



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTAL DE CUBASOLAR

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

16



Estudios para optimizar las celdas solares sensibilizadas (DSSC).....	1
Influencia de la orientación de los colectores solares en la captación de energía.....	11
Bioetanol de jugos de caña energética.....	19
Veranero para el cultivo de plantas en clima tropical.....	27
Obtención de la superficie selectiva cromo negro a nivel de planta piloto para colectores solares planos.....	39
Validación en la puesta en marcha del prototipo de veranero de 36 m ² del CIES: Respuesta biológica.....	46

Estudios para optimizar las celdas solares sensibilizadas (DSSC)

Studies Performed to Optimize Sensitized Solar Cells (DSSC)

Inti Zumeta¹, Sergilus Docteur², Bernardo González¹, Elena Vigil^{1,2}
¹Instituto de Materiales y Reactivos de la Universidad de La Habana, Cuba.
²Facultad de Física de la Universidad de La Habana, Cuba
e-mail: evigil@ff.oc.uh.cu

Resumen

La conversión de la energía solar en electricidad o energía fotovoltaica no contribuye a la contaminación atmosférica ni al calentamiento global, aunque aún resulta más costosa que la proveniente de los combustibles fósiles. Una variante menos costosa de las celdas solares fotovoltaicas la constituyen las celdas solares sensibilizadas, que son objeto de investigación intensa en los últimos años por sus perspectivas. El contacto entre la capa de óxido semiconductor, frecuentemente TiO_2 , y el contacto transparente que utilizan estos dispositivos fotovoltaicos ha sido poco estudiado. Por otra parte, conviene evitar el cortocircuito que se puede establecer al contactar el sustrato conductor y el electrolito a través de las porosidades de la capa de TiO_2 . Por este motivo, y a la vez mantener una gran área real de la capa de TiO_2 , se ha propuesto una capa fina y compacta debajo de la capa porosa que bloquee dicho contacto. La no coincidencia de los criterios sobre su utilidad [Lee, *et al.*, 2004 y Bisquert y Vikhrenko, 2004], hace necesario su estudio. En el presente trabajo se estudian las celdas solares sensibilizadas (DSSC) con una estructura de doble capa de TiO_2 sobre sustratos conductores, tanto sin sensibilizar como sensibilizados, y se analiza la importancia de la presencia de dicha capa fina utilizando la novedosa técnica de deposición por baño químico activado con microondas (MW-CBD). Se desarrolla un modelo teórico que confirma los resultados experimentales. Se evidencia la utilidad del sistema de doble capa usando MW-CBD en el aumento de la eficiencia en estos sistemas.

Palabras clave: Celdas solares sensibilizadas, energía solar fotovoltaica.

Abstract

The conversion of solar energy into electric power does not contribute to atmospheric pollution or to global warming, though it is more expensive than those using fossil fuels. A less expensive alternative of solar photovoltaic cells is the so-called sensitized solar cells which have been subjected to research in recent years due to its perspectives. The contact between the semiconductor oxide layer, frequently TiO_2 , and the transparent contact which use all these photovoltaic devices have been poorly studied. On the other hand, it is convenient to prevent from having a short circuit which may occur when there is contact between the conductor substrate and the electrolyte through the porosity of the TiO_2 . It is for this reason and also for maintaining a great area of TiO_2 that a fine compact layer has been proposed, under the layer with porosity that blocks this contact. It has been necessary to conduct this study

for the controversial views expressed on its usefulness. Sensitized solar cells (DSSC) with a TiO_2 double layer structure over conducting substrates, both without being sensitized or sensitized. The presence of such fine layer using the innovative technique of chemical deposition activated by microwaves (MW-CVD) was reviewed. A theoretical model is developed which confirms the experimental results. The usefulness of the double-layer system using MW-CBD is seen in the increased efficiency of these systems.

Key words: Sensitized solar cells, photovoltaic solar energy.

Introducción

Como ya es conocido, el empleo de las fuentes renovables de energía, así como su empleo racional, cobra cada vez más importancia en la actualidad debido al agotamiento de las reservas de combustibles fósiles y a los daños medioambientales que produce el ritmo actual de su consumo. La conversión directa de la radiación solar sobresale por ser esta fuente la más ampliamente distribuida en el planeta, además de estar considerada prácticamente inagotable. La energía fotovoltaica, o sea, la transformación directa en energía eléctrica mediante el uso de las celdas solares, reviste gran importancia futura y resulta muy atractiva. Por todo lo anterior, las celdas solares, elemento clave en los sistemas fotovoltaicos, son intensamente investigadas.

Las llamadas celdas solares sensibilizadas (DSSC) o celdas de Grätzel [O'Reagan y Grätzel, 1991] constituyen una variante mucho menos costosa, en comparación con las ya tradicionales de silicio o de estado sólido en general, para la conversión fotovoltaica. Estas celdas están constituidas por un electrodo de un óxido semiconductor poroso, en general TiO_2 nanocrystalino, recubierto con una monocapa de un compuesto orgánico que actúa como sensibilizador, ya que el TiO_2 (entre otros óxidos) es transparente a la luz visible. Esta monocapa, a diferencia del TiO_2 , es capaz de absorber un rango amplio del espectro solar. En estas celdas se usa un electrolito que contiene el par redox I^-/I_3^- en un solvente orgánico, el que penetra en toda la superficie interior del electrodo y contacta al fotoelectrodo (Fig. 1). Además, han logrado una eficiencia de conversión mayor de 10 %, a un costo muy inferior al de otros dispositivos fotovoltaicos de similar eficiencia [O'Reagan y Grätzel, 1991].

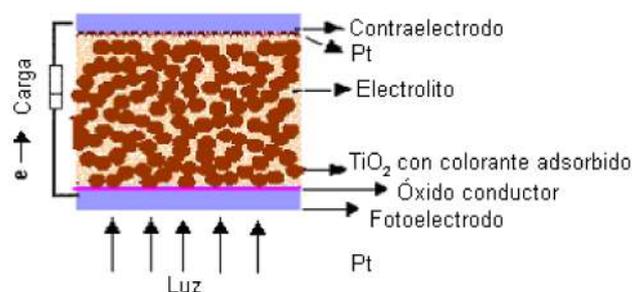


Fig. 1. Representación esquemática de las celdas solares sensibilizadas (DSSC).

Ya existen relojes comerciales que se abastecen de energía solar por medio de una celda de Grätzel [Grätzel, 1994]. Estas celdas, teniendo en cuenta su buen funcionamiento en niveles de radiación relativamente bajos, también han sido aplicadas en ventanas y vitrales en combinación y sustituyendo a elementos arquitectónicos [Grätzel, 1994 y Halme, 2002] (ver Fig. 1), donde constituyen la fuente de abastecimiento energético de baños y anuncios electrónicos en estanterías de mercados (Fig. 2a). Cuando se usan sustratos flexibles o variantes de este tipo de celdas basadas completamente en materiales orgánicos, estas se hacen muy ligeras; ya se observan aplicaciones muy atractivas (Fig. 2b).



Fig. 2a. DSSC insertadas en la arquitectura del entorno [Halme, 2002].



Fig. 2b. Tienda de campaña de la armada de los Estados Unidos. En general se diseñan paneles plegables. También pueden ser impresas en ropas y otros tejidos.

El principio de funcionamiento de las DSSC aparece esquematizado en la figura 3. Al incidir la radiación sobre el fotoelectrodo, esta es absorbida por el colorante (el TiO_2 es transparente a la luz visible) y a partir del estado excitado transfiere electrones hacia el TiO_2 , que a su vez se transportarán a

través del arreglo tridimensional de nanopartículas hasta el sustrato conductor. El circuito se cierra externamente en el contraelectrodo donde los electrones reducen al I_3^- a I^- que repondrá electrones al nivel desocupado en el colorante, cerrando el ciclo.

En el presente trabajo se estudian las DSSC con una estructura de doble capa de TiO_2 , donde la primera capa se deposita por una técnica original de baño químico activado por microonda (MW-CBD). Esta novedosa técnica permite crecer capas finas, densas y compactas, además de ser sencilla y poco costosa. El objetivo de la doble capa es que la primera capa actúe como capa de contacto y, además, como barrera que impida el contacto del electrolito con el óxido conductor que sirve como contacto (Fig. 4).

Para analizar la efectividad de la doble capa se comparan las mediciones de fotocorriente espectral y característica volt-ampérica de una DSSC, que la presenta con las correspondientes a una estructura tradicional de una sola capa nanocrystalina y porosa. Para la comparación de las capas dobles con las capas simples actuando como fotoelectrodos se sensibilizaron todas las estructuras con un compuesto organometálico de rutenio (RuL_2Cl_2 (L es 2,2' bipyridil- 4,4' dicarboxilato, $C_{12}H_8O_4N_2$). Se estudia la factibilidad de uso del tanino extraído de la *Casuarina equisetifolia* como sensibilizador y se compara, para el análisis, con el complejo de rutenio.

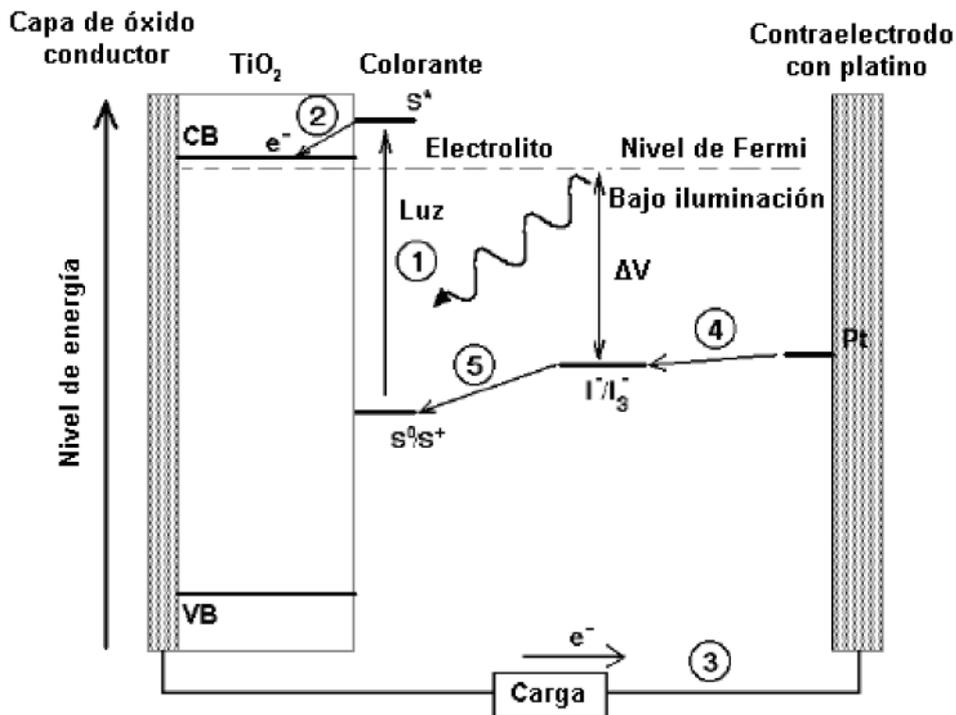


Fig. 3. Esquema del principio de funcionamiento de las DSSC.

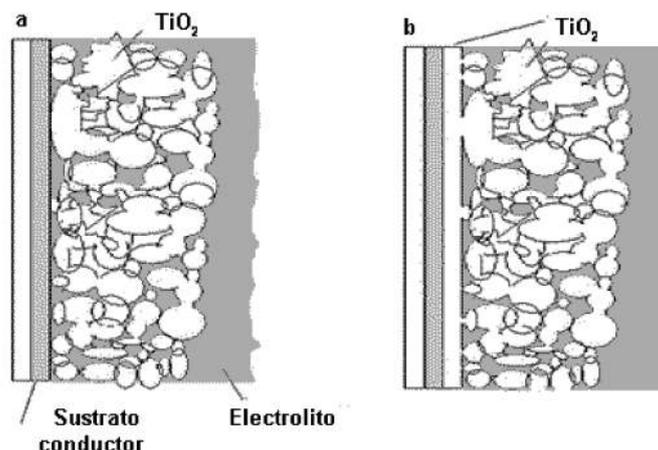


Fig. 4. Esquema de los fotoelectrodos de TiO_2 comparados. a) El electrolito hace contacto con el sustrato conductor a través de la porosidad de la capa b) La capa compacta de TiO_2 evita el contacto directo del electrolito con el sustrato conductor.

