente anuales; 78 millones de metros cúbicos de vertimientos biodegradables se

concentran en las fábricas de azúcar, destilerías de alcohol y despulpadoras de café [Indicadores..., 2003].

La hoja de la caña, con un poder calórico de 17 MJ/kg, es energéticamente similar al bagazo y representa alrededor de 3% del peso de la caña cortada. Sólo algunas cantidades están siendo combustionadas en calderas de vapor y el resto se quema en los alrededores de los centros de limpieza de la caña, sin ninguna utilidad energética y creando significativos problemas medioambientales [Suárez y Beatón, 2007].

Además de los residuos sólidos de la caña de azúcar, existen otros residuos de la agricultura que tampoco son explotados energéticamente y que también son degradados al medio ambiente, provocando malos olores, la acumulación de insectos indeseados en lugares de tránsito de personas, etc. Para eliminar esta acumulación de biomasa es necesario desarrollar aún más tecnologías que hoy el mundo emplea para beneficio propio y de la atmósfera terrestre. Por ejemplo, la degradación anaerobia, indistintamente de la tecnología que se emplee, es una forma para garantizar que la energía que se produce espontáneamente de la degradación de la biomasa sea utilizada para generar energía en forma de biogás.

En el Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES) se realiza un estudio sobre la degradación anaerobia de la hoja de la caña de azúcar, el cual se encuentra ahora en fase de ensayos de laboratorio.

Como la mayoría de estos residuos, provenientes de la agricultura y de los desechos urbanos, tienen gran contenido de materia lignocelulósica, por lo que su degradación es un tanto prolongada y dificultosa, es necesario realizar ensayos previos que permitan conocer el tiempo del proceso y la cantidad de energía que se puede obtener de la degradación anaerobia de un agroresiduo que se estudie.

Objetivo general:

Elaborar una metodología que permita desarrollar el estudio de la degradación anaerobia de agroresiduos.

Objetivos específicos:

1. Mostrar los avances y perspectivas del uso de los agroresiduos para la producción de biogás, con particular énfasis en la hoja de la caña de azúcar.
2. Proponer una metodología para el estudio de la biodegradabilidad de agroresiduos en condiciones anaerobias.

## **Desarrollo**

### *Aspectos generales del uso de la biomasa*

Un aspecto relevante de la conversión de la energía solar que realizan las plantas radica en la enorme variedad de productos que resultan del proceso, los que constituyen en conjunto el material denominado biomasa vegetal, propio de los diferentes organismos que integran la flora terrestre: desde las bacterias fotosintéticas y las algas microscópicas hasta los árboles gigantes. La biomasa vegetal ha sido utilizada en gran escala con fines energéticos; sin

embargo, hay factores que dificultan y limitan el aprovechamiento de una parte considerable de la misma.

En Cuba se lleva a cabo un programa de desarrollo para la explotación eficiente de fuentes renovables de energía. Gran interés se le ha dedicado especialmente a la biomasa, debido a la gran cantidad producida cada año, como las hojas y el bagazo de la caña, la cáscara de arroz, la de café y la leña. La combustión es la forma más común de empleo de estas fuentes de energía en nuestro país. Frecuentemente ésta se practica en instalaciones ineficientes, causando una gran contaminación medioambiental [Suárez y Beatón, 2000].

*La caña de azúcar como acumuladora principal de biomasa.*

La agroindustria cubana de la caña de azúcar es la fuente más importante de biomasa con que cuenta el país para el desarrollo de las fuentes renovables, y actualmente constituye la única a partir de la cual se está generando electricidad, con conexión a la red [Suárez y Morín, 2005].

Hoy en Cuba existen alrededor de 50 ingenios azucareros en operación, con aproximadamente una cosecha total de caña de 11 millones de toneladas por año. La hoja de la caña, con un poder calórico de 17 MJ/kg, es energéticamente similar al bagazo y representa alrededor de 3% del peso de la caña cortada, tiene una forma alargada, baja densidad aparente y alto contenido de cenizas de 9,3% [Suárez y Beatón, 2007]. Las características del bagazo y los residuos agrícolas cañeros como combustibles son las que se muestran en la tabla 1.

*Tabla 1. Composición química del bagazo y los residuos agrícolas cañeros (RAC)*

<b>Elementos químicos</b>	<b>Bagazo, %</b>	<b>RAC, %</b>
Carbono	47,0	48,28
Hidrógeno	6,50	5,55
Oxígeno	44,0	45,61
Cenizas	2,50	9,50
Azufre	0,02	0,13
Nitrógeno	0,001	0,43

En la tabla 2 se puede observar el contenido de materia orgánica que tiene la hoja de la caña de azúcar, representado en la celulosa (45%), la lignina (14%) y las pentosanas (26%), material que es posible degradar en un proceso de digestión anaerobia [Padilla, 2006].

Tabla 2. Composición química de la hoja de la caña

Componente	Paja integral, %	Paja preparada, %
Celulosa	45,13	44,84
Lignina	14,11	12,73
Pentosanas	25,56	29,63
Cenizas	8,03	7,61
Pectina	4,28	4,24
Solubilidad en:		
H2O fría	9,78	10,28
H2O caliente	13,35	13,49
Alcohol- benceno	3,54	3,85
Hidróxido de sodio	49,29	49,09
Humedad	9,67	9,64

#### *Proceso de digestión anaerobia*

La digestión anaerobia es un proceso biológico por el cual, a través de una compleja serie de reacciones bioquímicas, la materia orgánica se descompone por la actividad metabólica de los microorganismos en ausencia de oxígeno, produciendo un gas con alto contenido energético (biogás) y un lodo residual que presenta en muchos casos un alto poder fertilizante [Páez y Baz, 1999].

La digestión anaerobia se desarrolla en tres etapas: en la primera etapa, denominada de hidrólisis y fermentación o acidogénesis, los organismos hidrolíticos se encargan de hidrolizar los compuestos orgánicos complejos a compuestos más simple que luego son convertidos por las bacterias fermentativas o acidogénicas en ácidos grasos de cadenas cortas. En la segunda etapa los productos de la fermentación son degradados a ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno, por un grupo de bacterias denominadas acetogénicas, productoras obligadas de hidrógeno (OHPA). En la última etapa las bacterias anaerobias metanogénicas producen metano a partir del ácido acético (bacterias acetoclásticas) y a partir de hidrógeno y el dióxido de carbono (bacterias hidrogenofílicas).

En este proceso de digestión anaerobia influyen varios factores, como:

1. Temperatura: El rango óptimo es el mesofílico (30-45 °C).
2. Efecto del pH: El pH óptimo para mantener el equilibrio ecológico se sitúa entre 6,8 y 7,2 [Rozzi, 1984].
3. Nutrientes: Se requieren ciertos nutrientes, como el nitrógeno, fósforo, azufre y elementos trazas como el níquel, cobre, hierro y molibdeno. La relación C/N influye sobre la producción de biogás; esta será óptima cuando oscile entre 20:1 y 30:1.
4. Sustancias tóxicas: Compuestos cuya toxicidad esta relacionada con el pH, como el amoniaco, el ácido sulfúrico y los ácidos grasos volátiles, AGV.

Compuestos de toxicidad inmediata: los clorados del metano, los hidrocarburos aromáticos, el oxígeno, etc. Compuestos que con un pequeño aumento de la concentración pueden volverse tóxicos: iones metálicos, en particular los metales pesados.

#### *Perspectivas de la producción de biogás en Cuba*

La tecnología del biogás fue introducida en Cuba a principios de 1940 en una fábrica de cerveza del Cotorro, en La Habana; y un programa para introducción de esta tecnología fue iniciado por el Movimiento Nacional del Biogás en 1990. En el siglo XXI se cuenta con unas 500 instalaciones de biogás, principalmente con diseños chinos e hindúes [Suárez y Beatón, 2007].

La mayor planta de biogás en Cuba está localizada en la destilería Heriberto Duquesne, en la ciudad de Remedios, en la provincia de Villa Clara [González, 2007].

En Ciudad de La Habana hay un total de 13 plantas de biogás en funcionamiento, las cuales tienen gran impacto social y ambiental. Se construyó también el primer relleno sanitario, pues los desechos sólidos urbanos constituyen también una vía de contaminación en el mundo.

En la provincia de Las Tunas existen 49 digestores de biogás, de ellos 23 estaban en funcionamiento, y se piensa echar a funcionar los que están parados, además de la construcción de varios digestores más [Díaz, *et al.*, 2006].

En la provincia de Matanzas hay un total de 181 plantas de biogás, de ellas 19 plantas pertenecen al sector estatal y 162 plantas al sector privado [ARINSEMA, 2004].

En la provincia de Sancti Spíritus actualmente se cuenta con un total de 6 plantas en el sector privado y estatal con diferentes diseños [Savran, 2006].

En la provincia de Santiago de Cuba en el 2006 existían 13 digestores, la mayoría particulares, y en la actualidad se trabaja en la construcción de otros, como la edificación de un biodigestor chino en El Brujo, con estiércol porcino. Además, se está llevando a cabo un proyecto de construcción de un relleno sanitario en el Distrito José Martí.

En muchas provincias de Cuba se explota grandemente la energía del biogás; sin embargo, aún existen lugares que se tiene poca cultura sobre este tema y sobre otros usos de la biomasa como fuente renovable de energía, por lo que se han creado 14 grupos de trabajo del sector energético, los que tienen la misión del desarrollo y generalización de estas tecnologías para la utilización de las fuentes energéticas renovables.

Es de interés conocer que existe una cantidad enorme de esta biomasa sobre la cual se están estudiando diferentes formas de uso energético. Por ejemplo, la industria de madera aserrada produce aproximadamente 70 000 m<sup>3</sup> de residuos cada año, en la industria cafetalera se producen cada año 5 600 t de cascarilla solamente, anualmente también se producen 3 000 t de cascarilla de

arroz, etc. En general, estos residuos son combustionados para la generación de energía directamente.

En el mundo se están desarrollando tecnologías para la producción del biogás a partir de estos tipos de residuos lignocelulósicos, incluso en algunas partes se siembra el pasto para luego llevarlo a la generación de energía, produciendo biogás. En nuestro país se están haciendo estudios para el aprovechamiento de estos residuos en la generación de biogás. Para facilitar estos estudios es necesario seguir una metodología apropiada para tener una producción eficiente cuando se lleve a cabo un proyecto en el que se tenga como objetivo la producción de energía en forma de biogás partiendo de residuos lignocelulósicos.

### **Metodología para la degradación anaerobia de agroresiduos**

Los materiales de origen lignocelulósico pueden utilizarse como sustrato para la producción de biogás; su descomposición se prolonga más que la de otros materiales, debido al componente lignocelulósico que presentan en la estructura de sus tejidos.

#### *Cálculo del rendimiento teórico de biogás*

La relación entre los compuestos orgánicos de los agroresiduos y su productividad, es un factor importante para determinar el rendimiento de biogás del proceso. En la tabla 3 se pueden encontrar estos rendimientos, calculados por 1 g de material seco [Thi, 2005].

*Tabla 3. Rendimientos de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> de 1 g de material seco.*

<b>Compuesto</b>	<b>CH<sub>4</sub>, mL/g ST</b>	<b>CO<sub>2</sub>, mL/g ST</b>
Carbohidratos	0,37	0,37
Proteínas	0,49	0,49
Lípidos	1,04	0,36

Aunque los materiales de descomposición son generalmente abundantes en materia orgánica, sus principales componentes son carbohidratos, proteínas y lípidos. Por esta razón, la ecuación aplicada para el cálculo del rendimiento teórico está basada en estos compuestos [Thi, 2005].

$$E = 0,37A + 0,49B + 1,04C$$

$$D = 0,37A + 0,49B + 0,36C$$

Donde:

*E*: Rendimiento teórico de metano.

*D*: Rendimiento teórico de dióxido de carbono.

*A*: Cantidad de carbohidratos.

*B*: Cantidad de proteína.

*C*: Cantidad de lípido que contiene 1 g del material de descomposición.

Para evaluar la viabilidad de la aplicación de sistemas de tratamiento anaerobios de un residuo sólido, es preciso conocer detalladamente sus características fisicoquímicas (sólidos totales, componentes orgánicos, celulosa, lignina, cenizas, etcétera).

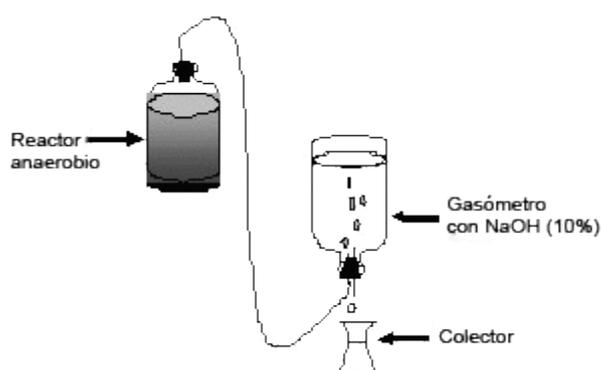
Además, es necesario tener en cuenta los factores biológicos dentro de un digester y las condiciones degradativas del sustrato, por lo que es necesario realizar algunos ensayos biológicos importantes, los cuales son:

1. Ensayo de actividad metanogénica del inóculo.
2. Ensayo de toxicidad de los componentes del sustrato.
3. Ensayo de biodegradabilidad anaerobia del sustrato.

#### *Ensayo de actividad metanogénica*

El ensayo de actividad metanogénica se realiza en experimentos batch, en los cuales se usa como sustrato una determinada fuente de carbono (glucosa, ácidos grasos volátiles, entre otros) para la producción de metano.

Antes de realizar el ensayo es necesario determinar los sólidos volátiles (SV) que contiene el inóculo, para poder estimar la cantidad de microorganismos presentes en el mismo. Durante el ensayo se mide la producción de metano acumulada, por el método de desplazamiento de líquido de una solución alcalina (Fig. 1). El experimento no debe durar más de tres días, ya que ese es precisamente el tiempo de duplicación de las bacterias metanogénicas. La solución alcalina (NaOH a 5%) absorbe el CO<sub>2</sub> producido, midiéndose solamente el metano. Como bioreactor se pueden emplear botellas serológicas o cualquier otro recipiente de vidrio con tapón de goma que cierre hermético, al cual se le añade una cantidad de inóculo que alcance una concentración de sólidos volátiles de 1 a 5 g SV/L en el reactor y se completa con la solución del sustrato a una concentración entre 2 y 4,5 g DQO/L, en dependencia si el medio es agitado o no.



*Fig. 1. Sistema de cuantificación de metano.*

### *Condiciones experimentales*

Para realizar el ensayo de actividad metanogénica con precisión es necesario asegurar las condiciones óptimas y constantes.

- La temperatura debe ser constante y preferiblemente en el rango mesofílico (35-40 °C) durante el ensayo.
- Mantener el pH cercano a 7.
- El medio también necesita algunos nutrientes para el desarrollo de los microorganismos (su composición la describe Méndez [1997]); este medio se puede reemplazar con sólo utilizar agua común y no agua destilada.
- Para asegurar condiciones anaerobias del medio, se adicionan 2,5 mL de una solución de 10 g/L de Na<sub>2</sub>S\*39H<sub>2</sub>O [Méndez, 1997].

### *Cálculo de la actividad metanogénica*

Cuando se tienen todas las mediciones, se grafican los valores de producción acumulada de metano contra tiempo, permitiendo calcular la pendiente (*m*) de esta curva [Méndez, 1997]:

$$m = \Delta \text{prod. acum. CH}_4 \text{ (ml)} / \Delta t \text{ (d)}$$

Donde:

$\Delta \text{prod. acum. CH}_4$ : Variación de la producción acumulada de metano.

$\Delta t \text{ (d)}$ : Variación del tiempo en día.

Con este valor de la pendiente y los gramos de sólidos volátiles g(SV) del inóculo utilizados, se puede calcular la actividad metanogénica (AME) por la fórmula siguiente [Méndez, 1997]:

$$AME = m / 0,34 \times g(SV),$$

Se expresa en g DQO<sub>CH<sub>4</sub></sub>/ g SV x d

Donde:

Los g(SV) se obtienen a partir de la concentración de los sólidos volátiles y el volumen del inóculo que se añade.

El factor 0,34 indica que por cada gramo de DQO (demanda química de oxígeno) que se degrada, se obtiene esta cantidad de metano y se expresa en mL de CH<sub>4</sub>/g DQO.

### *Ensayo de toxicidad*

El objetivo de este ensayo es la determinación del porcentaje de actividad metanogénica que pierde el inóculo en presencia de un compuesto inhibitorio.

La metodología de este ensayo es prácticamente la misma empleada en la determinación de la actividad metanogénica [Méndez, 1997].

### *Ensayo de biodegradabilidad anaerobia*

La biodegradabilidad anaerobia se define como la fracción máxima de materia

orgánica susceptible de ser eliminada por digestión anaerobia en determinadas condiciones de operación. Este ensayo permite determinar la fracción de sólidos totales que se degradada anaeróbicamente.

Para este ensayo es necesario conocer el porcentaje de sólidos volátiles dentro del digestor al inicio y al final del proceso de digestión anaerobia. En este ensayo, al igual que en el de AME, se mide la producción acumulada de metano para poder determinar el rendimiento.

Cuando se tiene un inóculo donde la degradación de sus sólidos volátiles es mucho mayor que la del sustrato, es necesario montar otro biodigestor como blanco o control que contenga solamente los mismos gramos de SV de la solución del inóculo empleados en los demás biodigestores, con el propósito de determinar la cantidad de materia orgánica que puede ser degradada y tenerlo en cuenta a la hora de realizar los cálculos del ensayo y conocer la cantidad de materia orgánica del sustrato que se degrada.

#### *Condiciones experimentales*

Para realizar este ensayo se requiere de determinadas condiciones experimentales.

- La mezcla debe estar homogeneizada para que los microorganismos accedan al sustrato con facilidad.
- En el bioreactor se introduce una mezcla del sustrato y el inóculo de una concentración de sólidos volátiles de 1 a 5%, en dependencia del tipo de sustrato, su contenido lignocelulósico y la AME del inóculo.
- La concentración de sólidos volátiles en el sustrato no debe superar 5% para que no se produzca acumulación de AGV y el pH disminuya.
- Mantener el pH del medio constante y cercano a 7 (si es necesario añadirles soluciones de HCl o NaOH, según corresponda).
- Después de tapar los biodigestores, éstos deben ser burbujeados con una mezcla de gas N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> 70%: 30% durante 2 minutos y se elimina la sobrepresión para que la misma inicialmente sea de 1 at [Méndez, 1997].

#### *Cálculos a realizar en el ensayo de biodegradabilidad*

Una vez determinado el porcentaje de sólidos volátiles al inicio y al final del proceso dentro del digestor, se puede calcular el porcentaje de remoción a partir de la fórmula siguiente:

- $\% \text{ remoción} = (\%SV_{inc.} - \%SV_{fin.}) / \%SV_{inc.}$

Donde:

$\% SV_{inc.}$ : Porcentaje de sólidos volátiles al inicio del proceso.

$\% SV_{fin.}$ : Porcentaje de sólidos volátiles al final del proceso.

- $\text{Rendimiento de metano} = V (CH_4) / g SV$

Donde:

$V (CH_4)$ : Volumen de metano producido por g de sólidos volátiles degradados (g SV).

También se puede determinar:

- % de conversión del contenido de fibra por el método de fibras en detergente neutro, expresado en inglés como *neutral detergent fiber* (NDF) [Han-Quing y Zhen-Hu, 2004].
- Actividad enzimática de las bacterias hidrolíticas, determinando en el medio la formación de ácidos grasos volátiles (AGV), mediante un cromatógrafo de gases y determinando la reducción del contenido de carbono total o azúcares.
- Caracterización del biogás mediante un cromatógrafo de gases para conocer el contenido de metano.

Cuando se tienen todos los resultados de los ensayos realizados al agroresiduo en estudio, se puede entonces llevar la degradación del mismo a un proceso de escala industrial, estableciendo todas condiciones estudiadas previamente.

## Conclusiones

1. Se puede constatar que el contenido de materia orgánica que tiene la hoja de la caña de azúcar, representado en la celulosa con 45%, la lignina con 14% y las pentosanas con alrededor de 26%, favorece en cierta medida su degradación en un proceso de digestión anaerobia.
2. Actualmente los agroresiduos constituyen aproximadamente 96% del potencial de energía renovable del país y su aprovechamiento es muy limitado debido a la poca disponibilidad de tecnologías, a pesar de que se conocen sus propiedades fisicoquímicas y recursos para su construcción, reparación y mantenimiento.
3. Con el estudio de las propiedades fisicoquímicas del agroresiduo, que se desea degradar, podemos tener un rendimiento teórico de la producción de metano y dióxido de carbono del proceso en condiciones anaeróbicas.
4. Con la metodología propuesta es posible realizar estudios experimentales sobre biodegradabilidad de agroresiduos a escala de laboratorio, en los que se pueden obtener parámetros como el rendimiento de metano, el porcentaje de remoción de sólidos volátiles, el porcentaje de conversión de fibras, entre otros, lo que permite crear una línea de opinión sobre la degradación de la materia orgánica.

