



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTAL DE CUBASOLAR

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

1



Análisis de la ganancia de calor a través de las ventanas diodo-solar para la climatización.....	1
Características electrocatalíticas y morfológicas de electrodos composite sobre la base de níquel para el desprendimiento de hidrógeno.....	14
Celdas solares con pozos cuánticos.....	19
Influencia del secado natural sobre los parámetros de eficiencia en la madera para combustible.....	29
Manejo de las coberturas como parte de un sistema integrado de lucha contra la erosión de los suelos en Cuba.....	34
Software para el cálculo de la densidad de energía de la mancha creada por un arreglo de	43
Tiempo de observación para la prospección eólica de un punto de interés.....	49
Uso eficiente de las fuentes renovables de energía. Mejoramiento económico mediante la sincronización a la red.....	58

Análisis de la ganancia de calor a través de las ventanas diodo-solar para la climatización.

Heat Gain Analysis through Diode-Solar Windows for Air Conditioning

*Dr. Ing. Omar Herrera Martínez, M Sc. Ing. Rodolfo Alarcón Fernández,
M Sc. Ing. Iosvany León e Ing. Yovanny Yañez Ocampo
Instituto Superior Pedagógico Julio Antonio Echeverría. Cuba.
Prof. Dr. Klaus U. Heinen y Prof. Dr. K. Kohlhof
Universidad de Ciencias Aplicadas de Colonia. Alemania.*

Resumen

El empleo de las ventanas de diodo-solar y marcos de PVC permite un considerable ahorro energético, en las condiciones de Cuba y el Trópico. Los experimentos realizados en el Centro Internacional de Salud Las Praderas, según una metodología de cálculo, señalan a las ventanas de diodo-solar como una alternativa eficiente para diseñadores y proyectistas para disminuir los costos y proteger el medio ambiente.

Abstract

The use of solar-diode windows and PVC frames enables substantial energy savings under Cuban and tropical conditions. The experiments carried out at Las Praderas International Health Center, according to a calculation methodology, show that solar-diode windows are an efficient alternative for designers and developers in order to diminish costs and protect the environment.

Keywords: solar-diode windows, energy saving

Introducción

En la construcción de instalaciones turísticas el vidrio juega un papel importante como material para la confección de puertas y ventanas. El uso del vidrio ha aumentado en todas sus formas y para diferentes propósitos arquitectónicos, funcionales y constructivos. Una prueba de esto son las modernas construcciones, donde el vidrio gana cada vez más un espacio como elemento estructural en la arquitectura exterior e interior. La amplia aplicación del vidrio como material de construcción es también de considerable importancia económica para la industria de la construcción en Cuba [Manual del vidrio, 1996 y Ventanas PVC].

Por otra parte, la reducción de los requerimientos de energía por concepto de climatización tiene cada vez mayor importancia, no sólo por el ahorro energético que esto significa, sino también por razones medioambientales. Para la restauración de edificaciones y la planificación de otras nuevas hay que tener en cuenta la influencia de la energía solar, ya que las temperaturas ambientales alcanzadas en nuestro país, sobre todo en los meses de verano, provocan un calentamiento en el interior de las edificaciones, lo que trae como

consecuencia un elevado consumo energético debido al aumento de la carga térmica [Polaino y Castilla, 1987].

Dada las características geográficas de Cuba, la radiación solar promedio anual tiene valores superiores a los 5 kWh/m^2 día, lo que implica que la ganancia de calor por este concepto sea significativa. Esto conlleva, a su vez, a un aumento del consumo de energía por cuestiones de climatización, siendo el sector turístico uno de los más afectados; por lo que se hace necesario buscar soluciones a dicha problemática. Una alternativa para esto es el empleo de ventanas de diodo-solar y marcos de PVC, constituidas por un doble acristalamiento (6 mm de espesor cada una), con una cámara de 14 mm relleno con gas argón. Al vidrio exterior se le ha depositado una capa de baja emisividad que disminuye en gran medida la transferencia de calor por radiación hacia el interior del local, que se calienta en dependencia de la radiación solar incidente e irradia energía en un rango espectral de ondas largas por encima de 2,8 mm [Heinen].

1. Ventana Diodo Solar

Las ventanas diodo solar instaladas en el Centro Internacional de Salud La Pradera tienen las siguientes características:

- Doble acristalamiento:

1er cristal: Polidur de 6mm de espesor con una capa de baja emisividad (cristal de color azul).

2do cristal: Polidur de 6 mm de espesor (cristal blanco).

- Cámara: 14 mm rellena con argón.

- Espesor total de la ventana: 26 mm.

- Coeficiente de transmisión térmica de la ventana: $U = 1,2 \text{ W/m}^2\text{K}$.

- Transmisión de la luz: 19 %.

- Transmisión de energía: 20 %.

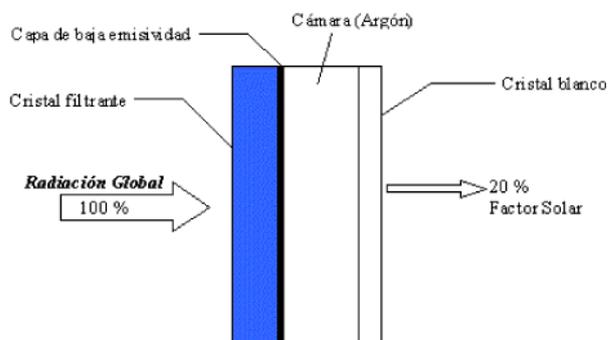
- Color de la ventana: Azul.

- Color del marco: Carmelita.

- Coeficiente de transmisión térmica del doble acristalamiento: $U = 1,1 \text{ W/m}^2\text{K}$.

1.1. Características energéticas

Fig. 1. Características energéticas de la ventana diodo solar.



En la figura 1 se puede ver que la ventana diodo-solar sólo transmite 20 % de la energía incidente.

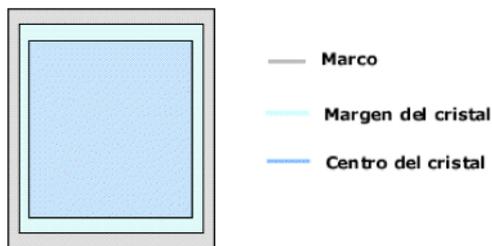
2. Metodología de cálculo de la ganancia de calor a través de ventanas

La transferencia de calor a través de las ventanas es más complicada de lo que parece. Esto se debe a que las estructuras y las propiedades del marco son muy diferentes a las del cristal. Como resultado, la transferencia de calor a través del marco y la sección del cristal adyacente al mismo es bidimensional. Según la metodología de ASHRAE [Cegel, 1998 y CD, 1998], se considera la ventana en tres regiones (Fig. 2). Cuando se analiza la transferencia de calor a través de ella, las mismas son:

1. Centro del cristal.
2. Margen del cristal.
3. Regiones del marco.

Entonces la cantidad total de la transferencia de calor a través de la ventana se determina añadiendo la transferencia de calor de cada región.

Fig. 2. Regiones de una ventana para el análisis de la transferencia de calor.



Para el desarrollo del cálculo se tienen en cuenta las ganancias de calor por:

- Convección-radiación.
- Radiación solar a través del marco.
- Radiación solar a través del cristal.
- Infiltraciones (sensibles y latentes).

Se establecen las siguientes condiciones para el cálculo [Acosta, 1998]:

- Temperatura en el local: 24 °C.
- Humedad relativa del local: 55 %.

2.1. Cálculo de la ganancia de calor a través de la ventana diodo-solar

La tabla que se muestra a continuación establece una comparación entre las ganancias de calor para dos variantes diferentes de ventanas, la ventana diodo solar y la ventana de aluminio con un cristal parsol bronce con valores del $F.S. = 0,59$ y $U_{cristal} = 5,76$ y $U_{marco} = 5,88$. Estos resultados fueron obtenidos utilizando la metodología propuesta.

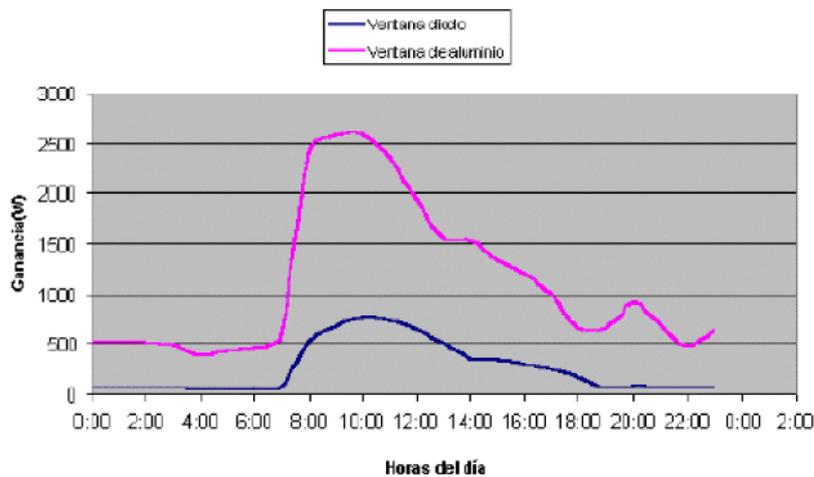
Tabla 1. Cálculo de la ganancia de calor a través de la ventana diodo solar.

Hora	Temp.	Humed.	Humed.	Radiac.	Tsol-aire		Ganancia	
	exter.	relativa	absoluta	(W/m ²)			(W)	
	°C	(%)			PVC	AI	PVC	AI
0:00:00	26,7	84	18,9	0				
1:00:00	26,7	84	18,9	0				
2:00:00	26,7	84	18,9	0				
3:00:00	26,4	86	19	0				
4:00:00	25,9	88	18,9	0				
5:00:00	25,7	88	18,6	0				
6:00:00	26,2	85	18,5	0				
7:00:00	27,8	78	18,7	0				
8:00:00	30,1	70	19,2	356	38,72	32,29	405,8	1197
9:00:00	31,6	62	18,5	471	43	34,5	537	1584
10:00:00	32,4	55	17,1	527	45,16	35,65	601	1772
11:00:00	31,7	65	19,5	507	43,98	34,82	578	1705
12:00:00	31,4	65	19,2	445	42,18	34,14	507,3	1497
13:00:00	31,9	64	19,4	309	39,38	33,8	352	1039
14:00:00	31	66	19	214	36,18	32,31	244	719,5
15:00:00	31,1	70	20,3	194	35,8	32,29	221	652
16:00:00	30,4	68	18,9	167	34,44	31,42	190	561,5
17:00:00	29,7	74	19,8	133	32,92	30,52	152	447,5
18:00:00	29	77	19,8	82	30,98	29,5	93	276
19:00:00	28,6	78	19,6	0				
20:00:00	28,6	94	23,8	0				
21:00:00	28,8	78	19,8	0				
22:00:00	28,3	81	20	0				
23:00:00	27,8	83	19,9	0				

Hora	Q _{cristal} /Q _{marco}		Q _{s inf}		Q _{L inf}		Q _{total}			
	(W)		(W)		(W)		(W)			
	PVC	AI	PVC	AI	PVC	AI	PVC	AI		
0:00:00	41	159,32	3,91	85,4	12,3	268,4	57,2	513,12		
1:00:00	41	159,32	3,91	85,4	12,3	268,4	57,2	513,12		
2:00:00	41	159,32	3,91	85,4	12,3	268,4	57,2	513,12		
3:00:00	38	146,4	3,6	77,7	12,6	273	54,2	497,1		
4:00:00	32	124,87	3,1	66,3	12,3	201	47,4	392,17		
5:00:00	29,9	116,26	2,87	61,7	12,5	251	44,3	428,96		
6:00:00	35	137,79	3,4	73,9	11,2	244,6	49,6	456,29		
7:00:00	53	206,68	5,1	110,5	11,7	256	69,8	573,18		
8:00:00	54,95	52,6	233	95	7,5	164	13	284	533,9	1973
9:00:00	58,82	67	282	117,6	9,15	198	11,2	245	683,2	2432,6
10:00:00	72,75	74,2	308	129,4	10	216,4	8,1	165	766	2590,8
11:00:00	67,33	70,2	285	120,9	9,3	200,3	13,9	302	738,7	2613,2
12:00:00	65	64,2	276	114	8,9	193,5	13	284	659	2364,5
13:00:00	69	54,8	292	110	9,45	205	13,6	296,3	498,8	1942,3
14:00:00	61,9	44,1	262	95,2	8,5	201,1	12,5	273	371	1550,8
15:00:00	62,7	42,8	266	95	8,7	186,6	15,9	347,4	351	1547
16:00:00	57,2	38,1	243	86	7,9	170,6	12,3	268	305,5	1332
17:00:00	46,4	33,21	220	77	7,12	154	14,6	318,5	253,3	1217
18:00:00	43,3	26,71	197	66	6,4	138	14,6	318,5	184	995,5
19:00:00	62,1		241		5,95	129	14,1	307,7	76,3	677,8
20:00:00	62,1		241		5,95	129	25,1	547	93,1	917
21:00:00	64,2		250		6,14	133,3	14,6	318,4	85	701,7
22:00:00	58,7		228		5,63	122	15,13	330	79,5	474
23:00:00	53,1		206		5,07	110,4	14,9	324,6	73	641
					Totales					
					(Wh/día)		6188,2		27857,26	

La tabla 1 muestra que, según los cálculos teóricos, la ventana de aluminio con cristal parsol bronce deja pasar 78 % más de calor que la ventana diodo solar. El comportamiento de la ganancia de calor de ambas ventanas con respecto al tiempo se muestra en la figura 3.

Fig. 3. Comportamiento de la ganancia de calor a través de la ventana diodo solar y la ventana de aluminio con cristal parsol, con respecto al tiempo.

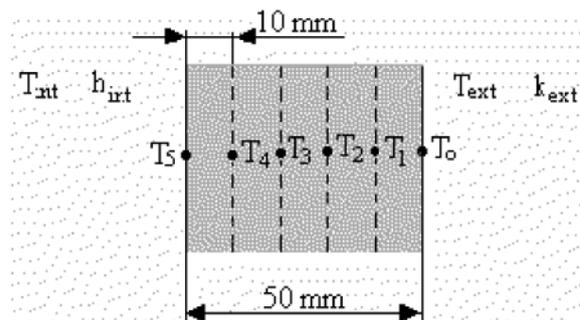


Los resultados obtenidos demuestran que la ventana diodo solar con marco de PVC brinda un considerable ahorro de energía y un mejor confort ya que permite el paso de una menor radiación solar con respecto a la ventana de aluminio con cristal parsol bronce de 6mm de espesor, comúnmente utilizado en las edificaciones modernas.

2.2. Cálculo trasciente del campo de temperatura por conducción a través del marco

Para realizar este cálculo a través de los marcos de PVC y aluminio se utilizó el método de diferencia finita implícita [Incropera y Wit, 1996; Kreith y Black, 1983 y Mill, 1995].

Fig. 4. Nodo de superficie con convección y conducción transitoria unidimensional.



El comportamiento de las temperaturas exterior (T_o) e interior (T_5) del marco de PVC ($k = 0,13$, $a = 9,74 \cdot 10^{-8}$ y $a_s = 0,55$) y aluminio ($k = 237$ y $a = 97,1 \cdot 10^{-6}$ y $a_s = 0,14$) se muestra en las figuras 5 y 6 .

Fig. 5. Comportamiento de las temperaturas exteriores del marco de PVC y aluminio.

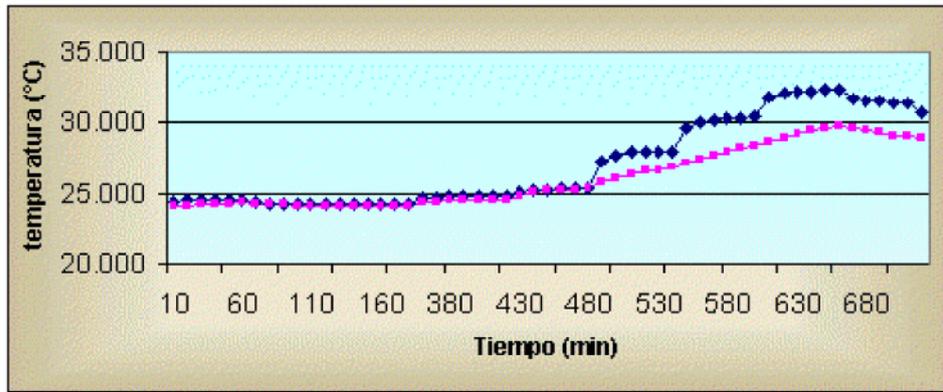
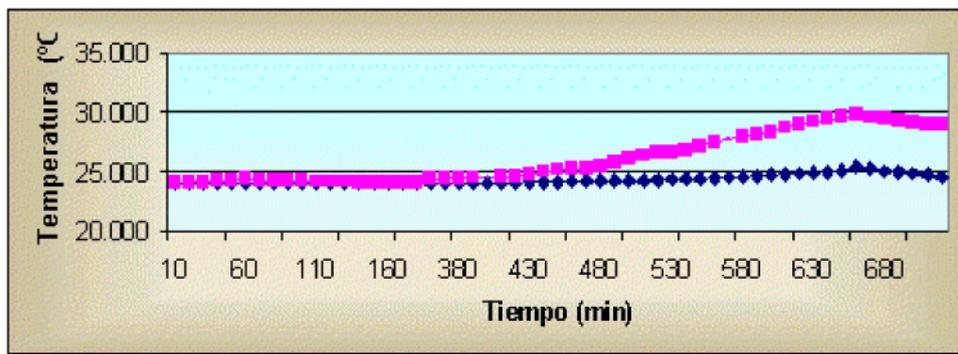


Fig. 6. Comportamiento de las temperaturas interiores del marco de PVC y aluminio.



◆ Marco de PVC
 ■ Marco de aluminio

Como se puede ver en la figura 5 la temperatura exterior (T_o) en el marco de PVC es superior a la del aluminio, siendo cada vez mayor a medida que va pasando el tiempo, es decir, cuando aparece la radiación solar. Esto se debe a que el material PVC tiene una absorptividad solar mayor que la del aluminio. Sin embargo, en la figura 6 se ve que la temperatura interior (T_i) del aluminio es mayor que la del PVC, debido a que el aluminio tiene una conductividad y difusividad térmica mucho mayor que la del PVC, aumentando esta diferencia cuando aparece la radiación solar.

Se puede apreciar que los valores de temperatura que se alcanzan en el exterior del marco de aluminio se transmiten casi en su totalidad al interior, no ocurriendo lo mismo en el marco de PVC, debido a lo anteriormente explicado. Esto provoca que la ganancia de calor a través del marco de aluminio sea superior a la del marco de PVC a las 12:00 m. del mes de junio en 6,44 veces.

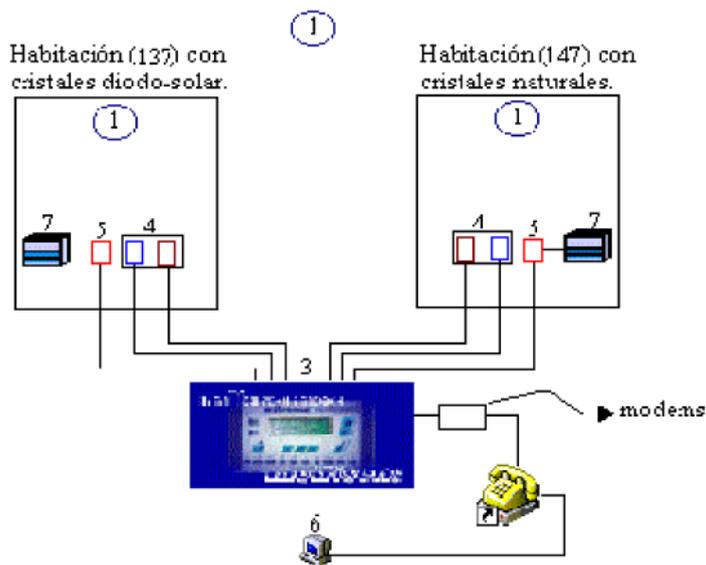
3. Descripción del experimento

Este experimento se realizó en el Centro Internacional de Salud La Pradera durante un período de nueve días, donde se midieron las temperaturas de bulbo seco, humedad relativa y consumo de potencia de los aires acondicionados en dos habitaciones de dicho hotel. Las habitaciones seleccionadas para el experimento fueron la 139, equipada con ventana diodo-solar de PVC, y la 145, con ventana de aluminio y parsol bronce, con el objetivo de comparar la influencia del acristalamiento sobre la carga térmica en dichas habitaciones. Estas habitaciones poseen iguales características en cuanto a dimensiones y ubicación (sureste) [Álvarez, 1992 y Duffie, 1974].

3.1. Esquema de la instalación experimental

La información registrada por los sensores de temperatura y humedad relativa (4) y los metros de potencia (5) conectados a la línea de alimentación de los aires acondicionados (7) se almacena cada tres minutos en un dispositivo de almacenamiento (Datalogger).

Fig.7 Esquema de la instalación experimental



4. Resultados de las mediciones

En este epígrafe se tabulan los resultados obtenidos en el experimento. En la tabla 2 aparecen las temperaturas y humedades relativas promedios horarias, así como los consumos eléctricos de los aires acondicionados de las habitaciones 139 y 145, equipadas con ventana diodo solar y ventana de aluminio con cristal parsol bronce respectivamente. La medición de estos parámetros se realizó en intervalos de 3 min.

Tabla 2. Resultados obtenidos en la medición de temperatura, humedad relativa y consumo de energía de ambas habitaciones.