Resultados

Para la medición de las celdas de doble y simple capas se utilizó una celda tipo sándwich sensibilizada con el complejo de rutenio RuL_2Cl_2 (L es 2,2' bipyridil- 4,4' dicarboxilato, $C_{12}H_8O_4N_2$), siendo el área iluminada en el fotoelectrodo de $0,25\text{ cm}^2$, se obtuvo la característica volt-ampérica simulando $1,5\text{ AM}$ (100 mW/cm^2) y sin aplicar voltaje externo. El electrolito empleado es una solución que contiene el par redox I^-/I_3^- en etilenglicol ($[I^-] = 0,5\text{ M}$ y $[I_2] = 0,05\text{ M}$ [20]. A continuación, en la figura 5 se muestran las curvas I-V para dos tipos de celdas (las letras SS y DS indican si la muestra es de simple o doble capa sensibilizada). La forma no cuadrática de estas curvas se debe a que las celdas empleadas no están optimizadas (contactos, electrolito, sellaje, etc.), pero ambas fueron medidas en igualdad de condiciones para realizar las comparaciones.

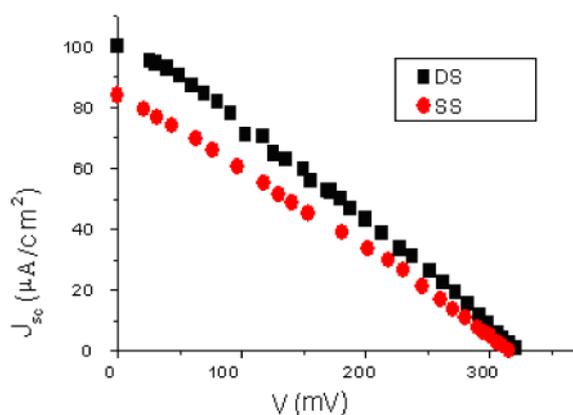


Fig. 5. Comparación de las características volt-ampéricas correspondientes a las muestras de doble y simple capas sensibilizadas con rutenio que presentaron las mejores características.

Algunos parámetros de estas curvas se muestran en la tabla 1. Se presentan los valores de voltaje (V_m), y corriente (I_m), correspondientes a la potencia máxima (P_m). También aparecen el factor de llenado FF, la eficiencia global η_m y las resistencias en serie y en paralelo.

Tabla 1. Parámetros obtenidos a partir de la característica volt-amperica de las celdas para muestras de simple (SS) y doble capa (DS)

Muestra	J_{sc} mA/cm ²	V_{oc} (V)	I_m (μ A)	V_m (mV)	P_m (μ W)	FF (%)	η_m (%)	R_s (k Ω)	R_p (k Ω)
S	0,08	0,32	10	0,18	1,8	28	0,007	34	17
D	0,10	0,33	13	0,18	2,3	28	0,009	11	28

En la tabla 1 se puede observar que los valores correspondientes a la doble capa en general superan a los de simple capa, con diferencias apreciables para el valor de resistencia en serie y en paralelo.

En la figura 6a se presentan los espectros de fotocorriente normalizada para celdas de simple capa sensibilizadas con el tanino, con el complejo de rutenio y sin sensibilizar. Se puede apreciar que las muestras sin sensibilizar no tienen respuesta para longitudes de onda mayores de 400 nm; sin embargo, las muestras sensibilizadas con el tanino extraído de la *Casuarina equisetifolia* absorben para $\lambda > 400$ nm. Se demuestra que el tanino extraído de la *Casuarina equisetifolia* inyecta electrones a la capa de TiO₂ en el similar rango espectral que el RuL₂Cl₂.

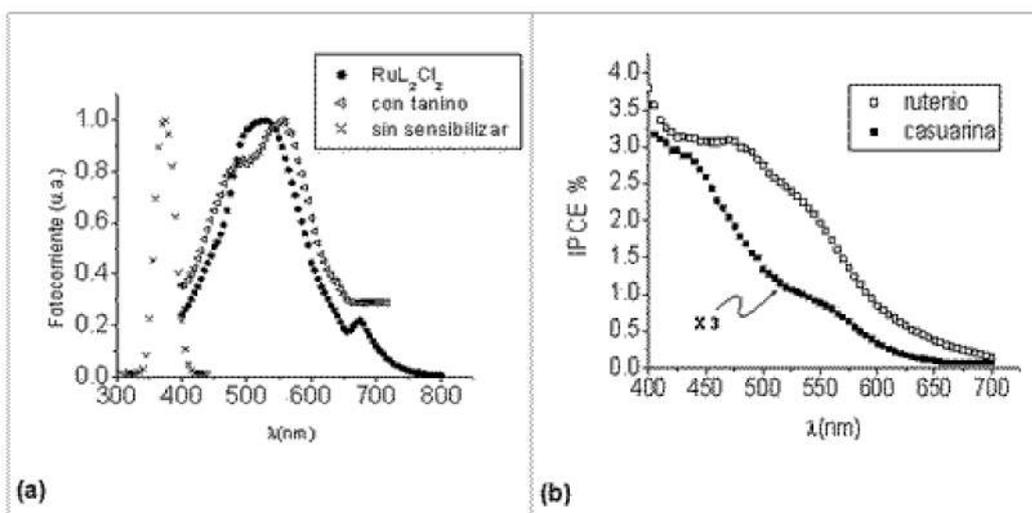


Fig. 6. a) Espectros de fotocorriente normalizados de los fotoelectrodos sensibilizados con diferentes colorantes y sin sensibilizar. b) IPCE para las celdas sensibilizadas.

En la figura 6b se muestran los espectros de IPCE correspondientes a las celdas sensibilizadas presentadas en la figura 5a. La IPCE representa el número de electrones que contribuye a la fotocorriente por fotón incidente, para una longitud de onda dada. Se observa que en la celda con sensibilizador del complejo de rutenio aparece un máximo correspondiente a

470 nm. En la celda sensibilizada con el tanino el máximo corresponde a 445 nm y se observa la presencia de un pequeño hombro alrededor de los 550 nm. De la tendencia en 400 nm de los espectros de sensibilidad y de IPCE se puede deducir que ambos sensibilizadores tienden a presentar los valores de sensibilidad y de IPCE máximos para la región ultravioleta. Esto concuerda con que para esa zona también crece la absorción de ambos sensibilizadores.

A partir del análisis de trabajos previos en la literatura [Augustynski, 2003 y Södergen, *et al.*, 1994], se desarrolló un modelo para determinar la distribución espacial de los portadores fotogenerados en el fotoelectrodo y el comportamiento espectral de la fotocorriente en el estado estacionario. Dicho modelo se basa en:

- Transporte de electrones por difusión.
- Concentración de especies redox alta (constante durante iluminación).
- Huecos fotogenerados extraídos con muy alta eficiencia por el electrolito (separación efectiva del par).
- Longitud de difusión constante de los electrones a través de toda la capa.
- Puede utilizarse una expresión análoga a la de Lambert-Beer para el perfil de decaimiento de la intensidad de la luz en el interior de la capa (modelo homogéneo).

Con estas consideraciones la ecuación de continuidad para el estado estacionario adopta la siguiente forma:

$$D_e \frac{d^2 n(x)}{dx^2} - \frac{(n(x) - n_0)}{\tau} + \Phi(\lambda) \alpha(\lambda) e^{-\alpha(\lambda)x} = 0$$

En el contacto con el sustrato conductor ($x = 0$) deberá cumplirse que:

$$D_e \left. \frac{dn(x)}{dx} \right|_{x=0} = s * (n(0) - n_0)$$

Donde, s es la llamada rapidez de extracción y representa la rapidez con que son extraídos los electrones del contacto posterior. Esta condición difiere de la usada en los trabajos precedentes y permite el estudio de situaciones fuera del cortocircuito ideal

($s \rightarrow \infty$). Los electrones que arriben al otro extremo de la capa de espesor d serán reflejados, por lo que será considerado que:

$$\left. \frac{dn(x)}{dx} \right|_{x=d} = 0$$

Esta condición es comúnmente empleada en la literatura [Augustynski, 2003 y Södergen, *et al.*, 1994]. Finalmente para la fotocorriente:

$$J_e = \left[\frac{\Phi(\lambda) \alpha(\lambda) L_e}{1 - \alpha^2(\lambda) L_e^2} \right] \left[\frac{\frac{sL_e}{D_e} \alpha(\lambda) L_e e^{-\alpha(\lambda)d} + (\alpha(\lambda) L_e + \frac{sL_e}{D_e}) \sinh\left[\frac{d}{L_e}\right]}{\frac{sL_e}{D_e} \cosh\left[\frac{d}{L_e}\right] + \sinh\left[\frac{d}{L_e}\right]} - \alpha(\lambda) L_e \right]$$

En la figura 7 se presentan algunos de los ajustes realizados a celdas sin sensibilizar con fotoelectrodos de doble y simple capas depositadas sobre sustratos conductores de ITO y FTO. Las capas bloqueadoras obtenidas por MW-CBD se depositaron usando como precursor una solución de $(\text{NH}_4)_2\text{TiF}_6$ $3,4 \cdot 10^{-2}$ M y H_3BO_3 $6,8 \cdot 10^{-2}$ M, con el cual se obtienen capas cristalinas de la fase anatasa [Vigil, *et al.*, 2000]. En el nombre de las muestras la palabra porosa denota la presencia en el fotoelectrodo de la capa gruesa ($\sim 10 \mu\text{m}$) y porosa de TiO_2 , MW para la capa fina ($\sim 100 \text{nm}$) obtenida por MW-CBD del tipo de sustrato sobre el que se hizo el depósito.

Se encontró que en igualdad de condiciones de deposición de las capas sobre sustratos de FTO se obtienen mejores valores de eficiencia que sobre ITO, debido a un mejor contacto eléctrico. También, para los fotoelectrodos de doble capa se obtienen mejores valores de IPCE, lo que denota su efectividad en el mejoramiento de la calidad del contacto con el sustrato conductor y/o su acción bloqueadora. En la figura 7 se puede apreciar que, en todos los casos, se encuentra un comportamiento aproximadamente lineal en las regiones indicadas en las curvas, lo cual concuerda con lo que predice el modelo. También se observa que los valores de E_g hallados a partir del intercepto de las rectas con el eje de las energías está en el rango de 3,0 a 3,2 eV, como se reporta para este material [Hagfeldt y Grätzel, 1995].

También se puede notar que en la misma medida en que los fotoelectrodos presentaron mayores valores de IPCE, aumentaron los valores de la pendiente en los ajustes de la figura IV.34, lo que según el modelo desarrollado se interpreta como un aumento en la velocidad de extracción de los portadores en el contacto posterior (aumento de s) debido a la mejora de los contactos con los sustratos.

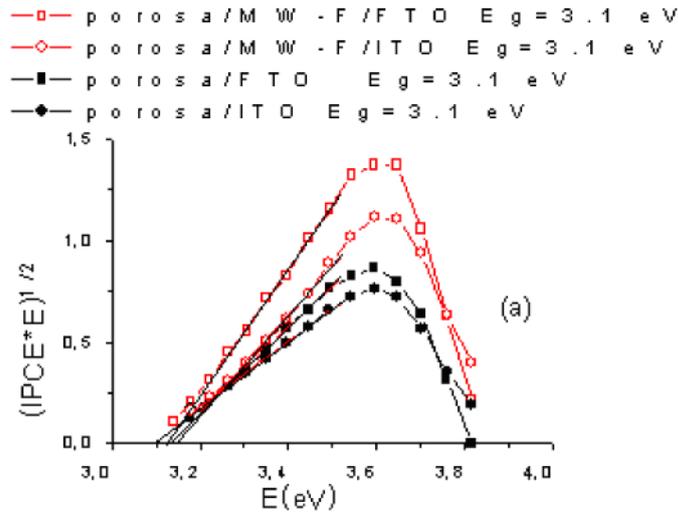


Fig. 7. Ajustes de la expresión hallada a valores experimentales de IPCE.

Conclusiones

Las celdas solares sensibilizadas son muy promisorias debido a su costo relativamente bajo, sus posibilidades de aplicaciones de baja intensidad de la radiación, factibilidad de aplicación sobre sustratos ligeros y/o flexibles, a los niveles de eficiencia alcanzados en un lapso de tiempo relativamente corto, entre otras ventajas. Actualmente se trabaja con intensidad en esta temática para la mejora en los niveles de eficiencia y estabilidad de estos sistemas, para ello se investiga además la utilización de nuevos materiales.