## Bibliografía

- BOUALLAGUI, H.; Y. TOUHAMI, R. BEN CHEIKH AND M. HAMDÍ. «Bioreactor Performance in Anaerobic Digestion of Fruit and Vegetable Wastes», *Process Biochemistry* (40): 989-995, 2005.
- ARINSEMA. «Censo de digestores construidos en Matanzas», en III Simposio Internacional de Arquitectura e Ingeniería al Servicio del Medio Ambiente. Camaguey: 13-15 de mayo, 2004.
- CORUJO, M. «Censo de los digestores construidos en Ciudad de La Habana», en *X Taller Nacional, Actualización y perspectiva para la producción de biogás en Cuba*, 27-29 de marzo de 2006. Sancti Spiritus: Ed. Feijóo, 2006. ISBN 939-203-247-1.
- DÍAZ, M.; R. YORDAN Y A. LEIVA. «Digestores de biogás en las Tunas», en *X Taller Nacional, Actualización y perspectiva para la producción de biogás en Cuba*, 27-29 de marzo de 2006. Sancti Spiritus: Ed. Feijóo, 2006. ISBN 939-203-247-1.
- GONZÁLES, O. «Construyen en destilería avileña planta de biogás». *Granma*, LaHabana: 2, may., 7, 2007.
- HAN-QUING, Y. AND H. ZHEN-HU. «Application of Rumen Microorganisms for Enhanced Anaerobic Fermentation of Corn Stover», *Process Biochemistry* (40): 2371-2377, 2005.
- HAN-QUING, Y. AND H. ZHEN-HU. «Anaerobic digestion of cattail by rumen cultures», *Waste Management* (26): 1222-1228, 2006.
- HILBERT, J. A. *Manual para la producción de biogás*. Instituto de Ingeniería Rural". I.N.T.A.-Castelar, pp. 30, 1992.
- «Indicadores socioeconómicos de Cuba», *Revista Panorama Económico y Social de Cuba*.  
[www.medioambiente.cu/download/2003/Indicadores%20socioecon%F3micos.pdf](http://www.medioambiente.cu/download/2003/Indicadores%20socioecon%F3micos.pdf). 2003.
- PADILLA, J. Y J. CORREA. *Utilización de los residuos. Industria de los derivados de la caña de azúcar*. La Habana: Ed. Científico-Técnica, 2006.
- KIVAI, A. K. Y S. ELIAPENDA. «Application of Rumen Microorganisms for Enhanced Anaerobic Degradation of Bagasse and Maize Bran», *Biomass and Bioenergy*, 8, (1): 45-50, 1995.
- LLABRÉS-LUENGO, P. Y J. MATA-ÁLVAREZ. «Influence of Temperature, Buffer, Composition and Straw Particle Length on Anaerobic Digestion of Wheat Straw – Pig Manure Mixtures», *Resources, Conservation and Recycling*, (1): 27-37, 1988.
- MÉNDEZ, D. «Toxicidad y biodegradación anaerobia de formaldehído». Tesis en opción al título académico de Doctor en Ciencia. Santiago de Compostela: 1997.
- MONTALVO, S Y L. GUERREROS. *Tratamiento anaerobio de residuos. Producción de biogás*. Chile: Universidad Técnica Federico Santa María. 2003.
- PÁEZ, O. Y R. BAZ. *Bioabonos. Uso alternativo de residuales orgánicos sólidos y líquidos*. La Habana: CID-DECAP, 1999.
- PIND, P. F.; I. ANGELIDAKI AND B. AHRING, B. «Dynamics of the Anaerobic Process: Effects of volatile fatty acids», *Wiley Inter Science*, 2003.
- RAJESHWRI, K. V.; D. C. PANTH, K. LATA AND V. V. N. KISHORE. «Studies on biomethanation of vegetable market waste», *Biogas Forum* (3): 4-11, 1998.

«Reactores anaerobios». [http://www.transwer.cl/tratamiento de las aguas residuales.htm](http://www.transwer.cl/tratamiento%20de%20las%20aguas%20residuales.htm). 2003.

ROZZI, A. «Modelling and control of anaerobic digestion process», *Trans. Ins Meas. Control* 6 (3): 153-159, 1984.

SAVRAN, V. «Censo Digestores Construidos en Sancti Spíritus», en *X Taller Nacional, Actualización y perspectiva para la producción de biogás en cuba*, 27-29 de marzo de 2006. Sancti Spiritus: Ed. Feijóo, 2006. ISBN 939-203-247-1.

SPEECE, R. E. *Anaerobic e Biotechnology for Industrial Wastewaters*. Tennessee: Archea Press, 1996.

SUÁREZ, J. Y P. BEATÓN. «Thermochemical Properties of Cuban Biomass», *Energy Sources*, 6-12, 2000.

SUÁREZ, J. Y P. BEATÓN. «Estado y perspectivas de las energías renovables en Cuba», *Tecnología Química*, 2007.

SUÁREZ, R. Y R. MORÍN. 2005. *Caña de azúcar y sostenibilidad: Enfoques y experiencias cubanas*. DESAL, 2005.

THI THAN HAI, D. *Manual para la formación en tecnologías para el biogás*. Vietnam: Instituto de Energía de Hanoi, 2005.

## **Propuesta de una metodología para la descripción de la rugosidad en Cuba**

### **Proposal of a methodology for the description of the rugosity in Cuba**

*Por Niebla Sosa, Yadiery\*, Rolando Soltura Morales\*\*  
y Alfredo Eulalio Roque Rodríguez\*\*  
Instituto de Meteorología, Cuba.  
\*\* Empresa Eléctrica, Cuba.  
e-mail: yadiery.niebla@insmet.cu.*

#### **Resumen**

Este trabajo se realizó con el objetivo de proponer para Cuba una nueva tabla de rugosidad, teniendo en cuenta las condiciones propias del país y los resultados internacionales. Para su confección y validación se trabajó de forma minuciosa con las características que presentan las principales biocenosis de Cuba y otras muy particulares halladas en el terreno. Se tomó como base una tabla de rugosidad ya confeccionada anteriormente, útil para características muy generales del paisaje cubano, creándose finalmente una tabla de rugosidad para Cuba, con alto nivel de detalle, de la cual posteriormente se derivó una segunda tabla que emplea el lenguaje en que aparece la información necesaria para el mapa digital de rugosidad.

**Palabras clave:** Rugosidad del terreno, energía eólica.

#### **Abstract**

This paper was done with the objective of proposing a new table of rugosity for Cuba, taking into account the conditions of the country and the international results. In its preparation and validation, there was a thorough work with the characteristics of the main biocenoses of Cuba and other very particular ones found in the field. A rugosity table previously obtained was taken as a basis, useful for very general characteristics of the landscape, and finally a table rugosity for Cuba was created, with a high level of detail. Moreover, a second table of rugosity was derived. The latter uses a language in which the necessary information for the digital map of rugosity appears.

**Key words:** land rugosity, wind energy.

#### **Introducción**

Se llama rugosidad del terreno al efecto conjunto de la superficie del terreno y los obstáculos, los cuales conducen a un retardo del viento cerca del suelo. La vegetación y las edificaciones son ejemplos de elementos de la rugosidad, mientras que las colinas largas y suaves no lo son, debido a que ellas por sí mismas no causan un incremento en la turbulencia del flujo. La rugosidad de un área dada está determinada por el tamaño y distribución de los elementos de rugosidad que contiene. Por tal motivo, a cada tipo de terreno se le puede asociar una clase de rugosidad. En términos físicos, la rugosidad es la altura

sobre el suelo en que la velocidad media del viento es igual a cero, si el perfil es logarítmico. Comúnmente es definida con la variable  $Z_0$ .

La longitud de rugosidad debe ser considerada un parámetro climatológico, a causa de los cambios en el follaje de los árboles, los ciclos de siembra y recogida de los cultivos, etc. Estos factores deben tenerse en cuenta a la hora de calcular la producción de energía de una turbina eólica, ya que ellos pueden ejercer una profunda influencia en el funcionamiento operativo de la máquina.

Como antecedente en Cuba a este trabajo, se tiene la confección de una primera tabla de rugosidad para las condiciones cubanas, la cual engloba los distintos tipos de rugosidad de forma general. Fue creada fruto del proyecto internacional Solar and Wind Energies Resources Assessment (SWERA) y que a la postre se usó en la confección del mapa del potencial eólico de Cuba.

Aquí se propone una nueva tabla de rugosidad con alto nivel de detalle para el territorio cubano, la cual será un complemento importante para un mejor estudio del potencial eólico del país. Además, tomando como base esta tabla, se confeccionó una segunda, en la que se describe la rugosidad teniendo en cuenta la información que presenta la base cartográfica de Mapinfo 1:100 000, imprescindible esta última tabla para unificar criterios al trabajar con la base digital empleada en el cálculo de la rugosidad.

## **Materiales y métodos**

En la confección de este trabajo se analizaron de forma rigurosa los paisajes, bajo criterios tales como: altura, porosidad y espaciamiento de los elementos que lo integran, para posteriormente, de acuerdo a sus características, designarle un valor de rugosidad específico. Se tomó como base para la confección de la tabla principal del trabajo (Tabla 2. Descripción de la rugosidad en Cuba de acuerdo a características del paisaje), la tabla de rugosidad del proyecto SWERA (Tabla 1), respetando su clasificación, la cual tuvo como guía en su confección la descripción de rugosidad propuesta en el Atlas Eólico Europeo, junto a otras descripciones del terreno [Wieringa, 1992] y la tabla de valores de rugosidad de la nota técnica No. 175 [OMM, 1984].

Tuvo gran peso en la confección de la tabla 2, la clasificación de biocenosis de Cuba dado por [Claro, 2005]. Además, se incluyen en la tabla características muy particulares halladas en el terreno. Mientras que se necesitó el uso del lenguaje empleado en las tablas de los ficheros en formato digital relacionados con la cobertura vegetal y otros, creados en el Sistema de Información Geográfica (SIG) Mapinfo de base cartográfica 1: 100 000, para la posterior confección de la tabla 3, que se empleará para unificar criterios y facilitar el proceso de digitalización de los mapas para el cálculo de la rugosidad en los sistemas WAsP o WindPRO, los cuales operan sobre un mapa digital que emplea el SIG Mapinfo como una de sus fuentes.

El concepto de Biocenosis, creado en 1877 por K. Möbius, designa las comunidades de seres vivos (animales o vegetales) que en un lugar dado comparten las mismas condiciones de vida.

Tabla 1. Descripción de la rugosidad. Proyecto SWERA

Longitud de rugosidad, m	Tipo de paisaje
0,0002	Superficie de agua (mar abierto, lago, presa), con apariencia abierta de varios kilómetros.
0,0024	Terreno completamente abierto con una superficie lisa (por ejemplo: pistas de hormigón en los aeropuertos, césped cortado, etc.); tierra desnuda, arena de costa (playas), vegetación de costa rocosa con alturas entre 0,5 y 1 m.
0,03	Área agrícola abierta sin cercados ni arbustos y con edificaciones muy dispersas. Solo colinas suavemente redondeadas. Vegetación de costa arenosa, herbazal de ciénaga, sabanas seminaturales y antrópicas.
0,055	Terreno agrícola con algunas casas y arbustos resguardantes de 8 m de altura con una distancia aproximada de 1 250 m. Vegetación de mogotes.
0,1	Terreno agrícola moderadamente abierto con algunas casas y arbustos resguardantes de 8 m de altura con una distancia aproximada de 500 m.
0,15	Cultivos bajos (caña de azúcar, tabaco, etc.); matorrales (marabú); plantaciones forestales jóvenes menores de 4 m (pinos, eucaliptos, majagua, etc.).
0,2	Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, o setos resguardantes de 8 m de altura con una distancia aproximada de 250 m. Bosque degradado 3-4 m de altura, bosque de galería y frutales.
0,3-0,35	Bosque semideciduo y bosque de mangles (mangle prieto, mangle rojo, llana y patabán).
0,4	Pueblos, ciudades pequeñas, suburbios, terreno agrícola con muchos o altos setos resguardantes, bosques de pinos y terreno accidentado y muy desigual.
0,5-0,9	Bosque pluvial y bosque siempreverde (ubicados en macizos montañosos).
1-2	Grandes ciudades con edificios muy altos.

## Resultados

Tabla 2. Descripción de la rugosidad en Cuba de acuerdo a características del paisaje

Longitud de Rugosidad, m	Tipo de paisaje y ubicación de algunos de ellos
0,0002	<b>Superficie de grandes extensiones de agua</b> (mar abierto, presas Zaza y Alacranes).
0,0005	<b>Superficie de aguas poco profundas o someras con apariencia cerrada</b> (mar interior, lagunas y presas).
0,0026	<p><b>Terreno completamente abierto con una superficie lisa</b> (ejemplo: pistas de hormigón en los aeropuertos, césped cortado, etc.); tierra desnuda, arena de costa (playas).</p> <p><b>Complejo de vegetación de costa rocosa:</b> se encuentra sobre el carso desnudo de la terraza de seboruco (Formación Jaimanitas), ocupa una estrecha faja de algunos metros de ancho (10-30 m). Junto a la línea costera aparece una faja estrechísima (comúnmente 2-3 m) sin vegetación, al lado de esta se haya otra de algunos metros de ancho con plantas pequeñas y suculentas, las cuales se denominan vulgarmente verdolaga de mar, están dispersas dentro de las oquedades cársicas; más lejos de la línea costera aparecen plantas herbáceas que se desarrollan sobre cierta cantidad de arena acumulada en las oquedades. Finalmente, en la parte más alejada de la línea costera (comúnmente 15-30 m), donde se acumula mayor cantidad de arena y fragmentos de conchas, aparecen pequeños arbustos (0,5-1 m de altura).</p> <p><b>Complejo de vegetación de costas arenosas:</b> Se encuentra en las costas erosivo-acumulativas donde se forman las playas. La vegetación está constituida por plantas rastreras: (mate de playa, boniato de playa); plantas herbáceas: (millo de mar, guisaso de playa) y pequeños arbustos (incienso de playa, etc.).</p>
0,015	<b>Sabanas sin árboles</b> (Sabanas = Espacios abiertos).
0,03	<p><b>Herbazal de ciénaga:</b> Se encuentra principalmente en las Ciénagas de Zapata y de Lanier, así como en las ciénagas al este de Morón y cerca de la desembocadura del río Cauto. La vegetación es un herbazal alto que se desarrolla sobre turba, la cual se origina debido a la prolongada inundación, que no permite la descomposición de la materia orgánica.</p> <p><b>Área agrícola abierta</b> (cultivos rotativos) sin cercados ni arbustos y con casas muy dispersas. Sólo colinas suavemente redondeadas.</p> <p><b>Sabanas seminaturales y antrópicas:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. De gramíneas altas con palmas altas.</li> <li>2. De gramíneas bajas con palmas bajas.</li> <li>3. Húmedas de Ciperáceas<sup>1</sup> y palmas bajas.</li> <li>4. Con árboles de hoja ancha.</li> </ol>

0,055	<p><b>Terreno agrícola</b> (cultivos rotativos) con algunas casas y árboles resguardantes de 8 m de altura con una distancia aproximada de 1 250 m. <b>Terreno que no sobrepasa los 500 m</b> (dedicado generalmente a la ganadería) con algunos árboles y arbustos en la cerca.</p> <p><b>Terreno integrado por:</b> pequeñas parcelas de cultivos rotativos, muy pocas casas y arbustos o árboles dispersos.</p> <p><b>Complejo de vegetación de mogotes:</b> Esta vegetación se distribuye en toda Cuba de forma muy dispersa sobre las alturas con carso cónico. Su mayor área se encuentra en la Sierra de los Órganos, pero también existen porciones menores en las Escaleras de Jaruco, en los mogotes de Jumagua, sierras de Jatibonico y Cubitas, mogotes de Baire y del sur de la Sierra de Nipe, alturas de Maniabón y de Sagua-Baracoa (mogotes de Monte Líbano y Moa) y Yunque de Baracoa.</p>
0,1	<p><b>Terreno donde hubo una plantación forestal, frutal o cítricos</b> en el que actualmente sólo quedan escasos árboles muy dispersos y áreas cubiertas por matorrales (marabú).</p> <p><b>Terreno agrícola moderadamente abierto</b> con algunas casas y árboles resguardantes de 8 m de altura con una distancia aproximada de 500 m.</p> <p><b>Matorral adaptado a condiciones de sequedad, espinoso sobre serpentinitas (degradado)</b> (Cuabal degradado): Cuando se degrada, el estrato herbáceo es denso y el arbustivo disperso, y predominan las palmas de los géneros <i>Coccothrinax</i> y <i>Copernicia</i>. Se distribuye en las áreas de serpentinitas comprendidas entre Pinar del Río y Holguín. Se encuentra en la vertiente sur de la Sierra de Cajálbana y en la Sierra Peluda (Pinar del Río), al sur de Campo Florido y entre Arcos de Canasí y Matanzas, y al sur de Camarioca (Matanzas), así como en los alrededores de las ciudades de Santa Clara, Camagüey y Holguín, y sectores de las sierras de Nipe y Cristal.</p>
0,15	<p><b>Plantaciones forestales jóvenes</b> (pinos, eucaliptos, majagua, etc.), <b>de árboles frutales o cítricos</b> (menores de 4 m) (La plantación por lo general presenta claros).</p> <p><b>Caña de azúcar. Tabaco. Café.</b></p>
0,2	<p><b>Matorral espinoso semidesértico:</b> Se encuentra en la primera y segunda terrazas del borde calizo de la costa sur del extremo oriental de Cuba, con clima semidesértico que presenta los más bajos promedios anuales de precipitación para Cuba (300-600 mm), con una estación seca de 9 a 11 meses. Comprende un área extensa desde la Bahía de Guantánamo hasta punta Caleta, y dos áreas pequeñas, una al oeste en Baconao y otra hacia el este en punta de Maisí. La primera terraza posee suelos arenosos que permiten el desarrollo de un matorral muy rico en cactus con forma de columna, árboles pequeños y arbustos. En cambio, en la terraza superior con carso desnudo o parcialmente desnudo, se desarrolla un matorral espinoso menos tupido, rico en</p>

	<p>plantas de tallo carnosos con espinas en lugar de hojas (cactáceas arborescentes), palmas y arbustos de diversos géneros (0,18).</p> <p><b>Matorral secundario:</b> Es un estadio sucesional inferior al del bosque secundario, con las mismas especies que se encuentran en éste. También pueden existir matorrales secundarios constituidos por una sola especie de alto poder competitivo. Por ejemplo, marabuzal, aromal (0,2).</p> <p><b>Matorrales montanos:</b> Estos matorrales se encuentran en las cimas de las montañas de Cuba oriental y pueden dividirse en <b>dos grupos:</b></p> <p><i>El primer matorral:</i> Posee un estrato denso de 2 a 4 m, con arbolitos emergentes (entre ellos <i>Pinus cubensis</i>) y se haya en serpentinitas y peridotitas serpentinizadas, entre 900 y 1 200 m, en las sierras de Nipe y Cristal, y las montañas de Sagua-Baracoa (0,22).</p> <p><i>El segundo grupo:</i> Son los que se originan sobre rocas volcánicas entre 1 800-2 000 m en la Sierra Maestra (matorral subalpino o subpáramo), está formado por arbustos achaparrados de 3 m con plantas adaptadas a condiciones de escasez de agua, plantas que crecen sobre otras y plantas que viven o parecen vivir sobre rocas (0,18).</p> <p><b>Bosque degradado de 3-4 m de altura.</b></p> <p><b>Terreno agrícola con muchas casas, arbustos y plantas, o setos resguardantes de 8 m de altura</b> con una distancia aproximada de 250 m.</p> <p><b>Bosque de galería. Cortina de casuarinas 10-20 m.</b></p>
0,25	<p><b>Plantación (forestal, de árboles frutales o cítricos de 4-6 m)</b> (generalmente presenta algunos claros).</p>
0,3	<p><b>Matorral adaptado a condiciones de sequedad, espinoso sobre serpentinitas</b> (Cuabal): Es un matorral denso de arbustos de hojas pequeñas y generalmente espinosos que alcanza de 4 a 6 m, con algunos arbolitos y en ocasiones palmas emergentes, así como plantas que crecen sobre otras y herbáceas dispersas, y abundancia de lianas. Se distribuye en las áreas de serpentinitas comprendidas entre Pinar del Río y Holguín. Se encuentra en la vertiente sur de la Sierra de Cajálbana y en la Sierra Peluda (Pinar del Río), al sur de Campo Florido y entre Arcos de Canasí y Matanzas, y al sur de Camarioca (Matanzas), así como en los alrededores de las ciudades de Santa Clara, Camagüey y Holguín, y sectores de las sierras de Nipe y Cristal.</p> <p><b>Casuarinas</b> de 10-20 m que abarcan un área restringida.</p> <p><b>Bosque siempreverde de mangle</b> (manglar): Altura promedio 8 m, sin estrato arbustivo y algunas lianas. Los árboles comprenden 4 especies: mangle rojo, mangle prieto, patabán y yana. En las depresiones aumenta la concentración de sales y el manglar es sustituido por los saladares, que es una vegetación herbácea. Se distribuye ampliamente en ambas costas. En la norte se extiende desde el Cabo de San Antonio hasta Mariel, y desde Cárdenas hasta Nuevititas. En la costa sur se extiende desde el río Cuyaguajateje hasta la Bahía de Cochinos, y desde Casilda hasta Cabo Cruz.</p>

<p><b>0,2-0,35</b></p>	<p><b>Matorral adaptado a condiciones de sequedad, costero y subcostero:</b> Esta vegetación ocupa las porciones más secas y ecológicamente extremas de las costas abrasivas con rocas carbonatadas, sobre todo desde Cabo Cruz a Maisí, la cual es muy seca. Se desarrolla por lo general sobre el carso desnudo o casi totalmente desnudo con una delgada capa de rendzina roja o pardo-rojiza. A medida que aumenta el espesor de la rendzina y el porcentaje de carso cubierto, el matorral se hace más alto para pasar progresivamente al bosque siempreverde de hojas pequeñas, por lo que resulta difícil establecer el límite entre ambas formaciones vegetales, cuando no existen terrazas.</p> <p>Se encuentra en algunas porciones de la costa sur de la península de Guanahacabibes, en la costa norte de La Habana y Matanzas, en la costa sur de Cienfuegos a Trinidad (sobre la segunda terraza con carso desnudo), en la costa norte entre Puerto Padre y Gibara, y al este de Banes, y en casi toda la costa sur desde Cabo Cruz a Maisí sobre la segunda y tercera terrazas.</p> <p>Este tipo de vegetación está constituido por un estrato arbustivo muy denso, a menudo impenetrable, de altura variable (2-3 m en las porciones más extremas <b>(0,2)</b>, hasta 6-7 m cerca del límite del bosque siempreverde de hojas pequeñas <b>(0,35)</b>). En ocasiones presenta emergentes o palmas y plantas de tallo carnoso, con espinas en lugar de hojas. Las lianas son abundantes, pero el estrato herbáceo es muy pobre.</p> <p>En las barras arenosas que cierran las lagunas litorales se forman matorrales adaptados a condiciones de sequedad con estructura muy parecida al anterior, pero con algunas diferencias florísticas, por ejemplo, estos matorrales son muy ricos en palmas.</p>
<p><b>0,35</b></p>	<p><b>Matorral adaptado a condiciones de sequedad, subespinoso sobre serpentinitas:</b> Las precipitaciones oscilan entre 1 300-1 900 mm anuales, es decir, son superiores a la de los cuabales, por lo que existe un matorral que alcanza mayor desarrollo (estrato arbustivo denso de 4 a 6 m y emergentes de 7 a 10 m, y pocos arbustos espinosos). El endemismo es altísimo (75-80%). Aparecen también lianas, plantas que crecen sobre otras y plantas herbáceas que forman un estrato discontinuo de gramíneas. Se conoce con el nombre de charrascal y es exclusivo de la parte norte de Cuba oriental en territorios colinosos de serpentinitas y gabros entre 0-400 m de altitud. Extendiéndose desde Moa hasta Baracoa, las principales áreas se encuentran en el cerro de Miraflores y Yamanigüey (Moa), y en Marabi y la Cuaba (Baracoa).</p> <p><b>Bosque secundario:</b> Se origina por la degradación del bosque natural. Posee un estrato arbóreo muy variable formado por pocas especies con dominancia de palma real, guásima y yagruma. En el estrato arbustivo abundan guao, caimitillo, jubabán y otras. Las lianas son numerosas, así como las plantas herbáceas.</p> <p><b>Plantación forestal o de árboles frutales</b> de 7-11 m.</p>

0,4

**Bosque nublado:** Se encuentra en los picachos de las montañas más elevadas en Cuba y presenta dos variantes diferentes. La típica se desarrolla en la parte alta de la cordillera del Turquino, entre 1 600 y 1 900 m, en el área del Pico Turquino y del Pico de la Bayamesa. Puede presentarse también esta variante, pero con menos desarrollo en alturas inferiores de las sierras de Trinidad, de Imías, de Puriales y en la propia Sierra Maestra. En la Sierra Maestra tiene un estrato arbóreo de 8 a 12 m, compuesto por árboles de troncos retorcidos, un estrato arbustivo denso y otro herbáceo. La otra variante se encuentra en los picachos de las sierras de Nipe, del Cristal, de Moa y en las Cuchillas de Toa y de Baracoa.