Hora	Habitación 139			Habitación 145		
	T 139	HR 139	Consumo	T 145	HR 145	Consumo
	°C	%	(Wh)	°C	%	(Wh)
0:00	23,20	91,91	666,5	22,86	77,17	906,5
1:00	23,17	91,39	643	22,83	78,19	732
2:00	23,18	92,21	575,5	22,79	78,56	853,5
3:00	23,18	92,58	553	22,77	78,71	763
4:00	23,17	92,56	563	22,79	80,81	745
5:00	23,17	93,02	549,5	22,73	79,59	801
6:00	23,16	93,37	527,5	22,74	81,50	643
7:00	23,16	92,87	560	22,74	81,07	736
8:00	23,17	92,64	567,5	22,76	78,51	791
9:00	23,18	92,14	567	22,80	76,43	1013,5
10:00	23,19	88,80	827,5	22,98	67,36	1370,5
11:00	23,22	86,83	887	23,13	60,62	1590
12:00	23,27	86,48	947	23,18	61,66	1440,5
13:00	23,23	87,45	956	23,14	64,35	1526
14:00	23,21	87,13	1028,5	23,13	63,18	1611,5
15:00	23,20	87,24	1096,5	23,06	61,80	1593,5
16:00	23,18	86,95	1115	23,07	61,20	1737,5
17:00	23,17	89,06	960	22,92	68,21	1275,5
18:00	23,19	91,09	634	0,00	0,00	837,5
19:00	23,15	91,91	633	22,77	78,00	746,5
20:00	23,16	92,52	594	22,75	78,38	880,5
21:00	23,14	92,54	601	22,70	78,13	788
22:00	23,15	92,19	591	22,74	80,56	759
23:00	23,16	92,08	582	22,69	79,54	748
Totales			17225			24889

De la tabla 2 se puede observar que la habitación 145 consume 7,664 kWh/día más que la habitación 139, lo que implica un ahorro de 30,8 % de energía eléctrica por concepto de climatización si se emplea la ventana diodo solar.

Un aspecto importante a señalar es que la potencia máxima en la habitación 145 es de 1737,5 W, que comparada con la habitación 139 es de 1096,5 W, presenta una diferencia de 641 W que con un COP de 3 produce una carga de refrigeración de 1932 W, que convertido en t de refrigeración representa un ahorro de 1/2 t. Los resultados analíticos muestran que la diferencia de carga máxima entre las habitaciones 145 y 139 es de 1874 W, que representa un ahorro teórico de 0,5 t similar al experimental [Pita, 1981].

Los gráficos siguientes muestran el comportamiento del consumo eléctrico de los aires acondicionados en las dos habitaciones seleccionadas para el experimento en los intervalos de tiempo de 3:00 a 4:00 de 13:00 a 14:00 del día 4 de agosto de 2001.

Fig. 8. Consumo eléctrico de los aires acondicionados de las habitaciones 139 (PVC) y 145 (aluminio). 3:00 - 4:00 del 4 de agosto de 2001.

Fecha: 04.08.01 Hora: 3:00 - 4:00 am

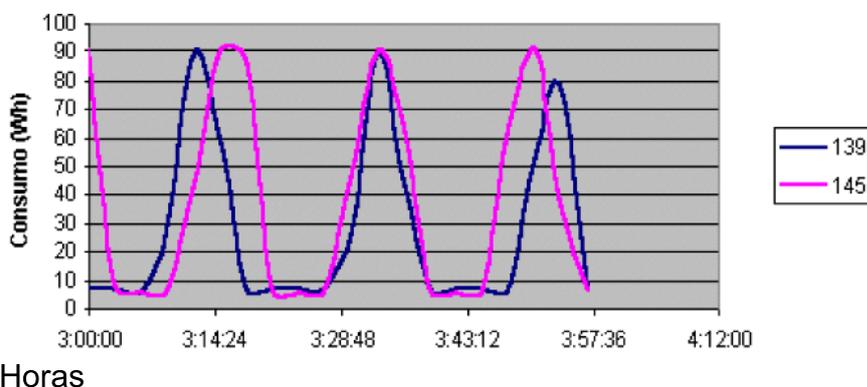
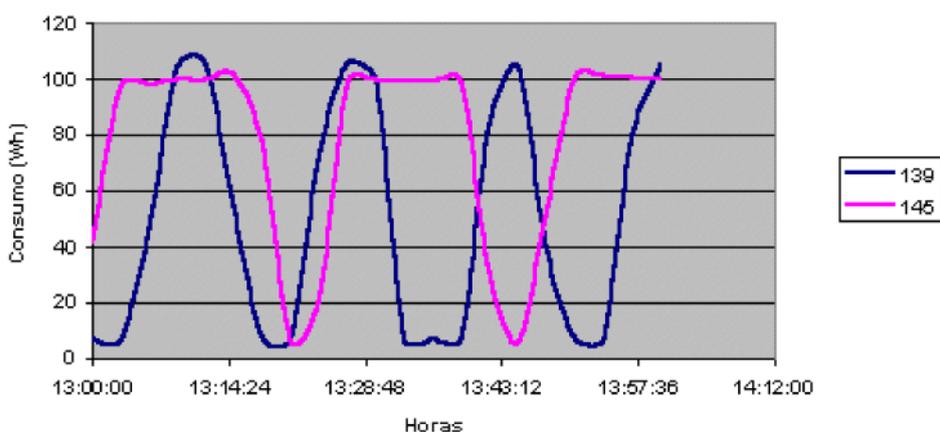


Fig. 9. Consumo eléctrico de los aires acondicionados de las habitaciones 139 (PVC) y 145 (aluminio). 13:00 - 14:00 del 4 de agosto de 2001.

Día 04.08.01 Hora: 13:00 - 14:00

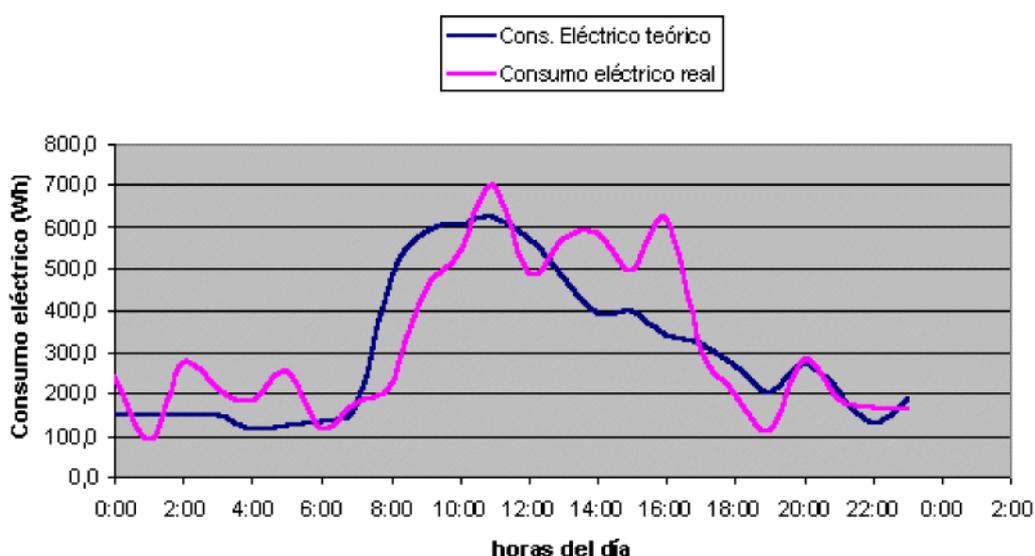


Los gráficos muestran que efectivamente los aparatos de climatización de la habitación 145, equipada con ventana de aluminio y persol bronce, funcionan por períodos más largos para lograr mantener la temperatura de 23 °C. En consecuencia los tiempos de funcionamiento del aire acondicionado de la habitación 139 donde se encuentra instalada la ventana diodo solar son menores, lo que se traduce en un menor consumo eléctrico manteniendo la misma temperatura. Esto ocurre de manera mucho más marcada durante las horas de sol, como se puede observar en el segundo gráfico.

5. Comparación de los resultados experimentales con la metodología

Para establecer una comparación entre la teoría y el experimento realizado se ha confeccionado el siguiente gráfico, el cual muestra en qué magnitud se alejan los resultados experimentales de los cálculos realizados con la metodología propuesta anteriormente. Las curvas que se representan en dicho gráfico son el resultado de la diferencia entre los consumos eléctricos de los aparatos de climatización con ventana diodo y ventana de aluminio.

Fig. 10. Diferencias teóricas y reales entre los consumos eléctricos de los aparatos de climatización con ventana diodo y ventana de aluminio.



04.08.01						
Hora	Hab. 139		Hab. 145		Diferencia	
	teórico (Wh)	exp (Wh)	teórico (Wh)	exp (Wh)	teórico (Wh)	exp (Wh)
0:00	57,2	666,5	513,12	906,5	152,0	240
1:00	57,2	643	513,12	732	152,0	89
2:00	57,2	575,5	513,12	853,5	152,0	278
3:00	54,2	553	497,1	763	147,6	210
4:00	47,4	563	392,17	745	114,9	182
5:00	44,3	549,5	428,96	801	128,2	251,5
6:00	49,6	527,5	456,29	643	135,6	115,5
7:00	69,8	560	573,18	736	167,8	176
8:00	533,9	567,5	1973	791	479,7	223,5
9:00	683,2	567	2432,6	1013,5	583,1	446,5
10:00	766	827,5	2590,8	1370,5	608,3	543
11:00	738,7	887	2613,2	1590	624,8	703
12:00	659	947	2364,5	1440,5	568,5	493,5
13:00	498,8	956	1942,3	1526	481,2	570

14:00	371	1028,5	1550,8	1611,5	393,3	583
15:00	351	1096,5	1547	1593,5	398,7	497
16:00	305,5	1115	1332	1737,5	342,2	622,5
17:00	253,3	960	1217	1275,5	321,2	315,5
18:00	184	634	995,5	837,5	270,5	203,5
19:00	76,3	633	677,8	746,5	200,5	113,5
20:00	93,1	594	917	880,5	274,6	286,5
21:00	85	601	701,7	788	205,6	187
22:00	79,5	591	474	759	131,5	168
23:00	73	582	641	748	189,3	166
Total	6188,2	17225	27857,26	24889	7223,0	7664

Es importante señalar que se pudo comprobar en el análisis de los resultados experimentales y teóricos que ambas habitaciones se explotaron bajo las mismas condiciones, lo que resulta de las diferencias entre los consumos eléctricos de las habitaciones 139 y 145 respectivamente con las ganancias de calor por las ventanas divididas entre el COP. Estos resultados mostraron una diferencia menor de 3 %.

Conclusiones

1. La metodología de cálculo muestra que para una radiación promedio del mes de agosto existe un ahorro en la carga térmica de 78 % al comparar la ventana de diodo-solar con la ventana de cristal sencillo
2. Se demuestra que la ventana de diodo-solar con marcos de PVC representa ahorros superiores a 30 % del consumo de energía eléctrica de la habitación del Centro Internacional La Pradera, lo que significa un ahorro superior a 7 kWh/día.
3. La comparación entre los resultados experimentales y el método analítico muestra una diferencia inferior a 6 % del consumo eléctrico de la máquina de refrigeración.
4. Se demostró por el método implícito de diferencias finitas, que la ganancia de calor para el marco de aluminio respecto al marco de PVC, a las 12:00 meridiano del día en el mes de junio, fue 6 veces superior.
5. De forma adicional se determinó que la capacidad de refrigeración de la máquina para una habitación puede ser disminuida en 0,5 t de refrigeración, producto de la instalación de las ventanas de diodo-solar, lo que representa un ahorro considerable en la inversión inicial.

Bibliografía

1. ACOSTA MARRERO, GUSTAVO. Sicrometría práctica del aire exterior. La Habana: Ed. Científica-Técnica, 1998.
2. ÁLVAREZ GUERRA, MARIO. Manual de radiación solar para la República de Cuba. La Habana: Ed. Academia, 1992.
3. CEGEL, YUNUS A. Heat transfer a practical approach. Mc Graw-Hill companies, Inc., 1998.
4. DUFFIE, JOHN A. Solar energy thermal processes. Edición John Wiley & Sons, Inc., 1974.
5. PITA, EDWARD G. Air conditioning principles and Systems: An Energy Approach. 1981.

6. F. MILL, ANTHONY. Transferencia de calor. España: 1995.
7. HEINEN, K-U. Introduction of de Solar-Diode-Window to Reduce the CO2 Emission. Alemania: University to Applied Sciences, Faculty of electrical energy, Betzdorder. Str.2.
8. KREITH, F; BLACK, W.Z. La transmisión del calor. Editorial Alhambra, S.A., 1983.
9. Manual del vidrio. CITAV: 1996.
10. P. INCROPERA, FRANK Y P. DE WIT. Introduction to heat transfer. Editorial John Wile & Sons, Inc., 1996.
11. POLAINO DE LOS SANTOS, LÁZARA Y SARA CASTILLA ROSELL. Instalaciones de climatización. Editorial ISPJAE, 1987.
12. SMITH, WILLIAM F. Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Madrid: 2da edición, 1995.
13. The ASHRAE Handbook CD. 1998.
14. Ventanas PVC.

Características electrocatalíticas y morfológicas de electrodos composite sobre la base de níquel para el desprendimiento de hidrógeno

Electrocatalytic and Morphologic Characteristics of Nickel Based Composite Electrodes for Hydrogen Evolution

*Alberto Jiménez Pérez y Ramón Piloto Rodríguez
Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Facultad de Ingeniería
Mecánica. Centro de Estudios de Energía Renovable.
Calle 127 s/n, Habana 6, Marianao.
Apartado 6028, CP 19390, Ciudad de La Habana, Cuba.
Teléfono: (537) 260 5060, Fax: (537) 267 2964.
Hilda González Medina, Maura Valdés,
Ernesto Peláez Abellán y Carlos Núñez Valdés
Universidad de La Habana. Facultad de Química.
Zapata esq. G, CP 10400, Plaza,
Ciudad de La Habana, Cuba. E-mail: pelaez@fq.uh.cu*

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo exponer los resultados del estudio de las propiedades electrocatalíticas de electrodos composite Ni/Al₂O₃ sobre la base de níquel, obtenidos electroquímicamente, así como sus características morfológicas.

Palabras clave: propiedades catalíticas, catalizador, electrodo composite

Abstract

The objective of the present paper is to expose the results of the study of the electrocatalytic estates of the nickel based Ni/Al₂O₃ composite electrodes, electrochemically obtained, as well as their morphological characteristics.

Keywords: catalytic properties, catalyzer, composite electrodes

Introducción

La utilización exclusiva de fuentes energéticas no renovables y muy contaminantes como los combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas) y combustibles nucleares ha obligado a buscar nuevas fuentes energéticas que posean las mismas ventajas de las que se utilizan actualmente [Turrini, 1999].

El método más utilizado para su obtención a escala industrial es la electrólisis del agua, pero el alto costo de su producción ha llamado a buscar electrocatalizadores más eficientes en la reacción de desprendimiento de hidrógeno [Babir y Veziroglu, 1992]. En este sentido se viene trabajando en diferentes tipos de electrodos tanto composites [Trassati, 1992; Tonida et al, 1992; Schultze y Bartelt, 1992; Choquete et al, 1990; Senda et al, 1989 y Belanber y Vijh, 1987] como aleaciones [Raj, 1992; Huot et al, 1991; Gala et al, 1984; Divisek et al, 1989; Conway et al, 1983 y Machado et al, 1996]. Se ha encontrado que electrodos de MoS₂ [Raj, 1992 y Huot et al, 1991] son superiores a los de sulfuro de Ni, Co y Fe; además, se ha obtenido por electrodeposición con partículas de C dispersas en un baño de Ni un material

denominado TWAC [Gala et al, 1984], que posee características muy alentadoras.

Parte experimental

Para la obtención de los electrodos composite se utiliza un baño de níquel Watts. Las concentraciones del baño son las siguientes:

$c(\text{NiSO}_4) = 137 \text{ g/L}$, $c(\text{H}_3\text{BO}_3) = 30 \text{ g/L}$, $c(\text{NiCl}_2) = 55 \text{ g/L}$, $\text{pH} = 4$

La temperatura de trabajo es la usual para los baños de Watts, o sea, de $60 \text{ }^\circ\text{C}$, el tiempo de electrólisis es alrededor de 80 min , la densidad de corriente es de 20 mA/cm^2 , los tiempos de rotación de la celda fueron de 8 min . La alúmina en polvo (Al_2O_3) que se utiliza tiene un diámetro de partícula de $3,75 \text{ mm}$.

Para evaluar las propiedades electrocatalíticas para la RDH de estos materiales composite se debe utilizar un método sencillo y preciso. El método comúnmente utilizado consiste en medir el potencial para largos períodos de tiempo a densidades de corriente muy drásticas. Con estos resultados se puede calcular el potencial estacionario y el tiempo de vida útil de los mismos, lo que permite comparar el poder electrocatalítico de diferentes materiales.

Por lo anterior, es conveniente siempre escoger un material como patrón o referencia. En este trabajo se utilizó como referencia un electrodo de níquel brillante.

El desprendimiento de hidrógeno se realizó a una densidad de corriente catódica de 200 mA/cm^2 a temperatura ambiente en una celda de vidrio Pyrex, de 500 mL de capacidad, con dos compartimentos (anódico y catódico), con cuatro bocas esmeriladas separadas por una división de vidrio poroso de gran diámetro. La celda se coloca en un baño de agua de gran volumen a temperatura ambiente.

El electrólito que se utiliza para la electrólisis del agua es $\text{KOH } 1 \text{ mol/L}$ previamente valorado y después electrolizado a una densidad de corriente de $1,5 \text{ A}$ a temperatura ambiente durante 24 h . Como electrodo auxiliar se utiliza uno de malla de platino de 30 cm^2 de área, y como referencia el electrodo de Pt/Hg/HgO/KOH con un capilar de Luggin, colocado lo más próximo posible a la superficie del electrodo de trabajo. Todos los valores de potencial están referidos a esta referencia. La corriente es suministrada por una fuente STRATON TYP 32221 y el potencial se mide con un milivoltímetro PRACITRONIC con un error de 1 mV . Para conocer las características morfológicas de la superficie de estos electrodos se tomaron fotografías de microscopía electrónica de barrido (SEM) con aumento de 50 mm en un equipo SEM Hitachi S 2300.

Resultados y discusión

Para el desprendimiento de hidrógeno se utilizó el método galvanostático, o sea, se sometió el electrodo en estudio a una electrólisis a densidad de corriente constante, y a partir del análisis de las curvas potencial-tiempo (E-t), se determinó el sobrepotencial del H_2 y el tiempo de vida del electrodo. Para el Ni electrolítico se presentó la dificultad de que el valor del potencial

estacionario (E_1) era superior al planteado en la literatura [Machado et al, 1996] posiblemente debido a impurezas en la solución, por lo que se decidió realizar una purificación de ésta antes del desprendimiento de hidrógeno.

Para eliminar impurezas de la solución y así disminuir el valor absoluto del potencial estacionario, se realizaron diferentes pretratamientos a la misma, que consistieron en una electrólisis previa (preelectrólisis) a distintas intensidades de corriente y tiempos. Los resultados obtenidos se muestran en la figura 1 y en la tabla 1.

Fig. 1. Gráfico E vs. $\log t$ del electrodo de Ni electrolítico para el desprendimiento de hidrógeno a $i_c = 200 \text{ mA/cm}^2$, para diferentes pretratamientos del electrolito.

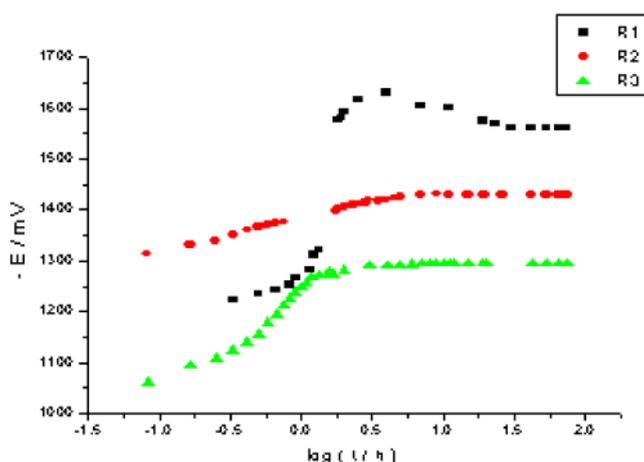


Tabla 1. Potencial estacionario a 200 mA/cm^2 para distintos pretratamientos del electrolito (KOH).

Régimen de pretratamiento del electrolito	$-E_{200}$ estacionario / mV
R ₁) sin pretratar	1560
R ₂) electrólisis con electrodos de platino 1 h a 300 mA	1430
R ₃) electrólisis con electrodos de platino 48 h a 1500 mA	1290
R ₄) electrólisis con electrodos de platino 24 h a 1500 mA	1285

De aquí se puede concluir que la preelectrólisis disminuyó el valor absoluto del potencial estacionario para el desprendimiento de hidrógeno. Con el régimen R₃ se obtienen valores de potencial similares a los planteados en la literatura. Esta disminución del sobrepotencial es debido a que con la preelectrólisis se disminuye el contenido de hierro que está presente en el electrolito. Este hecho se pudo confirmar mediante el análisis cuantitativo por espectroscopia atómica de emisión realizado a las disoluciones de trabajo (tabla 2). Los resultados muestran que con la preelectrólisis se disminuye apreciablemente la concentración de hierro en las soluciones utilizadas; sin embargo, no existen diferencias para los pretratamientos R₃ y R₄ obteniéndose un valor de -1290 mV como potencial estacionario para el Ni electrolítico.

Tabla 2. Concentración (en ppb) de hierro, en disoluciones 0,1 y 0,2 mol.L⁻¹ de KOH en dependencia del pretratamiento realizado a las mismas.

Muestra del electrolito(KOH)	Fe/ppb	
	c (KOH)/mol.L ⁻¹	
	0,1	0,2
Sin tratar	56	59
Pretratamiento R ₃	7	28
Pretratamiento R ₄	7	24

En las curvas E-t para los electrodos composite se observa que al cabo de cierto tiempo de desprendimiento de hidrógeno se alcanza el valor del estado estacionario del potencial, lo que permite calcular el valor de la meseta (potencial estacionario) en este período de tiempo. Es de señalar que este valor estacionario no varió apreciablemente durante el tiempo del experimento, lo que indica que los electrodos composite no perdieron sensiblemente sus propiedades electrocatalíticas para la RDH durante los 6-7 días de experimento. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Comportamiento del potencial estacionario de diferentes electrodos, para el desprendimiento de hidrógeno, a densidad de corriente catódica de 200 mA/cm².

