

# Aplicaciones de los métodos de optimización en el diseño de Sistemas Híbridos Eólico – Fotovoltaicos para las condiciones tropicales cubanas.

**M. Menéndez González, A. Sarmiento Sera.**

Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER)

Instituto Superior Politécnico "José A. Echeverría" (ISPJAE)

Marianao 14 , C. Habana , Cuba

Email: [mercedes@ceter.ispjae.edu.cu](mailto:mercedes@ceter.ispjae.edu.cu).

[sarmiento@ceter.ispjae.edu.cu](mailto:sarmiento@ceter.ispjae.edu.cu).

(Recibido el 3 de Enero del 2002, aceptado 5 de Junio del 2002).

## Resumen.

En este trabajo se plantea la aplicación y optimización de métodos en el diseño de sistemas híbridos eólico-fotovoltaicos los cuales se fundamentan en una programación lineal, para esto es analizada una instalación energética y la demanda energética constante en una localidad cubana, a partir de datos de viento y radiación solar.

**Palabras claves:** Energía renovable, sistemas híbridos, sistemas autónomos, recursos renovables, costos de energía, contaminación ambiental.

## 1. Desarrollo.

En la literatura [3],[4] ,[6] y [9] se refieren varios métodos de diseño para los sistemas híbridos eólico-fotovoltaico para la generación de electricidad en zonas alejadas de la red nacional de electrificación, el objetivo del presente trabajo es la aplicación de estos métodos a una instalación energética con una demanda constante en todos los meses de 60 kw/h / día en la cual se conocen los siguientes datos climatológicos.

El método de optimización comienza con la construcción de un gráfico, el cual se llamara  $a_v$  vs  $a_s$ , donde:

$a_v$  – área de viento o área cubierta por el aerogenerador.

$a_s$  – área solar o área de los paneles fotovoltaicos.

Tanto para el área de viento como para el área solar, ambas están afectadas por factores que disminuyen el rendimiento energético de la instalación, estos son:

$$a_v = Cp * (\pi * r^2) \tag{1}$$

$$a_s = \eta * A \tag{2}$$

La energía que proporcionan ambas fuentes se determina mediante:

$$W = \frac{D}{2} \cdot \rho_{\text{aire}} \cdot (v^3) \cdot \frac{1}{1000} \text{ [Kw/h / m}^2\text{]} \tag{3}$$

donde:

W - energía producida por el viento.

En el caso del sol se conoce el valor de HSP al cual le asignaremos en adelante la variable S, a la energía aportada en este caso.

**Tabla 1. Valores de viento en el lugar de la instalación medidos a la altura de 10 m.**

MESES	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
V(m/s)	6,5	6	5,5	5,3	5	4,5	4,5	5	5,3	5,5	6	6,5

**Tabla 2 . Valores de radiación solar en el lugar de la instalación.**

MESES	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
H.S.P	4,5	4,8	5	5,5	5,8	6	6	5,8	5,5	5	4,8	4,5

$$S = \text{HSP} \frac{1}{1000} \quad [\text{Kw/h} / \text{m}^2] \quad (4)$$

La relación de las áreas con la aportación energética de la región debe garantizar cubrir la demanda y esto se puede expresar por la ecuación de una recta de la forma:

$$\text{Emensual} = W_{av} + S a_s \quad (5)$$

El objetivo es determinar cuales son los valores de la  $v$  y  $a_s$ , que satisfacen la ecuación 5, a partir de las mediciones de viento y sol, así como de la demanda a satisfacer en la instalación.

**Tabla 3 - Valores de  $a_v$  para el lugar de análisis.**

MESES	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$a_v$ (m <sup>2</sup> )	753	960	1245	1390	1656	2271	2271	1656	1390	1245	960	753

**Tabla 4 - Valores de  $a_s$  para el lugar de análisis.**

MESES	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
$a_s$ (m <sup>2</sup> ) * 10 <sup>3</sup>	4000	375	360	328	310	300	300	310	327	360	375	4000

A partir de construir el gráfico  $a_v$  vs Meses, y de  $a_s$  vs Meses se obtiene el punto de intersección que define, los valores de  $a_v$  y  $a_s$  que se deben garantizar a partir del análisis del equipamiento existente.

Se realizó la simulación del comportamiento de los aerogeneradores que se estudiaron (se consideraron 17 aerogeneradores diferentes).

Determinándose la cantidad de energía mensual real que entrega el aerogenerador en el lugar:

$$E_n = k * Pa \quad (6)$$

donde:

$E_n$ - energía mensual (kW)

$k$ - cantidad de horas que tiene el mes (h)

$Pa$ - potencia equivalente (kW)

Posteriormente con la energía real que entrega cada máquina, conocido el costo de las mismas, se determina el costo específico eólico

$$C_{esp} = E_n / C \quad (7)$$

siendo  $C$  - costo de aerogeneradores (\$)

De manera que la máquina de menor  $C_{esp}$  determina el tipo de aerogenerador a utilizar, en el ejemplo el valor óptimo por la componente eólica se logra con un  $C_{esp} =$  de 0.09 \$, correspondiendo al aerogenerador Vergnet que presenta las siguientes características técnicas.