**Pinares de pino hembra en suelos ferralíticos cuarcíticos:** Posee un estrato arbóreo abierto de 15 a 20 m. Existen numerosos arbustos que alcanzan de 2 a 8 m y un estrato herbáceo. Actualmente están muy degradados y en gran parte destruidos y sustituidos por plantaciones de cítricos o sabanas. Cambiando así este valor de (0,4). Estos pinares se encuentran en la parte occidental de Pinar del Río y en la Isla de la Juventud.

**Bosque siempreverde de hoja mediana submontano:** Estrato arbóreo de 15 a 25 m, un estrato arbustivo de altura variable, un estrato herbáceo y un estrato de lianas. Actualmente este bosque está muy degradado y en parte sustituido por cafetales (por eso tiene este valor, no se tiene en cuenta los lugares donde sólo existen cafetales; eso ya sería otro valor de rugosidad). Este tipo de vegetación se encuentra en la Sierra Maestra, las alturas calizas de Guantánamo, en las sierras de Trinidad, Sancti Spíritus y Rosario. Entre los 300 y 800 m en la macrovertiente norte de la Sierra Maestra y hasta 700 m en las restantes sierras del centro y el oeste del país. Mientras que en la macrovertiente sur de la Sierra Maestra aparece entre 600 y 900 m.

**Pueblos** (Santa Cruz del Norte), **ciudades pequeñas** (Sagua La Grande, Santa Clara), **suburbios** (El Cotorro (pueblo)).

**Terreno agrícola con muchos o altos setos resguardantes; terreno accidentado y muy desigual.**

<p>0,45</p>	<p><b>Bosque siempreverde de hoja pequeña, costero y subcostero (0,45):</b> Presenta un estrato arbóreo de 12 a 15 m, y uno de 5 a 10 m, así como plantas que crecen sobre otras, lianas y arbustos en parte espinosos y algunos cactus con forma de columnas y ramificadas, y palmas del género <i>Coccothrinax</i>. Se encuentra fundamentalmente en las zonas costeras y subcosteras de Cuba oriental y sur de Cuba central, en esta última desde la Bahía de Cochinos hasta Trinidad. En Cuba oriental se extiende en la costa sur desde Manzanillo hasta Pilón y desde Santiago de Cuba hasta Maisí. En la costa norte se localiza fundamentalmente desde Nuevitas hasta Banes y en la cayería norte, desde cayo Coco hasta cayo Sabinal.</p> <p><b>Bosques de hojas anchas en el que aproximadamente la mitad de los árboles pierden las hojas en una estación del año:</b> Posee dos estratos arbóreos densos, frecuentemente con emergentes, así como abundantes lianas. El estrato arbóreo superior alcanza de 15 a 20 m, con presencia de elementos que pierden las hojas en una estación del año (40 a 65%). El estrato arbóreo inferior está constituido por árboles pequeños que alcanzan normalmente de 6 a 12 m y son siempreverde. Las plantas que crecen sobre otras son escasas y el estrato herbáceo es muy escaso o no existe, mientras que las lianas son abundantes. Estos bosques fueron los más abundantes en Cuba, se distribuían en llanuras y colinas de casi toda la Isla. En la actualidad estos territorios están cubiertos por distintos tipos de cultivos, sobre todo caña de azúcar, o se han originado sabanas, quedando sólo fragmentos de estos bosques en las áreas con fuertes pendientes o fuertemente carsificados. Presentan otras variantes, como la de hojas pequeñas, la cual se desarrolla en la parte oriental de Cuba. Otra variante que ocupaba importantes territorios en nuestro país se encontraba en las llanuras con humedad fluctuante donde se desarrollan los vertisuelos.</p>
<p>0,5</p>	<p><b>Bosque siempreverde de ciénaga:</b> Estrato arbóreo de 15 a 20 m, con palmas reales y en las porciones con suelo pantanoso (0,4); este estrato sólo alcanza de 8 a 15 m y la palma real se sustituye por la palma cana. En las porciones donde la inundación tiene una duración mucho más larga (suelo hidromórfico pantanoso), el bosque es más bajo y ralo (0,35). Se distribuye principalmente en la costa sur y <b>forma una estrecha y larga faja</b> entre los bosques en los que aproximadamente la mitad de los árboles pierden las hojas en una estación del año (<b>al norte</b>) y los manglares y herbazales de ciénagas (<b>al sur</b>). Presenta dos grandes áreas, la primera, en el sur de las provincias de La Habana y Matanzas, y la segunda desde el río Zaza hasta el río Cauto.</p> <p><b>Bosque pluvial submontano:</b> La vegetación es de hoja dura, con árboles de hojas pequeñas y dura debido a las extremas condiciones del suelo. El estrato arbóreo alcanza de 15 a 25 m y en las porciones más desfavorables el bosque es abierto con dominancia de manglillo (<i>Bonnetia cubensis</i>), que alcanza de 15 a 20 m. Es típico en el estrato arbóreo la palma pajua</p>

	<p>(<i>Bactris cubensis</i>), que constituye una palma endémica típica de este bosque. El estrato arbustivo es denso y presenta gran cantidad de especies.</p> <p>Se encuentra en el macizo ultrabásico de Nipe-Baracoa entre 400-800 m, con un área puntual en la Sierra de Nipe y un área pequeña en la Sierra del Cristal al oeste, y un área más extensa hacia el este, que comprende las sierras de Moa e Ibería, y las cuchillas de Toa y Baracoa.</p> <p><b>Pinares de pino hembra y pino macho en suelos amarillos esqueléticos de montaña:</b> Posee un estrato arbóreo de 15 a 20 m, así como lianas y plantas herbáceas. Este pinar actualmente está bien representado en Pinar del Río, pero en la Isla de la Juventud se encuentra muy destruido. Se distribuye en las alturas pizarrosas que rodean la Sierra de los Órganos.</p>
0,55	<p><b>Pinares de <i>Pinus cubensis</i> en suelos ferríticos:</b> El estrato arbóreo alcanza hasta 25 m y está constituido casi exclusivamente por <i>Pinus cubensis</i> y un estrato arbustivo con numerosas especies endémicas y palmas. Estos pinares se encuentran en las montañas y alturas serpentínicas de Cuba oriental, entre 0-900 m. Se distribuye en las áreas donde el suelo ferrítico alcanza su mayor desarrollo. El área de estos pinares comprende las sierras de Nipe, Cristal y Moa, así como las cuchillas de Toa y Baracoa. Este pinar posee una estructura similar al pinar de pino macho sobre suelo ferrítico.</p>
0,6	<p><b>Pinares de pino macho en suelos ferríticos:</b> Posee un <b>estrato denso</b> de 20 a 25 m, formado exclusivamente por <i>Pinus caribaea</i> (pino macho). El estrato arbustivo posee una enorme cantidad de especies endémicas, también existen palmas en este estrato (<i>Coccothrinax yuraguana</i>). Este tipo de pinar sólo se encuentra en la Sierra de Cajálbana (Pinar del Río), entre 25-400 m de altitud.</p>
0,65	<p><b>Bosque pluvial montano:</b> Estrato arbóreo denso y alcanza de 20 a 25 m con árboles de hojas grandes presentes todo el año. El segundo estrato de 8 a 15 m. Existen dos estratos de plantas que crecen sobre otras, uno expuesto directamente a la luz solar en las ramas de los árboles y uno a la sombra en los troncos de los árboles. Se distribuye ampliamente en la Sierra Maestra entre 800 y 1 600 m de altitud. Aparece también en las sierras de Imías y de Trinidad, pero por debajo de los 1 200 m de altitud en áreas mucho más pequeñas que en la Sierra Maestra. En la Sierra de Trinidad este bosque aparece a partir de los 700 m de altitud.</p>

0,7	<b>Pinares de <i>Pinus maestrensis</i> en suelos rojo-amarillentos de montaña:</b> Este tipo de pino es el más exuberante de Cuba, los árboles son enormes y alcanzan hasta un metro de diámetro, y en el estrato arbustivo abundan los helechos arborescentes y los arbustos de grandes hojas. Pinares exclusivos de la Sierra Maestra y se distribuyen de forma aislada, a diferentes alturas sobre el nivel del mar (generalmente entre 600 y 1 600 m), formando cayos dentro del bosque pluvial montano. Se encuentran también de forma transitoria donde se producen deslizamientos.
0,7-0,8	<b>Bosque pluvial de baja altitud:</b> (Vegetación más exuberante de Cuba). Posee 3 estratos arbóreos: 28 a 35 m, 20 a 25 m y hasta 20 m. Está por debajo de los 400 m de altitud en los valles de los ríos Toa, Jaguaní, Quibijan y Duaba; en el extremo oriental del país. Este tipo de fitocenosis se encuentra bastante antropizada. En la actualidad sólo se puede encontrar de forma muy puntual.
1-2	Grandes ciudades con edificios muy altos. <b>Ciudad de La Habana</b> <sup>(1)</sup> .

<sup>1</sup> Familia de plantas angiospermas, monocotiledóneas, herbáceas y perennes, con tallos triangulares, hojas envainadoras y flores de espigas.

*Tabla 3. Descripción de la rugosidad teniendo en cuenta la información que presenta la base cartográfica de Mapinfo 1: 100 000*

Longitud de rugosidad, m	Tipo de paisaje
0,0002	<b>Superficie de grandes extensiones de agua</b> (mar abierto, presas Zaza y Alacranes).
0,0005	<b>Superficie de aguas poco profundas o someras con apariencia cerrada</b> (mar interior, lagunas y presas).
0,0026	<b>Terreno completamente abierto con una superficie lisa</b> (ejemplo: pistas de hormigón en los aeropuertos, césped cortado, etc.); tierra desnuda, arena de costa (playas). <b>Sin vegetación.</b>
0,03	<b>Zona fangosa. Superficie pantanosa. Pantano accesible. Pantano inaccesible o difícil acceso.</b> <b>Cultivos rotativos</b> (área abierta sin cercados ni arbustos y con casas muy dispersas). <b>Vivero.</b> Sólo colinas suavemente redondeadas. <b>Arroz.</b>
0,06	<b>Hierbas y pastos artificiales.</b>
0,15	<b>Caña.</b> <b>Café:</b> Arbusto de 3-7 m de altura, aunque alcanza los 10 m en estadio silvestre. Generalmente se desmocha para dejarlo entre 2-3 m. <b>Tabaco.</b>

0,2	<p><b>Maleza compacta sin espina y Maleza compacta con espinas.</b> Sólo se supera este valor en los siguientes casos:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* Matorral adaptado a condiciones de sequedad, espinoso sobre serpentinitas.</li> <li>* Matorral adaptado a condiciones un poco menos secas, subespinoso sobre serpentinitas.</li> <li>* Matorral que ocupa las porciones más secas y ecológicamente extremas de las costas abrasivas con rocas carbonatadas, sobre todo desde Cabo Cruz a Maisí, la cual es muy seca.</li> </ul> <p><b>El primero:</b> Se conoce con el nombre de Cuabal. Es un matorral denso de arbustos de hojas pequeñas y generalmente espinosos que alcanza de <b>4 a 6 m</b>, con algunos arbolitos y en ocasiones palmas emergentes, herbáceas dispersas y abundancia de lianas. Se distribuye en las áreas de serpentinitas comprendidas <b>entre Pinar del Río y Holguín</b>. Se encuentra en la vertiente sur de la Sierra de Cajálbana y en la Sierra Peluda (Pinar del Río), al sur de Campo Florido y entre Arcos de Canasí y Matanzas, y al sur de Camarioca (Matanzas), así como en los alrededores de las ciudades de Santa Clara, Camagüey y Holguín, y sectores de las sierras de Nipe y Cristal <b>(0,3)</b>. Si se degrada, su valor es <b>(0,1)</b>.</p> <p><b>El segundo:</b> El matorral alcanza mayor desarrollo que el anterior (estrato arbustivo denso de <b>4 a 6 m</b>, y emergentes <b>de 7 a 10 m</b> y pocos arbustos espinosos. El endemismo es altísimo (75-80 %). Aparecen también lianas y plantas herbáceas que forman un estrato discontinuo de gramíneas. Se conoce con el nombre de charrascal y es exclusivo de la parte norte de Cuba oriental. Se extiende <b>desde Moa hasta Baracoa</b>, las principales áreas se encuentran en el cerro de Miraflores y Yamanigüey (Moa), y en Marabi y la Cuaba (Baracoa) <b>(0,35)</b>.</p> <p><b>El tercero:</b> Por lo general el valor de rugosidad que se emplea para esta vegetación es <b>(0,2)</b>, pero puede llegar a tener un valor de <b>(0,35)</b> cuando está próximo a los límites del bosque. Se encuentra en algunas porciones de la costa sur de la península de Guanahacabibes, en la costa norte de La Habana y Matanzas, en la costa sur de Cienfuegos a Trinidad (sobre la segunda terraza con carso desnudo), en la costa norte entre Puerto Padre y Gibara y al este de Banes, y en casi toda la costa sur desde Cabo Cruz a Maisí sobre la segunda y tercera terrazas.</p> <p>En las barras arenosas que cierran las lagunas litorales se forman matorrales con estructura muy parecida al anterior, pero con algunas diferencias florísticas, por ejemplo, estos matorrales son muy ricos en palmas.</p>
0,25	<p><b>Bosque de coníferas de 5-6 m.</b>  <b>Bosque de vegetación foliácea de 5 m.</b>  <b>Huertos frutales o cítricos</b> (menor o igual que 5 m de altura).</p>
0,3	<p><b>Bosque de vegetación foliácea de 6-9 m</b> (espaciamiento 5-8 m).  <b>Mangle:</b> Altura promedio de 8 m, sin estrato arbustivo y algunas lianas. Los árboles comprenden 4 especies: mangle rojo, mangle prieto, patabán y yana. En las depresiones aumenta la concentración de sales y el manglar es sustituido por los saladares, que es una vegetación herbácea. Se distribuye ampliamente en ambas costas. En la norte se extiende desde el Cabo de San Antonio hasta Mariel y desde Cárdenas hasta Nuevitás. En la costa sur se extiende desde el río Cuyaguatete hasta la Bahía de Cochinos y desde Casilda hasta Cabo Cruz.</p>
0,35	<p><b>Bosque de coníferas de 7-9 m</b> (espaciamiento 3 a 4 m).  <b>Bosque de vegetación foliácea de 6-8 m</b> (espaciamiento 3-4 m).  <b>Bosque de vegetación foliácea de 11 m</b> (espaciamiento 8 m y diámetro 0,20-0,30 m).  <b>Huertos frutales o cítricos</b> (más de 5 m de altura).</p>

<b>0,4</b>	<b>Bosque de coníferas de 10-13 m</b> (espaciamiento 3 a 4 m). <b>Bosque de vegetación foliácea de 9-10 m</b> (espaciamiento 3-4 m). <b>Bosque de vegetación foliácea de 10-12 m</b> (espaciamiento 5 m). <b>Bosque de vegetación foliácea de 12-13 m</b> (espaciamiento 6 m). <b>Bosque de vegetación mixta de 9-10 m</b> (espaciamiento 3-4 m). <b>Bosque de vegetación mixta de 12 m</b> (espaciamiento 5 m). <b>Pueblos</b> (Santa Cruz del Norte), <b>ciudades pequeñas</b> (Sagua La Grande, Santa Clara), <b>suburbios</b> (El Cotorro (pueblo)), <b>terreno accidentado y muy desigual</b> . <b>Café entre bosque.</b>
<b>0,45</b>	<b>Bosque de vegetación foliácea de 11-15 m</b> (espaciamiento 3-4 m). <b>Bosque de vegetación mixta de 11-15 m</b> (espaciamiento 3-4 m). <b>Bosque de vegetación foliácea de 8-11 m</b> (espaciamiento 0-1 m). <b>Bosque de vegetación foliácea de 9-14 m</b> (espaciamiento 2 m). <b>Bosque de coníferas de 11-12 m</b> (espaciamiento 2 m) <b>Bosque de coníferas de 14 m</b> (espaciamiento 2-3 m). <b>Bosque de coníferas de 15-16 m</b> (espaciamiento 3-4 m). <b>Bosque de vegetación mixta de 13-15 m</b> (espaciamiento 5 m).
<b>0,5</b>	<b>Bosque de vegetación foliácea de 16-20 m</b> (siempre y cuando la separación no supere los 8 m.) <b>Bosque de vegetación mixta de 16-20 m</b> (siempre y cuando la separación no supere los 8 m.)
<b>0,6</b>	<b>Bosque de vegetación foliácea de 21-30 m</b> (espaciamiento 6-10 m.)
<b>0,7</b>	<b>Bosque de vegetación foliácea de 21-30 m</b> (espaciamiento $\leq$ 5 m.)
<b>1 - 2</b>	Grandes ciudades con edificios muy altos. <b>Ciudad de La Habana (1).</b>

## Conclusiones

- Con la confección de estas tablas se mejora de forma significativa la que hasta ahora existía para Cuba, brindando mayor grado de precisión y confiabilidad.
- Se crean las bases para evaluaciones más precisas del recurso eólico en distintas zonas del país.
- Permitirán evaluar con mayor efectividad la influencia de los cambios de rugosidad en la producción energética de un parque eólico o de una turbina en particular.
- El mayor logro de la nueva tabla de descripción de la rugosidad en Cuba consiste en brindar la ubicación geográfica de muchos de los paisajes, a la vez que presenta un alto poder descriptivo para facilitar su reconocimiento.
- La tabla que tiene en cuenta información de la base cartográfica de Mapinfo 1:100 000 facilita considerablemente el trabajo de digitalización de la rugosidad, a la vez que homogeniza criterios entre los especialistas.

## Bibliografía

CLARO, A. R. «Principales biocenosis de Cuba», en Claro, A. R. (edits). *Biogeografía*. La Habana: Félix Varela, 2005. pp. 196-221.

OMM. *Tabla de valores de rugosidad. Aspectos metodológicos de la utilización del viento como fuente de energía*. Ginebra: Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial. Nota técnica No. 175, 1984. p. 150.

SOLTURA, R., *et al.* *Atlas Eólico de la Isla de la Juventud. Aplicaciones del WAsP.* Informe del proyecto Solar and Wind Energies Resources Assessment (SWERA). 2004. 36 pp. (Inédito).

TROEN, I. AND E. L. PETERSEN. *European Wind Atlas.* Denmark: Risø National Laboratory, Roskilde, 1989. 300 pp.

WIERINGA, J. «Updating the Davenport Roughness Classification», *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 357-368, 1992.

## **Metodología integral para el proyecto y la explotación de las centrales hidroeléctricas con embalse regulador**

### **Comprehensive methodology for the project and the exploitation of hydroelectric power stations with regulating reservoir**

*Por Dr. Luis Jerónimo García Faure  
Centro de Estudio de Eficiencia Energética, Universidad de Oriente, Cuba.  
e-mail: lgarcia@ceefe.uo.edu.cu*

#### **Resumen**

En las centrales hidroeléctricas con embalse regulador, el escurrimiento del río se almacena en una presa o embalse de grandes dimensiones, en las que la energía se determina en función de su volumen y la altura del salto. En este caso, la generación de electricidad puede realizarse a voluntad, según la demanda diaria o estacional, o para fines de regulación de la frecuencia del sistema en horarios pico. Los proyectos de las centrales con embalse regulador son en general de mayor envergadura y costo que los de las centrales aguas fluyentes, lo que implica una mayor responsabilidad en el estudio, proyecto y manera en que ésta debe ser explotada para obtener los mayores beneficios. En este trabajo se expone una metodología integral interactiva, que a partir de los datos estadísticos del escurrimiento y del embalse, permite determinar los parámetros fundamentales de diseño y explotación con la optimización técnico-económica del proyecto. Todo el proceso se lleva a cabo mediante una herramienta de cálculo diseñada con ese objetivo. Dispone de seis partes fundamentales que pueden utilizarse de forma parcial o integral, la cual ha sido evaluada con datos de centrales hidroeléctricas de Cuba, Ecuador y Nicaragua. Su importancia se puso de manifiesto en la demostración de los beneficios que representa el montaje y la puesta en funcionamiento de la segunda unidad de la Central Hidroeléctrica Carlos Manuel de Céspedes, de la provincia de Santiago de Cuba.