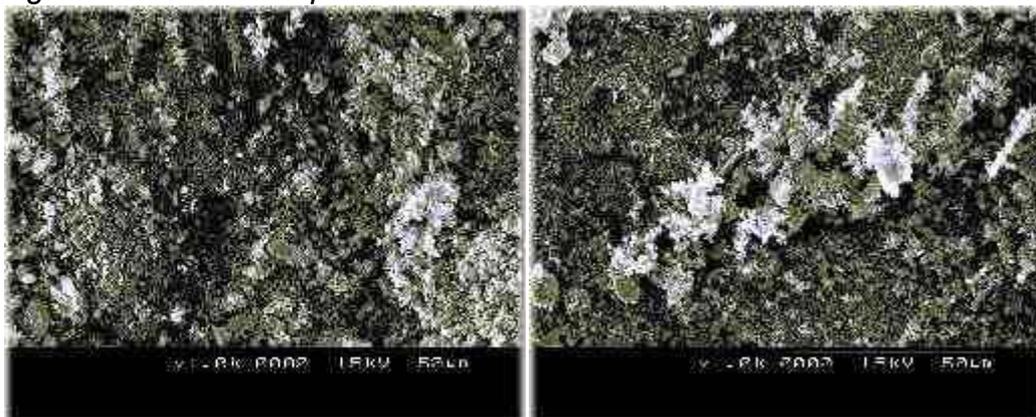
Electrodo	Ni electrolítico	Ni/Al ₂ O ₃
E ₂₀₀ estacionario /mV	-1290	-1257

Según se aprecia en la tabla, los electrodos composite presentan menores sobrepotenciales que los de Ni electrolítico, lo que evidencia un mejor poder electrocatalítico de los mismos. Esto puede explicarse si se tiene en cuenta el aumento del área superficial del material del electrodo, debido a la rugosidad de la superficie que se obtiene en su preparación.

Como en cualquier otro proceso heterogéneo, las características superficiales adquieren una gran importancia debido a la selectividad que puede presentar un catalizador para acelerar una reacción en específico. Todo lo anterior permite explicar el comportamiento de estos electrodos y así llegar unos electrodos que posean las mejores características electrocatalíticas para la RDH.

Según se aprecia en las fotos tomadas a varios electrodos, en general la superficie es compacta y poco porosa, la distribución de alúmina es homogénea, y se observa que algunas partículas muy próximas a la superficie están cubiertas por depósito de níquel que en ocasiones dan la impresión de capas o láminas superpuestas debido a la rotación de la celda.

Fig. 2. Fotos de SEM para diferentes electrodos.



Conclusiones

1. El electrolito es necesario electrolizarlo antes del desprendimiento de hidrógeno para eliminar las impurezas de hierro presentes.
2. Los electrodos composite son mejores electrocatalizadores que los de Ni liso debido a su mayor área superficial.
3. Con la microscopia electrónica de barrido es posible estudiar la superficie de los diferentes electrodos.

Bibliografía

1. TURRINI, E. El camino del sol. La Habana: CUBASOLAR, 101-113, 1999.
2. BABIR, F. Y VEZIROGLU T. N. Int. J. Hydrogen Energy. 17, 527-538, 1992.
3. TRASSATI, S. Advances in Electrochem. Science and Engineering. H. Gerisher and C. W. Tobias, vol. 2, 4-6, 1992.
4. TONIDA, T.; OKAMURA, K; ASHIDA T. Y NAKABAYASHI I. J. Electrochem. Soc. 139, 981, 1992.
5. SCHULTZE, K. Y BARTELT, H. Int. J. Hydrogen Energy. 17, 711, 1992.
6. CHOQUETE, Y.; BROSSARD, L.; LASIA, A. Y MENARD, H. Electrochim. Acta, 35, 1251, 1990.
7. SENDA, A.; SAKATA, A. Y YAMAGUCHI, K. Extended Abstract, 175th Meeting of the Electrochemical Soc. Los Angeles: 1989.
8. BELANBER, A. Y VIJH, A. K. Int. J. Hydrogen Energy. 12, 227, 1987.
9. RAJ, I. A. Int. J. Hydrogen Energy. 17, 413, 1992.
10. HUOT, J. Y.; TRUDEAU, M. L. Y SCHULZ, R. J. Electrochem. Soc. 138, 1316, 1991.
11. GALA, J.; MALACHOWSKI, A. Y NAWRAT, G. J. Applied Electrochem. 221, 14, 1984.
12. DIVISEK, J.; SCHINEITZ, H. Y BALLY, J. J. Applied Electrochem. 19, 519, 1989.
13. CONWAY, B. E.; ANGERSTEIN-KOZLOWSKA, H. M.; SATTAR, A. B. Y TILAK, V. J. Electrochem Soc. 130, 1825, 1983.
14. MACHADO, S. A. S.; AVACA, L. A.; LIMA-NETO, P. Y TIENGO, J. J. J. Appl. Electrochem. 26, 431, 1996.

Celdas solares con pozos cuánticos

Solar Cells with Quantum Wells

*J.C. Rimada
Centro de Microelectrónica. COPEXTEL.
Carretera Prensa Latina Km 1½. La Habana.
L. Hernández
Facultad de Física. Universidad de La Habana.
Colina Universitaria. Apdo 10400. La Habana*

Resumen

En el presente trabajo se presenta un estudio de las características de celdas solares de AlGaAs con pozos cuánticos. Se desarrolla un modelo analítico para calcular la característica I-V de una celda p-i-n de AlGaAs con pozos cuánticos en la región intrínseca. Se calculan además las densidades de corrientes de cortocircuito, los voltajes a circuito abierto y las eficiencias de conversión como funciones del número de pozos, del espesor de los pozos y de la banda energética prohibida del material de los pozos y las barreras en la región intrínseca. También se toman en cuenta los diferentes tipos de recombinación: la radiativa, la no radiativa y en la región de las intercaras. Estos resultados son comparados con los resultados de una celda p-i-n de igual banda prohibida al del material de las barreras de la celda con pozos. Como conclusiones obtenemos un estudio amplio de la operación de las celdas propuestas que sirve como guía para el diseño e interpretación del funcionamiento y características de celdas con pozos cuánticos fabricadas con una gran variedad de materiales.

Palabras clave: celda solar, pozos cuánticos,

Abstract

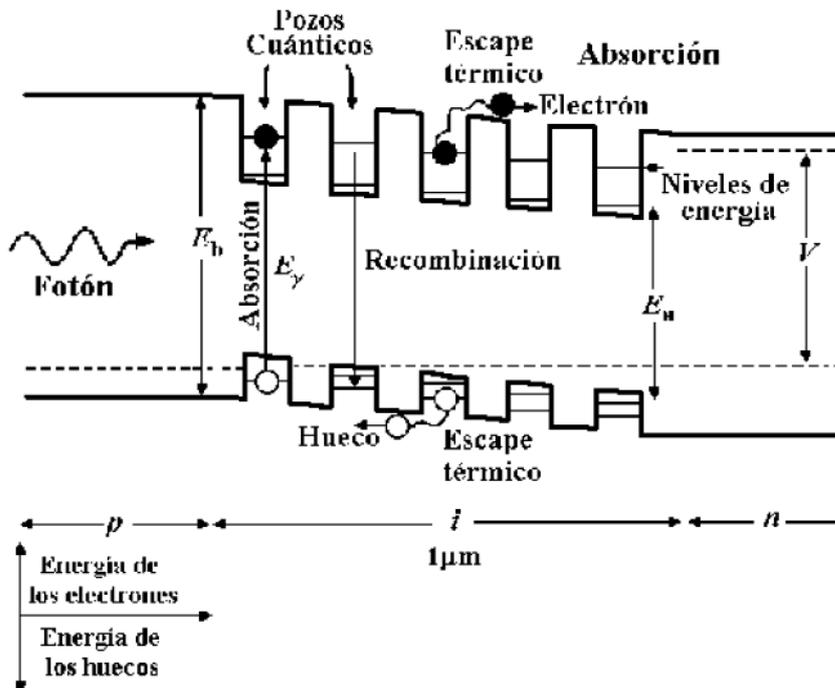
The paper contains a study of the characteristics of AlGaAs solar cells with quantum wells. An analytic model is developed to calculate the I-V characteristic of an AlGaAs p-i-n cell with quantum wells within the intrinsic region. Densities of short circuit currents, voltages at open circuit and conversion efficiencies are also calculated as functions of the number of wells, well thickness, and the forbidden energy band of the material of wells and barriers within the intrinsic region. Account is also being taken of the different types of recombination: radioactive, non-radioactive and within the interface region. These results are compared with the results of a p-i-n cell of a gap similar to that of the material of the barriers of the cell with wells. As a result, a wide study of the operation of the proposed cells is obtained, which could be used as a guide for the design and interpretation of the operation and characteristics of cells with quantum wells manufactured with a great variety of materials.

Keywords: solar cell, quantum well

Introducción

El uso de pozos cuánticos para aumentar la eficiencia de las celdas solares ha sido objeto de estudio en años recientes [Barnham et al, 1990; Barnham et al, 1991 y Paxman et al, 1993]. El principal efecto esperado al incluir estructuras de pozo cuántico en la región intrínseca de una celda solar p-i-n es el incremento de la fotocorriente sin modificar substancialmente el voltaje a circuito abierto para de esta manera obtener eficiencias de conversión altas. Un esquema de una celda solar p-i-n con pozos cuánticos en la región intrínseca, se muestra en la figura 1. Por otro lado, la teoría de balance detallado muestra [Araujo y Martí, 1994 y Ragay et al, 1995] que el límite teórico para la eficiencia de conversión de una celda p-i-n con múltiples pozos cuánticos no puede sobrepasar la eficiencia teórica de una celda solar con un ancho de banda prohibida (gap) simple o de homounión, pero que los pozos cuánticos pueden ser utilizados para obtener en la práctica celdas con gaps óptimos y con espectros de absorción ajustados a la radiación incidente.

Fig. 1. Diagrama esquemático de una celda solar p-i-n con pozos cuánticos en la región intrínseca indicando los procesos fundamentales de absorción, recombinación, escape y captura.



En este trabajo intentamos proporcionar un esclarecimiento en las tendencias de las características de las celdas solares con pozos cuánticos, así como también su dependencia con el gap y el ancho de los pozos y las barreras de los pozos cuánticos. También tenemos en cuenta la recombinación superficial en las intercaras entre los pozos y las barreras a través del desarrollo de un modelo analítico para el dispositivo en estudio. El modelo es aplicado a celdas de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ con pozos cuánticos de $\text{Al}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ donde $0 < y < x < 0,45$, iluminadas con una radiación AM1,5 [Aspnes et al, 1986] a 300 K.

Teoría

Con el objetivo de poder comparar serán presentados dos modelos: para la celda p-i-n de homounión, sin pozos cuánticos, de banda prohibida E_b y para la celda idéntica con pozos cuánticos de gap menor E_a en la región intrínseca la cual tiene un ancho W . Las consideraciones iniciales para ambos modelos son las siguientes [Anderson, 1995]:

i) Aproximación de la región de carga espacial (RCE): Las corrientes de inyección directa de portadores minoritarios (de difusión) y de extracción inversa (de deriva) son tratadas como en el modelo del diodo ideal basado en la aproximación de la región de carga espacial (RCE). La dependencia del ancho de la RCE con la polarización es despreciada.

ii) Cuasi-equilibrio: Las distribuciones de portadores a través de la estructura del diodo son descritas por la estadística no degenerada de Maxwell-Boltzmann y por los cuasi-niveles de Fermi. Esto presupone procesos de dispersión suficientemente eficientes para mantener los subsistemas de portadores en los pozos y las barreras en cuasi-equilibrio entre ellos mismos, así como las velocidades de emisión y captura suficientemente rápidas para mantener los dos subsistemas en cuasi-equilibrio uno con el otro.

iii) Límite de movilidad infinita: Las pérdidas óhmicas se asumen despreciables, se consideran los cuasi-niveles de Fermi constantes en toda la región intrínseca y separados por el voltaje del material.

iv) Simetría: Con el propósito de simplificar el modelo de la celda con pozos cuánticos y los cálculos numéricos, se toma el dopaje de las zonas n- y p- iguales y se asume que la estructura de banda de la banda de conducción y de la banda de valencia son iguales cerca del centro de la primera zona de

Brillouin $\left(\vec{k} = 0\right)$ y en todo punto de la celda.

Los modelos para la celda de homounión y la celda con pozos cuánticos están basados en la relación de corriente-voltaje del diodo ideal (modelo de Shockley), al cual se le adicionan las densidades de corriente de generación y recombinación provocadas por la incidencia de la luz en la celda:

$$J(V) = J_D \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] - J_G + J_R \quad (1)$$

donde q es la carga del electrón, V es el voltaje, kT la energía térmica, J_D es la densidad de corriente inversa de saturación del diodo, J_G y J_R son las densidades de corriente correspondientes a la generación y recombinación de portadores en la región intrínseca respectivamente.

Las densidades de corriente de generación para los dos tipos de celdas son obtenidas de la absorción de los fotones incidentes en toda la estructura; en la celda de pozos cuánticos se toma en cuenta la absorción a través de los niveles de energía confinados en el interior de los pozos. Además, también se

incluyen densidades de corriente de generación provocadas por la temperatura y la ionización por impacto (proceso inverso a la recombinación Auger) que está descrito por el coeficiente de generación no radiativo $A_{A,B}$ donde el subíndice A es para el material del pozo y B para el material de barrera. Este coeficiente se relaciona con el tiempo de vida no radiativo de la siguiente manera:

$$A_{A,B} = \frac{1}{\tau_{A,B}} \quad (2)$$

Para las corrientes de recombinación tomamos en cuenta la recombinación radiativa banda a banda que depende del coeficiente de recombinación radiativo B_B, W donde los subíndices B y W corresponden al material de barreras y al de pozos respectivamente, la recombinación Auger que se describe por el mismo coeficiente de recombinación no radiativo expresado en (2), y la recombinación superficial en las intercaras, provocada por la existencia de defectos en la región en que se unen los dos tipos de semiconductor de diferente gap, la cual viene expresada por:

$$J_{RS} = 2qNn_W u_S \quad (3)$$

donde N es el número de pozos en la región intrínseca, n_W es la densidad de electrones en el material de pozos y u_S es la velocidad de recombinación en las intercaras, parámetro que para el AlxGa1-xAs toma valores entre 30 y 300 cm/s.

Luego de incluir todos los términos necesarios en la ecuación (1), y después de un poco de álgebra obtenemos la expresión corriente voltaje para la celda de homounión:

$$J_E(V) = J_D(1 + \beta) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] + \alpha \left[\exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) - 1 \right] - q\Phi_E \quad (4)$$

donde los parámetros β y α están dados por:

$$\alpha = qWA_B n_{iE} \quad (5)$$

y Φ_B es el número de fotones absorbidos por la celda de homounión calculado a partir del espectro de absorción AM1,5 y del coeficiente de absorción del material.

Para el caso de la celda con pozos cuánticos se tiene:

$$J_{MQW}(V) = J_D(1 + r_s \beta) \left[\exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right] + (\alpha_{MQW} + r_s) \left[\exp\left(\frac{qV}{2kT}\right) - 1 \right] - q\Phi \quad (6)$$

donde Φ es el número de fotones absorbidos por la celda con pozos cuánticos calculados a partir del espectro AM1.5, y de la absorción en los pozos teniendo

en cuenta la cuantización de la energía en los pozos. Además, encontramos las relaciones siguientes:

$$r_R = 1 + fw \left[\gamma_B \gamma_{DOS} \exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right) - 1 \right] \quad (7)$$

$$r_{NR} = 1 + fw \left[\gamma_A \gamma_{DOS} \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right) - 1 \right] \quad (8)$$

$$r_S = 2Nq niB u_s \gamma_{DOS} \exp\left(\frac{\Delta E}{2kT}\right) \quad (9)$$

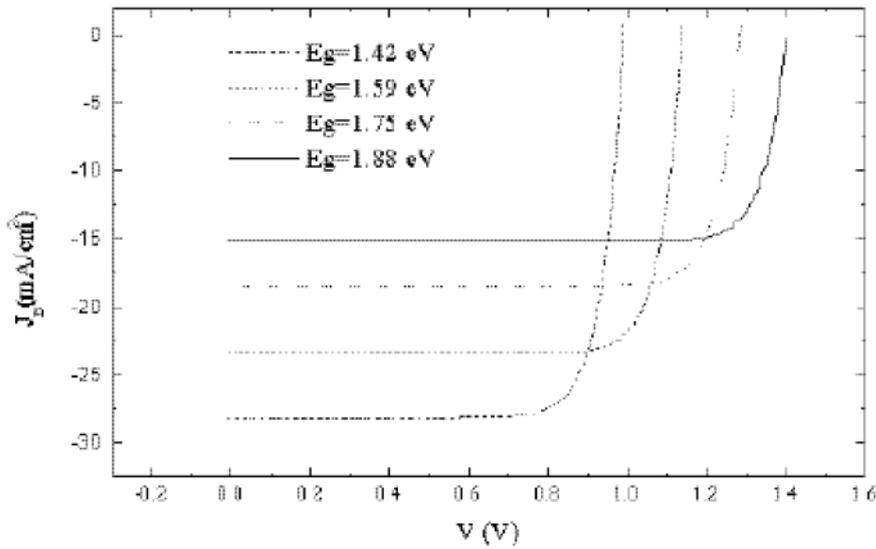
donde $\gamma_B \equiv \frac{E_B}{E_B} \gamma_{DOS} \equiv \frac{g_B}{g_B} \gamma_A \equiv \frac{A_B}{A_B} = \frac{\tau_B}{\tau_B}$, $\Delta E = E_B - E_A$ y fw es la fracción de la región intrínseca ocupada por pozos cuánticos. Nótese que la expresión (6) se reduce a la forma de la expresión (4) al hacer $\Delta E=0$ o $fw=0$ y anular la recombinación superficial en las intercaras ($uS=0$).

El algoritmo usado para llevar a cabo los cálculos fue desarrollado usando el programa MATHEMATICA, pues este es un programa muy potente que permita ahorrar mucho tiempo y esfuerzo para realizarlos al tener incorporadas un número grande de funciones.

Resultados

En la figura 2 aparecen las curvas de las celdas sin pozos cuánticos para varios valores de gap de las celdas. En ella se observa cómo la corriente de cortocircuito de estas celdas disminuye con el aumento del gap de la celda. Este hecho se debe a que con el aumento del gap se absorbe una región menor del espectro solar por lo que se produce una menor cantidad de portadores fotogenerados. También se observa cómo aumenta el voltaje a circuito abierto con el aumento del gap, lo cual está de acuerdo con la dependencia del voltaje a circuito abierto con el valor de dicha magnitud.

Fig. 2. Curvas J(V) para las celdas sin pozos cuánticos con distintos valores del gap.



En las figuras 3 y 4 se pueden apreciar las características $J(V)$ de las celdas con pozos cuánticos, en las cuales se varían el número de pozos y la altura de la barrera respectivamente. Vemos que al aumentar el número de pozos en la región intrínseca disminuye el voltaje a circuito abierto de la celda debido a que aumenta la recombinación superficial en las intercaras, y que al aumentar el tamaño de la barrera de los pozos disminuye en voltaje a circuito abierto debido al mayor confinamiento de los portadores, así como también disminuye la corriente de cortocircuito debido a que es absorbido un número menor de fotones.

Fig. 3. Curvas $J(V)$ para celdas solares sin pozos y con pozos variando el número de pozos cuánticos.

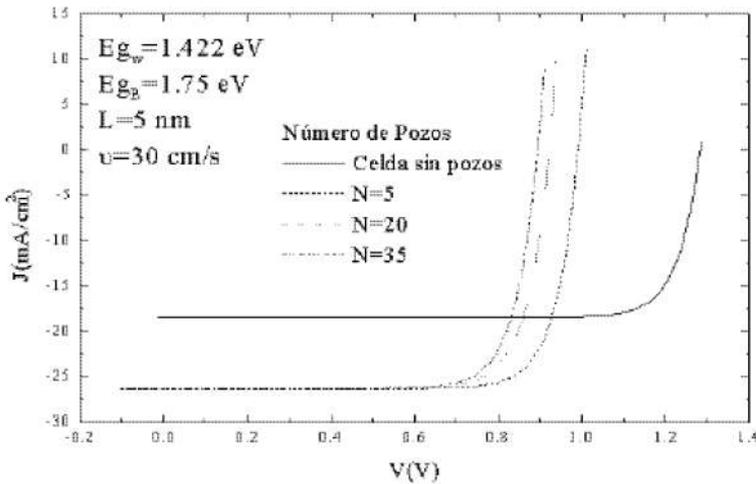
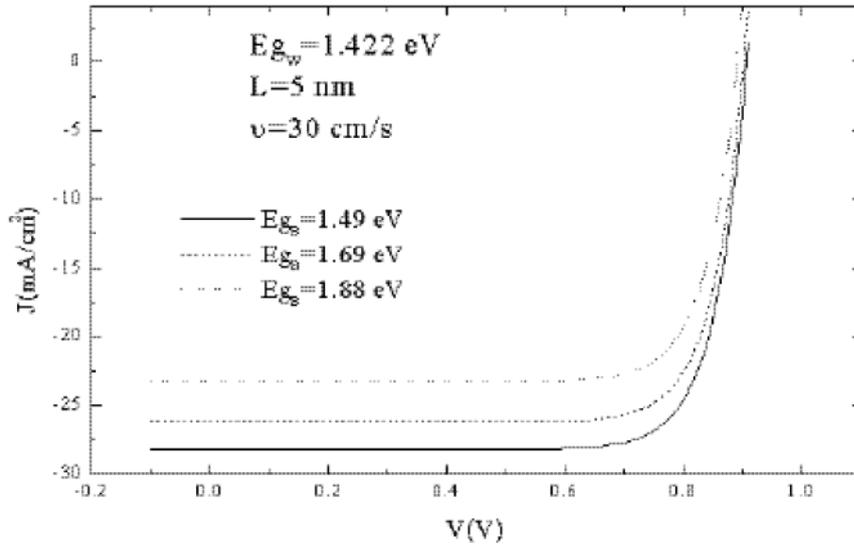
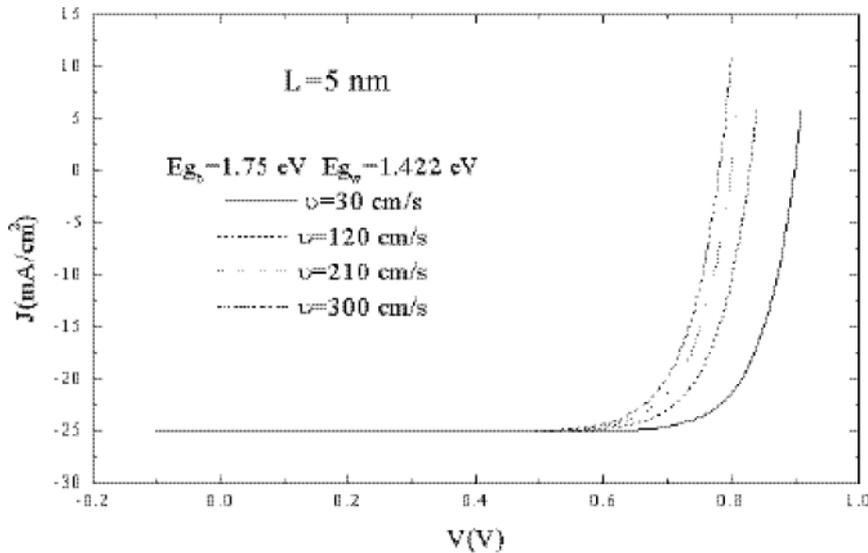


Fig. 4. Curvas $J(V)$ para celdas solares sin pozos y con pozos variando el gap de la celda, manteniendo el gap de los pozos fijo.