El fenómeno de la inyección de electrones desde el tanino condensado estudiado al TiO_2 tiene lugar en los fotoelectrodos estudiados, es decir, ocurre la sensibilización de estos. Este tanino se ha extraído de la corteza de la *Casuarina equisetifolia*, por lo que presenta la ventaja de ser poco costoso. El rango espectral donde se observa fotocorriente debido a la sensibilización es comparable con el correspondiente al RuL_2Cl_2 , sensibilizador conocido más difícil de obtener y costoso.

Bajo similares condiciones de deposición, las capas porosas depositadas sobre sustratos de FTO presentan mejores niveles de IPCE que las depositadas sobre ITO, lo que se ha atribuido al mejor contacto eléctrico del TiO_2/FTO respecto al TiO_2/ITO .

El modelo presentado para describir el transporte de electrones, que tiene en cuenta la rapidez con que son extraídos los electrones en el contacto TiO_2/TCO , permitió obtener las dependencias de $\Delta n(x)$ e $\text{IPCE}(E)$ fuera de la situación de cortocircuito ideal. El análisis de la efectividad en la extracción de portadores del contacto TiO_2/TCO demostró su influencia en los valores de IPCE y la existencia de un espesor efectivo de la capa. El uso propuesto de capas bloqueadoras obtenidas por MW-CBD mejora IPCE, I_{sc} , V_{oc} , R_{serie} y R_{ll} en las celdas estudiadas.

Bibliografía

- AUGUSTYNSKI, JAN. Comment on «Diffusion Impedance and Space Charge Capacitance in the Nanoporous Dye-Sensitized Electrochemical Solar Cell» y «Electronic Transport in Dye-Sensitized Nanoporous TiO₂ Solar Cells Comparison of Electrolyte and Solid-State Devices», en *J. Phys. Chem. B.*, 107 13544-13545, 2003.
- BISQUERT, JUAN Y VYACHESLAV S. VIKHRENKO. «Interpretation of the Time Constants Measured by Kinetic Techniques in Nanostructured Semiconductor Electrodes and Dye-Sensitized Solar Cells», en *J. Phys. Chem. B.*, 108, 2313-2322, 2004.
- GRÄTZEL, MICHAEL. «Highly Efficient Nanocrystalline Photovoltaic Devices», en *Platinum Metals Rev.*, 38-4 151-159, 1994.
- HAGFELDTT, ANDERS Y MICHAEL GRÄTZEL. «Light-Induced Redox Reactions in Nanocrystalline Systems», en *Chem. Rev.*, 9549-9568, 1995.
- HALME, JANNE. «Dye-Sensitized Nanostructured and Organic Photovoltaic Cells: Technical Review and Preliminary Tests», Master's thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Technology, Helsinki University of Technology, Department of Engineering Physics and Mathematics. February, 2002.
- LEE, JAE-JOON; GEORGE M. COIA Y NATHAN S. LEWIS. «Current Density versus Potential Characteristics of Dye-Sensitized Nanostructured Semiconductor Photoelectrodes. 2. Simulations», en *J. Phys. Chem. B.*, 108 5282-5293, 2004.
- O'REAGAN, BRIAN Y MICHAEL GRÄTZEL. «A Low Cost, High-Efficiency Solar Cell Based on Dye-Sensitized Colloidal TiO₂ Film», en *Nature*, 353, 737-746, 1991.
- SÖDERGEN, SEVEN; ANDERS HAGFELDT, JÖRGEN OLSSON Y STEN-ERIC. «Theoretical Model for Action Spectrum and the Current-Voltage Characteristics of Microporous Semiconductor Films in Photoelectrochemical Cells, Lindquist», en *J. Phys. Chem.*, 98, 5552-5556, 1994.
- VIGIL, ELENA; JOSÉ A. AYLLÓN, ANA M. PEIRÓ, RAFAEL RODRÍGUEZ-CLEMENTE, XAVIER DOMENECH, Y JOSÉ PERAL. «TiO₂ Layers Grown from Flowing Precursor Solutions Using Microwave Heating», en *Langmuir*, 17 891-896, 2000.

Influencia de la orientación de los colectores solares en la captación de energía

Solar Collectors Orientation Influence on Solar Energy Capture

Carlos A. del Moral Pelier¹ y Antonio Sarmiento Sera²

¹Centro de Ingeniería Genética y Biotecnología.

Ave. 31 s/n, entre 158 y 190, Cubanacán, Playa, Ciudad de La Habana, Cuba.

e-mail: carlos.moral@cigb.edu.cu

²Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER).

Calle 114, No. 11901, CUJAE, Marianao, Ciudad de La Habana, Cuba.

e-mail: sarmiento@ceter.cujae.edu.cu

Resumen

Se presenta el análisis simulado por computadora, de la influencia en la orientación de colectores solares planos, tanto en el acimut como en la inclinación, sobre la energía solar captada. Se hacen análisis sobre las posibilidades de orientaciones no clásicas, para aplicaciones específicas, así como valorar la influencia de errores o limitaciones en la precisión del montaje.

Palabras clave: Radiación solar, orientación solar, colectores solares.

Abstract

This paper contains a computer-simulated analysis on the influence of flat solar collectors both in azimuth as in slope on captured solar energy. Analyses on non classic orientation possibilities for specific applications are made as well as the evaluation on error influence or limitations on the assembly accuracy.

Key words: Solar radiation, solar orientation, solar collectors.

Introducción

Es conocido que el máximo de captación para colectores solares, teniendo estructura u orientación fija, se logra con orientación hacia el Sur cuando se trata de una región del hemisferio Norte [Duffie y Beckman, 1996].

Cualitativamente podemos interpretar que con esa orientación (acimut), se balancean las posibilidades de captación entre la mañana y la tarde, suponiendo que ambas poseen similares características de radiación.

También es conocido que ese máximo de captación, como promedio anual, con orientación Sur (acimut = 0o) se logra cuando la inclinación de los colectores es igual a la latitud de la región o zona de captación [Bérriz y Álvarez, 2004].

La simulación de la energía promedio anual captada, utilizando el programa Hybrid Optimization Model for Electric Renewables (HOMER), distribuido por National Renewable Energy Laboratory (NREL) permite visualizar las dependencias entre los parámetros geométricos mencionados y la energía captada, y a partir de ahí analizar y obtener conclusiones sobre determinados casos particulares [Guillén, 2004]. Los elementos señalados se utilizan en el presente reporte para el análisis de casos particulares, con posibilidades de

aplicaciones específicas, cuando las orientaciones o inclinaciones clásicas poseen algún aspecto limitador o existe asimetría en la radiación o en la demanda de la mañana y la tarde.

Método

Para la simulación se utilizó un lugar con latitud = 25º, colectores planos y con orientación fija (sin sistemas de seguimiento solar), aunque considerando la orientación de los colectores, como variables en la simulación.

En la figura 1 se presenta un diagrama de la radiación media diaria durante los meses del año utilizada en los análisis posteriores.

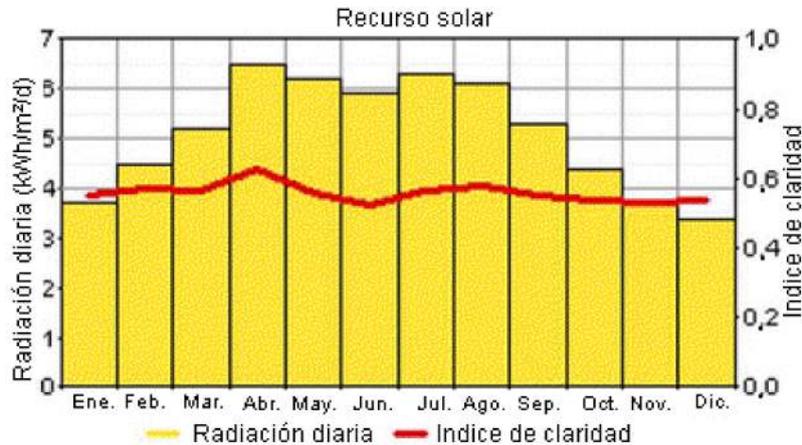


Fig. 1. Diagrama de la radiación solar incidente utilizada en la simulación.

Dada las facilidades de cálculo y posibilidades de análisis de este software se pudo hacer un estudio de diferentes parámetros y su variación debido al cambio de variables influyentes, por lo que se pudo estudiar, el comportamiento diario, mensual y anual de un captador fotovoltaico, como muestran las figuras 2, 3 y 4.

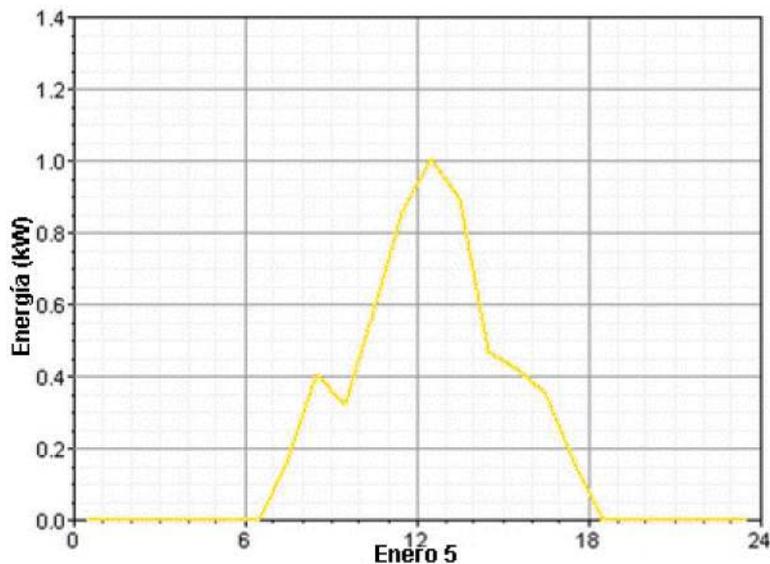


Fig. 2. Potencia horaria entregada por los paneles fotovoltaicos en un día, para las condiciones de la simulación.

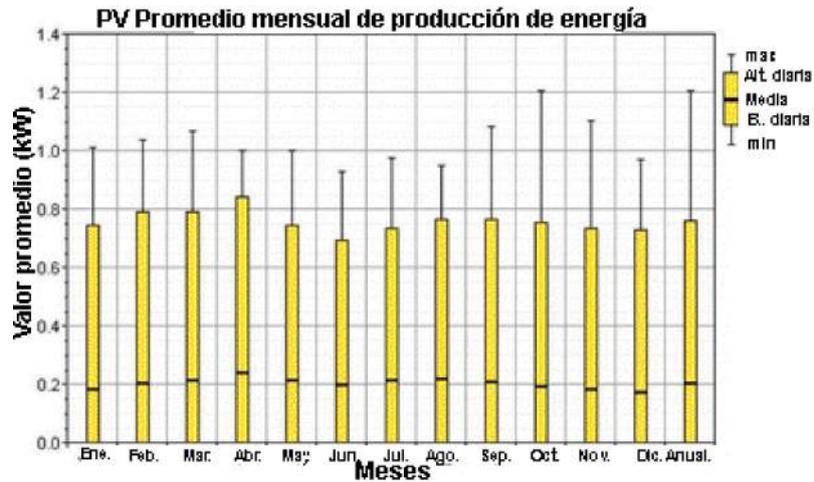


Fig. 3. Potencia media mensual entregada por los paneles fotovoltaicos en un año, para las condiciones de la simulación.

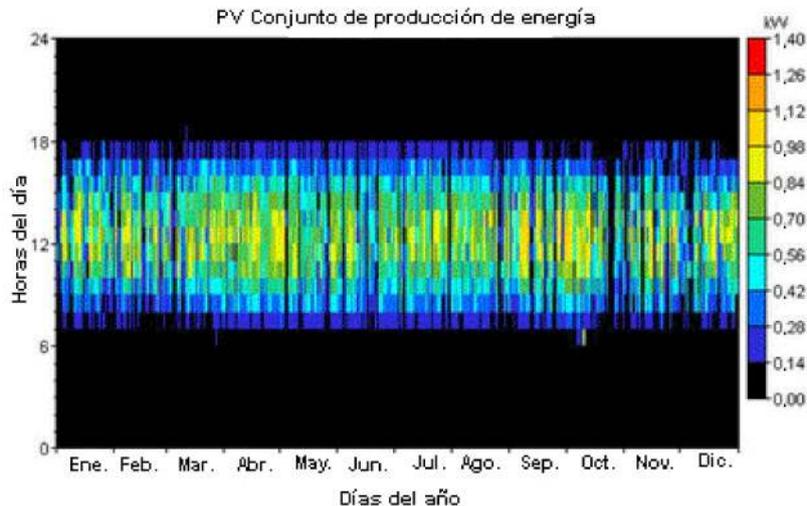


Fig. 4. Potencia horaria entregada por los paneles fotovoltaicos en un año, para las condiciones de la simulación.