**Palabras clave:** Pequeña central hidroeléctrica (PCH), centrales a pie de presa, embalse regulador.

#### **Abstract**

In the hydroelectric power stations with regulating reservoir, the flashing of the river is stored in a large reservoir, in which the potential energy is determined as a function of its volume and the height of the reservoir. In this case, electricity can be generated taking into account the daily or seasonal demand, or for the purpose of regulating the frequency of the system during peak hours. The projects of hydropower stations with regulating reservoir are in general more important and expensive than those stations based on fluent waters, which implies a greater responsibility in the study, project and way in which this power station should be exploited to obtain greater benefits. This paper presents an interactive comprehensive methodology that from the flashing statistical data and reservoir data enables to determine the design and exploitation parameters with the technical and economical optimization of the project. The whole process is

carried out using a calculation tool designed with that objective. It has six fundamental parts that can be used in a partial or comprehensive way, which has been evaluated with data of hydroelectric power stations of Cuba, Ecuador and Nicaragua. Its relevance became evident in the demonstration of the benefits that represents the installation, setting up and functioning of the second unit of the hydroelectric power plant Carlos Manuel de Céspedes, in Santiago de Cuba province.

**Key words:** Small hydroelectric power station, storage reservoir hydropower plant, regulating reservoir.

## **Introducción**

Existe una amplia bibliografía para el cálculo y proyecto de las centrales hidroeléctricas con regulación del escurrimiento, en cada una de las cuales pueden aplicarse diferentes procedimientos de cálculo, por lo que un mismo proyecto puede tener diferentes soluciones. Esto explica el hecho del porqué, para llegar a la mejor alternativa, deben analizarse diferentes variantes.

Cada variante analizada lleva implícita gran número de horas de cálculos, por lo que se hace necesario recurrir a alguna herramienta que facilite dicha operación. Existen software profesionales que se utilizan con ese fin, pero en general presentan determinados inconvenientes que dificultan su aplicación.

Generalmente dichos software hay que comprarlos, y pagar los derechos de utilización; hay que instalarlos en las máquinas, lo que dificulta trasladar los resultados para ser expuestos en otros lugares. Además, estos han sido concebidos según la metodología desarrollada por su autor, la cual no siempre coincide con los datos disponibles, ni con el sistema de unidades empleados.

A partir de la experiencia alcanzada durante varios años de trabajo del colectivo de investigación de la Empresa de Hidroenergía Santiago y la Universidad de Oriente, cursos de postgrado impartidos y proyectos relacionados con el tema, se pudo desarrollar una metodología interactiva de fácil aplicación para el proyecto y la explotación de las centrales con regulación del escurrimiento.

## **Parámetros fundamentales para el proyecto**

La característica hidrológica del río junto con la altura del salto hidráulico son los parámetros fundamentales que determinan la energía que se puede generar. Después de determinado el salto, éste permanece prácticamente invariable, por lo que la característica hidrológica pasa a formar el parámetro determinante.

Debido a la variabilidad del escurrimiento del río a lo largo del año y entre los diferentes años, se hace necesario recurrir a series de estudios estadísticos para determinar las curvas de comportamiento del escurrimiento con mayor grado de probabilidad de ocurrencia. Estas series pueden abarcar desde unos pocos años en los proyectos más modestos hasta cientos de años en los de grande envergadura.

Las gráficas que se obtienen del escurrimiento del río en función del tiempo,

reciben el nombre de curvas hidrográficas o hidrógrafas. Estas se suelen dar en valores promedio del escurrimiento (m<sup>3</sup>/mes) en la ordenada, para los diferentes meses del año en la abscisa.

Si ya existe el embalse y se dispone como datos su volumen y la altura del cierre, se puede entonces calcular, a partir de la curva hidrográfica, el volumen de agua anual que se puede almacenar, la energía que se puede generar, el agua que se vierte si el volumen del embalse es menor que la del escurrimiento y otras informaciones importantes.

Para una serie de observaciones de  $n$  años, el escurrimiento medio anual está dado por:

$$W_m = \frac{\sum W_i}{n} \quad (1)$$

El agua que llega al embalse durante el año tomado como base de cálculo, está dado por:

$$W_m = \sum_1^{12} W_{mes/12} \quad (2)$$

Para obtener el agua neta disponible para la generación de electricidad, debe restarse la que se evapora y la que se filtra, lo cual depende del área de la presa, el clima y la permeabilidad del terreno. Si se utiliza parte del agua para acueducto o regadío, también debe restarse de la que queda para generación de electricidad. Luego:

$$R_n = W_m - V_v - Var - Pt \quad (3)$$

Donde:

$R_n$ : Entrega neta para generación, m<sup>3</sup>/a.

$W_m$ : Escurrimiento medio anual, m<sup>3</sup>/a.

$V_v$ : Volumen vertido.

$Var$ : Volumen para acueducto y regadío.

$Pt$ : Pérdidas totales por evaporación y filtración.

Conocido el salto hidráulico medio, la energía que se puede generar en el año, está dada por:

$$E = \frac{9,8 \cdot R_n \cdot H \cdot \gamma \cdot \eta}{1000 \cdot 3600} \quad (4)$$

Donde:

g: Peso específico del agua (1 000 kgf/m<sup>3</sup>)

h: Eficiencia total de la central. Para pequeñas centrales h = 0,82; para grandes centrales

h = 0,85.

3600: Factor de conversión de Joule a kWh.

Queda:

$$E = (Rn \times H) / 450, \text{ kWh/a pequeñas centrales}$$

(5.  
a)

Y:

$$E = (Rn \times H) / 430, \text{ kWh/a grandes centrales}$$

(5.  
b)

Con la energía que se puede generar, y en dependencia de la utilización que se le vaya a dar a la central (potencia de base, horas pico, etc.), se fijan las horas que deberá trabajar al año y se determina la potencia a instalar. En la tabla 1 se muestra la primera hoja del software diseñado, con la cual se realizan estos cálculos.

Tabla 1. Parámetros generales de la central

<b>Datos del escurrimiento</b>	
Escurrecimiento medio mensual Wmed, m.c.m.	Wmed, m <sup>3</sup> /mes
Enero	820 000
Febrero	1 220 000
Marzo	3 480 000
Abril	6 150 000
Mayo	18 200 000
Junio	26 240 000
Julio	24 250 000
Agosto	60 220 000
Septiembre	65 300 000
Octubre	72 525 000
Noviembre	5 260 000
Diciembre	780 000
<b>DATOS DEL EMBALSE</b>	
% evaporación y filtración	5%

Volumen útil del embalse, m <sup>3</sup>	243 000 000
% del escurrimiento para generación	85,0%
Factor de utilización de la central, horas/año	5 000
Altura del salto máxima, m	36
Altura del salto mínima, m	32
<b>RESULTADOS</b>	
Escurrecimiento medio anual, m <sup>3</sup> /a	284 445 000
Volumen vertido, m <sup>3</sup> /a	41 445 000
Pérdidas totales por evaporación y filtración, m <sup>3</sup> /a	14 222 250
Entrega para generación y otros, m <sup>3</sup> /a	228 777 750
Entrega neta para generación, m <sup>3</sup> /a	194 461 087,5
Coefficiente de regulación anual del embalse	0,85
Altura del salto media, m	34
Energía a generar en el año, kWh/a	15 375 992,97
Potencia de proyecto, kW	3 075,20
Caudal de proyecto, m <sup>3</sup> /s	10,858

Con los datos del escurrimiento y la topografía del terreno, se determina si el conducto de aducción será mediante tuberías, túneles o canales, y se procede a su dimensionado de forma óptima. En la tabla 2 se muestra la hoja en la cual se procede a estos cálculos.

*Tabla 2. Determinación de las dimensiones del conducto aductor*

<b>Proyecto optimizado de los conductos de aducción</b>				
Dato Hoja 2			Dr. Luis J. García Faure	
Gasto, m <sup>3</sup> /s	10,86			
		Entrar datos		
	Longitud, m	Cota inicial, m	Cota final, m	Material pared
Canal	500	350	342	0,012
Túnel	200	342	340	0,025
<b>RESULTADOS</b>				
	Área sección, m <sup>2</sup>	Radio hidráulico, m	Ancho base, m	Altura solera, m
Canal	1,92	0,53	1,22	1,05
Túnel	Area sección, m <sup>2</sup>	Radio hidráulico, m	Diámetro, m	
	4,61	0,61	2,42	

En la hoja 3, tabla 3, con los datos tomados de la hoja 1, se procede a la

determinación del número, tipo de máquinas a utilizar y sus principales dimensiones.

Aquí el proyectista podrá interactuar con la herramienta y observará que para una misma potencia a instalar se pueden tener diferentes variantes en dependencia de los datos adicionales que le dé entrada. Así, por ejemplo, para el mismo salto hidráulico y caudal de proyecto, por la decisión que tome sobre el número de máquinas, número de polos del generador, relación de transmisión, etc., podrá determinar el tipo de máquinas que deberá utilizar y sus dimensiones.

Tabla 3. Determinación del tipo de máquinas y sus dimensiones

<b>Selección y dimensionado de los turbogeneradores</b>	
Datos tomados de hojas anteriores:	
Gasto de proyecto, m <sup>3</sup> /s	10,86
Salto hidráulico medio, m	34
Potencia de proyecto, kW	3 075,20
ENTRAR:	
Número de turbinas	<div style="display: flex; align-items: center; gap: 10px;"> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">2</div> <div style="font-size: 0.8em;">▼</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px;">1</div> <div style="font-size: 0.8em;">▼</div> </div> <div style="margin-left: 40px;"> <div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; display: inline-block;">1</div> <div style="font-size: 0.8em; margin-left: 5px;">▼</div> </div> <div style="margin-left: 100px;">2</div>
Relación de transmisión turbina-generador	1
Número de polos del generador	<div style="border: 1px solid gray; padding: 2px; display: inline-block;">14</div> <div style="font-size: 0.8em; margin-left: 5px;">▼</div> <div style="margin-left: 10px;">7</div>
<b>RESULTADOS PRELIMINARES</b>	
Potencia por turbina, kW	1 537,60
Gasto por turbina, m <sup>3</sup> /s	5,43
Revoluciones del generador, r.p.m.	514
Revoluciones de la turbina	514
Velocidad específica	286,45
<b>TIPO Y PARÁMETROS DE LAS TURBINAS</b>	
Mejor turbina:	Francis Alta velocidad
Eficiencia máxima	0,88
Relación ancho/diámetro B1/D1	0,29
Gasto unitario para máxima eficiencia	0,82
Revoluciones unitarias $n_1$	88,13
Gasto unitario máximo $Q_{1max}$	1,03
Relación diámetros $D_s/D_1$	1,07

(succión y exterior)	
Diámetro exterior del rodete $D1$ , m	1,00
Velocidad tangencia $U1$ , m/s	26,91
Velocidad tangencia unitaria $u1$	1,04
Diámetro de succión $Ds$ , m	1,07
Número de alabes $Z$	11,00
Ancho de entrada del agua al rodete $B$ , m	0,29
'-----	'-----

En la hoja 4 se procede a la determinación del número y diámetro óptimo de las tuberías de presión. Aquí el proyectista sólo tiene que entrar con un número limitado de datos, como son: material y espesor de la tubería y tiempo de vida útil de la misma. El resultado se obtiene de forma optimizada mediante la herramienta Solver de EXCEL.

El espesor y material de la tubería son parámetros que pueden influir en la velocidad de transmisión de la onda de presión en caso de producirse el golpe de ariete, que se calcula en la hoja 5, por lo que puede ser necesario, en algunos casos, volver a esta hoja y recalcular el diámetro de las tuberías con otro material o espesor. En la tabla 4 se muestra la hoja de cálculo para la optimización de las tuberías de presión.

*Tabla 4. Optimización de las tuberías de presión*

<b>Optimización económica del diámetro de tubería</b>	Dr. Luis G. García Faure
Caudal de proyecto, m <sup>3</sup> /s (tomado de la hoja 1)	10,86
Factor de utilización, horas/a (tomado de la hoja 1)	5 000
ENTRADA DE DATOS	
Longitud de tubería, m	100,00
Costo de la tonelada de tubería, CUC/ton	Acero 1 000,00
Seleccione el material de la tubería	2
Espesor de la tubería, m	0,015
Tarifa eléctrica, \$/kWh	0,1
Tasa anual de recuperación de la inversión, %	10%
Número de tuberías en paralelo	2
Ir a «Solver», en Herramientas	
RESULTADOS	

Peso específico del material de la tubería, kgf/m <sup>3</sup>	7 780
Rugosidad superficial de la tubería, m	4,50E-05
Velocidad del agua por la tubería, m/s	4,98
Coefficiente de fricción <i>f</i>	0,016
Pérdida de carga por rozamiento, m	3,39
Pérdida energía por rozamiento, kWh/año	16 619,53
Costo de la energía perdida por rozamiento, CUC/año	1 661,95
Peso del metro de tubería, ton/m	0,43
Costo del material de la tubería, CUC/año	8 636,50
Costo total anual de la tubería CUC, Objetivo	10 298,45
Diámetro óptimo de tubería, m	1,18
Puede hacer el análisis de sensibilidad variando el diámetro de tubería (C28)	

Un fenómeno que se puede presentar en las centrales es el golpe de ariete. Éste se produce durante el cierre de las válvulas en los momentos de disminución o rechazo de la carga aplicada a la máquina. Son muchos los factores que intervienen en la producción del golpe de ariete. Para que éste no se produzca, deben cumplirse las condiciones siguientes:

$$TH < Ta < TC$$

Donde:

*TC*: Tiempo de cierre del regulador, s.

*Ta*: Tiempo de aceleración de la máquina, s.

*TH*: Tiempo de aceleración del agua por la tubería, s.

El tiempo hidráulico depende de la relación L/H. Se recomienda que L/H < 5.

El tiempo de aceleración de la máquina depende del momento de inercia de la máquina. El procedimiento consiste en determinar estos tiempos (cada uno tiene su fórmula) y controlar el tiempo de cierre del regulador. En la tabla 5 se muestra la hoja para la optimización dinámica de la central.

*Tabla 5. Optimización dinámica de la central*

<b>Programa para la optimización dinámica de la central</b>	
(Cierre del regulador)	
Datos tomados de hojas anteriores	
Salto hidráulico medio <i>H</i> , m	34
Gasto de proyecto de la turbina <i>Q</i> , m <sup>3</sup> /s	5,43

Potencia de proyecto de la turbina $P$ , kW	1 537,60
Revoluciones normales de la turbina $Nn$	514
Diámetro de tubería de presión $d$ , m	1,18
Longitud de tubería de presión $L$ , m	100,00
Espesor de la tubería $e$ , m	0,015
Entrada de nuevos datos	
Material de la tubería	Acero
	15%
Incremento temporal máximo de velocidad permisible	30%
	0,15
Incremento máximo permisible de la presión, %	0,30
Tiempo de cierre del regulador $T_c$ , s	1,5
CONTINÚE	
ENTRE CON «SOLVER» EN HERRAMIENTAS	
RESULTADOS	
Velocidad de la onda de presión, m/s	1 057,86
Tiempo de la primera onda de presión $T_s$ , s	0,189
Tiempo hidráulico $TH$ , s	1,5
Parámetro de la válvula, Zita	7,93
Parámetro de la tubería, Rho	7,91
Tiempo de aceleración del grupo $T_a$ , s	10,0
Inercia del grupo $GD_2$ , kg-m <sup>2</sup>	21 275

En la hoja 6 se hace un resumen de los parámetros de operación y se determinan los principales elementos de evaluación económica y financiera del proyecto.

*Tabla 6. Evaluación económica y financiera del proyecto*

<b>Evaluación económica del proyecto</b>	<b>Luis García Faure. Universidad de Oriente</b>
Datos tomados de hojas anteriores	
Potencia de proyecto, kW	3 075,20
Energía generada en el año, kWh/a	15 375 992,97
Altura media del salto hidráulico, m	34
Número de grupos turbogeneradores	2
<b>ENTRAR</b>	
Tasa de interés bancario $i$ , %	5,0%
Años del ciclo de vida del proyecto	25
Costo de operación y mantenimiento, \$/a	5 000
Valor al final del ciclo de vida, \$	25 000
Precio de venta de la energía eléctrica, \$	0,09
<b>RESULTADOS</b>	
Costo aproximado del proyecto, \$	\$6 684 756,66
Tasa de retorno anual, %	7,10
Costo de la energía producida, \$/kWh	\$0,019
Período de recuperación de la inversión, años	4,85
Relación ingresos/costos	4,74
Ahorro de petróleo, ton/a, 200 g/kWh	3 075,20

## Conclusiones

1. Se ha desarrollado una metodología integral e interactiva que permite al proyectista tomar decisiones en breve tiempo sobre las mejores opciones durante el proyecto de las centrales hidroeléctrica con embalse regulador del escurrimiento.
2. La metodología ha sido evaluada con datos de centrales ya construidas en Ecuador y Nicaragua, pudiendo determinarse que con su aplicación se obtienen resultados similares.
3. En Cuba fue aplicada con los datos del escurrimiento de la presa Carlos Manuel de Céspedes, con lo cual se demostró que la generación de electricidad en un año normal aumenta de una generación de 9 000 MWh/a hasta unos 15 000 MWh/a, lo cual representa un ahorro de alrededor de 1 200 ton/a de petróleo.

## Bibliografía

GARCÍA FAURE, L. *Estudios de factibilidad y diseño de centrales hidroeléctricas*. Monografía. ESPOCH, Ecuador, 1994; Managua Nicaragua, 1999, 2001.

GARCÍA FAURE, L. «Optimización del proyecto y la explotación de pequeñas centrales hidroeléctrica». Tesis de Doctorado, Universidad de Oriente, 2005.

GRAVE DE PERALTA, ÁNGEL RICARDO. «Estudio de los problemas más comunes que se presentan en las PCH y propuestas de solución». Tesis de Maestría, Universidad de Oriente, 2005.

LASDON LEON; WARREN ALLAN. Herramienta Solver para la optimización con Excel. Estados Unidos de América, Universidad de Clevelan.

OLADE. *Dimensionado de pequeñas centrales hidroeléctricas*. Quito, Ecuador, 1986.

PETROBRAS. *Mini, micro y pequeñas centrales hidroeléctricas*. Brasil, 1991.

**Efecto del espacio muerto e irreversibilidades del regenerador sobre el comportamiento del ciclo de un motor Stirling**

## Effect of the dead space and irreversibilities of the regenerator on the cycle performance of a Stirling engine

*Por Dr. Juan José González Bayón  
Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER), I  
nstituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), La Habana, Cuba.*

### Resumen

El objetivo de este artículo es analizar un motor Stirling con regeneración imperfecta y con volumen muerto, basados en la termodinámica clásica. El análisis está dado en una forma general para considerar ambos efectos. Los resultados obtenidos en este artículo pueden proveer una guía general para el análisis del motor Stirling con regeneración imperfecta y volumen muerto.

**Palabras clave:** Motor Stirling, rendimiento térmico, termodinámica.

### Abstract

The objective of this paper is to analyze a Stirling engine with imperfect regeneration and with dead-like volume, based on classical thermodynamics. The analysis is given in a general way to consider both effects. The results obtained in this paper can provide a general guideline for the analysis of the Stirling engine with imperfect regeneration and dead-like volume.

**Key words:** Stirling engine, thermal efficiency, thermodynamics.

El motor Stirling es un tipo de motor de combustión externa que emplea un fluido compresible como sustancia de trabajo. El motor Stirling teóricamente puede poseer un rendimiento térmico de conversión de calor en trabajo igual al rendimiento de Carnot. El límite térmico para la operación de un motor Stirling depende sobre todo del material usado en su construcción. La mayoría de los motores reales no solares operan con temperatura de foco caliente de alrededor de 650 °C y con temperatura alrededor de 60-65 °C [Walter, 1980]. Los motores Stirling operando en estos intervalos de temperaturas con velocidades de giro de 2000 a 4 000 rpm alcanzan valores de rendimiento típico entre 30 y 40% [Stine, 1998].

La figura 1 muestra el diagrama simplificado de un motor Stirling con regeneración imperfecta.

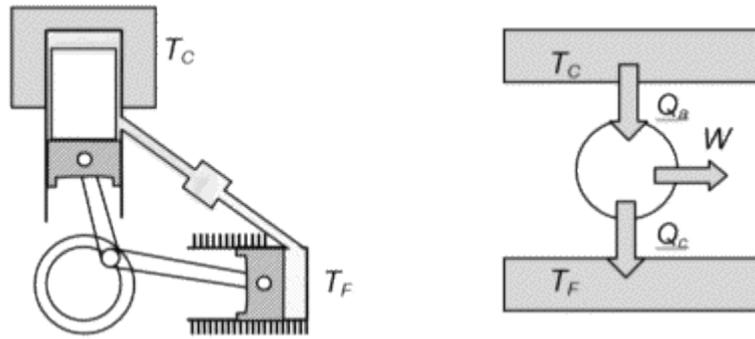


Fig. 1. Motor Stirling tipo  $\alpha$ .

En la figura 2 por su parte es mostrado los diagramas  $p-v$  y  $T-s$  de dicho motor con regeneración imperfecta.