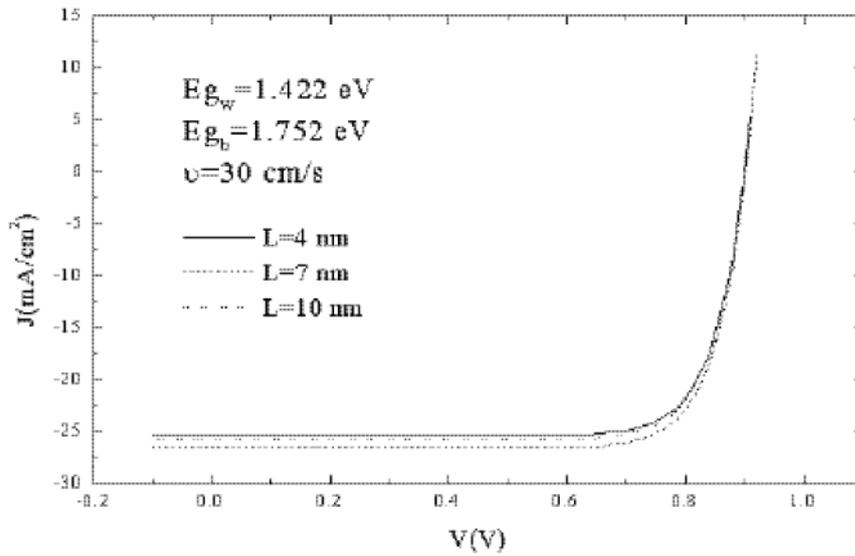
El efecto que provoca el aumento de la velocidad de recombinación superficial en las intercaras lo podemos ver en la figura 5. En ella observamos cómo disminuye el voltaje a circuito abierto con el aumento de esta velocidad de recombinación, conservando fijos el número de pozos y los gaps de los pozos y las barreras.

Fig. 5. Curvas $J(V)$ para celdas solares sin pozos y con pozos variando la velocidad de recombinación superficial en las intercaras.



Al aumentar el ancho de los pozos cuántico obtenemos un aumento de la corriente de cortocircuito al poder ser absorbido un número mayor de fotones con energías menores que el gap de la celda, como se puede apreciar en la figura 6 de nuestro trabajo.

Fig. 6. Curvas $J(V)$ para celdas solares sin pozos y con pozos variando el ancho de pozos cuánticos.



Las curvas de eficiencia de las figuras 7 y 8 reflejan que la celda sin pozos cuánticos tiene mayores eficiencias que las celdas con pozos, lo que indica que el aumento de la corriente de cortocircuito obtenida al incluir los pozos cuánticos en la celda solar no compensa las caídas en el voltaje a circuito abierto provocadas por el aumento de la recombinación en los mismos.

Fig. 7. Gráfico de eficiencias de celdas solares con pozos y sin pozos para varios números de pozos en la región intrínseca y variando el gap de los mismos.

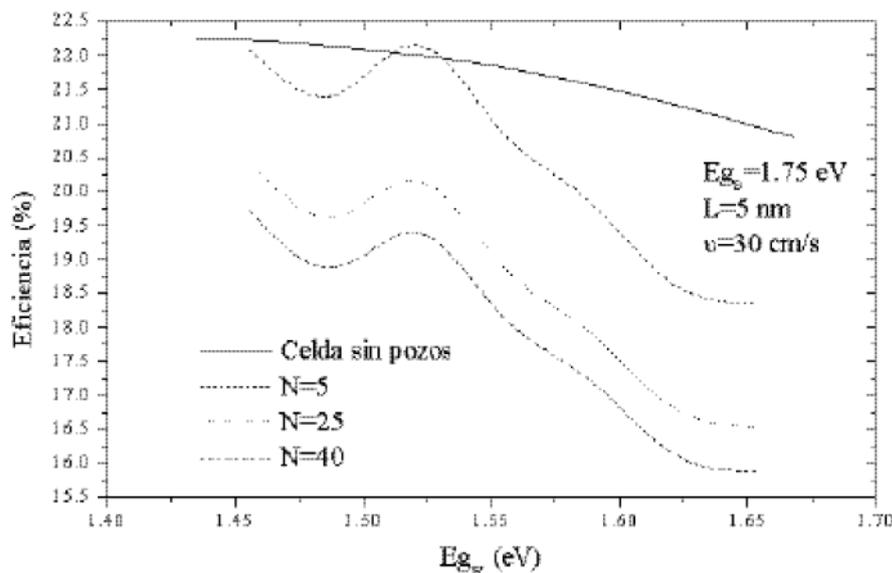
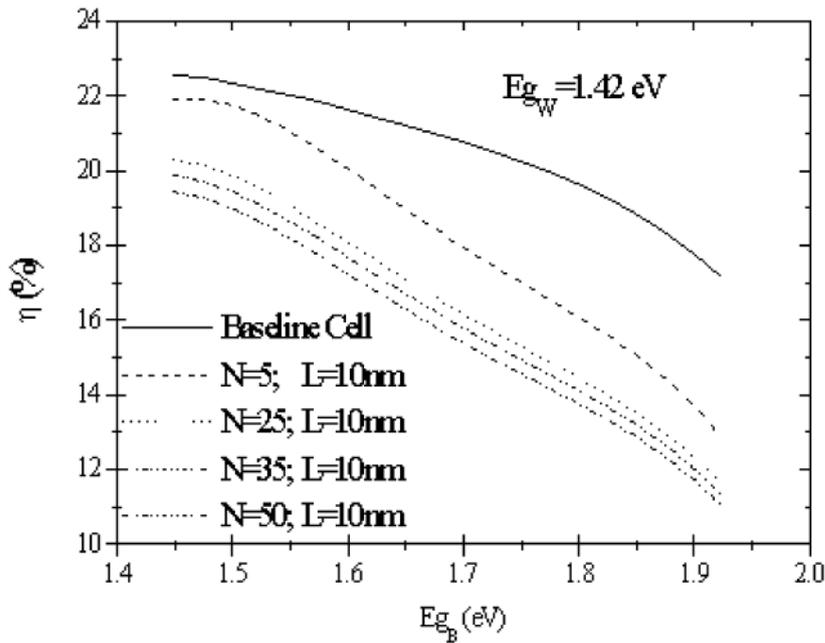


Fig. 8. Gráfico de eficiencias de celdas solares con pozos y sin pozos para varios números de pozos en la región intrínseca y variando el gap de la celda.



Conclusiones

En este trabajo hemos desarrollado un modelo analítico para estudiar el comportamiento de las celdas solares con pozos cuánticos y se ha aplicado a celdas fabricadas a partir de $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$. Se han obtenido las características corriente-voltaje para dichas celdas y se han comparado con las curvas obtenidas para las celdas sin pozos, variando un conjunto de parámetros como los gaps de los materiales de pozos y de barreras, la velocidades de recombinación superficial en las intercaras, el número y el ancho de los pozos. También obtuvimos curvas de eficiencia para estas celdas y las comparamos con las obtenidas para las celdas sin pozos.

La inclusión de pozos cuánticos en una celda solar provoca el aumento de la corriente de cortocircuito en la misma en comparación con una celda de homounión con el mismo gap. Sin embargo, el voltaje a circuito abierto desciende al añadir estas estructuras a la celda como resultado del incremento de la recombinación en la misma. Como conclusión de todo lo anterior, nosotros no encontramos ventajas en la elaboración de estos dispositivos con relación a las celdas solares convencionales de homounión.

Bibliografía

1. BARNHAM, K. W. J. AND DUGGAN, C. J. Appl. Phys. 67, 3490, 1990.
2. BARNHAM, K. W. J.; BRAUN, B.; NELSON, J.; PAXMAN, M.; BUTTON, C.; ROBERTS, J. S. AND FOXON, C. T. Appl. Phys. Lett. 59, 135, 1991.

3. PAXMAN, M.; NELSON, J.; BRAUN, B.; CONNOLLY, J.; BARNHAM, K. W. J.; FOXON, C. T. AND ROBERTS, J. S. J. Appl. Phys. 74, Vol. 1, 1993.
4. ARAUJO, G. L. AND MARTÍ, A. Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 33, 213, 1994.
5. RAGAY, F. W.; MARTÍ, A.; ARAUJO, G. L. AND WOLTER, J. H. Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 40, 5, 1995.
6. ASPNES, D. E.; KELSO, S. M.; LOGAN, R. A. AND BHAT, R. J. Appl. Phys. 60 (2), 754, 1986.
7. ANDERSON, N. G. J. Appl. Phys. 78 (3), 1850, 1995.

Influencia del secado natural sobre los parámetros de eficiencia en la madera para combustible

Impact of Natural Drying on the Efficiency Parameters in Fuel Wood

*F. Morales, M. Pérez y C. Rivera.
Estación Experimental Forestal de Pinar del Río.
R. González y M. A. Guyat.
Instituto de Investigaciones Forestales.*

Resumen

En los últimos cinco años, en la provincia de Pinar del Río alrededor de 40 % del volumen total de madera extraída se empleó como combustible directo y para la fabricación de carbón. Este trabajo tiene el objetivo de analizar el aumento en la eficiencia económica de este surtido mediante la disminución de la humedad de la madera a parámetros adecuados, tanto para combustible directo como para la carbonización, haciendo un uso racional de los elementos climáticos y en ordenado plan de tala.

Palabras clave: secado natural, eficiencia económica, humedad de la madera

Abstract

In the last five years, around 40 % of the total volume of wood extracted in the province of Pinar del Río was used as direct fuel and for producing charcoal. The current paper is aimed at increasing the economic efficiency of this process by reducing wood humidity to a appropriate level, for both direct fuel and charcoal production, with a rational use of the climate elements and in an organized cutting plan.

Keywords: natural drying, economic efficiency, wood moisture

Los estudios se realizaron sobre tres especies comúnmente utilizadas con estos fines *Quercus cubano var. sagreana* (Encino), *Eucalyptus pellita* F. Muell y *Casuarina equisetifolia* Forts, determinándose fundamentalmente los programas de secado natural, pérdida de peso en función de la humedad y eficiencia en los parámetros para la combustión directa y la carbonización, mediante un análisis económico simple que expresa un aumento de más de 50 % de todos los parámetros de eficiencia económica (rendimientos, producción y productividad del trabajo), elevación de la calidad del carbón y una considerable reducción de madera de alrededor de 50 %, lo que se traduce en dejar de talar entre 4 y 5 miles de hectáreas de bosques anualmente con fines energéticos. Finalmente se recomienda el secado natural de la madera para combustible como mínimo durante un período de tiempo de tres meses.

Introducción

La contribución de la madera a los esfuerzos por mitigar los problemas energéticos mundiales es mucho mayor de lo que generalmente se piensa. La leña y el carbón vegetal se han considerado, hasta hace poco tiempo, como

simple combustible de subsistencia, pero hoy no caben dudas de que son también los combustibles del futuro.

Se estima que 60 % de toda la madera extraída en el mundo se quema como combustible, ya sea directamente o transformándola en carbón vegetal. En

América Latina, casi un quinto del consumo energético es satisfecho con madera [González et al, 1989]. En Cuba, a finales de los años 50, la madera para quemar representaba 80 % del total extraído, en 1989 no rebasaba 63,5 %, fundamentalmente para la producción de azúcar. En la actualidad estos valores han aumentado debido a la escasez de oleocombustibles, alcanzando de nuevo valores entre 75 % y 80 % del total de la madera talada, lo que atenta en muchas zonas contra el patrimonio forestal [Lacasa, 1991].

Existen tres factores que ejercen una marcada influencia en la eficiencia energética de la madera, que son: humedad adecuada, densidad y dimensiones de la leña.

Este trabajo se limita a estudiar el primero de los factores antes mencionados, con el objetivo de lograr un uso racional de la leña como combustible directo o en su transformación a carbón vegetal.

Materiales y métodos

La investigación se desarrolló en el Polígono de Carbonización de la Estación Experimental Forestal de Pinar del Río, Viñales. Se realizaron tres experimentos fundamentales y análisis económicos de la siguiente forma:

* Determinación de los programas de secado natural de leña a partir del método de pesadas periódicas (mediante la fórmula de humedad actual) en las especies: Casuarina equisetifolia, Eucalyptus pellita y Quercus cubana.

De forma periódica y para finalizar el experimento se realizaron comprobaciones de la dinámica de la humedad de la madera por el método de diferencias de pesadas a muestras expuestas en estufa empleando la fórmula de humedad final.

* Se formaron 3 pilas de 1 m estéreo de cada especie antes mencionada y se determinó la humedad de la leña mediante el último de los métodos ya expuestos, realizándose pesadas totales periódicas en una báscula de plataforma para determinar las variaciones de peso en función del % de humedad de la madera y el tiempo de secado.

* Para determinar la influencia de la humedad de la leña en los rendimientos de carbón vegetal se empleó leña de Eucalyptus pellita de árboles con 7 años de edad, las dimensiones oscilaron entre los 4 y 18 cm de diámetro con una media general de 8 cm y 1 m de longitud, esta leña se almacenó convenientemente y se determinó el % de humedad mediante los métodos anteriormente descritos.

Las carbonizaciones (6 en total) se realizaron atendiendo a diferentes porcentajes de humedad en la madera, en un horno experimental de ladrillos, tipo colmena, con una capacidad potencial de 6,4 m³ y se obtuvieron los parámetros de rendimientos y calidad del carbón. Se realizó un análisis económico simple de la cuantía y estado de consumo de la leña combustible destinada a los centrales azucareros de la provincia de Pinar del Río.

Para determinar la eficiencia económica dada por la influencia de la disminución de la humedad de la leña en la producción de carbón vegetal se aplicó un método convencional de costos-beneficios y se realizó también un examen de la productividad del trabajo.

Resultados y discusión

Para el análisis de los resultados obtenidos se tomó como base lo expresado

por algunos autores [Tillman, Maggi y Partenaires, 1991], que plantean que una madera anhidra con 10 % de humedad produce en su combustión alrededor de 16,7 miles de *kJ/kg* y con 60 % de humedad sólo alrededor de 6,3 miles de *kJ/kg* de energía disponible. Según los mismos autores, para extraerle el agua a una madera con 60 % de humedad se necesita emplear alrededor de 20 % del poder calorífico disponible de la propia madera.

Otros investigadores [Briane y Dota, 1985] expresan que el rendimiento de 1 *m* estéreo de leña para la producción de carbón vegetal en función de la humedad de la madera aumenta a medida que disminuye el % de humedad, por ejemplo: un metro estéreo de leña con 20 % de humedad proporciona hasta 100 *kg* de carbón, pero con 80 % de humedad los rendimientos descienden a 45 *kg/m* estéreo.

La leña en un tiempo relativamente corto alcanza el punto de saturación de la fibra (PSF), o sea, alrededor de 30 % de humedad, primero el Eucalyptus por ser una madera menos densa y después el Quercus y la Casuarina, las tres especies expuestas a las mismas condiciones climáticas al aire libre, que logran humedades entre 20 y 28 % a los 90 días de exposición, lo que proporciona un programa de secado natural para estas especies.

En el secado de un metro estéreo de leña de las especies objetos de estudio, en función del tiempo y el peso de las mismas, el Eucalyptus reduce el peso 35 % a los 110 días, el Quercus disminuye 15 % de su peso en 98 días y la Casuarina 18 % de su peso original en 91 días.

El análisis económico simple de la influencia de la humedad en la eficiencia de la leña para centrales azucareros plantea ahorros en todos los indicadores analizados de 62,7 % hasta 72,8 %, cuando la madera se seca de forma natural de 60 % hasta 20 %, con especial interés para la ecología, pues disminuyen los volúmenes de leña y, por ende, de talas de bosques alrededor de 60 %.

Los parámetros de explotación del horno experimental de ladrillos (colmena) mejoran a medida que la humedad de la madera se acerca al rango de 20 a 30 %, en especial los porcentajes de rendimientos del carbón vegetal y la velocidad de carbonización, al igual que la calidad del carbón obtenido (análisis químico inmediato), lo que respalda que a menos humedad de la madera la calidad del carbón producido es mejor, a tenor con lo planteado por María Antonia Guyat (1989).

En la tabla 1 se exponen los resultados del análisis económico de la influencia positiva del secado de la leña sobre la producción del carbón vegetal de forma favorable sobre los elementos analizados, que muestran un aumento de los rendimientos de la producción, disminución del consumo de madera y aumento

de la productividad del trabajo, lo que concuerda con los resultados obtenidos por R. González y otros (1989).

Tabla 1. Análisis económico sobre la influencia de la humedad de la madera en la producción de carbón vegetal, aplicando el método tradicional de costos-beneficios.

Indicadores	U/M	Tratamientos					
		1	2	3	4	5	6
Producción de carbón por proceso	kg	240	325	396	411	440	466
Rendimientos volumétricos	%	32,6	43,7	48,9	50	55,3	68,9
Rendimientos de carbón en peso (base seca)	%	16,7	20,8	22,4	23,2	25,2	28,7
Consumo de madera/ton de carbón	M. estéreo	18,4	13,7	11,5	11,7	10,7	9,6
Consumo de madera/ton de carbón	ton	12,8	8,8	7,6	6,3	5,4	4,5
Consumo de madera/sacos de carbón	M. estéreo	0,75	0,53	0,45	0,43	0,4	0,35
Volumen de producción anual	ton	13,7	23	24,5	26,7	26	34,5
Valor de la producción anual	M. P.	3,5	5,9	6,3	6,8	6,6	8,8
Productividad del trabajo diario y físico	sacos	1,1	1,9	2	2,1	2,1	2,8
Productividad del trabajo diario en valores	Pesos	10,4	17,9	18,9	19,8	19,8	26,4

Conclusiones y recomendaciones

1. Se observa influencia negativa de los altos por cientos de humedad en la madera para combustible directo y para la producción de carbón.
2. Aunque las tres especies estudiadas presentan diferencias en los programas de secado, como mínimo la leña debe almacenarse adecuadamente al aire libre al menos durante tres meses para alcanzar entre 20 y 30 % de humedad, lo que además facilita una pérdida de peso de la leña de hasta 34 %.
3. Del análisis económico simple aplicado a la leña combustible con destino a centrales azucareros, se concluye que con sólo secarla (de 20 a 30 %) se ahorrarían cada año en la provincia de Pinar del Río 20800 m³, 370,7 t de combustible en el proceso de tala y transporte así como 197 800 de pesos.
4. El secado de la leña para la producción de carbón entre 20 y 30 % de humedad brinda los siguientes resultados:
 - * Pérdida de peso de la madera, lo que facilita su mejor manipulación, humaniza el trabajo y aumenta la capacidad de carga de los vehículos.
 - * Se reduce a 50 % el tiempo de carbonización.
 - * Se duplican los rendimientos y por consiguiente la producción de carbón vegetal.
 - * El valor de la producción se eleva en 151 % y se disminuyen los costos de la leña en 37,5 %.
 - * La productividad del trabajo se incrementa en 154 % en unidades físicas y en valores en 153 % por trabajador.
 - * En general, todos los valores de eficiencia económica se elevaron en más de 50 % cuando se usó la leña seca (28,4 % de humedad).
5. La eficiencia energética, la silvicultura y el medio ambiente se favorecen, lo que proporciona un desarrollo sostenible de las reservas forestales utilizando leña seca y no húmeda o verde.

6. Se recomienda ordenar las talas de leña para combustible o para la producción de carbón vegetal de tal manera que puedan ser adecuadamente almacenadas al aire libre como mínimo durante 3 meses antes de ser utilizadas.