Estos análisis se dirigieron fundamentalmente al interés específico del presente reporte, la influencia de la orientación de los paneles en el eje vertical (acimut), la influencia de la inclinación (que ha sido la más divulgada en trabajos anteriores) y la combinación de estas dos.

En la figura 5 se muestran los resultados del sistema fotovoltaico con inclinación fija de 25°, y se considera el acimut como variable independiente, obteniendo como respuesta la potencia entregada por los paneles, proporcional a la radiación directa recibida. El acimut = -90° representa el Este, mientras que el Oeste corresponde +90°.

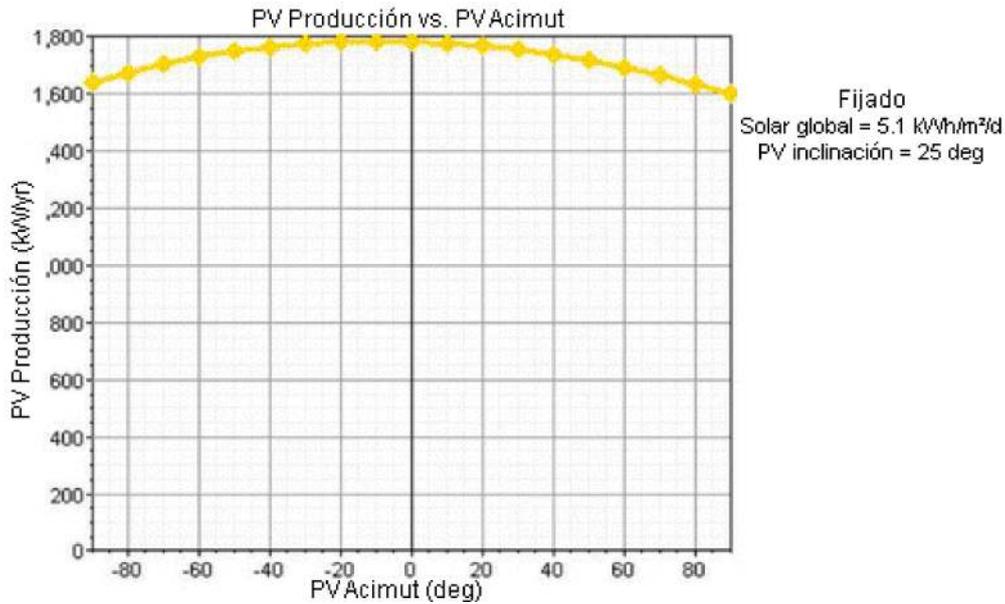


Fig. 5. Energía producida por los paneles fotovoltaicos en función del acimut, para una inclinación de 25° y las condiciones de la simulación.

En la figura 6 se muestra la dependencia integral de la variable «inclinación de los paneles» y la variable «acimut», en la potencia entregada por los paneles, lo que da una representación completa y visual del interés fundamental, en el presente reporte.

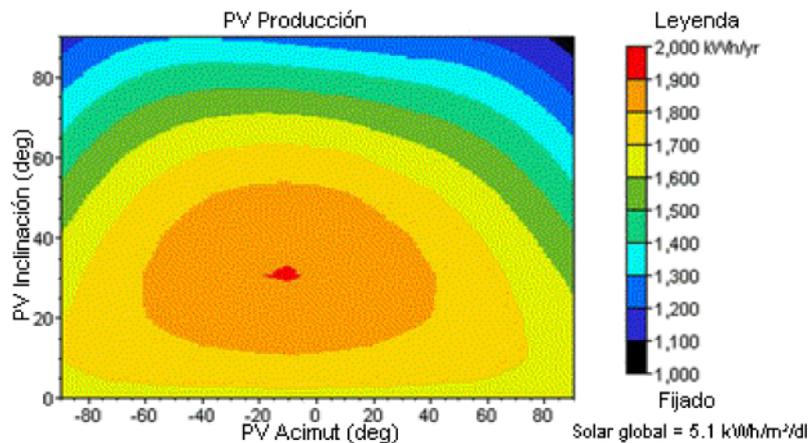


Fig. 6. Diagrama de distribución de la energía producida por los paneles fotovoltaicos en función del acimut y la Inclinación.

Resultados

Un primer resultado surge de la búsqueda de la inclinación óptima de los colectores, teniendo como objetivo la máxima energía captada en el año y considerando la orientación Sur (acimut = 0o), sin usar seguidores solares, con una distribución uniforme de la demanda durante el día y una distribución simétrica de la radiación solar entre la mañana y la tarde, como promedio mensual.

El resultado se puede visualizar en la figura 7.

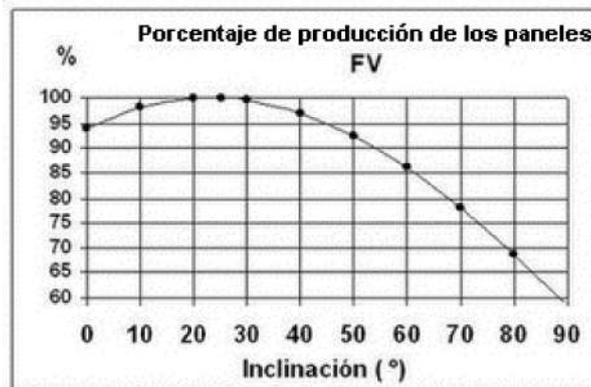


Fig. 7. Diagrama del porcentaje de energía producida por los paneles fotovoltaicos en función de la inclinación, acimut 0° y las condiciones de la simulación.

Es posible observar cómo la máxima captación, en las condiciones señaladas, se obtiene para una inclinación igual a la latitud del lugar, resultado ya presentado anteriormente por otros autores [Duffie y Beckman, 1996; Bériz y Álvarez, 2004]. En la presente simulación se destacan las facilidades de cálculo o presentación mediante un relativamente complejo sistema de ecuaciones, pero con un simple programa de cómputo.

Las variaciones en la inclinación de $\pm 15^\circ$ en la inclinación respecto al ángulo óptimo producen una disminución en la captación del orden de 2,5 %, siendo un elemento de compromiso en la toma de decisiones [Cabrera, 2005]

El siguiente análisis se realizó para observar la influencia de variaciones del acimut en la energía captada, para la inclinación óptima de 25° ya señalada.

En la figura 8 se muestran los resultados y pueden observarse disminuciones en la energía captada o en la entregada, del orden de 1 % para variaciones del acimut, hasta de 30° . Este resultado ha sido poco divulgado y existe el criterio de una mayor influencia, por lo que los autores del presente reporte han considerado útil su divulgación.

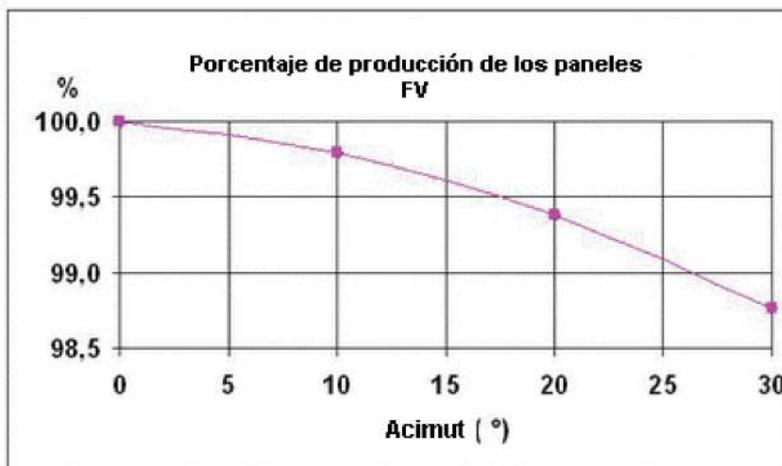


Fig. 8. Diagrama del porcentaje de energía producida por los paneles fotovoltaicos en función del acimut, inclinación 25° y las condiciones de la simulación.

En la figura 9 se muestran los resultados de las influencias combinadas de la inclinación y el acimut, sobre la energía captada.

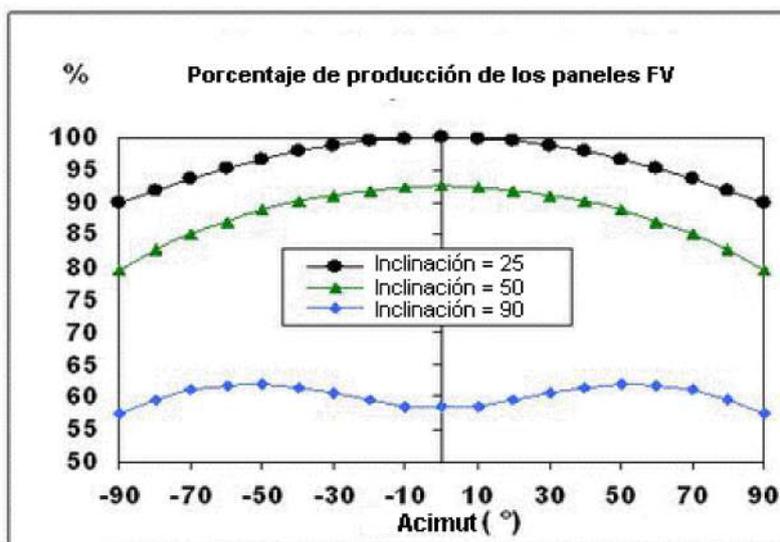


Fig. 9. Diagrama del porcentaje de energía producida por los paneles fotovoltaicos en función del acimut y las inclinaciones de 25, 50 y 90°, y las condiciones de simulación.

En este caso se observan efectos, como la poca dependencia del acimut, para inclinación de 90°, con interés en arquitectura o recepción de radiación en superficies verticales. Otro efecto que merece destacarse es el anteriormente mencionado acerca de la poca dependencia del acimut para la inclinación óptima de 25° (también para 0°), con variaciones de $\pm 30^\circ$ en el acimut; pero debe señalarse que este efecto es más notable aún para menores latitudes y menor en altas latitudes.

Un resultado interesante es el relacionado con la distribución horaria de la demanda de energía; por ejemplo, cuando la demanda de energía está

concentrada en las primeras horas de la mañana, situación más significativa en calentadores de agua que en producción de electricidad por las mayores dificultades del primer caso (en transferir energía almacenada de un día al siguiente), entonces en la figura 10 puede observarse la necesidad de orientación cercana al Este (acimut $\approx -75^\circ$), con una inclinación ($\approx 55^\circ$) mayor de lo acostumbrado para el máximo aprovechamiento de la radiación solar temprano en la mañana. El indicador de la figura 10 es de efecto negativo o inconveniencia, por lo que sus mínimos valores son preferibles (zona sombreada de negro).

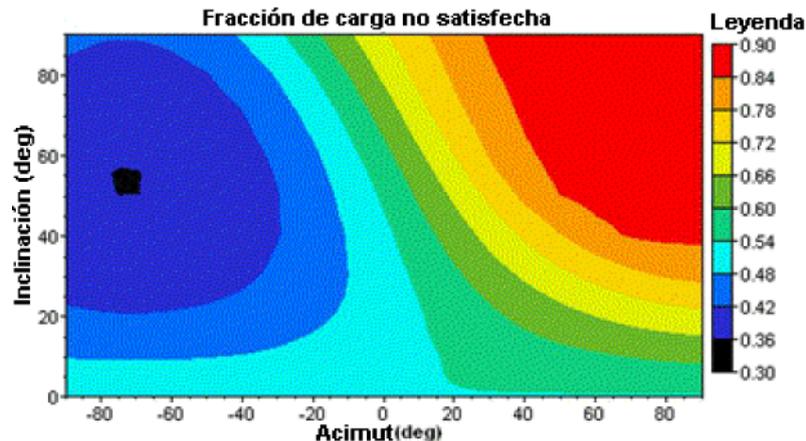


Fig. 10. Diagrama de distribución de la fracción de carga no satisfecha por los paneles fotovoltaicos en función del acimut y la inclinación.