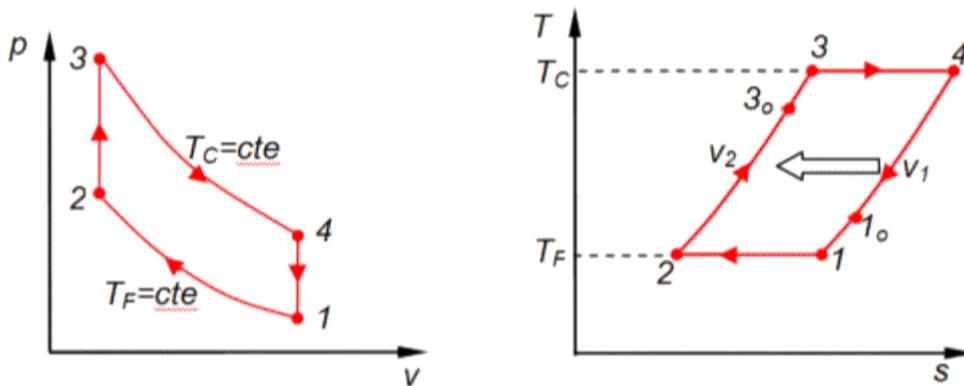


Fig. 2. Motor Stirling. Diagramas  $p-v$  y  $T-s$  del ciclo térmico.

Para un motor con regeneración ideal, todo el calor rechazado en el proceso 41 es absorbido por un regenerador perfecto y luego ese mismo calor es entregado nuevamente a la sustancia de trabajo durante el proceso 23. Para conseguir una regeneración ideal como la descrita, lógicamente es necesario un tiempo de regeneración y un área de transferencia de calor infinitos. Para un regenerador real (imperfecto), la temperatura de la sustancia de trabajo a la salida del regenerador nunca alcanza el valor  $T_3$ , ni  $T_1$ , sino que apenas logra ser  $T_{3_0}$  y  $T_{1_0}$ . Esto significa que para que el fluido eleve la temperatura hasta  $T_3$  desde  $T_{3_0}$ , debe absorber calor de una fuente externa, y que para reducir su temperatura desde  $T_{1_0}$  a  $T_1$  debe rechazar calor hacia el exterior [Walter, 1980]. Aunque en la bibliografía han sido reportados valores de efectividad del regenerador tan altos como 95, 98-99 y 99,09% [Dixit y Ghodke, 1992; Blank y Wu, 1994; Blank y Wu, 1995; Blank, 1998; Blank y Wu, 1998], los constructores de motores no tienen a la mano una tecnología que permita esos valores de efectividad de los regeneradores y, por tanto, los motores deben ser analizados con regeneradores imperfectos.

El volumen muerto en un motor es definido como el volumen ocupado por la sustancia de trabajo y que no participa en los procesos de trabajo (expansión/compresión). En el caso particular del motor Stirling, forman parte del volumen muerto el volumen de fluido contenido en el regenerador y en

todos los elementos de transferencia. Es evidente que un motor Stirling real posee un volumen muerto inevitable. En la práctica de diseño de los motores Stirling, el volumen muerto es de alrededor de 50-60% del volumen total [Martini, 1979]. Aunque muchos investigadores han analizado los motores Stirling, aún existe un amplio campo de desarrollo. La mayoría de los trabajos de análisis de motores Stirling [Kongtragool y Wongwises, 2002] de la literatura son presentados con regeneración ideal y volumen muerto nulo. El motor Stirling con regeneración imperfecta e incluyendo volumen muerto ha recibido muy poca atención en la literatura y debe ser estudiado con más detalle.

El motor Stirling incluyendo volumen muerto puede ser analizado por la técnica de Schmidt; sin embargo, en el análisis de Schmidt [Walter, 1980] es asumida la regeneración ideal. Para motores Stirling con grandes valores de volumen muerto, es importante tener la temperatura correcta de la sustancia de trabajo en el regenerador. La temperatura efectiva media del fluido de trabajo contenido en el regenerador puede ser calculada tomando las temperaturas extremas del fluido en el volumen muerto del regenerador en cada sentido de flujo [Martini, 1979], es decir,  $T_{30}$  en un sentido y  $T_{10}$  en el otro. La temperatura efectiva media del regenerador puede ser hallada de dos formas fundamentales: como la media aritmética [Walter, 1980; Martini, 1979] y como la media logarítmica [Martini, 1979] de las temperaturas de entrada y salida del fluido de trabajo en el regenerador.

Martini [1979] usó la temperatura efectiva media logarítmica del regenerador en el análisis del motor Stirling con volumen muerto, resultando que la temperatura efectiva media logarítmica del regenerador fue infinita para una efectividad del regenerador de 50%, dado que  $T_{30}$  en ese caso es igual a  $T_{10}$ . Por tanto, la temperatura efectiva media logarítmica del regenerador no debe ser usada para regenerador con efectividad variable. La temperatura efectiva media aritmética del regenerador resulta una buena aproximación.

### Regenerador imperfecto

La efectividad del regenerador,  $\eta_r$ , de un regenerador imperfecto es definida como:

$$\eta_r = (T_{30} - T_1) / (T_3 - T_1) \quad (1)$$

El valor de  $\eta_r$  es 1 cuando la efectividad del regenerador es 100%, es decir, un regenerador ideal y  $\eta_r$  es cero cuando la efectividad es de 0%, o sea, que no existe regeneración. La temperatura del fluido a la salida del regenerador puede expresarse en función de la efectividad del regenerador como:

$$T_{30} = T_1 + \eta_r (T_3 - T_1) \quad (2)$$

Para un regenerador con igual efectividad en calentamiento que en enfriamiento, los calores intercambiados en ambos procesos serán iguales,  $Q_{230} - Q_{410}$ , luego:

$$\eta r = (T_4 - T_{10}) / (T_4 - T_1)$$

Siendo  $T_4 = T_3$

Y la temperatura del fluido de trabajo a la salida en enfriamiento será:

$$T_{10} = T_3 - \eta r (T_3 - T_1) \quad (3)$$

La temperatura efectiva del fluido de trabajo contenido en el regenerador puede ser determinada usando la media aritmética [Walter, 1980; Martini, 1979]:

$$Tr = (T_{30} - T_{10}) / 2 \quad (4)$$

Sustituyendo (2) y (3) en (4) se obtiene:

$$Tr = (T_3 - T_1) / 2 \quad (5)$$

De donde puede ser concluido que usando la temperatura efectiva media aritmética del regenerador, ésta es independiente de la efectividad del regenerador.

### **Volúmenes muertos**

Asúmase que los volúmenes muertos en el espacio caliente, en el regenerador y en el espacio frío, en m<sup>3</sup>, son  $V_{mc}$ ,  $V_{mr}$  y  $V_{mf}$ , respectivamente. El volumen muerto total será:

$$V_m = V_{mc} + V_{mr} + V_{mf} \quad (6)$$

Definiendo las razones de espacio muerto de cada región, se tiene:

$$r_{mc} = V_{mc} / V_m; \quad r_{mr} = V_{mr} / V_m \quad (7)$$

Donde:

$r_{mc}$ : Razón de volumen muerto del espacio caliente.

$r_{mr}$ : Razón de volumen muerto del regenerador.

$r_{mf}$ : Razón de espacio muerto del espacio frío. De forma que,  $r_{mc} + r_{mr} + r_{mf} = 1$ .

Por otra parte, se define la razón de espacio muerto total como:

$$r_m = V_m / V_t \quad (8)$$

Observando que  $V_t$  es el volumen total del motor, es decir,  $V_t = V_m + V_d + V_p$ . Los volúmenes corresponden a los volúmenes de barrido del desplazador  $V_d$  y el pistón  $V_p$ , o de cada pistón según el tipo de motor analizado. Así:

$$V_m = r_m (V_m + V_d + V_p) \quad (8a)$$

Una forma más cómoda es relacionar el volumen muerto total al volumen de barrido del motor solamente, es decir:

$$r_{mdp} = V_m / (V_d + V_p) \quad (9)$$

De donde resulta que:

$$r_m = r_{mdp} / (1 + r_{mdp}) \quad (10)$$

### Relación $pVT$

Considerando que el fluido de trabajo es un gas ideal, la relación  $pVT$  vendrá dada por la ecuación de estado del gas ideal:

$$p \sum_i \frac{V_i}{T_i} = mR$$

La sumatoria corresponde a la relación del volumen-temperatura de cada región  $i$  del motor. Así:

$$\sum_i \frac{V_i}{T_i} = \frac{V_c}{T_3} + \left( \frac{V_{mc}}{T_3} + \frac{V_{mr}}{(T_3 + T_1)/2} + \frac{V_{mf}}{T_1} \right) + \frac{V_f}{T_1} \quad (11)$$

Obsérvese que los volúmenes  $V_c$  y  $V_f$  son variables y dependen de cada proceso, mientras que los volúmenes muertos son constantes, de manera que el término entre paréntesis resulta siempre constante, pudiendo expresarse como:

$$\sum_i \frac{V_i}{T_i} = \frac{V_c}{T_3} + C + \frac{V_f}{T_1}$$

$$C = \left( \frac{V_{mc}}{T_3} + \frac{V_{mr}}{(T_3 + T_1)/2} + \frac{V_{mf}}{T_1} \right)$$

Siendo:

### Análisis energético del motor

Se analizan, a continuación, las transferencias de energía de cada proceso del ciclo del motor.

#### *Compresión isotérmica, proceso 12*

En este proceso el gas del lado frío es comprimido desde  $V_1 = V_d + V_p$ , hasta el volumen  $V_2 = V_d$ . El volumen barrido en el espacio caliente durante este

proceso es nulo. Durante la compresión isotérmica, el trabajo consumido y el calor rechazado son:

$$Q_{12} = W_{12} = \int_{V_1}^{V_2} p dV_f = \int_{V_1}^{V_2} \frac{mR}{(V_f/T_1 + C)} dV_f = mRT_1 \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV_f}{V_f + CT_1}$$

$$Q_{12} = W_{12} = mRT_1 \ln[(V_2 + CT_1)/(V_1 + CT_1)] \quad (12)$$

$$Q_{12} = W_{12} = mRT_1 \ln[(V_d + CT_1)/(V_d + V_p + CT_1)]$$

Nótese que el trabajo de compresión (el calor rechazado), para volúmenes de barrido fijos, es sólo función del espacio muerto, representado por C.

#### *Calentamiento isocórico, proceso 23*

El calor absorbido por la sustancia de trabajo en el proceso, es:

$$Q_{23} = \Delta U_{23} = mc_v (T_3 - T_2) \quad (13)$$

Donde se ha asumido el calor específico a volumen constante  $c_v$  (kJ/kgK) como constante a la temperatura media del proceso.

Si el motor posee un regenerador ideal (perfecto), esta cantidad de calor es entregada al fluido de trabajo por el regenerador, mientras que si no existe regeneración todo este calor deberá ser absorbido por el gas desde una fuente externa.

Si el regenerador existe, pero es imperfecto, entonces el gas absorberá calor del regenerador sólo hasta alcanzar la temperatura  $T_{30}$ , o sea:

$$Q_{230} = \Delta U_{230} = mc_v (T_{30} - T_2) = mc_v \eta_r (T_3 - T_1)$$

Mientras que el resto de la energía para elevar su temperatura hasta  $T_3$  debe absorberla de la fuente externa, de manera que:

$$Q_{303} = \Delta U_{303} = mc_v (T_3 - T_{30}) = mc_v (1 - \eta_r)(T_3 - T_1) \quad (14)$$

De donde se aprecia que dicho calor es función de la efectividad del regenerador.

#### *Expansión isotérmica, proceso 34*

En este proceso el gas del lado caliente se expande desde  $V_3 = V_d$ , hasta el volumen

$V_4 = V_d + V_p$ . El volumen barrido en el espacio frío durante este proceso es nulo.

Durante la expansión isotérmica, el trabajo realizado y el calor absorbido, son:

$$Q_{34} = W_{34} = \int_{V_3}^{V_4} p dV_c = \int_{V_3}^{V_4} \frac{mR}{(V_c/T_3 + C)} dV_c = mRT_3 \int_{V_3}^{V_4} \frac{dV_c}{V_c + CT_3}$$

$$Q_{34} = W_{34} = mRT_3 \ln[(V_4 + CT_3)/(V_3 + CT_3)] \quad (15)$$

$$Q_{34} = W_{34} = mRT_3 \ln[(V_d + V_p + CT_3)/(V_d + CT_3)]$$

El trabajo de expansión (calor absorbido) es función del espacio muerto, representado por C.

*Enfriamiento isocórico, proceso 41*

El calor rechazado por la sustancia de trabajo en el proceso, es:

$$Q_{41} = \Delta U_{41} = mc_v(T_1 - T_4) \quad (16)$$

Nuevamente se ha asumido el calor específico a volumen constante  $c_v$  (kJ/kgK) como constante a la temperatura media del proceso.

Si el motor posee un regenerador ideal (perfecto), esta cantidad de calor es rechazada por el fluido de trabajo hacia el regenerador, mientras que si no existe regeneración todo este calor deberá ser rechazado por el gas hacia una fuente externa.

Si el regenerador existe, pero es imperfecto, entonces el gas rechaza calor hacia el regenerador sólo hasta alcanzar la temperatura  $T_{10}$ , o sea:

$$Q_{410} = \Delta U_{410} = mc_v(T_{10} - T_4) = -mc_v \eta_r (T_3 - T_1)$$

Mientras que el resto de la energía para bajar su temperatura hasta  $T_1$  debe rechazarla hacia la fuente externa:

$$Q_{101} = \Delta U_{101} = mc_v(T_1 - T_{10}) = -mc_v(1 - \eta_r)(T_3 - T_1) \quad (17)$$

De donde se aprecia que dicho calor es función de la efectividad del regenerador.

*Calor total absorbido por el ciclo*

Si el motor posee un regenerador imperfecto, entonces el calor que absorbe el ciclo desde una fuente externa será:

$$Q_{abs} = Q_{34} + Q_{303}$$

$$Q_{abs} = mRT_3 \ln[(V_d + V_p + CT_3)/(V_d + CT_3)] + mc_v(1 - \eta_r)(T_3 - T_1)$$

Y recordando que  $R = cv(k-1)$ , se tiene:

$$Q_{abs} = mc_v \{ (k-1)T_3 \ln[(V_d + V_p + CT_3)/(V_d + CT_3)] + (1 - \eta_r)(T_3 - T_1) \} \quad (18)$$

El calor absorbido por el motor depende de la efectividad del regenerador y del espacio muerto.

Nótese que si el regenerador fuese perfecto  $\alpha_r = 1$ , el calor absorbido se reduciría a  $Q_{abs} = Q_{34}$ , en tanto, que si no existe regenerador  $Q_{abs} = Q_{34} + Q_{23}$ .

#### *Calor total rechazado por el ciclo*

Similar a lo visto anteriormente, si el motor posee un regenerador imperfecto, entonces el calor que rechaza el ciclo hacia una fuente externa, será:

$$Q_{ced} = Q_{12} + Q_{101}$$

$$Q_{ced} = mRT_1 \ln[(V_d + CT_1)/(V_d + V_p + CT_1)] - mc_v(1 - \eta_r)(T_3 - T_1)$$

Arreglando:

$$Q_{ced} = -mc_v \{ (k-1)T_1 \ln[(V_d + V_p + CT_1)/(V_d + CT_1)] + (1 - \eta_r)(T_3 - T_1) \} \quad (19)$$

El calor cedido por el motor también depende de la efectividad del regenerador y del espacio muerto.

Si el regenerador fuese perfecto  $\alpha_r = 1$ , el calor cedido se reduciría a  $Q_{ced} = Q_{12}$ , en tanto, que si no existe regenerador  $Q_{ced} = Q_{12} + Q_{41}$ .

#### *Trabajo neto del ciclo*

El trabajo neto del ciclo es iguala al calor neto, luego:

$$W_{neto} = \sum Q_i = Q_{abs} + Q_{ced}$$

Sustituyendo:

$$W_{neto} = mc_v \{ (k-1)T_3 \ln[(V_d + V_p + CT_3)/(V_d + CT_3)] + (1 - \eta_r)(T_3 - T_1) \} - mc_v \{ (k-1)T_1 \ln[(V_d + V_p + CT_1)/(V_d + CT_1)] + (1 - \eta_r)(T_3 - T_1) \} \quad (20)$$

Arreglando:

$$W_{neto} = mc_v (k-1) \{ T_3 \ln[(V_d + V_p + CT_3)/(V_d + CT_3)] - T_1 \ln[(V_d + V_p + CT_1)/(V_d + CT_1)] \}$$

La expresión evidencia que el trabajo neto depende del espacio muerto, pero no de la efectividad del regenerador.

Si el volumen muerto fuese nulo,  $C = 0$ , y entonces:

$$W_{neto} = mc_v (k-1)(T_3 - T_1) \ln[(V_d + V_p)/V_d] = mR(T_3 - T_1) \ln(V_1/V_2)$$

Que es la expresión para el trabajo que aparece en los textos de termodinámica.

*Rendimiento térmico del ciclo*

El rendimiento térmico del motor, como el de cualquier máquina térmica, puede hallarse por:

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{abs}} \tag{21}$$

$$\eta = (k-1) \{ T_3 \ln[(V_d + V_p + CT_3)/(V_d + CT_3)] - T_1 \ln[(V_d + V_p + CT_1)/(V_d + CT_1)] \} / \{ (k-1)T_3 \ln[(V_d + V_p + CT_3)/(V_d + CT_3)] + (1-\eta_r)(T_3 - T_1) \}$$

Lógicamente, el rendimiento depende del espacio muerto y de la efectividad del regenerador.

Si el espacio muerto es nulo,  $C = 0$ , y entonces:

$$\eta = (k-1)(T_3 - T_1) \ln[(V_d + V_p)/V_d] / \{ (k-1)T_3 \ln[(V_d + V_p)/V_d] + (1-\eta_r)(T_3 - T_1) \} \tag{22}$$

Que arreglada, resulta:

$$\eta = (T_3 - T_1) / \{ T_3 + (1-\eta_r)(T_3 - T_1) / (k-1) \ln(V_1 / V_2) \}$$

Obsérvese que si el regenerador no existe  $\alpha_r = 0$ , se tiene el peor caso y el rendimiento queda:

$$\eta = (T_3 - T_1) / \{ T_3 + (T_3 - T_1) / (k-1) \ln(V_1 / V_2) \} \tag{23}$$

Por el contrario, si el regenerador es ideal  $\alpha_r = 1$ , entonces el rendimiento se convierte en el máximo alcanzable por el motor, es decir:

$$\eta = (T_3 - T_1) / T_3$$

Que es el rendimiento de Carnot de un motor operando entre dos focos térmicos a  $T_3$  y  $T_1$ .

Para evaluar la influencia del espacio muerto sobre el comportamiento del motor, todas las ecuaciones deben ser expresadas en términos del volumen muerto del motor y de la efectividad del regenerador.

Para el análisis se toma un motor con las características de la tabla 1.

*Tabla 1. Motor Stirling en «V» presurizado con  $p = 250 \text{ kPa}$  y razón de compresión  $V_d/V_p = 1$*

Temperatura de la zona caliente	650 K
Temperatura de la zona fría	340 K
Volumen de barrido de cada pistón	141 cm <sup>3</sup>
Razón de volumen muerto del espacio caliente	0,25
Razón de volumen muerto del regenerador	0,5
Razón de volumen muerto del espacio frío	0,25

De los datos resulta:

Temperatura media efectiva del regenerador:

$$T_r = (T_3 + T_1) / 2 = 495 \text{ K}$$

Volumen de trabajo de los cilindros:

$$V_1 = V_d + V_p = 1,5(141) = 211,5 \text{ cm}^3$$

$$V_2 = V_d = 0,5(141) = 70,5 \text{ cm}^3$$

Razón espacio muerto / volumen de barrido:

$$r_{mdp} = V_m / V_1 = (1/211,5) V_m$$

Razón de espacio muerto total:

$$r_m = r_{mdp} / (1 + r_{mdp}) = (V_m / 211,5) / (1 + V_m / 211,5)$$

$$C = \left( \frac{V_{mc}}{T_3} + \frac{V_{mr}}{(T_3 + T_1)/2} + \frac{V_{mf}}{T_1} \right) = \left( \frac{0,25}{650} + \frac{0,5}{475} + \frac{0,25}{300} \right) V_m$$

$$C = 0,00227 V_m \text{ m}^3$$

Masa de sustancia de trabajo:

$$m = \left( \frac{p}{R} \sum_i \frac{V_i}{T_i} \right) = \left( \frac{250}{0,287} \right) [141 \cdot 10^{-6} / 2(650) + 0,00227 V_m + 141 \cdot 10^{-6} / 300]$$

$$m = 0,000503 + 1,977 V_m, \text{ kg}$$

*Trabajo*

Compresión:

$$W_{12} = Q_{12} = mRT_1 \ln[(V_d + CT_1) / (V_d + V_p + CT_1)]$$

$$W_{12} = (0,000503 + 1,977 V_m)(0,287)(300) \ln[(141 \cdot 10^{-6} + 0,681 V_m) / (211,5 \cdot 10^{-6} + 0,681 V_m)], \text{ kJ}$$

Expansión:

$$W_{34} = Q_{34} = mRT_3 \ln[(V_d + V_p + CT_3) / (V_d + CT_3)]$$

$$W_{34} = (0,000503 + 1,977 V_m)(0,287)(650) \ln[(211,5 \cdot 10^{-6} + 1,475 V_m) / (141 \cdot 10^{-6} + 1,475 V_m)], \text{ kJ}$$

Calor absorbido extra por imperfección en el regenerador:

$$Q_{303} = \Delta U_{303} = (1 - \eta_r) m c_v (T_3 - T_1)$$

$$Q_{303} = (1 - \eta_r)(0,000503 + 1,977 V_m)(0,716)(350), \text{ kJ}$$

## Resultados y discusión

El efecto del volumen muerto sobre el trabajo de compresión, el trabajo de expansión, el trabajo neto, el calor absorbido y el rendimiento del motor será valorado para diferentes razones de espacio muerto total  $rm = 0; 0,166; 0,285; 0,375; 0,444; 0,5; 0,6$  (equivalentes a las razones espacio muerto respecto al de volumen de barrido del motor  $rmdp = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,5$ ) y varios valores de la efectividad del regenerador  $ar = 0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$ , tal como se muestra en las figuras 3-5.