Bibliografía

1. BONILLE, D. Y GALLO, G. Análisis de la contribución forestal a la producción de energía en América Latina. Roma: marzo, 1993. Tomos I y II. 228 p.
2. BRIANE D. Y DOAT, J. Guide technique de la carbonisation. La fabrication du charbon de bbois. París: 1985. 179 p.
3. COMITÉ ESTATAL DE PRECIOS. Lista oficial de precios, tarifas de servicios técnicos productivos. La Habana: CEP, 1981. s.p.
4. FAO. Programa de acción sobre leña y energía. Roma: Comité de Desarrollo Forestal en los Trópicos, 1985. 68 p.
5. GONZÁLEZ, R. ET AL. *Reducción del volumen de leña por aumento de la eficiencia en la obtención de energía*, en Memorias I Congreso Forestal de Cuba. La Habana: I.I.F., 1989. 64-73 pp.
6. GUYAT, MARÍA ANTONIA. Estudio de la calidad del carbón vegetal de especies forestales de la Ciénaga de Zapata. Inédito. La Habana: I.I.F., agosto, 1989. 7 p.
7. LACASA, A. Leña y carbón vegetal, sus perspectivas. La Habana: 1991. 31 p.
8. MAGGI Y PARTENAIRE. Biomasse Energíe. Raport sur la valorisation energética de la biomasse. Suiza: 1990. 59 p.

Manejo de las coberturas como parte de un sistema integrado de lucha contra la erosión de los suelos en Cuba.

Covering Handling as Part of an Integrated System of Fight against Soil Erosion in Cuba.

*F. Peña, M. Riverol, Consuelo. Hernández,
E. Cabrera, C. A. Alfonso, J. M. Llanes,
G. León, N. Castro y Yulaidis Aguilar*

Resumen

El incremento de los niveles de degradación de los suelos a escala mundial, unido al acelerado incremento demográfico que provoca el uso cada vez más intensivo de este recurso, así como el fomento de nuevas áreas de cultivo, requieren de un manejo adecuado de la cobertura vegetal como aspecto primario de conservación, que debe insertarse de forma obligatoria en un programa integral de medidas antierosivas con el objetivo de lograr el equilibrio deseado. El presente trabajo comprende resultados experimentales desarrollados a diferentes niveles: parcelas de escurrimiento, segmentos de microcuencas y campos de producción. Destaca las ventajas de la utilización de las plantas de cobertura y abonos verdes cuando se siembran en surcos siguiendo las curvas de nivel, sobre el control del escurrimiento superficial (~ 20 %), la reducción de las pérdidas de la materia orgánica (100-200 *kg/ha*), la incorporación de 20-50 *t/ha* de masa fresca según la especie, el enriquecimiento del contenido nutricional de suelo, así como un notable efecto económico a través del incremento del rendimiento del cultivo principal. Por todo ello se ratifica la necesidad de incorporar las prácticas vegetativas a sistemas integrales de manejo de suelo, como única vía para reducir a límites permisibles los niveles de erosión del suelo e incrementar el índice de utilización de la tierra, un mejor aprovechamiento del agua y con ello un aumento en la producción agrícola, además de la mejora y el mantenimiento de la fertilidad del suelo.

Palabras clave: material orgánico del suelo, lucha contra la desertificación

Abstract

The increment of the levels of soil degradation at worldwide scale, together with the acceleration of population increase that provokes more and more intensive use of this resource, as well as the search for new cultivation areas, need an adequate management of the live mulch as a primary aspect of conservation that should be compulsory inserted in a comprehensive program of anti-erosion measures for achieving the desired equilibrium. The paper presents experimental results developed at different levels: dripping parcels, segments of microwatersheds and production fields. It highlights the advantages of the utilization of the ground cover plants and green fertilizers on the control of superficial dripping (20 %), the reduction of organic matter losses (100-200 *kg/ha*), the incorporation of 20-50 *t/h* of additional mass according to the species, the enrichment of the nutritional content of the soil, as well as a notable economic effect through the yield increase of the main crop. All this ratifies the need to incorporate the vegetative practices to comprehensive systems of soil management, as the only way to reduce the levels of soil erosion to tolerable limits and increasing the rate of land use, a better use of water together with an increase in agricultural production, in addition to the improvement and preservation of soil fertility.

Keywords: soil organic matter, soil erosion control

Desarrollo

El suelo de nuestro planeta, junto con la atmósfera y los Océanos constituyen lo que se conoce como biosfera, una delgada capa que envuelve a la tierra, en la que se encuentran todas las formas vivientes. De estos tres elementos constitutivos quizás el más complejo sea el suelo. Es, además, el que se destruye más fácilmente. El acción desatinada de un ser humano puede hacer desaparecer para siempre decenas de toneladas de suelo de cada hectárea que cultiva. En pocos días puede desaparecer el legado de miles de años.

En los trópicos húmedos bastan 200 años para que se forme un suelo a partir de una base disgregada, pero el proceso por lo general es mucho más prolongado. En la mayoría de los casos, el suelo se forma a un ritmo de sólo 1 cm cada 100-400 años y se requieren de 3 000 a 12 000 años para que el sea suficiente para constituir tierras productivas. La relativa lentitud con que ocurren los procesos de formación de suelo en relación con el dinamismo de la erosión acelerada provocada por el hombre, justifica la tesis de que el suelo es un recurso no renovable.

La degradación de suelos implica, por definición, un problema social. Los procesos ambientales como erosión y lavado, ocurren sin la acción humana, pero para que estos procesos sean interpretados como degradación debe asumirse un criterio social que relacione la tierra con su uso actual y potencial.

Más de 306 000 000 *ha* están siendo afectadas en Latinoamérica por una degradación del suelo de origen antrópico [Pla, 1994]. Nuestros países en la actualidad presentan un elevado por ciento del área con afectación media y severa de degradación por erosión hídrica debido a la susceptibilidad de sus suelos y al carácter agresivo de las precipitaciones en el área tropical.

A través de la remoción y sedimentación del suelo superficial, la erosión hídrica altera las principales propiedades físicas, químicas y biológicas de los suelos, que a su vez afectan los procesos que regulan la productividad del agroecosistema. Podría decirse que es la forma más completa e integral de degradación de suelo, pues reduce las reservas de agua utilizable por la planta además de causar una acelerada pérdida de productividad de los suelos. En muchos casos la erosión provoca daños ambientales en zonas fuera del lugar donde ocurre la remoción del suelo. La erosión es entonces un doble desastre: un recurso vital desaparece de donde es desesperadamente necesitado y es depositado donde es totalmente indeseado [National Research Council, 1993].

En la mayoría de los países de Latinoamérica los problemas de uso, manejo y conservación de suelos y tierras no han sido considerados con la importancia y prioridad que merecen hoy día. Aunque existe la capacidad potencial de producción excedente de alimentos, no sucede así, y ello ha motivado la búsqueda de la productividad sobre la base del incremento de insumos tecnológicos, que a la par de incrementar los costos de producción han provocado nuevos problemas ambientales.

Visto con amplias perspectivas, no es mucho lo que se ha hecho en la región para contrarrestar el problema. Se exponen varias razones: algunas técnicas convencionales son costosas y raras veces generan apoyo a los campesinos; falta de estrategia para la integración de medidas organizativas, agronómicas y de soporte que con bajo costo controlen el proceso de erosión; los campesinos están sólo "moderadamente" interesados en el problema y enfocan la problemática listando una serie de prioridades entre las cuales no aparece el problema de la erosión, por ejemplo, la necesidad de fertilizantes, regadíos, pesticidas, implementos, etc.; el propio mecanismo de la erosión del suelo es incomprendido en su magnitud. Un aguacero puede hacer desaparecer 1 *mm* de suelo, lo cual es casi imperceptible, no obstante representa la pérdida de 15 *t* de suelo.

Si valoramos la tesis que plantea que el primer paso en la solución de un problema es comprender el problema en sí, resulta importante conocer que la erosión es un proceso que consta de dos partes principales: la primera es el desprendimiento de las partículas por el impacto de la gota de lluvia, la cual disipa su energía cinética sobre el agregado provocando su dispersión y separándolo virtualmente del cuerpo de suelo. Es conocido que esta dispersión puede trasladar incluso de 2 a 3 *m* el agregado que destruye. Es entonces a través de la segunda parte del proceso que el escurrimiento superficial transporta ladera abajo el suelo y se consume la erosión.

En las condiciones tropicales la dispersión de los agregados juega un papel determinante debido al tamaño de la gota de lluvia y a su energía cinética dada por las altas intensidades de 2,5 *cm/h* [Hudson, 1981], con relación a otras áreas geográficas, por ejemplo, Europa Occidental 1 *cm/h* [Morgan, 1977]. Es por ello que es preciso reducir al mínimo la exposición del suelo a la erosión. Manteniéndolo cubierto de la mejor forma posible se estaría limitando el proceso en su primera etapa. El manejo de las coberturas es de vital importancia en la estrategia a seguir en Latinoamérica y se podría afirmar que constituye la medida primaria en la lucha contra la erosión, por su efectividad y bajo costo.

No obstante, la significativa valoración y los esfuerzos que en Cuba se realizan en función del cuidado de la tierra, el país no escapa de la problemática de la degradación de los suelos que aqueja a la región. Estudios desarrollados por el servicio de suelos del país (1996) citan un gran número de factores limitantes como consecuencia de procesos de degradación, entre los cuales se plantea que 4 000 000 *ha* padecen problemas de erosión, de los cuales aproximadamente 2 000 000 *ha* ya tienen afectación media y severa.

Las mayores afectaciones por erosión en Cuba se localizan en la región más occidental, en Pinar del Río, sobre suelos ferralíticos-cuarcíticos (ultisoles); en la región central, áreas premontañosas del Escambray con suelos pardos grisáceos (inceptisoles); y en las regiones premontañosas de Oriente, sobre suelos pardos con carbonatos y sin carbonatos, según mapa de erosión actual de los suelos de Cuba [Riverol et al, 1989]. Ello concuerda con estudios referidos a la susceptibilidad de los suelos cubanos al proceso de erosión.

El Instituto de Suelos de Cuba, después de una primera etapa de trabajo en el diagnóstico de la erosión, apoyado en su red de estaciones, ha desarrollado estudios en estas regiones para cuantificar las pérdidas de suelo por erosión bajo diferente uso agrícola y determinar la efectividad de las medidas y de los sistemas integrales de medidas elaborados sobre la base de la experimentación en parcelas de escurrimiento, segmentos de microcuencas y áreas de producción.

En relación al manejo de la cobertura vegetal, los trabajos estuvieron encaminados a la selección de las especies más promisorias para ser intercaladas como cultivos intercosechas, en función de brindar protección en los períodos más peligrosos de erosión y a la vez mejorar la fertilidad del suelo con incorporación de la masa verde en el marco de las rotaciones de cultivos planteadas.

La sustitución del maíz como cultivo de rotación en áreas tabacaleras o de la vegetación espontánea por un abono verde, contribuye considerablemente a la reducción del escurrimiento superficial y las pérdidas de suelo (cuadro 1).

Cuadro 1. Evaluación de la erosión de los cultivos intercosecha y abonos verdes en suelos erralíticos - C. A. R. L. (ultisoles).

Cultivo	Pérdidas de suelos(t/ha)	Lluvia escurrida(%)	Período para lograr la cobertura total (días)
Suelo desnudo	41,8	59,5	-
Maíz	11,5	38,2	51
Soya	4,2	32,9	70
Sesvania	13,7	39,8	35-38
Caupi negro	2,9	7,4	30-32
Millo	1,8		

Fuente: Estación Experimental de Pinar del Río. Estudio en parcelas de escurrimiento.

En particular el millo (*Sorghum vulgare*) y el frijol carita (*Vigna sp.*) tienen un buen desempeño, limitando las pérdidas de suelo a valores inferiores a las 3 t/ha. Las altas pérdidas que se producen con el cultivo del maíz han revitalizado la estrategia de su siembra como cultivo asociado con leguminosas. En los suelos pardos grisáceos (cuadro 2) el abono verde también reduce los niveles del escurrimiento superficial y las pérdidas de nutrimentos. Destaca que con el millo o dolichos se evita el arrastre de más de 100 kg/ha de material orgánico en un período de 3 a 4 meses.

Cuadro 2. Escurrimiento superficial y pérdida de materia orgánica N y P durante el ciclo vegetativo de varios abonos verdes.

Abono verde	Escurrimiento	Pérdidas (kg/ha)
--------------------	----------------------	-------------------------

	superficial (mm)	M.O	N. Total	P. Total
Millo forrajero	165,1	92,71	6,05	0,61
Millo grano	177,15	116,85	8,00	0,81
Dolichos Lablat	189,86	170,17	18,72	1,97
Veg. espontánea	257,25	297,85	16,70	3,00

Fuente: Estación Experimental Escambray. Estudio en parcelas de escurrimiento en suelos pardos grisáceos (inceptisol).

Los abonos verdes al ser incorporados al suelo ponen determinada cantidad de nutrimentos en forma asimilable a disposición de los cultivos de importancia económica. Estos aportes están no solo en dependencia de la especie utilizada, sino también del tipo de suelo en que se desarrolla (cuadro 3 y 4). En sentido general, las gramíneas utilizadas como abonos verdes logran acumular un mayor peso de masa verde y en correspondencia una mayor cantidad de nutrimentos.

Cuadro 3. Masa foliar y contenido de nutrimentos de varios abonos verdes y algunas de sus combinaciones en suelos pardos grisáceos (inceptisol).

Variantes	Masa verde t/ha	Contenido de nutrimentos (kg/ha)		
		N	P	K
Veg. espontánea	22,1 ^b	55,6 ^b	7,4 ^d	83,4 ^b
Maíz + Dolichos	19,6 ^b	50,7 ^b	9,6 ^c	69,9 ^b
Millo + Dolichos	44,5 ^a	88,2 ^a	22,0 ^{ab}	167,7 ^a
Millo + Soya	45,2 ^a	84,3 ^a	23,6 ^{ab}	147,7 ^a
Millo forrajero	43,5 ^a	84,5 ^a	24,1 ^{ab}	155,8 ^a
Millo grano	46,4 ^a	88,5 ^a	25,7 ^a	156,0 ^a

Fuente: Estación Experimental Escambray. Experimento de campo.

Cuadro 4. Rendimiento y contenido de nutrimentos de abonos verdes sobre suelos ferralíticos rojos de La Habana (Ferralsols).

Cultivos	Rendimiento (t/ha)	N (kg/ha)	Contenido de nutrientes (kg/ha)
----------	--------------------	-----------	---------------------------------

			P	K	Ca	Mg
Caupí negro	55	260	45	244	145	35
Millo forrajero	80	197	51	450	118	29
Maíz (resto cosecha)	44	86	28	234	67	11
Pennisetum Cuba–Cueto	90	316	107	778	178	42
Barbecho	39	95	12	102	46	10
Millo+Caupí	48	245	72	372	145	32
Millo+F. Terciopelo	37	242	73	385	150	34
Millo+Canavalia	36	260	78	390	162	36
Millo+Crotolaria	43	249	72	398	172	37
Maíz+F. Terciopelo	54	180	39	245	110	24

Fuente: Instituto de Suelos. Estación Experimental La Renee.

El millo alcanza entre 40 y 50 *t/ha*, aunque en suelos de alta fertilidad pueden superar este rendimiento, como es el caso de los suelos ferralíticos-rojos (80 *t/ha*) en tanto la generalidad de las leguminosas alcanzan rendimientos entre 20 y 30 *t/ha*. Los aportes de nutrimentos pueden incluso ser superiores a dosis completas del fertilizante recomendado a los cultivos, razón por la que se hace posible la reducción de las dosis recomendadas. Hernández y otros (1996) lograron resultados similares en el rendimiento de tomate al incorporar indistintamente millo o canavalia como abono verde, aplicando sólo 75 % de la dosis de fertilizante recomendada.

El abono verde, con independencia de la especie que se utilice, constituye una práctica altamente positiva en la lucha contra la erosión hídrica y el mejoramiento de los suelos erosionados. No obstante, los resultados obtenidos en la cuantificación de la erosión demuestran que en la generalidad de los casos es una medida que utilizada de forma aislada es insuficiente en las aspiraciones de reducir las pérdidas hasta límites permisibles, por lo que es esencial incorporarla a un sistema de medidas agrotécnicas y en casos necesarios, hidrotécnicas o estructurales. Para el estudio de factibilidad de un sistema de medidas antierosivas que contemplen métodos de preparación de suelos, medidas culturales o agronómicas y estructurales, resulta imprescindible la selección de áreas experimentales de mayor extensión. El segmento de microcuencas posibilita la ejecución de la investigación en un área naturalmente delimitada y campificada, que equipada con instrumentos de aforo, nos permiten evaluar la influencia del método de preparación, de las

prácticas agronómicas y estructurales, del uso agrícola y, además, del régimen pluviométrico, el tipo de suelo y el factor topográfico. Estos aspectos posibilitan una mayor precisión en relación con los datos que se obtienen en parcelas de escurrimiento.

La experimentación en segmentos de microcuencas nos ubica en una posición ventajosa para la extensión de los resultados en el ámbito de las microcuencas, determinada como la unidad más lógica y racional para la planificación del aprovechamiento de los recursos naturales. CORTALC (1996) señala que la introducción de cambios ha sido lenta, difícil y a veces imposible cuando los planes de manejo se realizan en el ámbito de la cuenca, usualmente basados en orientaciones impuestas desde arriba. Ello revela un cambio obvio de mentalidad pasando del concepto de la tierra y la gente que se está arruinando al de la gente y la tierra que utiliza de forma eficaz y sostenible..

Estudios desarrollados en segmentos de microcuencas con diferentes condiciones topográficas en ultisoles de la región occidental del Cuba (cuadro 5) han propiciado valiosa información en períodos relativamente cortos: resulta impostergable la implementación de medidas sencillas para frenar el proceso de erosión, aun cuando las pendientes en este tipo de suelo no sean muy pronunciadas (< 5 %).

Cuadro 5. Influencia de diferentes sistemas antierosivos con inclusión de abonos verdes en suelos ferralíticos cuarcíticos amarillos lixiviados (ultisoles) sobre control de la erosión, el rendimiento y la calidad del tabaco. Precipitación de 1478,40 mm.

Subcuencas		Medidas	Uso de la tierra	Pérdida de suelos(kg/ha)	Esc (%)	Rend.Tab (kg/ha)	% Clase superior
No.	Pend(%)						
1	7	Labranza mínima, siembra en contornos, bordos de desagüe, canales empastados.	Tabaco – barbecho – frijol carita (a.v)	2198,35	21,50	1225	52,10
3	9	Labranza mínima, siembra en contornos.	Tabaco – barbecho – frijol carita (a.v)	4624,90	32,30	1050	31,00
4	8	Labranza mínima, siembra transversal a la mayor pendiente,	Tabaco – millo (a.v.) – frijol carita (a.v)	6032,90	30,50	1217	37,15

		fajas de millo.					
5	5.5	Labranza mínima, siembra transversal a la mayor pendiente, fajas de millo.	Tabaco – millo (a.v) – frijol carita (a.v)	2067,15	17,30	1255	38,45
9	4,2	Tradicional (laboreo convencional – surcado transversal a mayor pendiente).	Tabaco – barbecho	5781,96	28,18	700	26,6

Fuente: Instituto de Suelos. Informe de resultado.

La labranza mínima, el surcado en contorno, las fajas temporales de millo y el intercalamiento de plantas de coberturas y abonos verdes constituyen un sistema efectivo para reducir a límites permisibles las pérdidas por erosión en ultisoles dedicados al cultivo del tabaco con pendientes inferiores a 5 %. En estas condiciones de suelo y clima, cuando las pendientes son superiores a 5 %, se hace necesario implementar medidas de mayor complejidad que las fajas temporales de millo en el sistema antierosivo. Los bordos de desagüe y los canales empastados son una solución económica y factible para pendientes hasta 15 % en este territorio [Riverol et al, 1992]. Los sistemas antierosivos efectivos en el control de la erosión incrementan el rendimiento agrícola y la calidad de las cosechas.

Conclusiones

- El factor dinamizador de la erosión en las condiciones tropicales lo constituye el régimen pluviométrico debido a las altas intensidades, la ocurrencia en períodos concentrados y el papel de la gota de lluvia.
- El manejo de las coberturas, en particular las medidas tendientes a mantener e incrementar la cubierta en los períodos críticos, a través del empleo de abonos verdes y cultivos asociados constituyen un aspecto fundamental para el control de la erosión.
- A través de la incorporación de las plantas de cobertura se ponen a disposición de los cultivos principales elevadas cantidades de nutrimentos, comparadas a las dosis de fertilizantes recomendadas.
- El control de la erosión en condiciones tropicales requiere de la integración de medidas, atendiendo al nivel de complejidad de las condiciones topográficas y de cultivo.
- En las condiciones del trópico sólo será posible alcanzar rendimientos altos y estables cuando los propios usuarios de la tierra comprueben los beneficios directos derivados de la conservación del suelo.

Referencias

1. Conservación y rehabilitación de tierras en América Latina y el Caribe (CORTALC). Un Programa de acción Especial. Brasil: 1996. 28 p.
2. HERNÁNDEZ, C.; CANCIO, T.; OJEDA, L.; LEÓN, G.; ISAGUIRRE, J. Y CASTELLÓN, A. *Uso de diferentes abonos verdes como alternativas de sustituir fertilizantes en el cultivo del tomate*, en IV Jornada científica del Instituto de Suelos y II Taller nacional sobre desertificación. Resúmenes. 1996. p 112.
3. HUDSON, N.W. Soil conservation. Batsford: 1981. 320 p.
4. INSTITUTO DE SUELOS. La actividad de conservación y mejoramiento de suelos. Mimeografiado. Ministerio de la Agricultura, 1997. 7 p.
5. MORGAN, R. P. C. *Soil erosion in the United Kingdom: field studies in Silsoe area 1973-75*, en Nat. Coll. Agric. Egng. Silsoe Occasional Papel 4. 1997.
6. NATIONAL RESEARCH COUNCIL. Vetiver Grass: A Thin Green Line Against Erosión. 1993.
7. National Academy Press. Washington D.C. 171 p.
8. PLA SENTIS. I. Memorias de la segunda reunión bienal de la Red Latinoamericana de Labranza Conservacionista. 1994. 26 p.
9. RIVEROL, M.; CASTRO, N. Y SHEPASHENKO, G. *Mapa de erosión actual de los suelos de Cuba escala 1:2000000*, en Nuevo Atlas Nacional de Cuba. La Habana: Academia de Ciencias de Cuba, Instituto de Geodesia y Cartografía, 1989. IX 1-4.
10. RIVEROL, M.; CABRERA, E.; RONZONI, C. Y CASTRO, N. *Tecnología antierosiva en base a bordos de desagüe en suelos tabacaleros de Cuba*, en Memoria ampliada del XXV Congreso Nacional de las Ciencias del Suelo en México. 1992. pp. 396.