Conclusiones

Después del análisis de las figuras 7, 8 y 9 puede concluirse que una apreciable variación en la inclinación produce una influencia en la captación menor, de lo que en ocasiones se considera.

Para el caso particular de latitud = 25° , con inclinación = 25° , modificar la orientación hacia el Este o hacia el Oeste sólo introduce una disminución de 10 %. Incluso con variaciones en el acimut de $\pm 25^\circ$, la disminución es sólo de 1 %, en el caso de orientación Este u Oeste.

También se dan casos, tanto para calentadores solares como para paneles fotovoltaicos, donde la estructura de la azotea o el lugar de instalación de los colectores no facilita la orientación de los colectores con alta precisión hacia el Sur, pudiéndose encontrar soluciones con desviaciones de 45° con respecto al Sur, con relativamente baja disminución de la producción.

Algo similar sucede con captadores orientados hacia el Sur (acimut = 0°), en los cuales una variación en la inclinación de $\pm 10^\circ$ (desde 15° hasta 35°), debido a soluciones técnicas de montaje sólo introducen una disminución de 1 %, lo cual puede ser un indicador de compromiso ante la toma de decisiones.

La asimetría en la radiación solar entre la mañana y la tarde, por ejemplo, por mayor nubosidad en las tardes, característico de variadas zonas de la región occidental de Cuba, pueden producir que la máxima captación no se logre con

acimut = 0o; por ejemplo, en la figura 6 se observa una zona de máxima entrega de energía para acimut = -10o.

Otra influencia notable es la relacionada con la distribución horaria de la demanda de energía. O sea, en el caso de colectores solares para calentamiento del agua se encuentran aplicaciones, como la de círculos infantiles o guarderías para niños, donde se requiere agua caliente al mediodía (las instituciones finalizan su labor a las 5:00 p.m.); en cambio, otras instalaciones, como determinados hoteles en la playa, el mayor requerimiento del agua caliente puede estar a partir de las 5:00 p.m., por lo que orientaciones Este u Oeste pueden satisfacer requerimientos temporales diferentes con relativa poca disminución de la producción. La distribución horaria de la demanda de energía puede indicar la necesidad de una orientación específica para cada caso, como se ilustró en la figura 10. Estos elementos pueden ser considerados en diseños específicos.

Bibliografía

- BÉRRIZ, L. Y M. ÁLVAREZ. «Influencia del ángulo de inclinación de una superficie captadora solar sobre la radiación incidente», en *Eco Solar*, No. 8, 2004.
- CABRERA, I. «Los sistemas fotovoltaicos conectados a la red», en *Energía y tú*, No. 31, 2005.
- DUFFIE, J. A Y W. A. BECKMAN. *Solar energy thermal processes*. Madrid: Ed. Pergamon Press, 1996.
- GUILLÉN, O. «Herramientas de análisis para simulación de sistemas híbridos», en *Eco Solar*, No. 9, 2004.

Bioetanol de jugos de caña energética

Bioethanol of Energetic Sugar-Cane Juices

*Ing. Joaquín de Jesús Obregón Luna¹,
Dr. Ing. Osvaldo Romero Romero¹ e Ing. Aleida María Martínez Martínez²*

¹Centro Universitario José Martí Pérez, de Sancti Spíritus.

²Destilería Paraíso, Empresa Azucarera Melanio Hernández.

e-mail: obregon@suss.co.cu, osvaldo@suss.co.cu y paraíso@melanio.ss.minaz.cu

Resumen

Se realiza un escalado industrial contrastando la tecnología particular y específica de preparación de los jugos de caña energética como sustrato para la producción de bioetanol en la destilería Paraíso, integrando el central Melanio Hernández y esta planta material, operacional y energéticamente. Se demuestra la factibilidad técnica y económica de esta nueva tecnología y medio basal industrial.

Palabras clave: Bioetanol, jugos de caña energética, fermentación, medio ambiente.

Abstract

An industrial scale-up is carried out, contrasting the particular specific technology in the preparation of energetic sugar-cane juices as the substrate for ethanol production in the Paraíso Distillery, thus integrating the Melanio Hernández Sugar cane Mill and this plant from the material, energy and operational standpoints. This paper shows the technical economic feasibility of this new technology and the industrial basal means.

Keywords: Bioethanol, energetic sugar-cane juices, fermentation, environment.

En tal sentido se han experimentando nuevas variedades de esta gramínea, denominada en Cuba caña energética, como biomasa combustible para la cogeneración eléctrica fuera del período de zafra, destinando sus jugos como sustrato para producir bioetanol [Romero, 2005]. Todo un soporte de investigaciones básicas y aplicadas permitieron conocer y demostrar las diferencias altamente significativas de estos jugos con relación a los de caña azucarera [Ventura, 1996; Ulloa, 1997], que no permite aplicarles las tecnologías conocidas para los últimos al nuevo sustrato industrial [Jay y

Cruz, 1998]. Lo anterior generó la necesidad de desarrollar una tecnología particular y específica de preparación para uso inmediato, bajo solicitud de patente [SUSS, 2002], con otra de adición para su conservación hasta noventa días [Obregón y Fardales, 2006; CUSS, 2006]. El escalado industrial integrando material, operacional y energéticamente el central Melanio Hernández y la destilería Paraíso de Sancti Spíritus [MINAZ, 2003], han permitido contrastar la nueva tecnología de preparación y caracterizar la

fermentación con el nuevo sustrato comparándola con la tradicional y empleando melazas solas. El objetivo de este trabajo es mostrar los resultados obtenidos.

Preparación

La preparación de los nuevos jugos se hace en el ingenio desde el tándem hasta el clarificador BTR, mediante pasterización híbrida de tipo HTHT, según especifica la citada tecnología, donde el clarificador opera como reactor-pasterizador-sedimentador sin alcalización alguna. De este se filtran y bombean aún calientes para los tanques receptores ubicados en la destilería, de donde previo enfriamiento inmediato antes de empleo se suministran a los disolutores estáticos; se les completa el déficit de azúcares mediante mezclado con miel final de caña azucarera hasta una concentración de 110 g/L o menos, toda vez que no tiene sistema de enfriamiento en fermentación. De aquí se suministran a la sala de fermentación como normalmente se hace en cualquier destilería.

Diseño de experimentos

El tamaño muestral mínimo en el escalado es de siete prefermentadores y siete fermentadores con el sustrato mezcla jugo+miel e iguales cantidades simultáneamente con miel sola, todos con la misma cepa de levadura.

El tratamiento estadístico se selecciona no paramétrico con la prueba de Mann-Whitney del paquete de programas SPSS versión 11.5. Las determinaciones en los prefermentadores son para caracterizar y comparar el estado del inóculo al sembrarse en los fermentadores con uno y otro sustrato, y en los fermentadores los datos iniciales y el estado final de la fermentación, también con ambos sustratos por separado, aplicando el esquema de control normal utilizado en la destilería. La contrastación contempla la tecnología de preparación y el nuevo sustrato, por la vía estímulo-respuesta.

Resultados

En la tabla 1 se recogen los resultados de los prefermentadores y su procesamiento estadístico. La tabla 2 es igual a la anterior, pero para los fermentadores y los gráficos correspondientes.

Tabla 1. Inóculos de fermentación a fermentadores.

Prefermentadores para mezcla jugo + miel

% Brix al descargar	pH	Acidez	OC	Conteo 106	%Viabilidad	% Gemación	Contami-nación	Agluti-nación	Ciclo en horas
6,11	3,9	4,50	35	200	100	21,5	No	No	9,153
6,51	3,8	4,60	35	235	100	18,6	No	No	8,833
7,70	3,7	3,52	32	220	100	18,0	No	No	9,000
6,35	3,4	4,00	33	210	100	19,0	No	No	10,917
7,11	4,0	3,18	35	245	100	21,8	No	No	11,000
6,21	3,8	4,25	35	235	100	16,2	No	No	11,000
6,92	3,5	4,29	30	200	100	20,2	No	No	10,667
6,51	3,9	3,23	35	230	100	32,5	No	No	8,667
6,54	4,0	3,67	34	225	100	19,5	No	No	10,167
6,49	3,6	4,02	31	230	100	22,3	No	No	10,667
6,55	3,8	3,80	29	205	100	21,0	No	No	11,333

Prefermentadores para miel final sola

% Brix al descargar	pH	Acidez	OC	Conteo 106	%Viabilidad	% Gemación	Contami-nación	Agluti-nación	Ciclo en horas
6,43	3,7	3,57	34	245	100	22,3	No	No	10,000
7,62	3,6	4,10	30	220	100	19,8	No	No	11,666
7,62	3,8	3,86	30	225	100	21,6	No	No	11,917
7,02	3,6	3,86	30	210	100	19,6	No	No	11,500
7,12	3,5	3,85	30	220	100	20,2	No	No	11,667
6,93	3,7	3,92	35	226	100	20,1	No	No	9,153
7,35	3,9	4,06	33	250	100	18,4	No	No	10,000
7,27	3,6	4,75	36	210	100	21,4	No	No	11,153
7,52	3,5	4,11	34	205	100	19,5	No	No	8,500
5,09	3,9	3,77	32	225	100	21,2	No	No	10,000
6,57	3,9	3,42	33	245	100	20,8	No	No	9,667

NPar Tests, Mann-Whitney Test: Inóculo de fermentación

Tabla. Ranks.

pH	1	11	12,55	138,00
	2	11		
	Total	22		
Acidez	1	11	11,45	126,00
	2	11		
	Total	22		
Temperatura	1	11	12,55	138,00
	2	11		
	Total	22		
Conteo	1	11	10,86	119,50
	2	11		
	Total	22		
Gemación	1	11	11,14	122,50
	2	11		
	Total	22		

Tabla. Test Statistics

	pH	Acidez	Temperatura	Conteo	Gemación
Mann-Whitney U	49,000	60,000	49,000	53,500	56,500
Wilcoxon W	115,000	126,000	115,000	119,500	122,500
Z	-,766	-,033	-,769	-,462	-,263
Asymp. Sig. (2-tailed)	,444	,974	,442	,644	,793
Exact. Sig. [2*(1-tailed Sig.)]	,478a	1,000a	,478a	,652a	,797a

a. Enlace no corregido

b. Variable de agrupación

Mezcla jugo + miel

Fermentador	% Brix inicial	% Brix final	Δ Brix	0 c máx.	pH	Acidez	% alc.	% Red. Res.	Lev. 106	% Viabilidad	Yp/s 100	Yx/s 100	Ciclo en h	μe
1	15,47	5,44	10,03	40	3,8	4,90	4,83	0,72	45	100	79,00	6,25	21	0,230
2	15,49	5,46	10,03	40	4,0	4,02	4,90	1,00	60	100	82,44	6,27	21	0,233
3	14,50	5,29	9,21	36	3,7	4,39	4,60	1,22	45	100	77,40	6,16	22	0,209
4	14,50	5,09	9,41	36	4,1	3,43	4,55	1,38	35	100	79,93	6,23	22	0,207
5	16,05	5,45	10,60	40	3,8	4,90	4,65	0,72	45	100	81,60	6,30	21	0,221
6	15,48	5,95	9,53	40	3,9	4,22	4,70	0,92	55	100	81,83	6,18	22	0,214
7	16,00	6,00	10,00	40	3,9	4,22	4,70	0,88	55	100	75,81	6,89	22	0,214
8	15,50	4,85	10,65	41	4,3	3,25	4,90	0,70	40	100	79,00	6,80	24	0,204
9	16,06	5,88	10,18	36	4,0	4,90	5,12	0,88	30	100	77,72	6,42	22	0,233
10	16,00	5,87	10,13	38	4,4	3,60	5,03	0,94	50	100	79,87	6,46	23	0,219
11	16,15	6,18	9,97	39	4,0	4,39	5,08	0,92	50	100	78,42	6,77	23	0,221