La figura 3 muestra el comportamiento del trabajo de compresión, de expansión y neto del motor versus la razón de espacio muerto total. Se observa que las curvas de los tres trabajos considerados disminuyen con el espacio muerto y son independientes de la efectividad del regenerador. Puede apreciarse que la tasa de disminución del trabajo de compresión con el espacio muerto es mucho menor que la caída que sufre el trabajo de expansión con el aumento del volumen muerto. Observándose una dependencia muy apreciable en el trabajo neto con respecto al volumen muerto. Esta gráfica expresa claramente que deben evitarse incrementos no justificados del espacio muerto, pues la elevación del espacio muerto reduce considerablemente el trabajo que puede ser entregado por el motor.

La figura 4 muestra la dependencia del calor absorbido por el motor como función del volumen muerto y de la efectividad del regenerador. Si el calor absorbido total es interpretado como la sumatoria del trabajo de expansión más el calor externo necesario absorber por imperfección en el regenerador, entonces es simple ver que para el motor con regeneración perfecta el calor absorbido total debe decrecer con el aumento del volumen muerto, puesto que en esas circunstancias el trabajo de expansión decrece y no es necesario calor alguno para suplir la imperfección del regenerador. Si el regenerador es imperfecto se necesita absorber calor para reponer la imperfección del regenerador, ese calor a reponer es mayor en la medida que crece el volumen muerto, pues hay más masa en el sistema y en consecuencia, el calor absorbido total tiende a aumentar en la medida que aumenta el volumen muerto siendo imperfecto el regenerador. Del razonamiento anterior, resulta evidente que en la medida que la efectividad del regenerador decrece mayor será el calor necesario absorber para reponer la imperfección y mayor también será el efecto del muerto sobre el aumento del calor total a absorber.

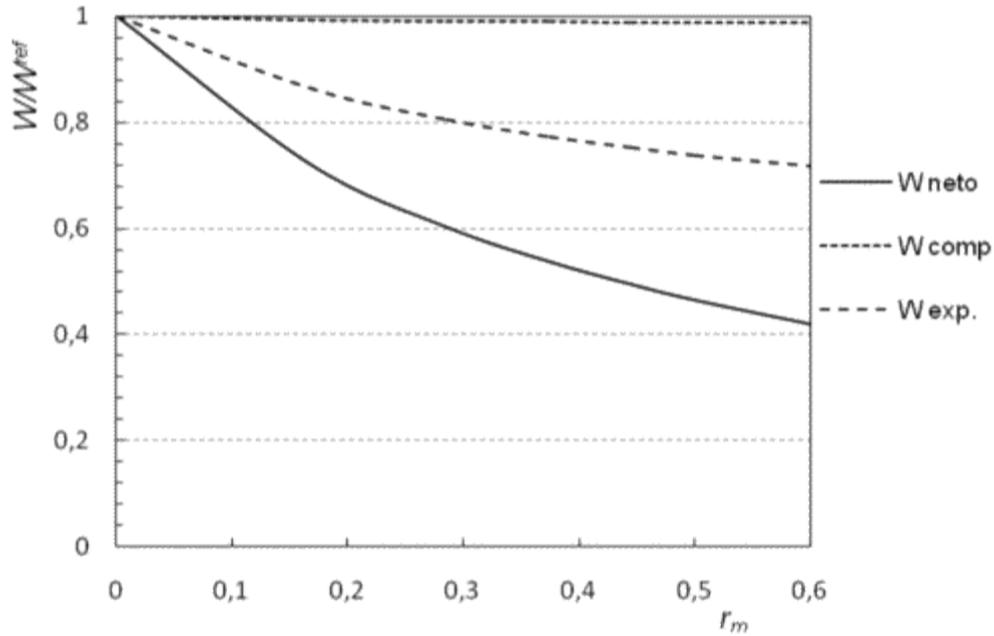


Fig. 3. Comportamiento del trabajo de compresión, de expansión y neto del motor vs. la razón de espacio muerto total.

Puede concluirse que un motor con un regenerador real y un volumen muerto grande, demandará una elevada cantidad de calor absorbido para su funcionamiento.

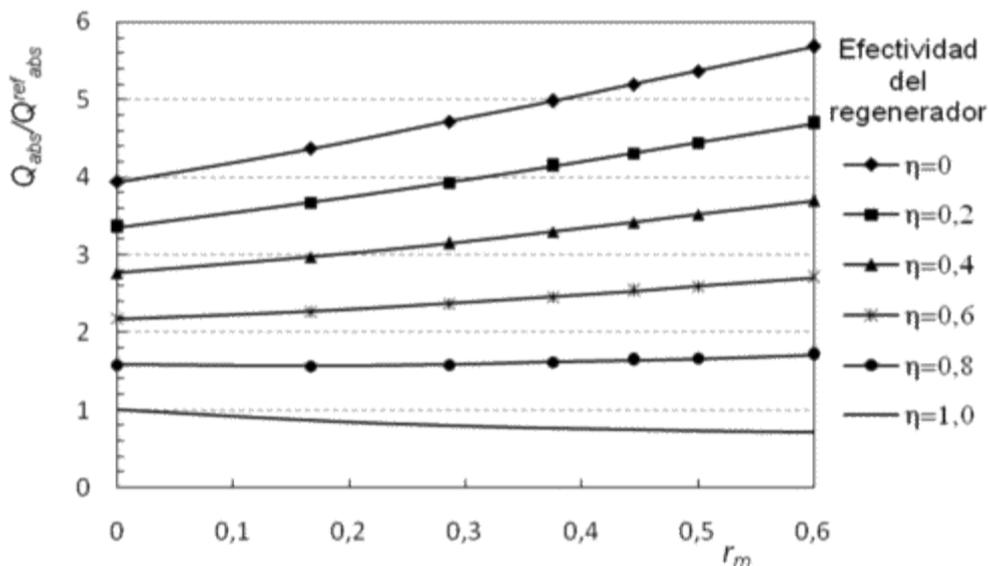


Fig. 4. Dependencia del calor absorbido por el motor como función del volumen muerto y de la efectividad del regenerador.

La figura 5 muestra el comportamiento del rendimiento térmico del motor con la efectividad del regenerador y el volumen muerto. Se observa que a mayor efectividad del regenerador mayor rendimiento térmico, lo cual es esperado teniendo en cuenta que el trabajo neto no depende de la efectividad del regenerador, mientras que el calor absorbido total disminuye en la medida que la misma crece. Con relación al volumen muerto el comportamiento es contrario

al analizado, pues como fue visto antes el calor absorbido total se incrementa con el volumen muerto, en tanto que el trabajo neto decrece con el mismo, lo que conduce a que el rendimiento térmico disminuya apreciablemente en la medida que aumenta el volumen muerto.

Estos resultados conducen a la conclusión que todo motor Stirling, con alto volumen muerto y regeneración muy imperfecta, tendrá un rendimiento térmico muy bajo.

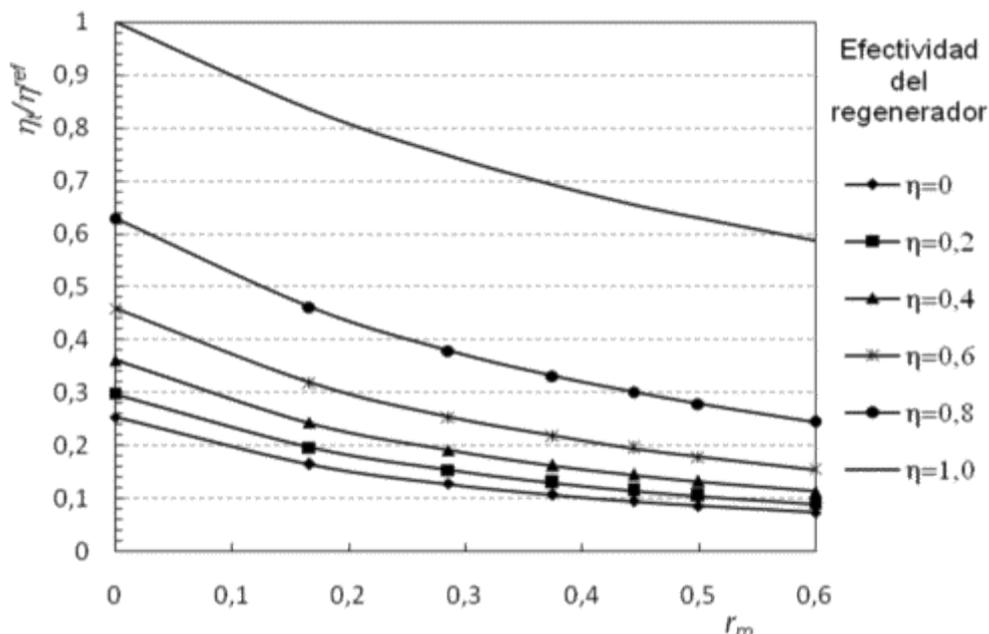


Fig. 5. Comportamiento del rendimiento térmico del motor con la efectividad del regenerador y el volumen muerto.

## Conclusiones

El estudio realizado en este trabajo muestra que el análisis termodinámico clásico es adecuado para evaluar el comportamiento de un motor Stirling con regeneración imperfecta y volumen muerto.

El análisis presentado proporciona un método analítico más próximo a la realidad para estudiar y evaluar el comportamiento y las mejoras de un motor Stirling, en comparación con otros modelos que no conjugan al mismo tiempo ambos factores (espacio muerto y efectividad del regenerador).

Los resultados muestran que, para un motor Stirling con regeneración imperfecta, con volumen muerto y donde se asume la temperatura efectiva media aritmética del regenerador, algunos elementos evaluativos del comportamiento del motor dependen solamente del volumen muerto, en tanto otros son afectados por ambos factores (volumen muerto y efectividad del regenerador).

Por tanto, puede concluirse que:

1. Un motor Stirling con un volumen muerto dado no verá afectado su trabajo neto por colocar un regenerador más o menos efectivo, si se toma la temperatura efectiva de regenerador como la media aritmética entre la

temperatura del calentador y del enfriador. Sin embargo, un motor con un regenerador ineficiente precisa de mayor entrega de calor al motor (calor absorbido) y también mejor enfriamiento que otro motor similar con un regenerador más eficiente.

2. El volumen muerto hace decrecer el trabajo neto y el rendimiento térmico del motor, y hace que aumente el calor que es necesario absorber para el trabajo del ciclo. No obstante, en todo motor real es inevitable la presencia de un volumen muerto.

3. Para motores con grandes volúmenes muertos sólo se podrá esperar pequeños valores del trabajo entregado.

4. Para alcanzar alto rendimiento térmico del motor es indispensable un regenerador con alta efectividad. Un motor sin regenerador está predestinado a poseer un rendimiento muy bajo, independientemente de su volumen muerto.

## Bibliografía

Blank, D. A. «Universal Power Optimized Work for Reciprocating Internally Reversible Stirling-Like Heat Engine Cycles with Regeneration and Linear External Heat Transfer», *J. Appl. Phys.* 84(5): 2385-92, 1998.

Blank, D. A. and C. Wu. «Finite-Time Power Limit for Solar-Radiant Ericsson Engines in Space Applications», *Appl. Therm. Eng.*, 18: 1347-57, 1998.

Blank, D. A. and C. Wu. «Power Optimization of an Extra-terrestrial, Solar-radiant Stirling Heat Engine», *Energy*, 20(6): 523-30, 1995.

Blank, D.A. and C. Wu. «Power potential of a terrestrial solar-radiant Stirling heat engine», *J. Ambient Energy*, 15(3): 131-9: 1994.

Dixit, D. K. and S. V. Ghodke. «Renewable Energy Powered Stirling Engines-a Viable Energy Alternative». In: Sayigh, A. A. M., editor. *Renewable Energy Technology and the Environment. Proceedings of the Second World Renewable Energy Congress*, vol. 2, 1992. p. 934-8.

Kongtragool, B. and S. Wongwises. A Review of Solar Powered Stirling Engines and Low Temperature Differential Stirling Engines, *Renew. Sust. Energy Rev.* 7: 131-54, 2003.

Martini, W. R. «Stirling Engine Design Manual», report no. NASA CR-135382. In: M. J. Collie, editor. *Stirling Engine Design and Feasibility for Automotive Use*. New Jersey: Noyes data corp., 1979. p. 60 see also pages 64, 67, 70 and 77.

Stine, W. B. «Stirling Engines». In: Kreith, F., editor. *The CRC Handbook of Mechanical Engineers*. Boca Raton: CRC Press, 1998. p. 8-67.

Walker, G. *Stirling Engines*. Oxford: Clarendon Press, 1980. p. 24-5.

## **Evaluación preliminar de las externalidades atmosféricas provocadas por el transporte automotor**

### **Preliminary assessment of the atmospheric externalities caused by the automotive transport**

*Por Elieza Meneses Ruiz\*, Leonor Turtós Carbonell\*, Ernesto Paz Ortega\*, José de Jesús Rivero Oliva\*, Norberto Díaz Rivero\*, Saturnino Pires Rivas\*\*, José Manuel Villarroel\*\*\*, Rafael Biart Hernández\*\*\*, Katia Rivero Cruz\*\*\*, Enrique Molina Esquivel\*\*\*\**

*\* Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía, CUBAENERGÍA.  
Calle 20 No. 4111 e/ 18-A y 47, Playa, 11300, La Habana, Cuba.  
Tel.: (+537) 206 2065 y 2027527.  
Fax: (+537) 206 2065 y 204 1188.  
e-mail: emeneses@cubaenergia.cu*

*\*\* Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE), Cuba.*

*\*\*\* Centro de Investigación y Desarrollo del Transporte (CETRA), Cuba.*

*\*\*\*\* Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología (INHEM), Cuba.*

## **Resumen**

Las emisiones atmosféricas del transporte tienen su mayor impacto directo o indirecto sobre la salud humana, aunque también afectan a otros receptores, como materiales de construcción, ecosistemas, incrementan el calentamiento global, etc. Estas emisiones constituyen una de las fuentes principales de contaminación atmosférica en las zonas urbanas, incidiendo directamente en la disminución de la calidad de vida de las personas. La estimación del impacto que provoca la polución debida a la emisión de diferentes contaminantes atmosféricos que genera el sector del transporte, es necesaria expresarla en términos económicos; este proceso se conoce como estimación de las externalidades [www.gssr] o costos externos (por externalidades se entiende los impactos de cualquier actividad (productiva, de distribución y de consumo), sobre el medio ambiente y el bienestar de la población, que no se reflejan en los precios de mercado). Aunque estos costos no lleguen a ser propiamente internalizados, el simple hecho de conocerlos ayuda a crear condiciones más favorables para el trazado de políticas y estrategias con vistas a reducir las emisiones generadas por este sector, entre las que podrían incluirse: la introducción de tecnologías para reducir las emisiones, el empleo de combustibles más eficientes y(o) menos contaminantes, etcétera. La estimación de las externalidades para el transporte es una tarea compleja, pues requiere de experiencia multidisciplinaria y una amplia gama de datos, generalmente de difícil obtención. Siguiendo la metodología general «Vías de impacto», el proceso de estimación de las externalidades involucra cuatro etapas fundamentales: obtención del volumen de emisiones, estimación de las afectaciones a la calidad del aire, evaluación de los impactos y estimación de los costos debido a los impactos. En el presente trabajo se realiza una

recopilación de las herramientas aplicadas, desde el punto de vista metodológico, en cada una de las cuatro etapas fundamentales, y los resultados obtenidos para los tramos de vías escogidos de la Ciudad de La Habana. Los resultados obtenidos sugieren que los costos del daño alcanzan 7,58 millones de pesos, cifra elevada si se tiene en cuenta que sólo se han evaluado pequeños tramos de vías.

**Palabras clave:** Externalidades atmosféricas, contaminación del transporte automotor.

### **Abstract**

The atmospheric emissions of transportation have its bigger direct or indirect impact on health, although also affect other receptors, like building materials, ecosystems, contribute to increasing global warming, etc. These emissions are one of the main sources of atmospheric pollution in urban areas, directly causing the decrease of the quality of life of the people. It is necessary to express the estimation of the impact of pollution due to the emission of different atmospheric pollutants generated by the transportation sector, in economic terms; this process is known as estimation of externalities or external costs. An externality is the impact of any activity (productive, distribution or consumption), on the environment and the well-being of the population, that is not reflected in market prices. Although these costs are not properly internalized, the simple fact of knowing them helps to create more favorable conditions for designing policies and strategies with the purpose of reducing the emissions generated by this sector, like the introduction of technologies to reduce emissions and the use of more efficient and (or) less polluting, fuels. The estimation of the externalities of the transportation sector is a complex task, because it needs a multidisciplinary approach, a broad experience and a wide range of data, generally difficult to obtain. Following the general methodology, the process of estimating externalities has four fundamental steps: Obtaining the volume of emissions, estimating the affectations to the quality of the air, evaluation of the impacts and estimation of the costs due to the impacts. In the present paper we present a methodological compilation of the tools applied in each of the four fundamental steps aforementioned, and the results obtained for the stretches of streets chosen in the city of Havana. The results obtained suggest that the costs of the damage attain 7.58 million Cuban pesos, a high figure considering the limited span of the study.

**Key words:** Atmospheric externalities, pollution of automotive transportation.

Objetivo general Evaluación preliminar de las externalidades del transporte para tramos de vías seleccionados en Ciudad de La Habana, a partir de la adecuación con «know how» propio de diferentes metodologías aplicadas internacionalmente. Metodología Como metodología general se aplicó la metodología «Vías de impacto». Esta metodología fue aplicada con anterioridad para estimar las externalidades de instalaciones energéticas. La metodología consta de cuatro etapas de evaluación fundamentales, tal como se muestra en la figura 1.

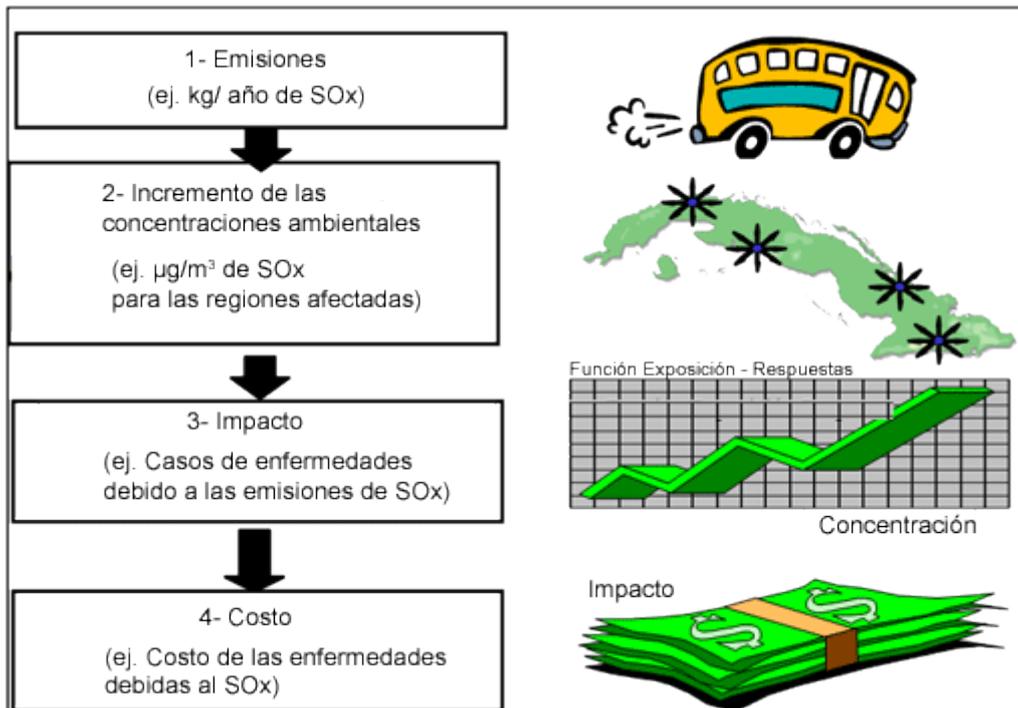


Fig. 1. Metodología «Vías de impacto».  
Contaminación atmosférica local y regional.

Fuente: Elaboración propia con base en European Commission, ExternE, 1995. Para realizar la evaluación correspondiente a cada una de las etapas, se adoptaron, aplicaron y(o) desarrollaron, con know how propio, diferentes metodologías.

La evaluación se realizó en cuatro tramos de vías principales de la Ciudad de La Habana, donde existe un alto flujo vehicular. Se estudiaron tres donde el flujo vehicular es libre: Vía Monumental, Reina y Monserrate; y una cuarta controlada por semáforo: Toyo. *Evaluación de las emisiones del transporte*

Para el cumplimiento de esta etapa, se utilizó el modelo IVE (International Vehicle Emissions model) [www.gssr], por tratarse de un modelo relativamente sencillo, validado mediante su aplicación en un número importante de ciudades de todo el mundo y orientado hacia las especificidades de países en vías de desarrollo [Davis, *et al.* 2004; Lents, *et al.*, 2001].

Este modelo basa su metodología en el cálculo de las emisiones, en parada, arranque, en marcha y evaporativas por tipo de vehículo en dependencia del ciclo de manejo que se realiza. Por carencias de recursos no se pudieron evaluar las emisiones durante el arranque.

A diferencia de otros países donde la aplicación de este modelo se basa en el uso de técnicas novedosas, como el empleo de GPS y dispositivos en el encendido de los vehículos, para determinar de forma automática el número de veces que se enciende el motor, en nuestro país debido a la carencia de recursos y para dar solución a la limitante en cuanto a datos de entrada requeridos, se adoptó el método de conteo de vehículos de forma manual para

tramos de vías y la clasificación de los mismos para las horas picos. El realizar el conteo de forma directa por los especialistas trae consigo que aumenten las incertidumbres, pero fue la solución más aceptada. El conteo se realizó para 12 horas del día, y se extrapoló a criterio de experto. La clasificación se realizó sólo para las horas pico y al igual que el conteo se extrapoló al resto de las horas.