Software para el cálculo de la densidad de energía de la mancha creada por un arreglo de diodos.

Software for the Calculation of the Energy Density of the Stain Created by a Diode Arrangement.

*José Armando Espinosa Martínez y Arlene Mariana Pérez
Centro de Desarrollo de Equipos e Instrumentos Científicos (CEDEIC).
Luz 375 e/ Compostela y Picota, La Habana 10100, Cuba.
Fax: (537)- 338707. E-mail: cedeic@ceniai.inf.cu.
Roberto Pérez Rivera
Dirección Provincial de Salud de Ciudad de La Habana.*

Resumen

En este trabajo se describen las características de un software desarrollado con el fin de calcular la densidad de energía de una mancha creada por un arreglo de diodos láseres o LEDs. Se grafica, en dos o tres dimensiones, la mancha que se logra al irradiar una superficie, en dependencia de parámetros tales como el número y las características de los diodos y la ubicación de los mismos. Además, se listan los resultados del cálculo de la densidad de energía en la mancha creada.

Palabras clave: densidad de energía, arreglo de diodos

Abstract

In this paper we describe the characteristics of the software developed with the purpose of calculating the density of energy of a stain created by an arrangement of laser diodes or LEDs. The stain obtained is graphed in two or three dimensions, when irradiating a surface, depending on such parameters as the number and the characteristics of the diodes and their location. Also, the results of the calculation of the energy density are listed in the stain created.

Keywords: energy density, diode array

Introducción

El empleo de la radiación óptica con fines terapéuticos es reportado ya desde la época de la civilización egipcia, pero no es hasta mediados del siglo xx que investigaciones científicas tratan de buscar respuesta a las numerosas incógnitas que surgen en el campo de la interacción de la luz con el cuerpo humano. Ya a principios de los años ochenta aparecen equipos comerciales para su uso en diferentes ramas de la medicina, y con ello se acrecientan las investigaciones en este campo y aumentan las patologías a tratar, para cada una de las cuales se hace necesario optimizar los parámetros dosimétricos de la radiación.

Por otro lado el desarrollo optoelectrónico de nuestros días ha significado la obtención de láseres semiconductores con líneas de emisión en un amplio

intervalo de longitudes de onda y de diferentes potencias. El abaratamiento de estos dispositivos, sus reducidas dimensiones y largo tiempo de vida ha significado el incremento de su empleo como fuente de radiación en equipos de laserterapia y bioestimulación.

Durante más de 15 años el CEDEIC ha sido un centro a la vanguardia en el desarrollo de equipos para laserterapia, y en estos momentos trabaja con vistas a introducir los diodos láseres en el tratamiento de varias patologías. Es así como surge un proyecto para desarrollo de un equipo con un arreglo superficial de diodos láseres destinado al tratamiento de quemaduras y otras lesiones dermatológicas en las que el láser ha dado resultados muy satisfactorios [Herrero, 1988 y Trelles, 1985]; la característica más novedosa de este nuevo producto es el tratamiento de grandes zonas afectadas, con el consiguiente ahorro de tiempo e incomodidades a los pacientes.

Al trabajar en la concepción de este equipo, una de las primeras interrogantes presentadas estuvo relacionada con la cantidad de diodos a utilizar y la disposición óptima de los mismos para obtener una zona irradiada con densidad energética dentro de los límites recomendados en el tratamiento de quemaduras [Master et al, 1971 y Alasia y Magliacani]. Por esto se llevó a cabo la preparación de un software que permitiese simular la mancha creada por un número determinado de diodos láseres dispuestos a interés del usuario y a partir de aquí tener criterio sobre el área irradiada. Además, se incorporó la posibilidad de realizar este análisis para diodos electroluminiscentes.

El programa creado en Borland Delphi calcula todos los parámetros principales de una mancha creada por un número determinado de diodos láseres, LEDs o combinación de estos y dibuja la forma de la misma en dos dimensiones y su patrón de intensidades en tres dimensiones. Todo esto resulta de gran importancia si tenemos en cuenta que los parámetros dosimétricos varían según la patología y que por tanto todo equipo desarrollado con fines médicos debe tener en cuenta esta situación, por lo que el software está destinado principalmente a diseñadores de equipamiento para laserterapia y a los usuarios de esta técnica.

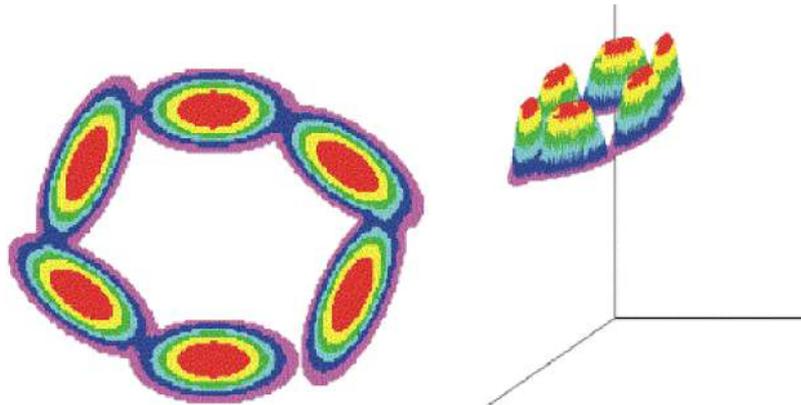
Características del software

En la vista inicial del programa aparece una ventana principal de presentación junto a las ventanas para seleccionar las opciones de trabajo, estas son: dibujo de la mancha de diodos en dos dimensiones, esquema de intensidades de la mancha en tres dimensiones y lista de resultados del cálculo de la densidad energética de la mancha creada; estas ventanas aparecen habilitadas en tres grupos, una para el caso de trabajo con diodos láseres, otra para diodos electroluminiscentes y la última para la combinación de estos.

El primer dato a tener en cuenta es la distancia a la que se quiere obtener la mancha partiendo de la posición de los diodos. Para el caso de diodos con emisión láser es necesario conocer la posición relativa entre ellos, es decir, el ángulo de rotación de cada uno, se consideran, además los datos dados por los fabricantes, tales como potencia máxima de emisión y ángulos de dispersión paralelo y perpendicular, que son introducidos como datos por el

usuario del software y quedan registrados en una base de datos, con la que el usuario puede interactuar.

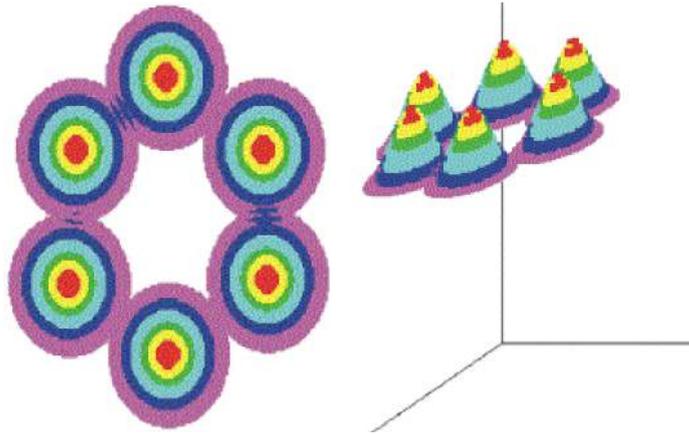
Para obtener la mancha en un plano se selecciona la posición de los diodos con la ayuda del mouse. La mancha que se obtiene finalmente es la superposición de las elipses o circunferencias producidas por cada diodo independientemente; todo esto en una escala de colores que va desde el rojo, para los niveles de mayor intensidad, hasta el violeta. La figura obtenida puede ser grabada, exportada o impresa, e igualmente se pueden abrir ficheros creados anteriormente para su lectura o modificación.



La opción en tres dimensiones grafica la intensidad del haz de cada diodo según el área de la mancha creada por este, con similar patrón de colores que en el caso bidimensional. En esta variante es posible hacer rotación de dos de los ejes de coordenadas, para así mostrar el perfil desde varias posiciones. El análisis de los resultados incluye la base de datos con la relación de los diodos que contribuyen a la mancha y la posición de los mismos, el área total de la mancha y su densidad energética.

Cálculo de la densidad de energía de la mancha

Para realizar el cálculo del área de la mancha y de la densidad de potencia se tiene en cuenta la distancia a la cual se ha ubicado el diodo del plano irradiado, pues la intensidad luminosa decae exponencialmente en la medida en que nos alejamos de la fuente. Este comportamiento es más marcado en el caso de los diodos electroluminiscentes. Como es sabido, el haz de un diodo de emisión láser tiene forma de un cono gaussiano, donde el área aumenta a medida que nos alejamos del diodo, hasta hacerse cero la intensidad de la luz emitida por este [Optics Guide 4, 1988].



Conociendo los ángulos de dispersión (perpendicular y paralelo) podemos calcular los semiejes de las elipses que forma dicho haz perpendicular al plano de irradiación. Dentro del área de esta elipse la distribución de la potencia de la luz emitida se comportará según la ley:

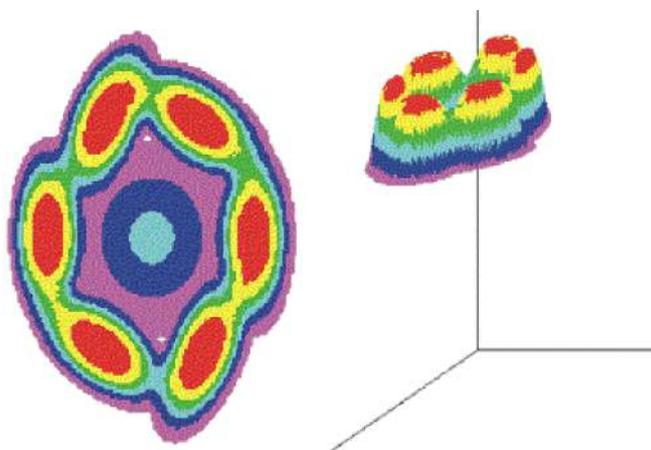
$$P = P_0 \exp(-2R^2 / \omega^2)$$

Donde: P es la potencia de la luz en el punto en cuestión, P_0 es la potencia máxima de emisión del diodo, R es la distancia al centro de la elipse, y ω es la raíz del producto de los semiejes de dicha elipse.

Esta ecuación es obtenida por analogía a la ecuación de propagación de un haz gaussiano para un láser de He-Ne.

Para el caso de los LEDs el argumento de la ecuación anterior es lineal, y existe un solo ángulo de dispersión.

La potencia de la mancha es calculada, por superposición, como la sumatoria de la potencia para cada punto. Al dividir por el área total de la superficie irradiada se obtiene la densidad de potencia total de la mancha.



Algunos resultados obtenidos con el programa

A continuación presentamos algunos resultados demostrativos de las posibilidades del programa. Se muestra la lista de resultados (incluye la lista de diodos que contribuyen a la mancha y su posición) y la lista de la contribución de cada diodo a la densidad energética de la mancha, y los gráficos de la mancha en dos y tres dimensiones.

Arreglo de seis diodos láseres formando un hexágono.

Diode	ANG 1	ANG 2	ANG 3	Dist (mm)	Power (mW)
1	8,0	30,0	0,0	8,0	2,0
2	8,0	30,0	0,0	8,0	2,0
3	8,0	30,0	30,0	8,0	2,0
4	8,0	30,0	30,0	8,0	2,0
5	8,0	30,0	120,0	8,0	2,0
6	8,0	30,0	120,0	8,0	2,0

Diode	X (mm)	Y (mm)	DP (mW/cm ²)	Área (cm ²)	I _o (mW)
1	82,0	64,0	39,43	7,62	2,0
2	82,0	106,0	39,43	15,24	2,0
3	55,0	95,0	39,92	22,58	2,0
4	108,0	74,0	55,43	29,82	2,0
5	110,0	95,0	52,85	36,96	2,0
6	56,0	73,0	51,13	44,09	2,0

Arreglo de seis LEDs formando un hexágono.

Diode	ANG1	ANG2	DIST (mm)	Power (mW)
1	28,0	0,0	7,0	2,0
2	28,0	0,0	7,0	2,0
3	28,0	0,0	7,0	2,0
4	28,0	0,0	7,0	2,0
5	28,0	0,0	7,0	2,0
6	28,0	0,0	7,0	2,0

Diode	X (mm)	Y (mm)	DP (mW/cm ²)	Área (cm ²)	I _o (mW)
1	85,0	61,0	12,54	16,04	2,0
2	86,0	122,0	12,54	32,08	2,0
3	112,0	106,0	12,57	47,99	2,0
4	110,0	77,0	12,75	63,10	2,0
5	60,0	106,0	12,75	78,90	2,0
6	62,0	77,0	12,86	93,86	2,0

Arreglo de un LED y seis diodos láseres formando un hexágono.

Diode	Laser/LED	ANG 1	ANG 2	ANG 3	Dist (mm)	Power (mW)
1	LED	28,0	28,0	0,0	7,0	2,0
2	Láser	12,0	28,0	0,0	7,0	2,0
3	Láser	12,0	28,0	0,0	7,0	2,0
4	Láser	12,0	28,0	0,0	7,0	2,0
5	Láser	12,0	28,0	0,0	7,0	2,0
6	Láser	12,0	28,0	0,0	7,0	2,0
7	Láser	12,0	28,0	0,0	7,0	2,0

Diode	X (mm)	Y (mm)	DP (mW/cm ²)	Área (cm ²)	I _o (mW)
1	86,0	90,0	12,49	18,16	2,0
2	108,0	90,0	22,04	25,99	2,0
3	65,0	89,0	27,03	34,00	2,0
4	77,0	69,0	31,08	40,68	2,0
5	97,0	110,0	34,11	47,19	2,0
6	96,0	70,0	37,04	52,80	2,0
7	76,0	108,0	39,27	58,60	2,0

Posibilidades de explotación del programa

- Con este software los diseñadores de estos equipos de nuestro centro podrán satisfacer mejor las demandas de los usuarios ya que antes de crear el equipo podrán brindar una imagen en pantalla o impresa de las características del haz que emitirán los equipos a construir, pudiendo ajustarse a geometrías específicas.

- Los usuarios, en especial los médicos que se dedican a la investigación, contarán con una herramienta para el cálculo de las dosis de radiación, y podrán saber su distribución por unidad de área en dependencia de la fuente de luz empleada.

Referencias

1. HERRERO, C. *El láser y su aplicación en los diferentes tratamientos de medicina estética*, en CDL. No15-16, 1988.
2. TRELLES, M. A. Observación experimental de los efectos de la radiación láser de baja intensidad en las quemaduras y su aplicación clínica. Congreso Láser. España: 1985.
3. ALASIA, S. T. Y MAGLIACANI, G. La terapia laser nel trattamento della ustioni.
4. MASTER, E.; SPIRY, T.; SZENDE, B. Y TOTA, J. G. *Effect of laser rays on wound healing*, in The American Journal of Surgery. Vol. 122, No. 10, 532-5, 1971.
5. Optics Guide 4. Melles Griot, 1988.

Tiempo de observación para la prospección eólica de un punto de interés

Observation Time for the Eolic Prospection of an Interest Point

*Lic. Guillermo Saura González, Lic. Ricardo Osés Rodríguez,
Ing. Rogelio Díaz de Villegas, Ing. Julio C. García Márquez
y Tec. Roberto Oropesa Rodríguez
Filial Provincial de CUBASOLAR en Villa Clara. Departamento
de Energía Renovable.
Delegación Provincial CITMA en Villa Clara.
Candelaria No. 6. Entre Cuba y Colón. Santa Clara. CP: 50100*

Resumen

en un punto de interés, se procesaron cinco años de observaciones correspondientes a la estación agrometeorológica del INIVIT, se transformaron los datos del formato de observaciones trihorarias al de tiempo de permanencia en un intervalo de velocidad dado y se determinaron las ecuaciones de regresión que relacionan sus variables con las correspondientes a las demás estaciones meteorológicas de la provincia Villa Clara. Basados en el valor de los parámetros característicos y en un criterio reconocido se evaluaron los resultados que ofrece cada ecuación para diferentes períodos de tiempo. Se muestra la pérdida de calidad de las ecuaciones al disminuir el tiempo de observación, y se exponen sugerencias del período durante el cual se deben efectuar las mediciones del potencial eólico, de acuerdo con la potencia de la máquina eólica que se desea instalar.

Palabras clave: prospección eólica, potencial eólico

In the determination of the optimal time of observation for wind prospection in a site of interest, we processed five years of observations obtained at the meteorological station of the Instituto de Investigaciones de Viandas Tropicales (INIVIT, in Spanish). The tri-hour format of the data of observations were transformed to the period of permanence in a given interval of velocity and the regression equations were determined relating its variables with the equivalent ones in other meteorological stations of the Villa Clara province. Based on the value of the characteristic parameters and in a known criterion the results of each equation for different periods of time were evaluated. It is shown the loss of quality in the equations when the time of observation decreases and we present some recommendations of the period during which the measurements of the wind potential should be carried out, according to the power installed capacity of the wind turbine.

Keywords: wind prospection, wind potential

Introducción

No hay dudas de que los molinos de viento han tenido, tiempo atrás, un gran éxito. Han proporcionado al hombre la energía mecánica que faltaba en aquella época para la realización de sus proyectos. Pero con la invención de la máquina de vapor, el motor diesel y el desarrollo de la electricidad, su explotación se descuidó y en muchas ocasiones fue abandonada.

Por tanto y debido a la presencia en el mercado de los nuevos medios de producción de energía, los aerogeneradores no llegaron a imponerse. La utilización del viento parecía pues que cada vez se abandonaba más y que su porvenir era muy dudoso.

Sin embargo, la historia a veces reserva sorpresas. Con la disminución del stock mundial de hidrocarburos, la demanda energética que crece sin cesar y el temor a la polución que nos invade cada vez más, la energía eólica vuelve al primer plano de actualidad. Su explotación puede convertirse en algo muy rentable para regiones con viento.

Como las demás fuentes de energía, cuando se pretende usar en gran escala la energía eólica, es necesario estudiarla para poder prospectarla y caracterizarla; así en el mundo se realizan prospecciones tanto globales como locales, con mayor o menor rigor, en dependencia del equipamiento y la metodología empleados.

En Cuba, debido a la escasez de fuentes energéticas tradicionales, se hace necesario el estudio y utilización de recursos alternativos de energía. Para resolver esta problemática existen varias opciones, siendo la eólica una de las más prometedoras, ya que es renovable, ecológicamente limpia, no depende de precios de mercado, es gratis y tanto su estudio como los equipos para aprovecharla son simples y baratos, al compararla con las demás.

El viento, en mayor o menor intensidad, está repartido en toda el área de nuestro país y muchas de sus formas de aprovechamiento son bien conocidas y altamente eficaces. Para lanzarnos a un uso intensivo y a gran escala del viento se hace necesario caracterizarlo energéticamente. Es por eso que el presente trabajo tiene como objetivo dar sugerencias acerca del tiempo durante el cual se deben efectuar mediciones de la velocidad y dirección del viento en un punto de interés, con vistas a ofrecer su caracterización energética.

El potencial eólico de nuestro país aún no ha sido estudiado, sólo existen referencias de algunos puntos aislados [Saura et al, 1994; Saura et al, 1996; Soltura et al, 1990 y Boitel, 1972]; por tanto, como parte de la estrategia de prospección del viento para nuestra provincia, se han venido realizando algunos trabajos [Saura et al, 1994; Saura et al, 1996 y Soltura et al, 1990] y este estudio, como ya se ha mencionado, dará un paso más en el conocimiento práctico y metodológico de las caracterizaciones energéticas de puntos de interés, al ofrecer sugerencias acerca del tiempo de observación a seguir en tales lugares.

Es poco práctico y además innecesario medir durante largos períodos de tiempo en cada lugar donde se desea instalar una máquina eólica, pues esto encarecería la inversión y demoraría demasiado la solución del problema.

Medir un largo período de tiempo significa el uso prolongado de personal e instrumentos, y como generalmente los lugares donde se desea medir están alejados de las ciudades, esto hace aumentar los gastos y el descontento de los encargados de realizar las mediciones. Además los instrumentos más baratos son también los menos precisos y requieren de una persona para realizar las anotaciones, en tanto los instrumentos que no requieren personal y son capaces de medir y registrar los datos automáticamente son muy costosos. También se presenta la situación de que realizar las observaciones durante un largo período de tiempo si se ha encontrado otra solución energética al problema se pierda el interés o se atrasan las tecnologías que se pensaban emplear.

Los argumentos anteriores nos obligan a pensar en cómo reducir el tiempo de observación en un punto de interés, sin perder el rigor en el conocimiento tanto cualitativo como cuantitativo del viento. ¿Cómo podemos medir la velocidad del viento en un corto período de tiempo y predecir sus valores para el resto del año?

La respuesta la encontraremos en la estadística matemática al hacer ecuaciones de regresión, que nos dan la relación funcional entre la velocidad del viento en el lugar de interés y la velocidad del viento en otros lugares ya estudiados anteriormente. Cómo se hace y bajo qué condiciones, se verá más adelante.

Materiales y métodos

Se procesaron datos del viento correspondientes a 5 años de observaciones para la estación meteorológica del INIVIT, municipio de Santo Domingo, provincia de Villa Clara.

Se consideran las velocidades a partir de 3 *m/s*, umbral de arranque práctico de las máquinas eólicas.