Miel sola

Fermentador	% Brix inicial	% Brix final	Δ Brix	0 c máx.	pH	Acidez	% alc.	% Red. Res.	Lev. 106	% Viabilidad	Yp/s 100	Yx/s 100	Ciclo en h	μe
12	16,36	4,95	11,41	40	4,1	3,53	4,80	1,00	35	100	72,51	6,36	24	0,200
13	16,32	4,76	11,56	39	4,2	3,60	4,81	0,96	50	100	72,88	6,29	24	0,200
14	16,42	5,77	10,65	38	4,5	2,84	5,20	0,72	60	100	78,25	6,02	23	0,226
15	16,72	5,39	11,33	36	4,4	3,04	5,10	0,86	50	100	74,79	6,12	21	0,243
16	16,74	5,57	11,17	38	4,5	2,90	5,21	0,90	65	100	76,33	6,02	22	0,237
17	16,25	7,55	8,70	40	3,7	5,12	4,75	1,56	55	100	74,51	6,81	24	0,198
18	16,32	6,45	9,87	40	3,7	5,58	4,77	1,54	50	100	74,53	6,61	24	0,199
19	16,00	7,45	8,55	40	4,0	4,02	4,50	1,00	60	100	71,68	6,98	22	0,205
20	15,23	5,09	10,14	36	4,1	3,43	4,40	1,38	35	100	70,23	6,71	22	0,200
21	14,48	5,99	8,49	36	3,7	5,39	4,20	1,22	40	100	70,59	6,88	21	0,200
22	15,50	5,57	9,93	36	4,3	2,50	4,60	1,12	30	100	72,16	6,81	22	0,209

NPar Tests: Fermentación

Mann-Whitney Test

Tabla. Ranks

	Grupo	N	Mean rank	San of ranks
pH	1	11	10,09	111,00
	2	11		
	Total	22	12,91	142,00
Acidez	1	11	13,14	144,50
	2	11	9,85	108,50
	Total	22		
Temp	1	11	12,65	139,50
	2	11	10,32	113,50
	Total	22		
YPS	1	11	16,64	183,00
	2	11	6,36	70,00
	Total	22		
YXS	1	11	10,82	119,00
	2	11	12,18	134,00
	Total	22		
UE	1	11	13,95	153,50
	2	11	9,05	99,50
	Total	22		
Glazucae	1	11	7,85	86,50
	2	11	15,14	166,50
	Total	22		

Tabla. Test Statistics b

	pH	Acidez	Temp	YPS	YXS	UE	Glazucae
Mann-Whitney U	45,000	42,500	47,500	4,000	53,000	33,500	20,500
Wilcoxon W	111,000	108,500	113,500	70,000	119,000	99,500	86,500
Z	-1,026	-1,185	-,901	-3,711	-,493	-1,780	-2,628
Asymp. Sig. (2-tailed)	,305	,236	,368	,000	,622	,075	,009
Exact. Sig. [2*(1-tailed Sig.)]	,3323	,2433	,4013	,0003	,6523	,0763	,0073

a. Enlace no corregido

b. Variable de agrupación

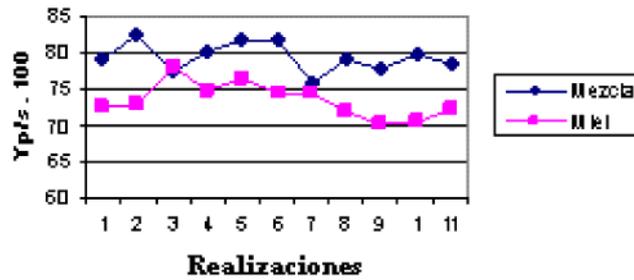


Gráfico 1. Yp/s vs. sustrato.

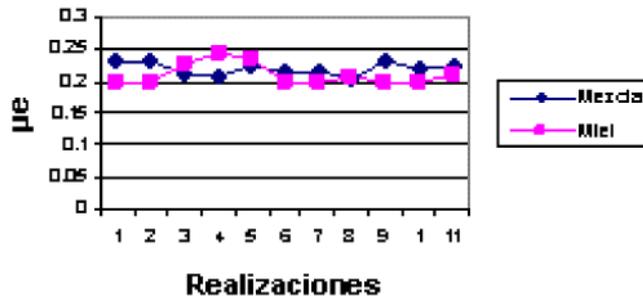


Gráfico 2. µe vs. sustrato.

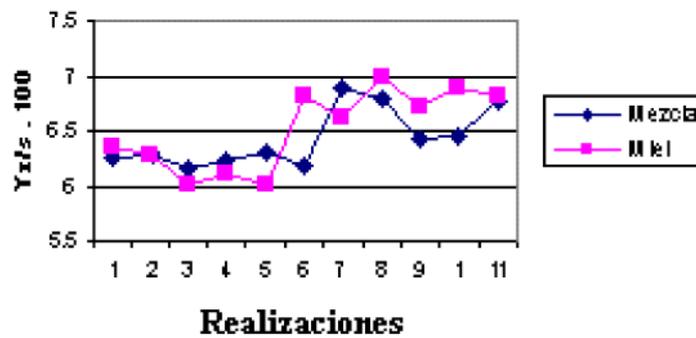


Gráfico 3. Yx/s vs. sustrato.

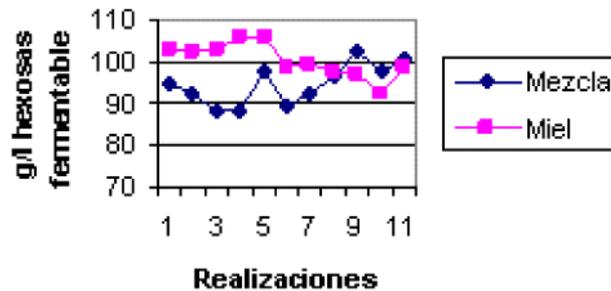


Gráfico 4. g/i hexosas fermentables vs. sustrato.

Simbología:

Yp/s g de hexosas convertidas en bioetanol/g de hexosas fermentables total, ajustando modelo de Monod de rendimiento [Aiba, Humphrey y Millis, 1970].
 Yx/s g de hexosas convertidas en biomasa/g de hexosas fermentables total.
 µe % alcohol v/v al final de la fermentación/tiempo en horas de fermentación.

Efecto económico por producciones y ahorros [Obregón, *et al.*, 2005]:
 \$ 23 021,78 MN, \$ 2 761,90 CUC

Discusión

El procesamiento estadístico de la tabla 1 permite inferir que no hay diferencias significativas en ningún parámetro físico, químico y microbiológico entre los prefermentadores empleados para inocular mezcla jugo + miel y miel final sola, por lo que el inóculo empleado es similar para uno y otro sustrato, de lo que resulta que la variable modelo biológico vivo levadura no tiene incidencia de significación en los resultados finales de la fermentación. Por su parte, los de la tabla 2 muestran que no hay diferencias significativas entre el sustrato fermentado mezcla jugo + miel y el de miel final sola en el pH, acidez, temperatura y µe; pero son altamente significativas en el Yp/s, siendo mejor los resultado con la mezcla; esto corrobora a escala industrial lo obtenido en pruebas de banco desde 1997 con imbibición simulada, lo cual se interpreta como un efecto colateral de mayor dilución de los inhibidores normales presentes en cualquier melaza dado que su proporción es significativamente menor en la mezcla, aunque aporta Mg y K, entre otros, que pueden estar en déficit en los jugos pasterizados solos. Los gráficos 1, 2 y 3 complementan lo analizado, mientras que el gráfico 4 realizado a partir de datos de balances de materiales que no se brindan, muestran la variabilidad en los gramos por litros de hexosas fermentables debido a la operación manual de los disolutores estáticos que aumenta los límites de la incertidumbre.

Conclusiones

- Se alcanzan los objetivos de contrastar industrialmente la nueva tecnología de preparación obtenida a escala de banco de preparación de los jugos de caña energética y su empleo como sustrato para la producción de bioetanol por fermentación sumergida con levadura.
- Los mejores resultados con el sustrato mezcla miel + jugo con relación a melazas solas corrobora la factibilidad tecnológica y económica de la tecnología obtenida a escala de banco de preparación y empleo de jugos de

- caña energética en la destilería Paraíso.
- Siempre habrá que suplementar el nuevo sustrato con azúcares procedentes de miel final de caña azucarera, por el déficit natural de éstos en la gramínea y en el jugo mezclado de tándem.
 - El efecto económico es el correspondiente a este escalado solamente.

Recomendación

Realizar escalado industrial a prefermentación también con potencial reducción del consumo de ácido sulfúrico aprovechando el bajo pH y alta acidez natural de estos jugos, facilitando así las operaciones en los disolutores estáticos y evaluando a ciclo completo su comportamiento fabril.

Bibliografía

AIBA, S.; A. E. HUMPHREY Y N. F. MILLIS. *Biochemical Engineering*. La Habana: Ediciones Ciencia y Técnica, 1970.

CUSS (2006). Solicitud de Patente de Adición a la OCPI No. 2002-0251, en trámites.

JAY, J. Y F. CRUZ. «Investigaciones, tecnologías y sistemas para la producción de alcohol», en *CubaAzúcar XVII* (4), 31-33, 1998.

MINAZ. Resultado del empleo de la caña energética y azucarera en la producción de alcohol. Informe de oposición. Proyecto Territorial 070551. Destilería Paraíso, 2003. 7 pp.

OBREGÓN, J. J. Y J. Fardales. «Conservación de jugos de caña energética integrando tecnología química y sistema experto». CUSS, Cátedra Álvaro Reynoso. Trabajo enviado para el II Taller, 2005. 13 pp.

OBREGÓN, J. J., *et al.* «Producción industrial de etanol y biomasa de levadura empleando jugos de caña energética como sustrato». XVI Forum de Ciencia y Técnica, I Etapa. Relevante a nivel provincial. Sancti Spíritus. Ponencia, 2005. 11 pp.

ROMERO, O. «Metodología para incrementar el aporte de electricidad con bagazo y alternativa de combustible para generar fuera de zafra». UCLV, CEEPI. Tesis doctoral. 2005.

SALOMÓN, R. «Azúcar, ¿hacia donde van los precios?», en *Granma*, 31.03, 2006. p.5.

SUSS. «Procedimiento de preparación de jugos de caña energética como sustrato para la producción de alcohol y biomasa de levadura». Solicitud de Patente en la OCPI No. 2002-0251, 2002.

ULLOA, J. G. «Evaluación de jugos de caña energética atrasada para la producción de alcohol con levadura». UCLV. Trabajo de Diploma. 1997.

VENTURA, A. «Evaluación de jugos de caña energética para la producción de alcohol con levadura». UCLV. Trabajo de Diploma. 1996.

Veranero para el cultivo de plantas en clima tropical

Veranero for the Cultivation of Tropical Plants

Manuel Álvarez¹, Lisandro Vázquez¹ y Juan M. Bermúdez²

¹Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGIA),
Ciudad de La Habana, Cuba.

²Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES), Santiago de Cuba, Cuba.
e-mail:malvarez@cubaenergia.cu
e-mail:lisandro@cubaenergia.cu

Resumen

El veranero es una cámara solar de clima controlado en la cual se cultivan vegetales y otras especies de plantas típicas de temporada invernal durante todo el año. En la cámara pueden crearse todas las condiciones climáticas para cada cultivo. El presente trabajo muestra las características constructivas del veranero, así como los conocimientos básicos necesarios en su funcionamiento. Además, contiene las instrucciones para su correcta explotación y el mantenimiento preventivo de los componentes fundamentales de la instalación.

Palabras clave: Energía solar, cámara de clima controlado, fotosíntesis, filtro óptico líquido, veranero.

Abstracts

Veranero is a solar climate-controlling chamber where the growing of vegetables and other species of typical plants of winter season all year round is performed. All kind of climate conditions are set up for each crop. This paper presents the constructive characteristics of the *veranero*, as well as the basic necessary knowledge for its operation. Instructions for its proper exploitation and preventive maintenance of fundamental components of the installation are also provided.

Key words: Solar energy, climate-controlling chamber, photosynthesis, liquid optical filter, *veranero*.

Introducción

A partir de los resultados obtenidos [Bérriz, *et al.*, 1992, 1995 y 1996] en las pruebas experimentales a nivel de laboratorio con diferentes filtros ópticos líquidos coloreados y en las experiencias prácticas de funcionamiento de un veranero de 3 x 1,5 m, se concibió la actualización y adaptación de la concepción general de una instalación de veranero de 6 x 6 m para el cultivo de plantas típicas de invierno en verano, como parte del proceso de escalado.