Para resolver esto se ilustrará mediante un procedimiento gráfico [6], [9], en el cual se define un plano cartesiano de variables  $a_s$  y  $a_v$ , donde cada punto representa una configuración del sistema híbrido y cada línea uno de los meses del año, por lo tanto muchas soluciones numéricas satisfacen la condición anterior.

La representación gráfica de esta ecuación brinda una recta que a partir de la cual se puede determinar fácilmente la zona de trabajo de un híbrido. Esta representación da infinitos valores que al relacionarlos con paneles y aerogeneradores que se puedan emplear, proporcionan la solución óptima del problema.

Los valores de  $a_v$  y  $a_s$  obtenidos para el caso de ejemplo se muestran en las tablas 3 y 4.

Firma *Vergnet* (Tipo - GEV 7.10)

Diámetro del rotor - 7m

Número de palas - 2

Velocidad de rotación - 195 r.p.m.

Potencia Nominal - 10 kW

Altura de la torre - 30m

Velocidad de arranque - 4 m/s

Velocidad nominal - 13 m/ s

Velocidad de parada - 90 m/s

Tiempo de garantía - 2 años

Costo del aerogenerador - 26510 \$

Cantidad de aerogeneradores - 5 aerogeneradores

Costo del kW/ h = \$ 0.09

En el cálculo de la componente fotovoltaica a partir del valor de  $a_s$  que se determinó gráficamente, se determinan el número de paneles. Se analizaron 21 tipos de paneles fotovoltaicos diferentes [2].

Posteriormente con la energía real que entrega cada panel, conocido el costo de los mismos, se determina el costo específico fotovoltaico.

$$C_{espf} = E_n / C_p \quad (8)$$

siendo  $C_p$  - costo de paneles (\$)

De este análisis se obtiene que el menor  $C_{espf}$  tiene un valor que corresponde al panel fotovoltaico que tiene las siguientes características técnicas:

Tipo de panel - Arco Quad

Potencia - 96 w

Area del panel- 0.37 m<sup>2</sup>  
Cantidad de paneles - 70  
Costo unitario del panel = 399 \$  
Costo del kW/ h = \$0.13

Se determinó la existencia de un sistema de almacenamiento para suplir la energía con una autonomía de 3 días, [1], [3], [5], [9], para ello se analizaron 18 tipos de baterías diferentes existentes en el mercado, seleccionando la misma en función del mínimo costo, obteniéndose los siguientes resultados:

Firma de la batería - Golf Card.  
Modelo - L6  
Voltaje - 6 volts.  
Capacidad Nominal - 12 A -h  
Costo unitario - 59 \$  
Costo básico (\$ USD/ Ah) - 0.295  
Costo total de baterías - 17700 \$

## 2. Conclusiones.

Una vez concluido el presente trabajo se arriba a las siguientes conclusiones:

1. Se realiza el diseño de un sistema híbrido eólico - fotovoltaico para la generación de electricidad en un lugar de Cuba, a partir de considerar los valores de radiación solar y de velocidad del viento en Cuba.
2. El diseño se realiza empleando una herramienta matemática, la programación lineal, de manera que se emplea un método de optimización en el mismo.
3. En el análisis se considera una serie de equipamiento existente en el mercado, de manera que la selección final de los elementos del sistema, está avalado por un análisis técnico económico.

## 3. Bibliografía.

1. Castedo, S. Proceedings "Wind Hybrid Systems Applications for Rural Electrification : The case Study of Chile" presentado en la Conferencia y Exhibición de Energía Eólica, Sweden , pág. ( 301-304), 1996
2. Catálogos de firmas comerciales.
3. C. Seeling , G. , Art. 'Optimization of PV - Hybrid Energy System design and system operation control strategies', presentada en la ISES Conference in Harare ,1995.
4. Escobar Jácome Ana y otros, Trabajo de Diploma "Sistema Integrado de Energías Renovables" , Facultad de Ing. Industrial , Dpto. de Informática , Ciudad de la Habana , 1998.
5. Informe Final de Proyecto de Investigación "Sistema híbrido eólico - fotovoltaico", del CIES, Santiago de Cuba, Nov. 1998.
6. Markvart ,T, Art Sizing of hybrid photovoltaic - wind energy systems , Solar Energy , Vol. 57, No.4 ,pág. ( 277- 281), 1996.
7. Menéndez, M. Proceedings " Utilization of Hybrid Energy Systems in Cuba" presentada en la Conferencia de la Unión Europea de Energía Eólica, Sweden ,pag.(353- 356),1996.
8. Menéndez, M. Tesis de doctorado "Diseño de sistemas híbridos eólico- fotovoltaico para la generación de electricidad en instalaciones autosustentables de pequeña capacidad en Cuba", ISPJAE, Junio de 2001.
9. Swift, A.H.. Artículo. Diseño de sistemas híbridos productores de energía, Universidad de Texas, E:U, 1993.

---

## Optimization methods application of hybrid eolic- photovoltaic systems in tropical conditions.

### Abstract.

The objective of this paper is the application of optimization methods in the design of hybrid eolic- photovoltaic systems whose base is the lineal programming, for it is analyzed it an energy installation that has a constant demand and that it is located in a place of Cuba, in which the data of wind and solar radiation are known.

**Key words: Renewable energy, hybrid systems, autonomous systems, renewable resources, energy costs, environmental contamination.**