Como herramienta adicional de desarrollo el módulo Power Bin.exe (Fig. 2), que es capaz de generar la velocidad que desarrolla cada vehículo segundo a segundo. Esta herramienta no hubiera sido necesaria de contar con GPS suficientes para cada vehículo, constituyendo de esta forma una solución novedosa ante una carencia.

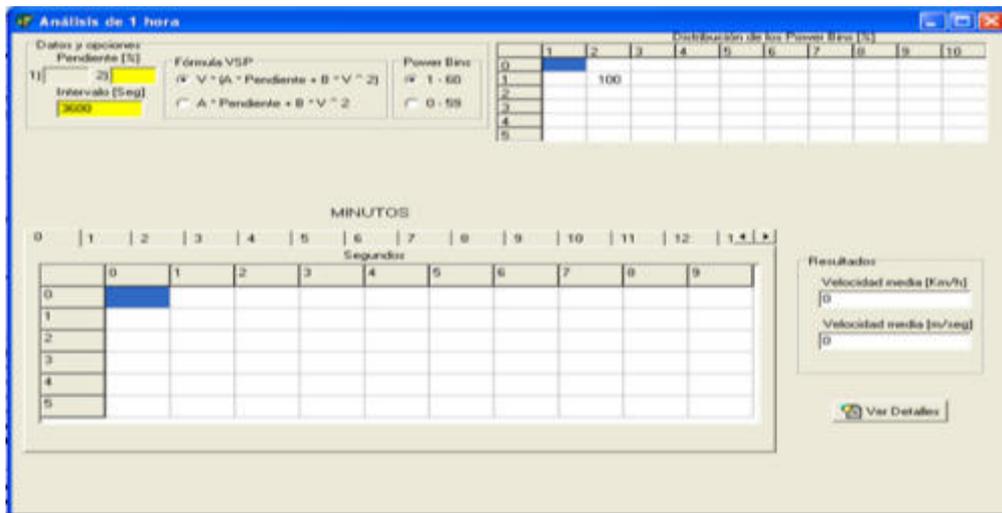


Fig. 2. Pagina Principal de módulo Power Bin.exe.

De la aplicación de este modelo se obtuvo (sin considerar la emisiones en el arranque), que para 12 horas se emiten en las vías seleccionadas 0,7 toneladas de CO, siendo la hora pico la de mayor volumen de emisión. Para el CO<sub>2</sub> se obtuvieron 7,5 toneladas emitidas en 12 [Rivero, *et al.*, 2007].

#### *Evaluación de la dispersión de contaminantes*

Para evaluar el transporte de los contaminantes emitidos, se utilizó el modelo CAL3QHCR, desarrollado por la EPA [U.S. EPA, 1995].

Para aplicar este modelo fueron necesarios dos nuevos tipos de datos de entrada de emisiones, en lugar de expresar las emisiones, en g/s:

- a) El factor de emisión de un vehículo promedio por kilómetro recorrido para cada tramo de vía objeto de estudio.
- b) El factor de emisión de un vehículo promedio por hora, para los vehículos detenidos en el semáforo, específicamente para el tramo de vía de la Calzada de 10 de Octubre, que incluye el semáforo de la esquina de Toyo.

En esta etapa, sobre la base de una mayor disponibilidad de datos acerca de las características del tráfico en las vías, se adicionó la consideración de dos nuevos factores en la metodología de cálculo de las emisiones:

- a) Parada de los vehículos en el paso peatonal de la calle Monserrate.
- b) Influencia del semáforo en la calle 10 de Octubre sobre el perfil de velocidades de los vehículos.

Por otra parte, el modelo CAL3QHCR realiza la dispersión solamente de las partículas y el CO, porque fue necesario modificar el código fuente para permitir la evaluación de otros contaminantes, como: compuestos orgánicos volátiles (COV), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), 1,3 butadieno, acetaldehídos, formaldehídos, amoníaco (NH<sub>3</sub>) y benceno [Paz, *et al.*, 2008].

Como resultado, se obtuvo que las mayores concentraciones en la intercepción de Toyo se producen en el sentido del viento a 100 m de la intercepción, aproximadamente, aunque se observan concentraciones significativas hasta 250 m, a partir de esta distancia comienza a decaer la concentración de contaminantes.

En la calle Monserrate se observa que las mayores concentraciones de contaminantes se producen en el sentido del viento, afectando desde 50 m hasta 250 de la intercepción de Monserrate y Neptuno, es decir, que los contaminantes que se producen en esta calle afectan con mayor intensidad desde la Manzana de Gómez hasta la intercepción de las calles Agramonte (Zulueta) y San José, aunque la dispersión de los contaminantes es mucho más extensa.

En la Vía Monumental las principales concentraciones se producen hacia la salida del túnel, que se incrementan hacia esta zona debido a diferentes factores, como la dirección predominante de los vientos que incide en el transporte de los contaminantes, los autos en este tramo se encuentran en una subida, por el efecto que se produce por ser un tramo de vía que se encuentra en una zona hundida, lo que hace que el tiempo de permanencia de los contaminantes sea mayor y por presentar una disminución de la velocidad de los autos a la salida del túnel.

En la calle Reina se produce una distribución de los contaminantes en dirección y sentido del viento, observándose las mayores concentraciones a 100 m de la vía. Es decir, las emisiones de contaminantes que se producen en la calle Reina producto del tráfico vehicular van a afectar con mayor intensidad a la calle Estrella, observándose las mayores concentraciones hacia esta zona.

De acuerdo a los resultados en orden de concentraciones, los contaminantes que más aportan son el CO, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, benceno, material particulado, formaldehídos, NH<sub>3</sub> y acetaldehídos [Paz, *et al.*, 2008]. *Propuesta de funciones exposición-respuesta (FER)*

Durante esta etapa se propone una serie de FERs basadas en evidencias nacionales y extranjeras a emplearse nacionalmente para evaluar de impacto en salud provocado por las emisiones de contaminantes atmosféricos del transporte vehicular. Para ello se realizó una actualización de las FER seleccionadas para los contaminantes prioritarios del aire, PM, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, y se obtuvieron otras para otros contaminantes más asociados

directamente con está actividad diferente a los criterios, como benceno, formaldehído, 1-3 butadieno.

Tanto para Cuba como para los países de Centro América y el Caribe, la no disponibilidad de series históricas de datos de monitoreo ambiental constituye una gran limitante para la realización de estudios epidemiológicos confiables (complejos y costosos), con vistas a la obtención de FER propias. El hecho de contar con un conjunto de funciones propuestas de acuerdo a criterios científicos, nos permitirá llevar a cabo a escala nacional estudios de impacto ambiental en salud y de análisis de riesgo de las emisiones provenientes del sector transporte.

En esta etapa se aplicó por primera vez en el país la metodología propuesta por ExternE [European..., 2005], para estimar los años de vida perdidos a partir de las tasas de mortalidad por grupos de edades [Meneses, *et al.*, 2008a].

Para estimar los impactos, se asumen las FER lineales, sin umbral, calculando la pendiente de la FER como el incremento del riesgo relativo (IRR) al impacto, multiplicado por la incidencia base por la fracción de la población en riesgo.

$$S_{FER} = IRR \left( \frac{\%}{\mu\text{g} / \text{m}^3} \right) * Incidencia \left( \frac{\text{casos}}{\text{receptor- año}} \right) * fpop \quad (1)$$

Donde este IRR se estima de la misma manera que el coeficiente  $\beta$ , en los estudios log-lineales:

$$IRR = \frac{\ln(RR)}{\Delta C} \quad (2)$$

Donde IRR es el cambio en la tasa de ocurrencia de una enfermedad (efecto adverso o variable respuesta) para una población expuesta al factor de riesgo objeto de análisis (en este caso el contaminante), por unidad de cambio en la concentración ambiental ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) para un tiempo de exposición promedio dado (horas, día, semanas, año). La tasa natural de incidencia de una enfermedad en particular es la línea base, la cual se expresa en casos al año normalizado por persona (probabilidad individual de sufrir el efecto). Para la mortalidad, la línea base es la tasa anual de mortalidad para el grupo receptor. Mientras que  $fpop$  se corresponde con la fracción de la población en riesgo.

Por lo tanto, utilizando el valor de pendiente obtenido en la ecuación 1, los casos anuales atribuibles se podrán expresar de la forma siguiente (ecuación 3):

$$\Delta Y = \sum S_{\text{FER}}(\text{POP } j) (\Delta C_j) \quad (3)$$

Donde:

$\Delta Y$ : Incremento en el número de casos anuales.

$POP j$ : Número de receptores en la localización  $j$ .

$\Delta C_j$ : Cambio anual (variabilidad) en las concentraciones de un contaminante dado en el área  $j$ .

Las tablas 1 y 2 constituyen un resumen de los incrementos de riesgo seleccionados para cada efecto por contaminante.

Tabla 1. Incremento de riesgo recomendados

Efecto	Receptores	IRR (%/µg/m <sup>3</sup> ) para PM	IRR (%/µg/m <sup>3</sup> ) para SO <sub>2</sub>	IRR (%/µg/m <sup>3</sup> ) para NO <sub>2</sub>	IRR (%/µg/m <sup>3</sup> ) para CO
Bronquitis crónica	≥ 27 años	0,452			
Infarto agudo de miocardio, no fatal	≥ 18 años	0,795			
Ingresos hospitalarios, respiratorios	Población total	0,015	0,04	0,378	0,0050
Ingresos Hospitalarios, cardiovasculares	≥ 65 años	0,072	-	-	0,0011
Visitas a salas de urgencia (asma)	Asmáticos	0,545	-	-	-
Bronquitis aguda niños	Niños (5-14 años)	0,898	-	-	-
Días actividad restringidos	18-65 años	0,165	-	-	-
Síntomas respiratorios bajos	Niños (5-14 años)	0,628	-	-	-
Mortalidad aguda	Población total	-	0,034	0,0613	0,0013

*Tabla 2. Principales contaminantes carcinógenos emitidos por el transporte, expresadas como unidad de riesgo atribuibles*

<b>Contaminante</b>	<b>Unidad de riesgo</b>
Benceno	1.14 E-07
1,3 Butadieno	4.29 E-06
Benzo a pireno	1.42 E-09
Formaldehídos	1.43 E-07

*Valoración económica de los impactos en salud*

En esta etapa se establecen los costos que se deberán utilizar en las evaluaciones económicas. Para la mortalidad se utilizó, por primera vez, la metodología seguida por el proyecto ExternE, donde a partir del valor estadístico de la vida (VEV), se calculan los años de vida perdidos (crónico y agudo). Para valorar la morbilidad se emplea la suma de los diferentes tipos de costos que tiene asociado un efecto en salud: Costos de enfermedad + Pérdida de productividad + Voluntad a pagar. Las referencias empleadas fueron los proyectos ExternE y Abt 2008 [Abt..., 2008], de la U.S. EPA [Meneses, *et al.*, 2008b]. La tabla 3 constituye un resumen de los costos obtenidos.

*Tabla 3. Valores de costos, expresados en CUC*

<b>Efecto</b>	<b>Suma, CUC</b>
Bronquitis crónica	57 075
Infarto agudo de miocardio, no fatal	14 930
Admisiones hospitalarias, respiratorias	611
Admisiones hospitalarias, cardiovasculares	611
Visitas a salas de urgencia (asma)	205
Bronquitis aguda niños	13
Días de actividad restringida	39
Días de actividad restringida menor	15
Días laborales perdidos	25
Síntomas respiratorios bajos	46
AVP, crónico	14 269
AVP, agudo	21 403

Resultados La tabla 4 muestra el monto total del costo del daño, que resultó igual a 316 mil CUC, o alrededor de 7,58 millones de pesos, si se utiliza el cambio oficial. De estos resultados se pudo concluir que aún empleando metodologías donde no son tomados en cuenta ni todos los impactos asociados a la contaminación atmosférica, ni todos los costos, los resultados son muy elevados, si tenemos en cuenta que sólo se evaluaron pequeños tramos de vías. Además, el hecho de no incluir un contaminante como el ozono, simplifica mucho la evaluación, dando un estimado muy por debajo del real. Estos resultados sugieren que deben ser tomadas medidas en este sector para reducir los impactos para aumentar la calidad de vida de las personas afectadas.

*Tabla 4. Resultados totales para los cuatros tramos*

	<b>Impacto</b>	<b>Alto</b>	<b>Bajo</b>
<b>Total CUC</b>	315 857	78 958	1 263 578
<b>Total CUP</b>	7 580 579	1 894 997	30 325 866

Los contaminantes con mayores impactos asociados fueron las partículas y el NO<sub>2</sub>, para los cuales sus impactos oscilaron entre 40-60% del impacto total. Los mayores costos estuvieron asociados a la mortalidad aguda, alrededor de 33% del costo total, los otros efectos con mayores costos asociados fueron los días de actividad restringidos (26%), seguido por las admisiones hospitalarias respiratorias y cardiovasculares, ambas con 20% del costo total, y la mortalidad crónica por partículas con 1%. Los otros efectos tuvieron costos menores de 1%. Conclusiones Los impactos mayores fueron obtenidos para las partículas y NO<sub>2</sub>, en todos los tramos seleccionados. Los efectos que más aportaron a los costos totales fueron la mortalidad, los días de actividad restringidos y las admisiones hospitalarias.

Los costos totales (7,58 millones de pesos), aunque pequeños en valor, son muy elevados si se tiene en cuenta que solamente se analizaron pequeños tramos de vías.

### **Bibliografía**

- Abt Associates Inc. *BenMAP-Environmental Benefits Mapping and Analysis Program, User's Manual*. September 2008.
- DAVIS, NICOLE, *et al. Mexico City Vehicle Activity Study*. Final Report. International Sustainable System Research, July 2004.
- European Commission, ExternE. «Externalities of energy: Methodology 2005 update», (EUR 21951), Directorate-General XII, Science Research and Development, Office for Official Publications of the European Communities, L-2920 Luxembourg, F75272, Paris, Cedex 06, France, 2005.
- <http://www.gssr.net/ive/index.html>.

LENTS, JAMES, *et al.* *Santiago Vehicle Activity Study*. Final Report. International Sustainable System Research, December 2001.

MENESES, ELIEZA, *et al.* «Propuesta de funciones exposición-respuesta a emplear en los estudios de externalidades del transporte». Informe salida de proyecto PN 00613312 «Externalidades del Transporte». Mar., 2008a.

MENESES, ELIEZA, *et al.* «Valoración de los costos en salud para los efectos seleccionados». Informe salida de proyecto PN 00613312 «Externalidades del Transporte». Sep., 2008b.

PAZ, E., *et al.* «Modelación de la dispersión de contaminantes atmosféricos emitidos por el tráfico vehicular en una vía de Ciudad de La Habana», *Eco Solar* (23): ene.-mar., 2008. ISSN 1028-6004.

RIVERO, *et al.* (2007), «Metodología para el cálculo de emisiones, provenientes del transporte, a utilizar en la evaluación de las externalidades». Informe salida de proyecto PN 00613312 «Externalidades del Transporte». Abr., 2007.

U.S. EPA. *User's Guide for CAL3QHC Version 2: A Modeling Methodology for Predicting Pollutant Concentrations Near Roadway Intersections*. EPA -454/R-92-006 (Revised). U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711. 1995.

## Posicionamiento del rotor y la cola de un pequeño aerogenerador de eje horizontal debido a la influencia de los coeficientes de arrastre y sustentación que afectan la veleta de cola

### Positioning of the rotor and tail of a small horizontal axis wind turbine due to the influence of the trawling coefficients and sustentation that affect the tail weather vane

Por Dr. C. Ernesto Yoel Fariñas Wong, Sergio Jáuregui Rigo y Jesús Betancourt Mena  
Universidad Central de Las Villas, Carretera a Camajuaní, km 5½,  
Santa Clara, Villa Clara, Cuba.  
e-mail: farinas@uclv.edu.cu

#### Resumen

En la presente investigación se realizó una valoración sobre el estado de la tecnología acerca de los sistemas de orientación y protección por momento de cola utilizados en pequeñas aeroturbinas de eje horizontal, en el trabajo se perfeccionó el procedimiento metodológico para el desarrollo de los sistemas de orientación por momento de cola de estas máquinas, al incorporarse la utilización de coeficientes de sustentación y arrastre de comportamiento variable en función de la razón de aspecto, utilizando los principios de la mecánica del medio continuo y métodos CFD. Se analizaron dos variantes, *original* y *actualiza*, del aerogenerador CEETA-01, sobre el cual al autor le fueron concedidos un Certificado de Patente de Invención y uno de Modelo Industrial; la *variante actualizada* se obtuvo a partir del procedimiento propuesto por el autor. Esta variante presenta un soporte para la veleta de mayor longitud y una mayor área en la veleta. A partir del análisis de la cantidad y costo de la energía generada, así como del factor de capacidad en tres emplazamientos en la provincia Villa Clara, se pudo concluir que la *variante actualizada* del aerogenerador CEETA-01 es superior a la *original*.

**Palabras clave:** Pequeños aerogeneradores, coeficientes de arrastre y sustentación, sistema de orientación y protección de aerogeneradores.

#### Abstract

In the present research paper we carried out an assessment on the state of the technology about the systems of orientation and tail momentum protection used in small wind turbines of horizontal axis. We upgraded the procedure for the development of the systems of orientation and tail momentum protection of these machines, by incorporating the utilization of coefficients of sustentation and dragging of variable behavior as a function of the aspect ratio, using the principles of the mechanics of the continuous medium and CFD methods. Two versions, original and updated, of the wind turbine CEETA-01 were analyzed, on which the author was awarded a Patent Certificate of Invention and a Certificate of Industrial Model. The updated version was obtained from the

procedure proposed by the author. This version includes a support for the weather vane of bigger length and a bigger area of the weather vane. From the analysis of the amount and cost of the electricity generated, as well as the capacity factor in three locations in the province of Villa Clara, it was possible to conclude that the *updated version* of the wind turbine CEETA-01 has better results compared to the *original*.

**Key words:** Small wind turbines, dragging and sustentation coefficients, orientation and protection system of wind turbines.

## Desarrollo

*Estado actual de los sistemas de orientación y protección por momento de cola (SOPMC) utilizados en pequeños aerogeneradores de eje horizontal*

Según Sagrillo [1997], el desarrollo de los pequeños aerogeneradores se ha visto limitado por la poca profundidad en el análisis de los fenómenos aerodinámicos, por lo que puntualiza la necesidad de un análisis específico sobre los sistemas de orientación y protección, los que han sido en general deficientes, provocando problemas aeroelásticos en el rotor, en la torre y en el generador eléctrico, así como ruido aerodinámico, reflejo de las pérdidas en la captación de energía del viento.

Gipe [2000] planteó que para revertir la situación era necesario un estudio tanto analítico como experimental de los sistemas de orientación y protección utilizados en estas máquinas. En este marco, Piggott [1999] propone la utilización del «sistema de orientación y protección por momento de cola» (SOPMC) en aerogeneradores de eje horizontal con rotor frente al viento. Versiones de este sistema se estudiaron en diferentes prototipos por Corbus [2005] y Bikdash [2004]. Estos reportes concluyen que la utilización del sistema propuesto por Piggott [2001] era viable; sin embargo, para aumentar la eficiencia y atenuar los problemas aeroelásticos presentes en los prototipos ensayados, era necesario el desarrollo de métodos que tuvieran en consideración la aerodinámica para el cálculo de la veleta de cola, debido a que ésta se había convertido en un componente activo en la regulación y no sólo como un elemento para la orientación o decorativo.

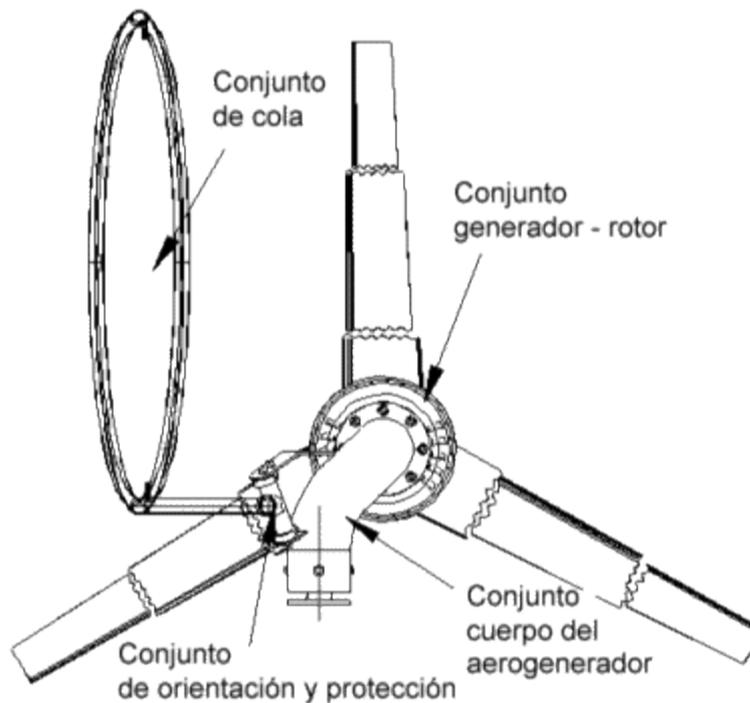
En la UPC, Mas y Batet [2006] publicaron un procedimiento para el cálculo y análisis de aerogeneradores con SOPMC, que tiene en consideración las recomendaciones antes expuestas; sin embargo, los coeficientes aerodinámicos de sustentación y arrastre que influyen sobre la veleta del sistema de orientación y protección son asumidos constantes para cualquier velocidad del viento y posición de la veleta, tratamiento que el autor considera una limitación del procedimiento, debido a que el valor de los coeficientes influye en el posicionamiento del rotor y la cola respecto al viento, el cual si es incorrecto provoca pérdidas en la captación de la energía del viento, así como la ocurrencia de problemas aeroelásticos.