Descripción de la cámara de clima controlado

El veranero fue construido como una nave cuadrada de 6 x 6 m y altura de 2 m, con paredes de bloque ahuecados de concreto de 15 cm de espesor y acabado con mortero fino; el piso está compuesto por capas sucesivas de

lajas, grava, gravilla y zeolita para garantizar el drenaje; el techo lo forma una estructura metálica soporte de un recipiente de fondo y paredes de policarbonato alveolar de 16 mm de espesor y altura de las paredes de 150 mm; las dimensiones del fondo están acordes con las de la cámara. En la figura 1 se muestra el prototipo construido.



Fig. 1. Prototipo de veranero de 6 x 6 m².



Fig. 2. Filtro óptico del veranero.



Fig. 3. Detalle de las tuberías de llenado del filtro óptico líquido.

El techo de la cámara se puede observar en las figuras 2 y 3, formado por dos planchas de policarbonato doble de 2 x 6 m y espesor de 17 mm, que descansan sobre una estructura de barras cuadradas de acero de 20 mm de espesor, separadas entre sí a 0,5 m y colocadas sobre las cuatro vigas tipo I de 15 x 20 cm con espesor de 7 mm.

Estas vigas están separadas entre sí por una distancia de 2 m. Todo el perímetro de la cubierta está construido con listones de policarbonato doble a una altura de 17 cm. Todas estas piezas plásticas se unieron con silicona resistente al agua.

En la figura 4 se observa la instalación del suministro de agua y la solución correspondiente hacia el filtro óptico por medio de tuberías provenientes de los tanques de llenado, situados en la parte superior de la estructura metálica auxiliar. Esta estructura es abierta con dos niveles. Al nivel de piso se instalaron tres tanques de polietileno para la recolección de la solución que se evacua del filtro óptico. En el nivel superior se ubicaron dos tanques de polietileno para el suministro de la solución al filtro óptico; además, se situaron dos tanques de fibrocemento destinados a agua potable de abastecimiento en

todas las fases de la tecnología de explotación del veranero. En esta zona se situaron, sobre un pedestal, las bombas de trasvaso de agua potable y la solución del filtro óptico.



Fig. 4. Estructura de los tanques que suministran agua y solución al filtro.

En el fondo del recipiente del filtro óptico líquido existen tres aberturas con válvulas y tubería colectora de 101,6 mm de diámetro para la evacuación de la solución del filtro óptico de las aguas de lavado del recipiente o las precipitaciones atmosféricas, según corresponda. En la figura 5 se muestra a lo largo de las paredes Este y Oeste cómo se extienden los intercambiadores de calor del sistema de climatización formados (tubos de 48,1 mm de diámetro, con aletas de acero galvanizado de 152,4 mm de diámetro exterior).



Fig. 5. Intercambiadores de calor ubicados en las paredes interiores del veranero.

También existe una batería de intercambio de calor a lo largo de la zona central de la parte superior de la cámara interior, colocada cerca de la estructura que soporta el filtro óptico líquido.

El suministro de agua a la instalación se realiza desde dos tanques circulares de hormigón ubicado a una distancia de la instalación de 3 metros al nivel del piso; realiza la función de cisterna para el suministro de agua potable. Estos tanques ya existían con anterioridad y forman parte de las instalaciones del polígono experimental del Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES). Sus dimensiones son: diámetro interior 4,00 m; altura 1,5 m; volumen 18,8 m³. De aquí es bombeada a dos tanques de asbesto cemento de 1892

de capacidad cada uno, colocados en la parte superior de la estructura metálica auxiliar en el lado Oeste de la instalación (ver Fig. 4).

Estos tanques suministran agua al tanque de agua fría, al sistema de riego y al área del veranero (facilidades de uso). En caso necesario, para lavado y reposición por pérdidas evaporativas, también puede suministrar agua al filtro óptico líquido. La bomba utilizada es centrífuga CM 50 de 370 W de potencia eléctrica.

La instalación está calculada para mantener una diferencia de temperatura de aproximadamente 5 °C por debajo de la temperatura ambiental mediante un sistema de climatización.

La utilización del filtro óptico líquido sólo deja pasar al interior de la cámara la parte del espectro de la radiación solar fotosintéticamente activa, eliminando la radiación no útil. La potencia de la radiación en el interior de la cámara puede ser regulada en un rango de 50-250 W/m² por medio del espesor de la columna líquida del filtro óptico entre los límites de 0-10 cm. Otros rangos de potencia de la radiación requerida pueden ser logrados a través de variaciones de la concentración y la naturaleza de los pigmentos componentes de la solución filtrante.

Debido a que el filtro óptico es abierto, la solución que lo conforma mantiene su temperatura constante en concordancia con la del medio ambiente que lo circunda por el efecto de enfriamiento evaporativo, por este concepto se evaporan 3-4 L/día de agua como promedio, comprobado experimentalmente, que se reponen diariamente para mantener constante la composición de la solución.

Los parámetros de la composición físico-química del aire en el interior de la cámara (humedad relativa, contenido de CO₂ y otros) pueden ser variados según las necesidades de desarrollo de las especies que en él se cultivan y las tecnologías empleadas para el cultivo.

A la entrada del veranero por el lado Sur existe un local auxiliar de 3,20 x 3,80 m de dimensiones lineales con paredes similares y techo de placa y rasilla, destinada a labores de laboratorio. En su interior, a la derecha, posee una meseta de trabajo con fregadero y a la izquierda otra meseta, debajo de la cual está situado el tanque de agua fría que posee las siguientes dimensiones: largo 2,50 m; ancho 1,00 m; altura de trabajo 1,00 m; altura total 2,00 m; volumen de trabajo 2,50 m³; volumen total, 4,50 m³ (Fig. 6). Además, se construyó una meseta con un fregadero con dimensiones de 0,60 x 2,80 m. Ambas mesetas están cubiertas con azulejos. Este local tiene una puerta de entrada de madera y policarbonato, de 1 400 x 2 100 mm.; a ambos lados hay dos ventanas de pivote horizontal de 0,6 x 0,7 m, hechas de madera y vidrio ordinario.

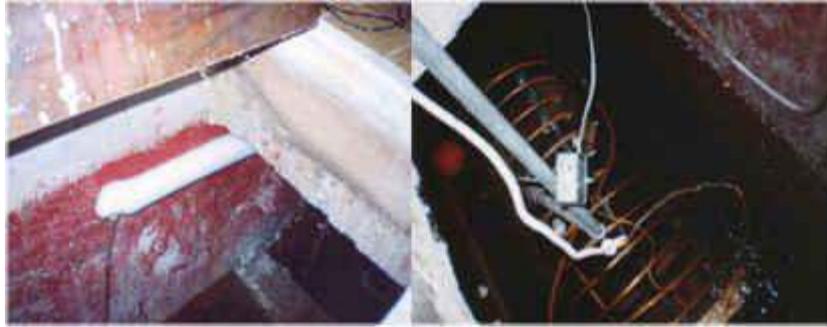


Fig. 6. Tanque de agua fría.

En las paredes Este y Oeste de este local también tiene ocho ventanas de este tipo. La puerta divisoria entre este local y la cámara interior del veranero es de madera, dos hojas de 1 400 x 2 100 mm. A ambos lados tiene dos ventanas cerradas de vidrio de 0,6 x 0,8 m que permiten la observación en el interior de la cámara desde el área de laboratorio. Hacia el lado Oeste, al lado de dicho local, se construyó la caseta de la unidad condensadora y la bomba de agua fría, con techo de placa y rasilla. En la figura 7 se muestra la caseta, la unidad condensadora y la bomba de agua fría.



Fig. 7. Bomba de agua fría y unidad condensadora.

El suministro eléctrico requerido por el veranero para su operación es de 220 V ~ trifásico, con una potencia nominal de 3 kW. En la tabla 1 se muestran las dimensiones fundamentales del veranero.

Tabla 1. Dimensiones del veranero

Largo	6 000 mm
Ancho	6 000 mm
Altura	2 500 mm
Superficie total	36 m ²
Superficie útil	30 m ²
Volumen total	90 m ³

Instalación y funcionamiento de los sistemas componentes del veranero

Sistema de climatización

Para asegurar los requerimientos de los productos en estas cámaras se pueden emplear equipos de aire acondicionado de ventana y los sistemas de enfriamiento por aire quieto (con agua).

Particularidades de los equipos de aire acondicionado de ventana:

- Su costo está en el orden de 600 USD/TR.
- En caso de rotura o interrupción del fluido eléctrico no se puede evitar el daño de los cultivos (no existe acumulación de frío).
- Debido a la velocidad del flujo de aire se pueden dañar los cultivos.

Teniendo en cuenta la elevada incidencia que los costos asociados a la energía eléctrica tienen en el costo total en el funcionamiento de instalaciones de climatización, se justifican soluciones técnicas que mejoren la reducción de tales gastos. En este sentido, los sistemas de almacenamiento por frío (tanques de hielo, depósitos de agua helada, soluciones de sales eutécticas, etc.) puede ser una buena opción, pues contribuyen a una reducción de la potencia instalada y permite el funcionamiento de las instalaciones en períodos donde el precio de la energía eléctrica es barato. En el convencimiento de que estas instalaciones pueden contribuir a nivel global al aplanamiento de la curva de demanda de energía eléctrica, a nivel de usuario permiten reducir los costos energéticos incrementando la seguridad de los sistemas de climatización.

La principal ventaja de los sistemas de agua fría es que logrando almacenar el agua se puede aprovechar su capacidad acumulativa con posterioridad si se producen interrupciones temporales del fluido eléctrico. El enfriamiento con agua da la posibilidad de instalar un sistema de clima de aire quieto que consiste en instalar las tuberías aletadas por cuyo interior circula el agua fría, dentro de la cámara principal del veranero, logrando a través de la convección natural el enfriamiento del aire y la absorción rápida de la radiación por tener un área significativa de aletas y según su conexión al resto del sistema primario de refrigeración, conforma un evaporador del tipo inundado.

Por todo lo anterior, el sistema seleccionado es el de aire quieto para la climatización de la cámara interior del veranero, construido con un sistema de tuberías aletadas de hierro galvanizado (tres partes conectadas en paralelo entre los cabezales de entrada y salida, con diámetros de 38 mm y altura de aleta de 46 mm y paso de aletas de 19 mm. Por el interior de esta tubería circula agua fría, extraída del tanque de agua fría por una bomba centrífuga CM 50 de 370 W (ver Fig. 7). En este tanque, dividido por un tabique con abertura en el fondo, el agua es enfriada por un evaporador formado por dos serpentines de tubería de cobre de 10 mm conectados en serie, inundados y uno de ellos recibe el refrigerante por la parte superior (arriba). El primero actúa sobre el volumen mayor del tanque de agua fría y el segundo sobre el volumen menor, de modo que aquí se pueda enfriar con mayor rapidez.

De acuerdo con los cálculos y experiencias prácticas anteriores, se seleccionó una unidad condensadora Prestcold de 2,24 KW con dos ventiladores de enfriamiento del condensador de 120 W cada uno, para un total de 2,48 kW de potencia eléctrica y 2 TR de capacidad frigorífica para el ciclo estándar (ver Fig. 7).

En el tanque de agua fría está situado un termostato que regula la temperatura del agua dentro del tanque hasta un valor de $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$, para que el sistema tenga la posibilidad de producir una determinada cantidad de hielo, el cual se acumulará y utilizará para mantener establemente la temperatura dentro del tanque, mientras no trabaje la bomba de recirculación de agua fría o cuando falte la corriente eléctrica; y cuando se reponga el fluido eléctrico dar una respuesta rápida para la extracción del calor acumulado dentro de la cámara interior del veranero, de modo que la temperatura no exceda mucho de los límites establecidos.

Está previsto que la acumulación de hielo permita satisfacer el déficit de corriente eléctrica por un período de 4 horas, durante las cuales la bomba de recirculación de agua fría deberá trabajar alimentada por un sistema de respaldo eléctrico.

Materiales y métodos

En las pruebas experimentales se utilizaron piranómetros con una precisión de 95 %, luxómetros PU-150 de precisión de 98 %, termómetro digital FLUKE con precisión de $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, termopares tipo K (chromel alumel) y termómetros de mercurio para medir la temperatura ambiente dentro del veranero y en la tierra contenida en las canaletas. Para la medición de la humedad relativa se utilizaron dos psicrómetros de aspiración, uno TM-6-1 soviético y otro modelo ISUZU japonés con rango de trabajo de -30 a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y escala 1/5.