Como la metodología de estudio está basada en la toma de 6 intervalos de velocidades: 3,4; 4,5; 5,6; 6,7; 7,8 y 8,9 *m/s* [Saura et al, 1994 y Saura et al, 1996] para los cuales se debe conocer el tiempo en que el viento ha soplado entre sus límites cada día, fue necesario cambiar el formato meteorológico del registro de la velocidad media, en observaciones trihorarias, por el del tiempo en el intervalo de velocidad.

Debido a la complejidad de cualquier estudio de viento y a la gran cantidad de variables que entran en su caracterización energética, y como el presente trabajo sólo constituye un paso en la solución del problema planteado, se tomaron la velocidad media (V_{med}) y la velocidad más frecuente (V_f) de las cuatro estaciones meteorológicas de la provincia como los datos para las ecuaciones de regresión [Ostel, 1980 y Murray, 1966] y se tomó en todas las variantes posibles la V_m del INIVIT como la variable dependiente de la ecuación.

Debido a que la finalidad de nuestro estudio es determinar el tamaño adecuado de la muestra de observaciones en el punto de interés, en la ecuación de regresión que nos proporciona la relación funcional de la Vm del INIVIT con las demás, no se pueden incluir otras variables del INIVIT en la ecuación.

Las Vm y Vf de las estaciones de Sagua la Grande, Yabú y Caibarién con el formato del tiempo en el intervalo de velocidad fueron tomadas de una base de datos existentes [Saura et al, 1994 y Saura et al, 1996] que incluye los años estudiados (1986-90).

Se conformaron las ecuaciones de regresión con Vm del INIVIT como variable dependiente y las variables de Yabú, Sagua y Caibarién en todas las combinaciones posibles.

Se buscaron las ecuaciones para dependencias cuadráticas, cúbicas, productos cruzados e incluso variables provinciales.

El método de regresión empleado fue el Full Model, pues éste usa toda la información disponible [Ostel, 1980 y Murray, 1966].

El criterio de selección para la ecuación de regresión fue que tuviera buena estabilidad y buenos parámetros.

El análisis de varianza se realizó según las fórmulas que aparecen en la siguiente tabla [Ostel, 1980 y Murray, 1966]:

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Razón F
Regresión	$SCR = \beta'X'Y$	p	$CMR = SCR / p$	$F = CMR / CME$
Error	$SCE = Y'Y - \beta'X'Y$	n-p	$CME = SCE / n-p$	
Total	$SC_{tot} = Y'Y$	n		

Para comprobar los resultados se realizó una predicción de los valores de la Vm para diferentes períodos y se analizaron los errores.

Para Vm y Vf se emplearon las fórmulas propuestas en la literatura [Soltura et al, 1990 y Boitel, 1972], con la particularidad de que la ponderación se realiza sobre el tiempo que el viento se mantiene en el intervalo de velocidades dado [Saura et al, 1994 y Saura et al, 1996].

Sobre la base de los valores reportados por la literatura nacional e internacional y la experiencia de algunos investigadores [OLADE, 1983 Y PORK, 1981], se adopta un criterio de clasificación de las ecuaciones de regresión como sigue:

- Si la diferencia media entre la velocidad observada y la predicha es menor a 1 m/s es buena.
- Si la diferencia media entre la velocidad observada y la predicha está entre 1 y 2 m/s es regular.
- Si la diferencia media entre la velocidad observada y la predicha es mayor a 2 m/s es mala.

Resultados y discusión

Se obtuvieron las ecuaciones de regresión con Vm del INIVIT como variable dependiente y todas las combinaciones posibles con las otras variables de las estaciones de Sagüa, Yabú y Caibarién como explicativas, sobre la base de modelos lineales, cuadráticos, cúbicos y de variables provinciales. Las combinaciones posibles para las ecuaciones de regresión en el caso del modelo lineal se exponen en la tabla 1. Este resultó el modelo más adecuado, y dentro del conjunto de posibles ecuaciones de regresión la combinación número 7 es la que mejor se ajusta, debido a que es la que más información aporta con respecto a la varianza de la variable dependiente.

Tabla 1. Combinaciones para las ecuaciones de regresión (en el modelo lineal).

No.	Var. dependiente	Var. explicativas					
1	Vml	Vmy	Vfy				
2	Vml	Vms	Vfs				
3	Vml	Vmc	Vfc				
4	Vml	Vmy	Vfy	Vms	Vfs		
5	Vml	Vmy	Vfy	Vmc	Vfc		
6	Vml	Vms	Vfs	Vmc	Vfc		
7	Vml	Vmy	Vfy	Vms	Vfs	Vmc	Vfc

Vm: Velocidad media. Vf: Velocidad más frecuente. C: Caibarién. Y: Yabú. S: Sagua la Grande. I: INIVIT.

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos con la combinación seleccionada para diferentes períodos de observación en la Estación Meteorológica del INIVIT. Se incluyen el error estándar de estimación, la desviación estándar media de las variables muestrales y el R múltiple como una medida para la selección de las variables, el cuadrado medio de los residuos y la diferencia entre los valores observados y los predichos como una medida para la bondad de la ecuación de regresión [Soltura et al, 1990 y Boitel, 1972], y se expone además un criterio de bueno, regular o malo para la clasificación de la misma.

Tabla 2. Características fundamentales de la ecuación de regresión del INIVIT con las demás estaciones, para diferentes períodos de observación.

No.	Tiempo de observación		Error estándar de estimación	Error estándar medio de la variable	R múltiple $\mu=0.05$	Cuadrado medio de los residuos	Diferencia media. Vobs.Vpre	Evaluación de los resultados
1	1 año		0,8112	1,5091	0,6091	0,6580	0.09 0.4	B
2	6 m	E- Jn	0,9011	1,5847	0,5488	0,8120	0.09 0.44	R
2	6 m	Jl-D	0,8866	1,2843	0,5601	0,8511	0.09 0.41	B
2	6 m	MS	0,8938	1,4345	0,5544	0,8315		
3	3 m	E, F, M	0,9332	1,6066	0,4950	0,8709	0.1 0.52	R
3	3 m	A, M, J	0,9201	1,4923	0,5013	0,8633	0.1 0.48	R
3	3 m	J, A, S	0,9022	1,2961	0,5225	0,8402	0.1 0.4	B

3	3 m	O, N, D	0,9164	1,5214	0,5103	0,8426	0.09 0.41	B
3	3 m	M, J	0,9171	1,4791	0,5072	0,8542		
4	1 m	E	0,9590	1,6356	0,4668	0,9196	0.11 0.48	R
4	1 m	F	0,9977	1,5043	0,5761	0,9421	0.12 0.49	R
4	1 m	M	0,0152	1,2115	0,5538	0,8645	0.1 0.48	R
4	1 m	A	1,0830	1,3763	0,5022	1,0671	0.12 0.48	R
4	1 m	M	0,8388	1,6805	0,5784	0,7081	0.1 0.45	R
4	1 m	J	0,9106	1,2148	0,4477	0,8572	0.1 0.47	R
4	1 m	J	0,7497	09986	0,4965	0,8022	0.09 0.4	B
4	1 m	A	0,7661	1,0943	0,4277	0,8205	0.09 0.41	B
4	1 m	S	0,8931	1,1350	0,4757	0,9289	0.1 0.47	R
4	1 m	O	0,9557	1,1085	0,4895	0,8322	0.11 0.51	R
4	1 m	N	0,8413	1,2481	0,4735	0,8930	0.09 0.41	B
4	1 m	D	0,8275	1,6818	0,4706	0,8783	0.09 0.41	B
4	1 m	M, M	0,8948	1,3241	0,4965	0,8761		

μ : Nivel de significación. E: Enero. F: Febrero. D: Diciembre. MS: Media semestral. MT: Media trimestral. MM: Media mensual.

Se puede observar cómo al disminuir el período de observaciones el error estándar de estimación (E.S.E.) aumenta, hecho que era de esperar, pues disminuye el número de observaciones, es decir, el tamaño de la muestra, también es significativo señalar cómo el error estándar de estimación es inferior al valor medio de desviación estándar de las variables, lo que nos dice que la selección de variables es buena y que se suavizan los errores muestrales. No obstante, en la tabla se reportan todos los valores del E.S.E., la desviación estándar media de las variables y el R múltiple, para que cada persona siga el criterio que desee y con el rigor que estime sea necesario.

El R múltiple va desde 0,6091 para un período de observación de un año, hasta 0,4966 para el R múltiple mensual medio. Aunque su variación es pequeña, se puede apreciar la tendencia a disminuir, cuando se hace menor el período de observación. Esto nos dice que las ecuaciones de regresión cada vez son más inadecuadas y no reflejan la verdadera relación funcional entre las variables.

También se reporta el cuadrado medio de los residuos (C.M.E.) que al analizarlo nos percatamos de que aumenta al disminuir el período de observaciones. Esto se debe a que esta magnitud depende inversamente del tamaño de la muestra. Aquí se refleja cómo al disminuir el tamaño muestral se hace más evidente e importante la dispersión de los datos y cada dato se hace altamente significativo. Resalta, además, la similitud entre el E.S.E. y el C.M.E., esto es debido a que el C.M.E. es un estimador del primero cuando el modelo elegido es el adecuado. Así consideramos que la elección de un modelo lineal es adecuada.

Un reflejo de los buenos resultados obtenidos se tiene al comparar el valor del cuadrado medio de los residuos con el obtenido por otros investigadores, que reportan 0,76; 0,68 y 0,70, respectivamente, para grandes períodos de observación en el primer caso y un año en los otros dos. En nuestro caso el

cuadrado medio de los residuos va desde 0,65 para un año hasta 0,85 para el C.M.E. medio mensual.

La diferencia media entre la velocidad observada (Vobs) y la predicha (Vpre), aumenta al disminuir el período de observaciones, esto también se debe a la disminución del tamaño muestral que provoca que se hagan notar más los efectos de la dispersión de los datos, la variabilidad real de la magnitud.

Se obtuvo que la ecuación para un año de observaciones es buena, para períodos de 6 meses resultó que una es buena (de julio a diciembre) y la otra es regular, lo que significa 50 % de ecuaciones buenas; para períodos de 3 meses, 2 ecuaciones fueron buenas y 2 regulares para 50 % de ecuaciones buenas, y para los períodos de observación de un mes se tiene que 8 meses fueron regulares y 4 buenos para 33,3 % de ecuaciones buenas.

Las Vpre van a tener una diferencia con las Vobs, que en todos los casos a pesar de que las ecuaciones sean catalogadas de regular, no sobrepasan en ningún caso 30 %. Otros autores [Soltura et al, 1990 y Boitel, 1972] tienen variaciones superiores a 50 %.

Basados en las observaciones anteriores, en un análisis de la estabilidad de estos resultados para todo el período de tiempo estudiado y en criterios económicos, es que sugerimos se use el período de observación de un mes para emplazar máquinas eólicas para bombeo de agua y generación de electricidad con potencia inferior a 1 kW (éstas son producidas comercialmente de forma estándar y barata), 3 meses para máquinas de mediana potencia (sobre producciones estándar, pero son más costosas), hasta un año para las máquinas grandes y parques eólicos (son aún más costosas y se diseñan al efecto).

La tabla 3 muestra las ecuaciones de regresión del INIVIT con las demás estaciones meteorológicas para diferentes períodos de observación. Así cada interesado puede encontrar los coeficientes de las variables y la constante de la ecuación de regresión que haya seleccionado acorde con el tiempo de observaciones que desee realizar si se encuentra estudiando el viento en el INIVIT.

Tabla 3. Ecuaciones de regresión del INIVIT con las demás estaciones para diferentes períodos de observación.

Período de observación		Coeficientes de regresión						Constante
		Vfs	Vms	Vfy	Vmy	Vfc	Vmc	
1 año		.0028	.0366	.045	.0510	.0293	.2143	3,084
6 meses	E-Jn	-.0362	-.0171	.0583	.0522	.0379	.2199	2,8513
6 meses	Jl-D	.053	-.0721	.0325	.0349	-.0086	.2069	3,2901
3 meses	E, F, M	.0199	.0979	.0304	.1849	.1190	.0791	3,1892
3 meses	A, M, J	-.016	.358	.0355	.0390	.0509	.159	1,858
3 meses	J, A, S	.026	.011	-.035	.344	.088	-.026	2,033
3 meses	O, N, D	-.022	.035	-.008	.421	.016	.0402	2,143
1 mes	E	-.0398	.0176	.3947	-1.987	.0611	-.0611	3,6525

1 mes	F	-.0154	.0139	-.3639	1.027	-.2600	.5081	0,6714
1 mes	M	.3755	-.915	-.0150	.0576	-.0745	.2945	6,8851
1 mes	A	-.1617	.0355	.0390	.3641	.1854	.0110	2,9298
1 mes	M	-.4575	.8001	.0113	.0103	-.0359	.4835	-0,2570
1 mes	J	-.2757	-.0287	.0478	-.1073	.3094	-.3991	3,8333
1 mes	J	.0250	.0329	-.2590	.3065	-.3026	.6028	1,9176
1 mes	A	-.1037	.0970	.1748	-.1261	-.1753	.2758	3,3232
1 mes	S	-.2287	.5931	-.1942	-.0277	.0018	.2169	1,9861
1 mes	O	.0863	-.2348	.0212	.0910	.0023	.4309	2,9575
1 mes	N	-.2186	.2398	.0079	.3931	.1931	.0124	1,9542
1 mes	D	.0881	.1375	.4728	-.5338	.0321	-.0809	3,5370

E: Enero. F: Febrero. D: Diciembre. Vm: Velocidad media. Vf: Velocidad más frecuente. C: Caibarién. Y: Yabú. S: Sagua la Grande. I: INIVIT.

Es interesante señalar cómo la estación de Caibarién es la que más influye en la ecuación de regresión para los períodos de observación más largos (de un año y de seis meses), mientras para los meses y trimestres se alterna con el resto de las estaciones.

Conclusiones

Se reportan las ecuaciones de regresión y parámetros que las caracterizan, lo que permite elegir el período de observaciones adecuado en cada caso.

Se sugieren los períodos de tiempo de observación siguientes:

- Un mes para el emplazamiento de bombas y aerogeneradores con potencia menor a 1 kW.
- Tres meses para máquinas medianas.
- Un año para máquinas grandes y parques eólicos.

Bibliografía

1. GARCÍA GALLARDO, M. La energía eólica. Madrid: España-Galpe, S.A., 1987. 150 pp.
2. GOURRIERES, D. Energía eólica: teoría, concepción y cálculo práctico de instalaciones. Barcelona: Masson, S.A., 1983. 285 pp.
3. GUY, C. Aeromotores y aerogeneradores. Barcelona: Ediciones Marzo 80. 180 pp.
4. KOVARIK, T. Wind Energy. Chicago: Donens Book, 1979. 250 pp.
5. SAURA GONZÁLEZ, G. ET AL. Estudio del viento en un punto de interés. Fondo Manuscrito del IDICT, 1994. 12 pp.
6. SAURA GONZÁLEZ, G. ET AL. *Caracterización energética de los vientos en estaciones meteorológicas de Villa Clara*, en Construcción de maquinaria. No. 1, 1996. 12 pp.
7. SOLTURA, R. ET AL. Evaluación del potencial eólico en Cuba. (Inédito). 1990. 12 pp.
8. BOITEL, F. Geografía eólica de Oriente. La Habana: Ed. Ciencia y Técnica, 1972. 249 pp.

9. OSTEL, B. Estadística aplicada. La Habana: Ed. Ciencia y Técnica, 1980. 632 pp.
10. MURRAY, S. Theory and problems of statistics. La Habana: Ediciones Revolucionaria, 1966. 359 pp.
11. OLADE. Aerogeneración de energía. Quito: 1983. 300 pp.
12. PORK, J. The wind power book. California: Palo Alto, 1981. 150 pp.

**Uso eficiente de las fuentes renovables de energía.
Mejoramiento económico mediante la sincronización a la red**

**Efficient Use of Renewable Energy Sources. Economic Improvement by
Means of Grid Synchronization**

*Dr. Marcos A. de Armas Tierra
Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente
Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba.
Ing. Ernesto Martínez Vilches
Delegación Provincial del Ministerio del Azúcar (MINAZ).*

Resumen

Muchas industrias alimentadas con biomasa operan aisladas de las redes de suministro eléctrico. En otros casos, los sistemas solares, las turbinas hidráulicas y eólicas no son parte de un sistema integrado en el cual concurren varias fuentes energéticas. Cuando esto sucede, aún en instalaciones de pequeña y media capacidad, se pierden determinadas ventajas que no pueden ser ignoradas cuando se trata de alcanzar el mayor beneficio social y disfrutar la compatibilidad ambiental de las tecnologías renovables. Sincronizar es una oportunidad para reducir costos y operar competitivamente las fuentes energéticas renovables aun en las más exigentes condiciones. Por otra parte, es una realidad frecuente cuando se toman decisiones sobre la aplicación de las energías renovables, considerar que tienen prioridad en sitios aislados o apartados y su elevado costo en términos de *USD/kW* de capacidad instalada agravado por el bajo factor de carga durante su explotación. En este escenario, después de haber analizado el mérito social, se deben evaluar las medidas que contrarrestan estos factores de desaprobación a fin de alcanzar la mayor eficiencia y mejores resultados económicos en el empleo de estas fuentes. En el presente trabajo son revisados estos aspectos teniendo en consideración el proceso de interconexión de los sistemas eléctricos de los centrales azucareros a la red nacional en la provincia de Cienfuegos. Se analiza su repercusión en la economía y como caso de estudio particular se expone una pequeña fábrica alimentada con biomasa y los resultados alcanzados en este pequeño espacio geográfico de Cuba con tecnologías de limitado potencial energético. Como complemento se presenta un análisis de costos que permite evaluar, para condiciones específicas, hasta cuánto puede invertirse en un proyecto energético con fuentes renovables.

Palabras clave: sincronización a la red, fuentes renovables de energía

Abstract

Many biomass-powered industries operate isolated from power grids. In other cases, solar PV systems, hydro and wind turbines are not part of an integrated system in which several energy sources converge. When this happens, even in facilities of small and medium capacity, certain advantages are lost which cannot be ignored when trying to maximize social and environmental benefits of renewable energy technologies. Synchronization is an opportunity to reduce costs and operate the renewable energy sources competitively, even in the most demanding conditions. It also happens frequently that when taking decisions on the utilization of renewable energies, to prioritize their

implementation in isolated or remote places due to their high cost in terms of USD/kW, aggravated by the low load factor during their exploitation. In this scenario, after having analyzed the social aspects, measures to offset these negative factors should be evaluated, in order to reach the highest efficiency and better economic performance in using those sources. This paper discusses these aspects taking into account the process of interconnection of the power systems from the sugar mills to the national grid in the province of Cienfuegos. Their impact on the economy is analyzed and, as an especial case study, a small biomass-powered factory is presented as well as the results obtained in this small geographical space of Cuba with technologies of limited energy potential. As a complement we present a cost analysis that enables evaluating for specific conditions, how much can be invested in an energy project with renewable sources.

Keywords: grid synchronization, renewable energy sources

Desarrollo

Dentro de la estrategia económica general, uno de los aspectos fundamentales es la energía. Enfrentarse acertadamente con el problema de la energía representa, cada vez más, una vía hacia el progreso y la competitividad.

Cuando se trata de desarrollar la generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables, como la eólica, la hidráulica y la biomasa, se tiene entre los inconvenientes fundamentales el alto costo de la inversión inicial, el carácter cíclico y el bajo factor de carga durante la explotación del sistema. En algunas instalaciones se recurren a residuos de la cosecha u otros derivados de la biomasa regionalmente concentrados y transportados para su conversión. En muchos casos estos sistemas, de los que existen varias alternativas, son costosos, lo que gravita sobre las finanzas y en determinadas condiciones constituyen una carga difícil de insertar dentro de la estrategia de desarrollo general.

Una opción para el desarrollo y la extensión de los sistemas renovables es fundamentarse en la optimización, la elevación del rendimiento y la efectividad con que se utilizan los recursos disponibles.

Dentro de esas oportunidades, es importante abordar la sincronización a la red nacional de los sistemas de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables. Junto a las ventajas económicas que se obtienen, cuando la producción de electricidad se realiza desde un sistema de generación sincronizado, se logran otros beneficios muy importantes entre los que se encuentran:

- Mayor simplicidad y flexibilidad de la operación.
- Elevación de la calidad de la energía eléctrica. Disminución de la Intensidad de fallas.
- Mayor estabilidad estática y dinámica de los procesos electroenergéticos.
- Mejora del balance de generación y consumo de energía eléctrica.
- Mejora del balance térmico.
- Constante comunicación con el despacho de cargas.
- Elevación de la cultura general de operación.

- Elevación del factor de carga del sistema.

En el caso cubano, donde la producción azucarera se ha estructurado en complejos agroindustriales que atienden tanto las labores agrícolas de cultivo, riego, fomento y cosecha como la actividad industrial y de derivados, se puede considerar aproximadamente que, en términos de toneladas de combustible equivalente, de 100 % de la energía total 75 % se obtiene de la biomasa y 25 % restante se deriva de los combustibles fósiles.

Aunque no se consume combustible suplementario en los generadores de vapor, se compra energía eléctrica a la red; de los fósiles, la energía eléctrica consumida por todas las actividades, representa 23 %, y junto al diesel superan 85 % de la demanda total. Dada esta estructura, es fundamental obtener el máximo aprovechamiento de la biomasa, aun bajo tecnologías de potencial limitado.

Costos de la generación del kWh. Viabilidad de las fuentes renovables

El costo de producción de la energía eléctrica está dado por la relación entre el costo total de la instalación de generación y la cantidad de energía producida. El costo de la energía es una magnitud variable debido a que tanto los costos de los combustibles y de operación y mantenimiento como la cantidad de energía producida no resultan constantes durante todo el período de explotación de una central. Aunque es posible un proceso de actualización de los costos durante todo un período de explotación, usualmente el costo de la energía se determina como un costo promedio a partir de los costos y la generación anual de energía eléctrica.