El autor considera que es posible modificar el procedimiento planteado por Mas y Batet [2006], mediante la utilización de coeficientes de sustentación y arrastre de comportamiento variable, la utilización de la teoría del medio continuo y la implementación del análisis del rotor con la teoría del momento anular,

condiciones que contribuirán a mejorar el posicionamiento del rotor y la cola, e influir positivamente en la eficiencia de la máquina por la reducción de los problemas aeroelásticos.

#### *Modelo de aerogenerador CEETA-01*

Para caracterizar el comportamiento de un aerogenerador con SOPMC, se utilizó el aerogenerador CEETA-01 (Fig. 1). El autor agrupa sus componentes en cuatro conjuntos a partir de los grados de libertad en su movimiento. La figura 2 muestra detalles del conjunto sistema de orientación y protección, compuesto por el pivote de cola, el cual está inclinado formando un ángulo  $\beta$  respecto a la vertical. Cuando se observa la proyección del mecanismo sobre un plano horizontal (Fig. 3), se distingue que los soportes son instalados a un ángulo  $\alpha$ , con valores entre  $10^\circ$  y  $45^\circ$  [Piggott, 2001].



*Fig. 1. Vista posterior de los conjuntos del aerogenerador CEETA-01.*

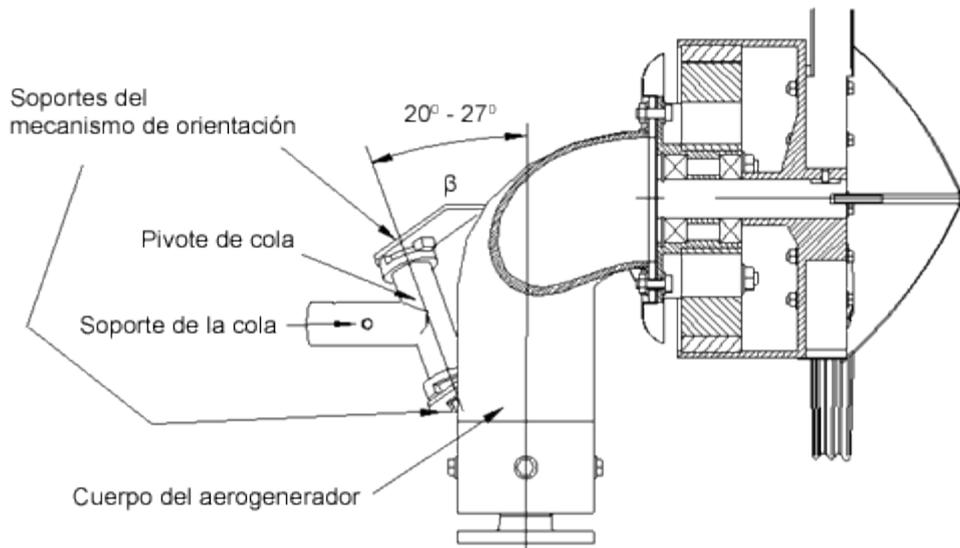


Fig. 2. Vista lateral en corte del aerogenerador CEETA-01

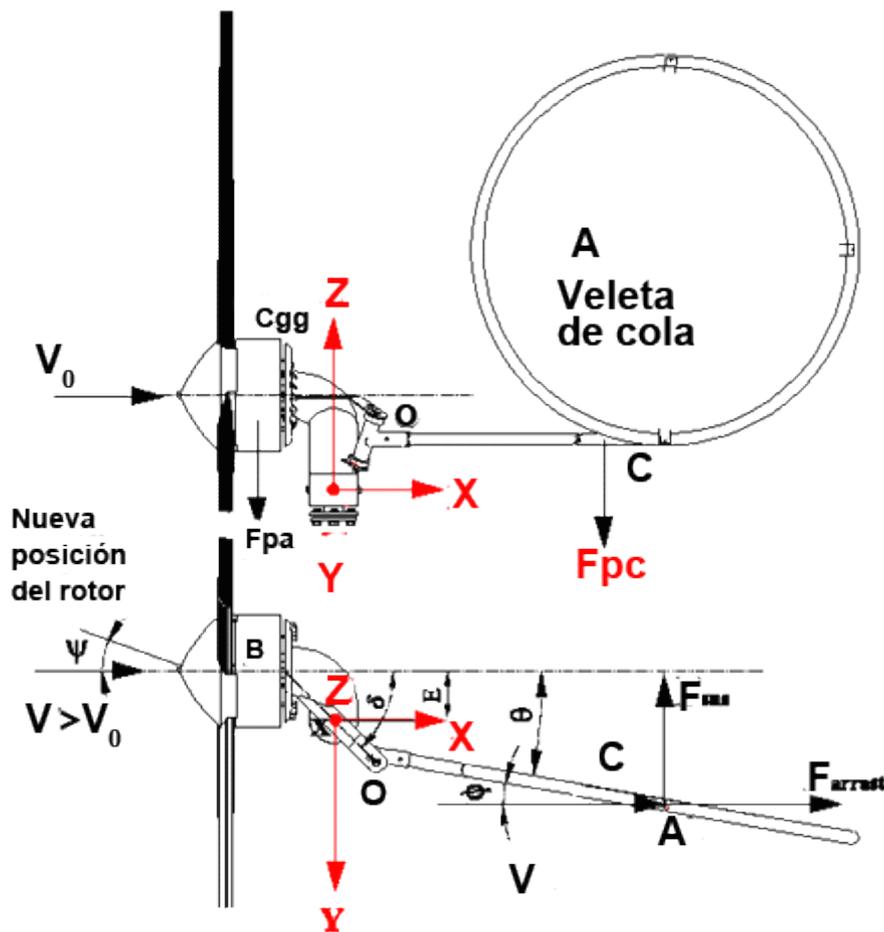


Fig. 3. Esquema de fuerzas sobre la cola del aerogenerador CEETA-01.

El conjunto cuerpo del aerogenerador (Fig. 2) se obtiene a partir de una estructura tubular en forma de S, cuyos extremos están en planos perpendiculares entre sí. El rotor es de tres palas con perfil NACA 4412, el cual ha sido utilizado en la construcción de rotores de pequeños aerogeneradores. *Análisis del aerogenerador CEETA-01 utilizando el procedimiento de Mas y Batet*

La propuesta de Piggott [1999] de utilizar el SOPMC como sistema de orientación y protección en pequeños aerogeneradores, tropezó con la inexistencia de un aparato analítico para su desarrollo, condiciones que determinaron que el sistema fuera dimensionado mediante pruebas de campo por tanteo y error [Fariñas, 2004], utilizando las dimensiones de otros sistemas, haciendo tedioso, impreciso y costoso llegar a configurar el sistema. En base a esta situación, fue desarrollado el procedimiento de Mas y Batet [2006]; dicho procedimiento se basa en determinar los ángulos formados entre el eje del rotor ( $\gamma$ ) y el de la cola ( $\beta$ ) para diferentes velocidades del viento a partir de las características geométricas de la aeroturbina. Con el valor de estos ángulos se procede a determinar la curva de potencia de la máquina.

Hasta la elaboración de este trabajo, el procedimiento analítico aceptado para el cálculo de los SOPMC es el planteado por Mas y Batet [2006], en colaboración con Piggott, que fue desarrollado a partir del aerogenerador IT-100, fabricado en el Intermediate Technology Development Group (ITDG) de Perú. Dicho método es acogido por autores como Clos y Sánchez [2007] o Leite y Araújo [2007] para el análisis de un pequeño aerogenerador con SOPMC; sin embargo, en opinión del autor dicho procedimiento presenta limitaciones relacionadas con el tratamiento aerodinámico de la veleta de cola, las cuales son corregibles mediante la utilización de métodos numéricos y coeficientes aerodinámicos variables. El procedimiento de Mas y Batet [2006] utiliza la teoría de Betz para el cálculo del rotor, omitiendo de esa forma las características del rotor y su influencia sobre la corriente que toca la cola. En base a estas limitaciones el autor realizó un estudio del comportamiento de los coeficientes aerodinámicos variables para su inclusión en el procedimiento.

#### *Coefficiente aerodinámico de sustentación lineal*

Las veletas de cola de los sistemas de orientación y protección de pequeñas aeroturbinas generalmente poseen figuras geométricas conocidas con características aerodinámicas estudiadas en túneles de viento. Debido a la similitud y los análisis de placas planas realizados en experimentos de aerodinámica, en este trabajo se considera la veleta de cola del SOPMC como una placa plana inmersa en un fluido, extendiendo así la teoría a la aplicación práctica en el cálculo de aerogeneradores.

A principios del siglo pasado, Ludwig Prandtl planteó (Ec. 1) cómo caracterizar el coeficiente de sustentación ( $CL$ ) de una placa plana con  $AR < 3$  y flujo laminar.

$$C_L = \frac{C_{l\phi}}{1 + \frac{C_{l\phi}}{\pi AR} (1 + \tau)} \quad (1)$$

Donde:

$$t = 0-0,6$$

$$C_{l\phi} = \quad (2)$$

$$2\pi$$

$$AR = L^2 / S_c$$

Donde:

$L$ : Longitud característica.

$S_c$ : Área expuesta al flujo.

Sobre este mismo tema, Katz y Plotkin [2001] abordan el cálculo del coeficiente de sustentación estático (Ec. 3), para valores de  $AR < 1$  y ángulos de ataques  $\Phi < 5^\circ$ .

$$C_L = \frac{\pi}{2} AR \phi \quad (3)$$

El autor considera que no es viable la utilización de estas teorías en el análisis del SOPMC, debido a que el ángulo  $\Phi$  es por lo general mayor que cinco grados, el flujo está perturbado por la presencia del rotor y la torre, mientras que la razón de aspecto para el aerogenerador CEETA-01 varía de 3 a 9.

#### *Coefficiente de sustentación no lineal*

Trabajos publicados en el siglo anterior por Bartlett y Vidal [1955], Polharmus [1966] y Lamar [1976], plantean distintos modelos matemáticos para describir la no linealidad del coeficiente de sustentación a través de la adición de términos relacionados con el ángulo de ataque.

Bartlett y Vidal [1955] refieren la ecuación 4 para lograr la curva de  $C_L$  vs.  $\Phi$ , mediante una aproximación polinómica de segundo orden, la cual puede ser empleada en geometrías tan disímiles como alas deltas, placas rectangulares y alas rectangulares delgadas; presenta como restricción valores de  $AR < 3$  y números de Reynolds por debajo de 104.

$$C_L = C_{L\phi} \phi + C_{DC} \phi^2 \quad (4)$$

La restricción viene dada por la determinación de la constante independiente  $C_L$  pendiente de la curva de sustentación y se determina mediante la ecuación

5, mientras que el coeficiente de flujo cruzado  $CDC$  se determina por la ecuación 6; este último no presenta restricciones en cuanto a la razón de aspecto y número de Reynolds.

$$C_{L\phi} = 1,97AR^{0,72} \quad (5)$$

$$C_{DC} = 2,82AR^{-0,98} \quad (6)$$

Polhamus [1966] utiliza la ecuación 7 para el cálculo del coeficiente de sustentación en placas rectangulares, circulares y deltas, donde  $K_p$  es el coeficiente potencial de sustentación, el cual es función de  $AR$ , y la forma del borde de ataque  $K_v$ , que es el coeficiente de vórtice de sustentación.

$$C_L = K_p \text{sen}\phi \cos^2 \phi + K_v \cos\phi \text{sen}^2 \phi \quad (7)$$

Cuando se desprecia la acción del arrastre por fricción, el coeficiente de arrastre ( $C_{D0}$ ), producto de esta consideración, puede ser calculado en la ecuación 8:

$$C_{D0} = C_L \tan\phi \quad (8)$$

Para los cuales Polhamus [1966] definió los términos  $K_p$  y  $K_v$ , en función de la razón de aspecto, en las ecuaciones 9 y 10.

$$K_p = 0,0051AR^2 + 0,2406AR + 1,31 \quad (9)$$

$$K_v = 3,41e^{0,034AR} \quad (10)$$

Lamar [1976] extiende los trabajos de Polhamus [1966] a otras geometrías y a bordes laterales; los vórtices de sustentación en los bordes laterales se estiman de la misma manera que los de succión en el borde de ataque, expresándose el coeficiente de sustentación mediante la ecuación 11.

$$C_L = K_p \text{sen}\phi \cos^2 \phi + (K_{v,le} + K_{v,se}) \cos\phi \text{sen}^2 \phi \quad (11)$$

El término  $K_{v,le}$  es igual a  $K_v$  de la ecuación 7, que representa la sustentación generada por el borde de ataque y  $K_{v,se}$  es la parte del vórtice de sustentación generado por el borde lateral.

La utilización de la ecuación 11 tiene la dificultad que los coeficientes  $K_{v,le}$  y  $K_v$ , se aún se encuentran poco caracterizados y sus valores difieren considerablemente de un reporte a otro, por lo que el autor no recomienda aún la utilización de dicha ecuación: propone utilizar en el análisis de la cola de los pequeños aerogeneradores la ecuación 7 de Polhamus [1966], la cual está mejor caracterizada y ha sido empleada por varios autores [Wood, 1991; Prado, 2007] en otras ramas de la ingeniería, para el cálculo de los coeficientes de sustentación, con buenos resultados.

*Coeficiente de arrastre en función de la sustentación*

La razón del coeficiente de arrastre y el de sustentación en la cola del aerogenerador, es fundamental para que exista un buen control sobre la posición de la máquina. El arrastre está compuesto por el arrastre parásito y el arrastre inducido. El arrastre parásito es generado por la fricción superficial, la cual es despreciable en superficies pulidas y  $Re < 10^6$ , mientras que el arrastre de forma o arrastre de presión se convierte en una función del ángulo de ataque y del área expuesta al fluido.

El cálculo del arrastre inducido, si es derivado de la teoría del comportamiento lineal de la sustentación, puede obtenerse mediante la ecuación 12.

$$C_D = \frac{C_L^2}{\pi(AR)\tau} \tag{12}$$

Siendo comúnmente expresada la relación entre los coeficientes de sustentación y el de arrastre por la polar de arrastre en la forma de la ecuación 13.

$$C_D = C_{D0} + DiC_L^2 \tag{13}$$

$C_{D0}$  es determinado por la ecuación 8 y el parámetro  $Di$  factor de arrastre inducido por la ecuación 14, el cual depende del factor de eficiencia  $t$ .

$$Di = \frac{1}{\pi(AR)\tau} \tag{14}$$

Para cuerpos simétricos, el segundo término de la ecuación 13 es el mismo que el de la ecuación 12, pero la constante  $Di$  incluye la contribución del arrastre parásito y del arrastre inducido. La ecuación 13 es utilizada para aproximar el arrastre.

Mediante el análisis realizado en este epígrafe, es posible determinar los coeficientes de sustentación y de arrastre con un comportamiento no lineal para diferentes ángulos de ataques en base a una geometría predeterminada y número de Reynolds calculado en función de la velocidad y la magnitud

característica de la veleta de cola, siendo viable su introducción en el procedimiento de cálculo desarrollada por Mas y Batet [2006] para el desarrollo de los SOPMC.

## Conclusiones

1. El análisis de los sistemas de orientación por momento de cola (SOPMC) se ha basado fundamentalmente en ensayos de campo por tanteo y error, mientras que los procedimientos metodológicos desarrollados para su análisis presentan limitaciones con la aerodinámica de la veleta de cola y con el análisis del rotor.
2. Es necesario reducir los problemas aerodinámicos de los SOPMC expuestos en esta investigación por las simulaciones numéricas, debido a que estos favorecen el incorrecto posicionamiento del rotor y la cola respecto a la dirección del viento, lo que contribuye a la baja eficiencia de los pequeños aerogeneradores.
3. El procedimiento metodológico planteado por Mas y Batet para el análisis de los pequeños aerogeneradores con SOPMC, presenta limitaciones debido al empleo de coeficientes aerodinámicos de valor constante para el análisis de la cola; dichos coeficientes, en opinión del autor, deben ser variables en función de la razón de aspecto de la veleta.
4. El autor considera que debido a la utilización de coeficientes aerodinámicos variables en función de la razón de aspecto de la veleta, en conjunto con la utilización de la teoría de movimiento anular, en la *variante actualizada* del aerogenerador CEETA-01, se obtiene una disminución del ángulo existente entre la dirección del viento y el eje del rotor para todo el dominio de velocidades.

## Bibliografía

- BARTLETT, G.E. Y R. J. VIDAL. «Experimental Investigation of Edge Shape on The Aerodynamic Characteristics of Low Aspect Ratio Wings at Low Speeds», *Journal of the Aeronautical Sciences* (34): 34-41, 1955. ISSN 0022-4650.
- BIKDASH, M.; D. A. CHEN AND M. HARB. «A Hybrid Model of a Small Autofurling Wind Turbine», *Journal of Vibration and Control*, (7): 127-148, 2001. ISSN 1392-2114.
- BONSIGNORI, M. «Progetto aerodinamico di un piccolo aerogeneratore», Tesi di Laurea Università Degli Studi Di Pisa Dipartimento Di Ingegneria Aerospaziale, Pisa, Italia, 2005.
- BORNAY, J. «Aerogeneradores», 2005, disponible en <http://www.bornay.com>.
- CASTRO, R. F. «Discurso pronunciado por Fidel Castro Ruz, Presidente de la República de Cuba, en ocasión del aniversario 47 de su entrada en Pinar del Río y del montaje de los grupos electrógenos en esa provincia». Pinar del Río: 2006.
- CLOS, D.C. Y T. C. SÁNCHEZ. «Modelo de un aerogenerador de baja potencia y bajo coste», en 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Cusco, 23-25 de octubre de 2007.
- CORBUS, D. Y M. MEADORS. «Small Wind Research Turbine», Final Report Technical Report NREL/TP-500-38550, October 2006, en <http://www.osti.gov/bridge>.

- FARIÑAS, E. «Generador de imanes permanentes para aplicaciones industriales». *Revista Centroazucar*, (4): 46-50, 2004. ISBN 0253-5757.
- FARIÑAS, E. «Estudio de aerogeneradores de pequeña potencia», *Revista Electro Sector*, 2006, disponible en <http://www.electrosector.com/novedades.asp>.
- FARIÑAS, E.; S. LÓPEZ, P. CASANOVA Y S. JÁUREGUI. «Aerogenerador con sistema de orientación y autofrenado lateral». Patente de invención. OCPI. Certificado 23278. Resolución 958/2008, 2008.
- FARIÑAS, E. E I. MARTÍNEZ. «Aerogenerador. Certificado de Modelo industrial», OCPI, Certificado 2168. Resolución 3855/2004, 2005.
- GÍPE, P. «Noise from Small Wind Turbines: An Unaddressed Issue», en *Chelsea Green*, 2000.
- LAMAR, J. E. «Prediction of Vortex Flow Characteristics of Wings at Subsonic and Supersonic Speeds», *Journal of Aircraft*, (21): 56-79, 1976. ISSN 0002-2667.
- LEITE, G. Y M. ARAÚJO. «Modelagem dinâmica de conversão eólico-mecânica em turbinas eólicas de eixo horizontal», en 8º Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica, Cusco, Perú, 2007.
- MAS, V. E. Y LL. M. BATET. *Estudio mecánico del aerogenerador T 100*. 2006
- PIGGOTT, H. *Cómo construir un generador eólico*, traducción al castellano, United Kingdom: Editorial Scoring Wind, 2001. pp. 73-108. ISBN 9780975197059.
- PIGGOTT, H. *Windpower Workshop*. United Kingdom: Centre for Alternative Technology, Editorial Scoring Wind, 2003. ISBN 978-1898049203.
- POLHAMUS, E. C. «Predictions of Vortex-Lift Characteristics by a Leading-Edge Suction Analogy», *Journal of Aircraft*, 8 (4): 193-199, 1971. ISSN 0021-8669.
- POLHAMUS, E. C. «A Concept of the Vortex Lift of Sharp-Edge Delta Wings Based on a Leading-Edge Suction Analogy», NASA TN D-3767, 1966.
- PRADO, R. A. «Development of a Code for the Viscous-Inviscid Interaction Oriented to Turbomachinery», Tesis de Doctorado de la Universidad de Buenos Aires, Área Ingeniería, Argentina, 2007.
- SAGRILLO, M. «Small Wind Generators and Noise», *Windletter*, February/March, 1997. ISSN 0036-8075.

**Eco Solar** es una publicación científica electrónica trimestral para los especialistas de las fuentes renovables de energía. Se dedica a la promoción de temas relacionados con la energética, las energías alternativas, la física ambiental, la arquitectura bioclimática, el impacto sobre el medio ambiente la educación ambiental, la

termoconversión, la eficiencia energética, y las energías de origen hidráulico, fotovoltaico, eólico, solar, biomasa y ciencias relacionadas.

**DIRECTOR GENERAL:**

Dr. Luis Bériz Pérez.

**DIRECTOR:**

Lic. Manuel Álvarez  
González.

**EDITOR:**

Lic. Alejandro Montecinos  
Larrosa.

**CORRECCIÓN:**

M Sc. Roberto Manzano  
Díaz.

Ing. Jorge Santamarina

**DISEÑO ELECTRÓNICO:**

D.I. Antonio Romillo Polaino.

**TRADUCCIÓN:**

Lic. Lázaro O´Farril Lazo.

**CONSEJO ASESOR:**

Dr. Luis Hernández (Energía fotovoltaica)

Dr. Conrado Moreno Figueredo (Energía  
eólica)

Lic. Bruno Henríquez Pérez (Física  
ambiental)

Dr. Jorge Luis Paretas (Energía hidráulica)

Dr. Dania González Couret (Arquitectura  
bioclimática)

Dr. Jorge Guardado (Biomasa)

Dr. Sergio Corp Linares (Energía solar  
térmica)

Lic. Leonor Turtós Carbonell (Impacto  
ambiental)

Lic. Alejandro Montecinos Larrosa (Energía  
humana)

Lic. Ricardo Bériz Valle (Educación  
ambiental)



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

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

Teléfono: (537) 205-9949.

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

e-mail: [editora@cubasolar.cu](mailto:editora@cubasolar.cu)

<http://www.cubasolar.cu>