Tradicionalmente, los costos de la instalación se han agrupado en costos fijos y variables. Uno de los aspectos que más influye en la determinación de los costos fijos es la depreciación. Cuando se estudia la depreciación puede considerarse o no el valor residual de la instalación. Como las instalaciones energéticas se construyen para ser usufructuadas durante toda su vida útil, es posible considerar despreciable el valor residual.

A partir de los desembolsos anuales, el cálculo del costo de la energía producida CEP (*USD/kWh*) se calcula tomando como base el costo anual de toda la instalación *CA* (*USD/año*) y la producción anual de energía *EA* (*kWh/año*) según:

$$C_{EF} = \frac{C_A}{E_A} = \frac{C_I + C_E}{\tau_{OP} \times FC \times P_I} \text{ USD/kWh}$$

Donde:

CI (*USD/año*) es el costo anual de la instalación, *CE* (*USD/año*) es el costo anual de explotación, *FC* (p.u.) es el factor de carga de la instalación, τ_{OP} es el tiempo de operación en horas y *PI* (*kW*) es la potencia instalada.

El costo anual de la instalación puede determinarse a partir de las condiciones económico-financieras en que se realizó la inversión inicial. En este caso el valor presente en términos del costo unitario del *kW* instalado *CPI* (*USD/kW*),

sin considerar el valor residual, se transforma en una anualidad mediante el factor de recuperación del capital. Si r es la tasa de interés y n el número de años evaluados, el costo anual está dado por:

$$C_i = C_{PI} \times P_i \times \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \text{ USD/año}$$

Los costos de explotación se componen básicamente de los costos de operación y mantenimiento y el costo del combustible. El costo de operación y mantenimiento

COM (*USD/año*), generalmente se establece como una función estadística del costo anual de la instalación $f(OM) \times CI$ tomando en consideración el tipo de planta y su calidad, régimen de explotación, etc.

$$C_{OM} = f_{(OM)} \times C_i \text{ USD/año}$$

El costo del combustible se determina a partir del costo unitario del combustible CUC (*USD/kg*), el consumo específico medio CEM (*kg/kWh*) y la energía generada.

$$C_C = \tau_{OP} \times F_C \times P_i \times C_{UC} \times C_{EM} \text{ USD/año}$$

Sustituyendo se obtiene:

$$C_{EP} = \left[\frac{(1 + f_{OM})}{\tau_{OP} \times F_C} \times C_{PI} \right] \times \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + C_{UC} \times C_{EM} \text{ USD/kWh} \quad (1)$$

En la expresión anterior se supone que todo el consumo de combustible se emplea en la generación de electricidad, y es aplicable al cálculo del costo en un sistema renovable, una central termoeléctrica o un grupo diesel si se consideran los costos apropiados.

En un sistema de cogeneración una parte de la energía del combustible es utilizada con fines térmicos en otra sección de la instalación y por lo tanto, no se justifica cargar a la electricidad todo el consumo de combustible. A la generación de electricidad debe cargarse la diferencia entre el consumo total de combustible y el consumo de combustible equivalente que es utilizado para satisfacer la demanda térmica del proceso.

La eficiencia en la generación de electricidad en una planta cogeneradora de energía eléctrica a partir del vapor con un ciclo Rankine de contrapresión es:

$$\eta_{GE} = \frac{P}{\left(E_{COMB} - \frac{E_2}{\eta_{GV}} \right)}$$

Donde P (*kW*) es la potencia eléctrica generada, E_{COMB} (*kW*) es la cantidad

de calor del combustible, E_2 (kW) es el calor demandado por el proceso y η_{GV} es la eficiencia de la generación de vapor.

En estas condiciones el costo final del kWh está dado por:

$$C_{EP} = \left[\frac{(1+f_{OM})}{\tau_{OP} \times F_C} \times C_{PI} \right] \times \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} + C_{UC} \times C_{EM} \times \left(1 - \frac{E_2}{\eta_{GV} E_{COMB}} \right) \text{ USD/kWh}$$

Esta expresión puede representar el costo de la energía considerando todos los gastos del sistema si los valores de los costos unitarios que se han empleado se refieren a los costos de la instalación total o a un punto determinado del sistema donde se pretenda calcular el costo de transmitir o llevar la energía eléctrica. Cuando sea necesario, en la inversión capital deben considerarse los gastos en las redes y en el equipamiento eléctrico necesario para lograr la interconexión.

De la ecuación (1) se deduce que el costo de la energía para una situación financiera dada se reduce a medida que aumenta el tiempo de explotación y se eleva el factor de carga. Por tal motivo estos sistemas exigen una garantía de recepción y compra de la energía con tarifas apropiadas y un período elevado de explotación anual.

En los casos en que el costo del combustible es reducido, como sucede en las instalaciones de energía renovable, el elevado factor de carga durante la explotación de estos sistemas es fundamental si se pretende alcanzar el máximo de beneficio económico en períodos de explotación generalmente intermitentes.

Aplicación de las fuentes renovables en las condiciones de la actualidad cubana.

En Cuba se obtienen como promedio aproximadamente 2,8 kWh por cada kilogramo de combustible convencional. En estas condiciones, para el país será efectiva toda instalación cuyo costo de generación sea igual o inferior al costo de producción del SEN.

En julio del 2000 este valor se estimó aproximadamente en 0,05733 USD/kWh. A partir de (1) es posible establecer una ecuación que determine para la inversión capital, el costo unitario máximo que puede pagarse por la instalación de generación:

$$C_{PI} \leq \left[0.05733 - C_{UC} \times C_{EM} \times \left(1 - \frac{E_2}{\eta_{GV} E_{COMB}} \right) \right] \times \frac{(1+r)^n - 1}{r(1+r)^n} \times \frac{\tau_{OP} \times F_C}{(1+f_{OM})} \quad (2)$$

USD/kWh

Dos condiciones importantes para reducir el costo de la energía y obtener mayores beneficios de las fuentes renovables son trabajar en paralelo con la red eléctrica para aumentar el estado de carga y extender el tiempo de

operación de la instalación. Debe notarse la dependencia de las condiciones de mercado y de la tasa de interés establecida en el contrato.

Desarrollo de la sincronización en la provincia de Cienfuegos

Cuando en 1981 el central 5 de Septiembre se sincronizaba al Sistema Eléctrico Nacional (SEN), se iniciaba un proceso paulatino de interconexión eléctrica entre la industria del azúcar en la provincia de Cienfuegos y el SEN. Cienfuegos, hasta ese momento caracterizada por retraso en el desarrollo y modernización de su industria azucarera, sobre todo en su base energética, comenzó a ejecutar un programa inversionista acelerado por la crisis energética y las exigencias de los años más duros del Período Especial.

Hoy se cuenta con 28 turbogeneradores instalados con una capacidad de 64,2 MW con 16 de ellos sincronizados al SEN con una capacidad de 49,2 MW. Para ello se realizaron cuantiosas inversiones.

En la zafra 1999/2000, la capacidad sincronizada en la provincia alcanzó los 49,2 MW. En la provincia el índice de venta creció a 5,48 kWh por tonelada de biomasa; de esta forma, se autoabastece de energía eléctrica en su gestión fabril y vende a la red el 11,73 % de la generación total. Este resultado, sin grandes inversiones, constituye una experiencia no reportada por otras regiones. Ver Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de la provincia de Cienfuegos 2000/2001.

	I.Generación kwh/T	I. Consumo SEN kWh/T	I. Venta al SEN kWh/T	Generación/consumo %
Malt tiempo	22,55	3,73	1,26	90,13
C. Caracas	30,20	1,78	4,92	111,60
G. Moncada	43,27	1,24	13,79	140,86
A. Sánchez	11,40	6,15	-	73,51
14 de Julio	36,83	1,57	12,95	144,75
E. Gómez	16,84	1,37	3,12	111,57
P. Tey	9,13	7,30	0,04	55,72
Total	25,16	3,19	5,48	111,73

Estos esquemas entregan aproximadamente a la red un promedio de 6 a 8 GWh anuales, siendo equivalente a mantener en operación durante todo un año un generador de 1,0 MW alimentado desde una fuente de energía renovable. Por otra parte, si se considera que en Cuba el costo de la generación en el SEN es próximo a 57 USD/MWh los gastos evitados al sistema se aproximan a 500000 USD/año. En términos ecológicos y ambientales, significa evitar que se lancen a la atmósfera un total de 11560,0 t de CO₂, 202.4 t de SO_x y 48.8 t de NO_x.

Si se toma como referencia el período comprendido entre la zafra 96-97 y la zafra 2000-2001 se puede mostrar un grupo de resultados derivados de este proceso de sincronización.

En estas cinco zafras se han incrementado en todo el país las exigencias por la

reducción del consumo de energía del SEN; el MINAZ ha sido ejemplo, no sólo por lo que representa para el bienestar económico del organismo sino también por lo que representa para los sectores no priorizados y la población, al reducirse las afectaciones por falta de fluido eléctrico.

También se ejecutó entre los años 1999 y 2001 la normalización paulatina de los servicios eléctricos de los bateyes y su conexión a las redes del MINBAS, lo cual posibilitó una reducción adicional en el consumo de energía eléctrica de los centrales azucareros de la provincia.

Por otra parte, ha tenido influencia el sistema para el pago en divisa líquida de la energía neta que entregan los centrales azucareros al Sistema Eléctrico Nacional por la Unión Eléctrica al MINAZ desde la zafra 99-00.

Ha sido importante el incremento del aprovechamiento de la capacidad de molida en este período y otras medidas como el programa de compactación llevado a cabo que además de elevar la eficiencia industrial contribuye a mejorar la eficiencia energética de las fábricas de azúcar. Cienfuegos ha estado en la vanguardia en el desarrollo de este programa.

A partir de la zafra 96-97, a escala provincial los índices de consumo de energía eléctrica de la red nacional por tonelada de caña molida y tonelada métrica de azúcar producida han ido disminuyendo, y los índices de entrega respectivos han ido en ascenso. Los mismos se detallan en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados provinciales.

Zafra	Índices de consumo al SEN		Índices de entrega al SEN	
	kWh/Tm de Caña	kWh/Tm de Azúcar	kWh/Tm de Caña	kWh/Tm de Azúcar
96-97	6,27	59,41	2,52	23,88
97-98	6,28	64,24	3,24	33,14
98-99	3,65	31,59	4,15	35,92
99-00	3,62	31,76	4,21	36,94
00-01	3,31	28,06	5,27	44,72

Para evaluar los resultados económicos se parte de los precios de facturación de la energía eléctrica consumida y entregada al SEN. Estos en el período analizado eran los siguientes:

Tabla 3. Tarifas de compra-venta.

Horario	Compra (centavos/kWh)	Venta (centavos/kWh)
Hora pico	14,20	5,00
Madrugada	2,40	-
Resto del día	4,70	3,30
Promedio	5,52	3,58

En la práctica, al facturar mensualmente se cobran también las pérdidas de transformación y se afecta el valor total por el factor de combustible, el cual

depende del precio del petróleo en el período facturado. Como este factor se aplica tanto para la compra como para la venta de energía, no ha sido tenido en cuenta en los resultados que se muestran.

En el análisis de los indicadores de consumo y entrega de energía eléctrica en las últimas cinco zafras es importante llegar a conclusiones que consideren no sólo el incremento de la eficiencia económica y la reducción de los costos de producción de azúcar, sino, además, el costo evitado al país al obtener una energía producida a partir de combustible renovable y la compatibilidad ambiental de estas tecnologías.

En el proceso de análisis se parte de definir los índices de compra y de venta de energía como la multiplicación de los precios promedio de compra y venta de energía por los índices de consumo y entrega, tal y como aparece a continuación:

$I_c = \text{Índice de compra} = \text{Precio de compra} \times \text{Índice de consumo.}$

$I_v = \text{Índice de venta} = \text{Precio de venta} \times \text{Índice de entrega.}$

Estos índices pueden analizarse en razón de la caña molida o del azúcar producida, surgiendo así los siguientes:

I_{cc} : Índice de compra por tonelada de caña molida.

I_{vc} : Índice de venta por tonelada de caña molida.

I_{ca} : Índice de compra por tonelada de azúcar producida.

I_{va} : Índice de venta por tonelada de azúcar producida.

En todos los casos como el precio se expresa en centavos/*kWh* y los índices en *kWh/Tm*, cuando se multiplica se obtiene centavos/*Tm*. En el caso de los índices respecto al azúcar producida, para simplificar se expresan en pesos/*Tm*. Los resultados pueden observarse en las tablas y figuras siguientes:

Tabla 4. Índices respecto a la caña molida.

Zafra	% molida	I_{cc} (ctvs/ <i>Tm</i>)	I_{vc} (ctvs/ <i>Tm</i>)	Diferencia (ctvs/ <i>Tm</i>)
1	2	3	4	5 = 4 - 3
96-97	56,6	34,61	9,02	- 25,59
97-98	54,3	34,66	11,60	- 23,06
98-99	73,2	20,15	14,86	- 5,29
99-00	69,6	19,98	15,07	- 4,91
00-01	79,0	18,27	18,87	0,60

Tabla 5. Índices respecto a azúcar producida.

Zafra	% molida	Ica (ps/Tm)	Iva (ps/Tm)	Diferencia (ps/Tm)
1	2	3	4	5 = 4 - 3
96-97	56.6	3.29	0.85	- 2.44
97-98	54.3	3.54	1.19	- 2.35
98-99	73.2	1.74	1.29	- 0.45
99-00	69.6	1.75	1.32	- 0.43
00-01	79.0	1.55	1.60	0.05

Nótese cómo los índices de compra en ambos casos han ido disminuyendo a la vez que se han ido incrementado los índices de venta, hasta que en la última zafra analizada los segundos superan ligeramente a los primeros.

En la zafra 96-97, por cada tonelada de caña molida se gastaron para comprar energía al SEN como promedio 34.61 centavos, y por cada tonelada de azúcar que se produjo \$ 3,29 pesos. Esto representó que en la referida zafra los centrales que molieron gastaron por concepto de energía eléctrica insumida del SEN 689.3 MP.

Con igual razonamiento, en esa misma zafra los centrales cienfuegueros cobraron al OBE por concepto de venta de energía eléctrica alrededor de 178,0 MP, lo que muestra un balance negativo para el MINAZ de uno 511,3 MP.

En la zafra 2000-2001 los resultados fueron bien distintos. Los centrales en activo por cada tonelada de caña molida tuvieron que invertir 18,27 centavos para comprar energía al SEN, pero vendieron de su autogeneración a razón de 18,87 centavos/Tm, o sea, aportaron al MINAZ alrededor de 0,60 centavos/Tm de caña molida, lo que representa alrededor de 11,7 MP de incremento en los activos líquidos de esta zafra.

Fig. 1. Índices provinciales vs. caña.

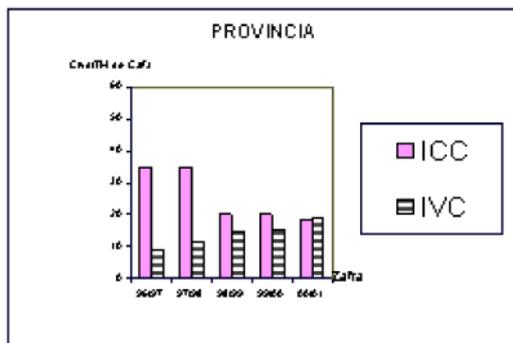
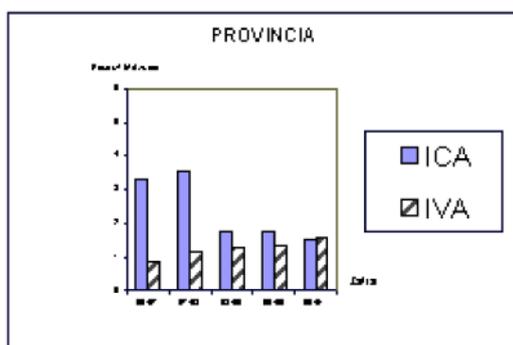


Fig. 2. Índices provinciales vs. azúcar.



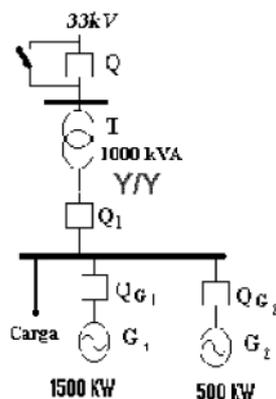
Ahora bien, si los precios hubieran sido idénticos y se vendiera la energía al mismo precio que se compra, entonces los resultados revalorizados serían de 211,3 MP a favor del MINAZ, lo que supera en varias veces el real obtenido.

El costo de la tonelada de azúcar producida también ha sido favorecido por los resultados energéticos. En la zafra 96-97 se cargaron por insumo de energía eléctrica cerca de 3,29 P/Tm y en la recién finalizada sólo 1,55 P/Tm, pero además en la zafra 96-97 sólo se dedujeron por concepto de energía entregada 0,85 P/Tm de azúcar y en la zafra 2000-2001 esta reducción ascendió hasta 1,60 P/Tm. Analizando comparativamente estos resultados se puede concluir que ha habido un descenso neto del costo de 2,49 P/Tm de azúcar por concepto de la mejora en los resultados energéticos entre la zafra 96-97 y la recién concluida.

Caso de estudio: Sincronización del sistema de biomasa del CAI Elpidio Gómez

En la figura 3 se muestra el esquema empleado en la sincronización del Complejo Agroindustrial (CAI) Elpidio Gómez, de la provincia Cienfuegos, Cuba, donde sólo se sincronizaron los generadores existentes.

Fig. 3. Esquema general de sincronización.



En la tabla 7 se muestran comparativamente los índices obtenidos en la zafra: 2000/2001.

Capacidad instalada (generación)	2250 kW
Banco de enlace	1000 kVA Y / Y 0,48/33 kV
% vapor/caña	49
Presión de trabajo	18 kg/cm ²

Tabla 7. Resultados de la sincronización del CAI Elpidio Gómez.

	Unidad	Antes	Después	%
I. Generación	kWh/T	12,54	16,84	134,2
I. Consumo SEN	kWh/T	4,55	1,37	0,30
I. Venta SEN	kWh/T	0,0	3,12	
Gen/Cons	%	73,78	111,57	151,2
I. Compra/T de Az.	Cts/T	25,18	7,2	28,6
I. Venta / T de Az	Cts/T	0,0	12,1	-
Factor de carga	p.u.	0,65	0,82	126,1

Los resultados económicos alcanzados son los siguientes:

Total de energía entregada (MWh)	756,00
Días efectivos de trabajo	90,58
MWh/Día efectivo	8,346
Ingresos totales (USD)	17032,00

Como se muestra, no sólo se logra incrementar la generación en 34,2 % y reducir el consumo en 70 % sino, además, incrementar el factor de utilización de la capacidad instalada, autoabastecerse de energía y exportar a la red 3,12 kWh por tonelada de biomasa procesada con un ingreso total de 17032,00 USD. De esta forma se reducen los costos, se eleva la competitividad de la empresa y se reduce la emisión de gases contaminantes y de efecto invernadero debido al consumo evitado de combustible fósil en las centrales eléctricas convencionales.

Conclusiones

- Para elevar la eficiencia y la efectividad de los sistemas de generación a partir de fuentes renovables es importante evaluar las posibilidades de sincronizar la instalación a las redes eléctricas existentes en el Sistema Eléctrico Nacional.
- La sincronización eléctrica de las plantas generadoras de los centrales azucareros al SEN aporta favorables beneficios al país, mejora las condiciones operativas de la industria azucarera y favorece la situación económica de los complejos azucareros.
- En condiciones de sincronización se pueden obtener aún mayores beneficios de las potencialidades renovables de una región.
- Las industrias cogeneradoras con biomasa, en particular las correspondientes a la industria azucarera cubana y las centrales hidroeléctricas de pequeña y mediana capacidad, deben operar sincronizadas al SEN.

- El costo del *kWh* en las empresas generadoras del país, las condiciones de mercado, inversión capital, tasa de interés, etc., junto al factor de carga y el período de explotación, son los ingredientes fundamentales que permiten determinar, según las expresiones propuestas, la viabilidad económica para la aplicación de las fuentes renovables de energía.

Bibliografía

1. Datos estadísticos Delegación Provincial MINAZ. Cienfuegos: 2000-2001.
2. MARTÍNEZ VILCHES, ERNESTO Y MARIA DE LA C. FRANCESENA RAMOS. Resultados económicos de la sincronización al SEN. Cienfuegos: MINAZ, mayo, 2001.
3. DE ARMAS TIERRA, MARCOS A. *Desarrollo de la industria azucarera con mínimos recursos*, en XIV Forum de Ciencia y Técnica. Cienfuegos: 2001.
4. DE ARMAS TIERRA, MARCOS A. *Papel de la sincronización de pequeños centrales azucareros*, en International Sugar Journal. Vol. CII, December, 2000.

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

DIRECTOR GENERAL:

Dr. Luis Bérriz Pérez.

DIRECTOR:

Lic. Manuel Álvarez
González.

EDITOR:

Lic. Alejandro Montecinos
Larrosa.

CORRECCIÓN:

M Sc. Roberto Manzano
Díaz.

Ing. Jorge Santamarina

DISEÑO ELECTRÓNICO:

D.I. Antonio Romillo Polaino.

TRADUCCIÓN:

Lic. Lázaro O´Farril Lazo.

CONSEJO ASESOR:

Dr. Luis Hernández (Energía fotovoltaica)

Dr. Conrado Moreno Figueredo (Energía
eólica)

Lic. Bruno Henríquez Pérez (Física
ambiental)

Dr. Jorge Luis Paretas (Energía hidráulica)

Dr. Dania González Couret (Arquitectura
bioclimática)

Dr. Jorge Guardado (Biomasa)

Dr. Sergio Corp Linares (Energía solar
térmica)

Lic. Leonor Turtós Carbonell (Impacto
ambiental)

Lic. Alejandro Montecinos Larrosa (Energía
humana)

Lic. Ricardo Bérriz Valle (Educación
ambiental)



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

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

Teléfono: (537) 205-9949.

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

e-mail: editora@cubasolar.cu

<http://www.cubasolar.cu>