Las mediciones se realizaron cada 15 minutos en días de enero, febrero, marzo y abril. Se midieron la radiación solar exterior y en el interior de la cámara, regulando de forma manual la altura de la capa líquida para mantener dentro del veranero una intensidad no menor de 200 W/m^2 ($20\ 000$ lux). Con estos valores se obtuvieron las transmisividades efectivas del filtro óptico.

Los sensores del piranómetro y del luxómetro se colocaron dentro de la cámara a una altura de 50 cm y en la zona central de la cámara. Se exploró la homogeneidad del campo de radiación solar dentro de la cámara, colocando el sensor a diferentes alturas y puntos de la cámara.

Análisis de los resultados

En las figuras 8, 9 y 10 se muestran los resultados de las mediciones de la temperatura interior y exterior del veranero para tres de los días que duró el experimento.

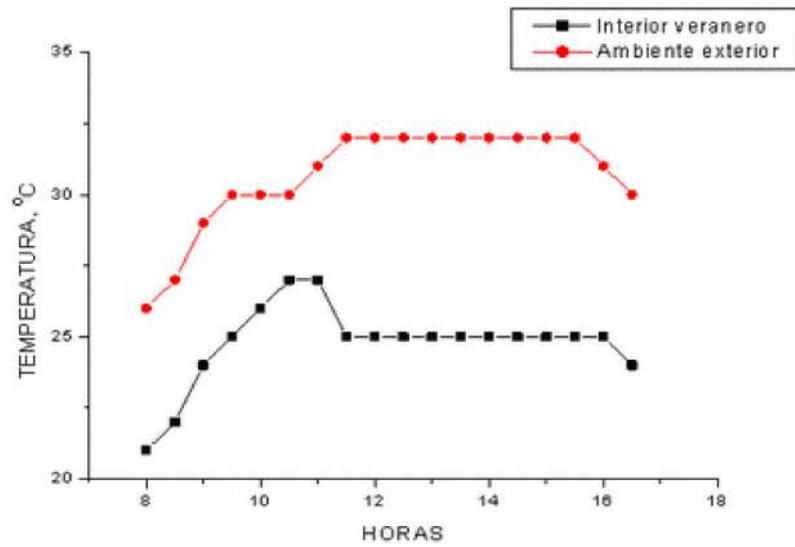


Fig. 8. Temperatura ambiente exterior y en el interior del veranero.

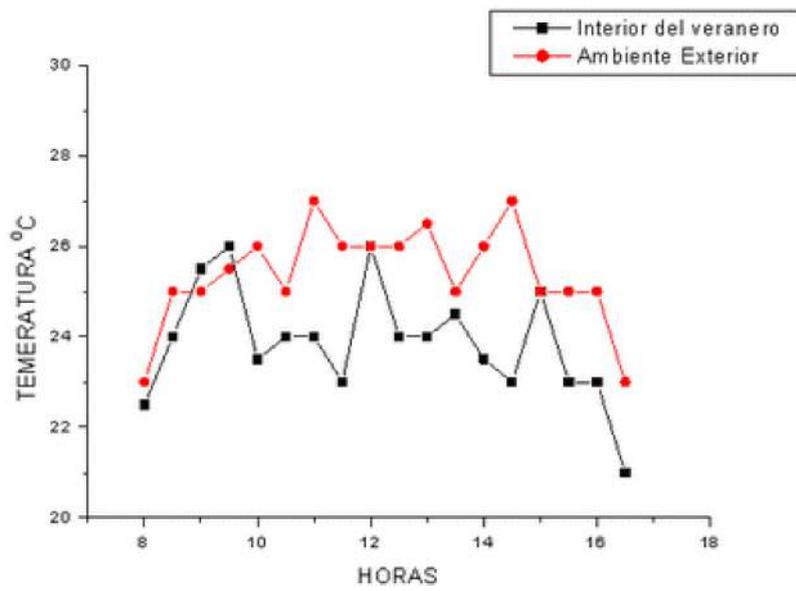


Fig. 9. Temperatura interior del veranero y ambiente exterior.

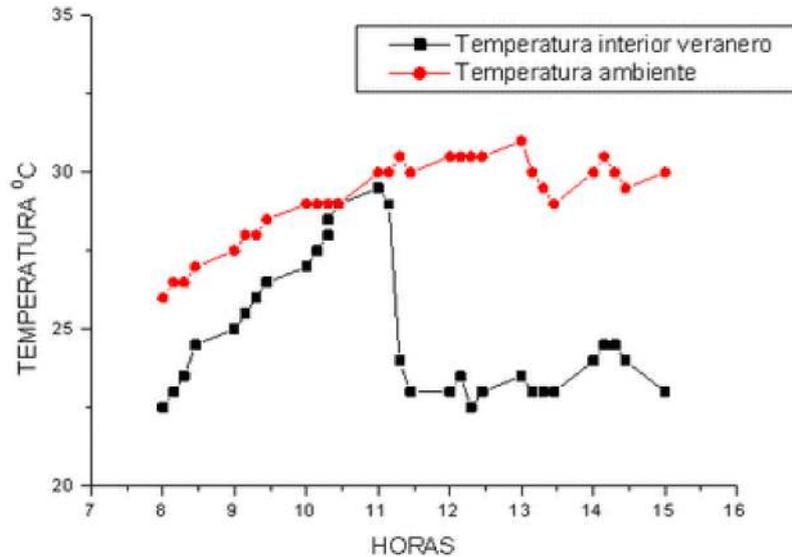


Fig. 10. Temperatura interior del veranero y ambiente.

En las figuras 8, 9 y 10 se observa que como promedio la diferencia entre ambas temperaturas oscila alrededor de 5 °C. Asimismo, se puede apreciar que existen picos de valores de la temperatura interior, que alcanzan y en ocasiones sobrepasan los valores de la temperatura exterior. Esto es debido a los momentos en que hubo ausencia de electricidad que condujo al no funcionamiento de la bomba de recirculación de agua fría. El descenso posterior de esa temperatura dentro del rango de trabajo se logró por el restablecimiento del fluido eléctrico, y la velocidad de respuesta al restablecimiento de los valores de la temperatura está dada por el nivel de acumulación de frío que se pudo lograr antes de la eliminación temporal del suministro eléctrico, con lo cual se verifica también lo correcto de la forma constructiva de la caja de agua fría. No obstante, excepto estos momentos que nunca excedieron de una hora, la temperatura interior se mantuvo dentro de los valores establecidos para los vegetales durante todo el experimento.

En las figuras 11 y 12 se aprecia la diferencia entre los valores de la radiación solar exterior y en el interior del veranero.

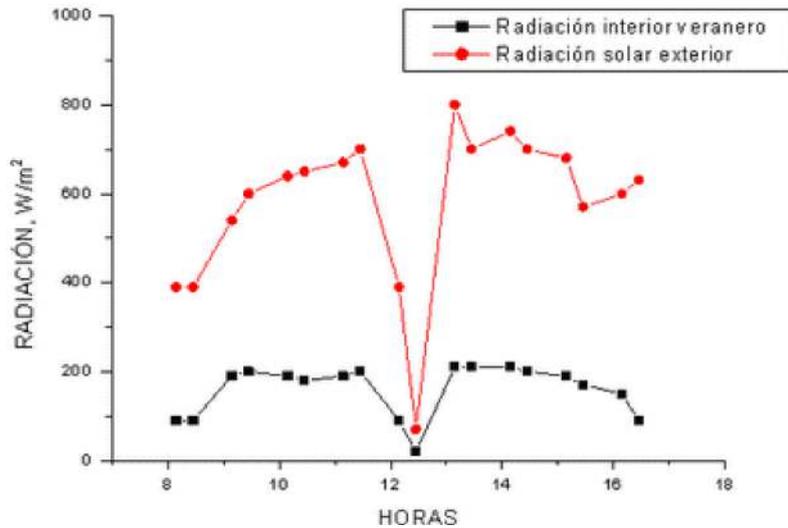


Fig. 11. Radiación solar exterior e interior del veranero.

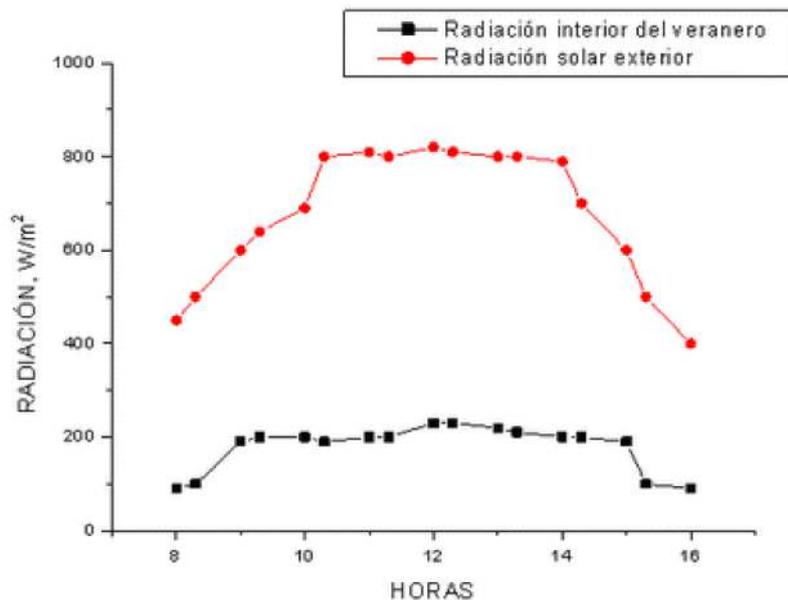


Fig. 12. Radiación solar exterior e interior del veranero.

En la figura 11 se puede observar un mínimo de la radiación solar interior que corresponde a la presencia de nubes en el horario cercano al mediodía. La figura 12 muestra la curva de radiación solar que corresponde a un día claro sin nubes, corroborándose los resultados antes expuestos. El nivel de radiación solar interior se mantuvo alrededor de los 200 W/m² entre las 10:00 a.m. y las 3:00 p.m.

Las mediciones realizadas permitieron la toma de decisiones en cuanto a la operación de los equipos para garantizar la explotación y funcionamiento del veranero dentro de los parámetros establecidos para los cultivos.

En la figura 13 se presentan los resultados del comportamiento de la humedad relativa dentro del veranero para tres de los días que duró el experimento, lo cual se corresponde con los niveles de radiación solar exterior, o sea, que a medida que aumenta la radiación solar exterior, la humedad relativa disminuye, y a partir de las horas cercanas al mediodía comienza a crecer nuevamente. Este parámetro osciló entre 80 y 90 % como promedio en el interior de la cámara. En los días muy nublados y de poca radiación solar la humedad relativa alcanza valores grandes con tendencia a la saturación del aire dentro de la cámara.

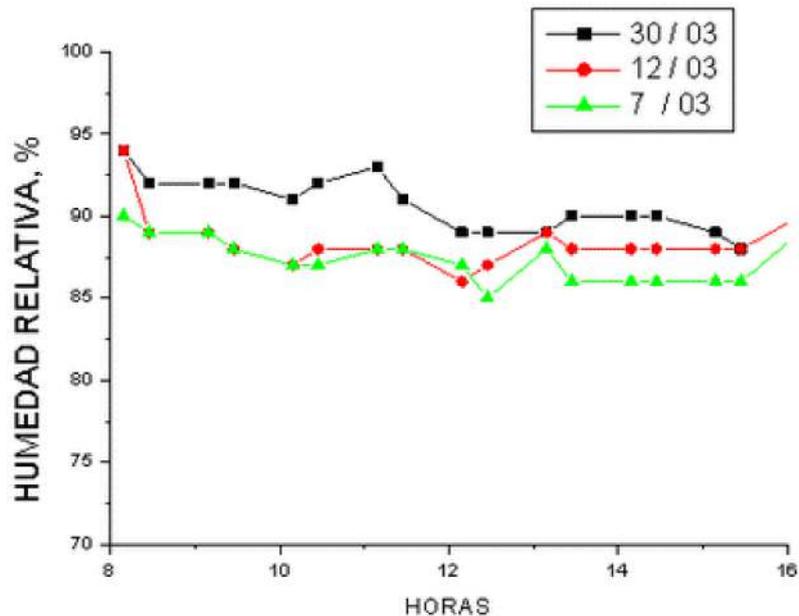


Fig. 13. Humedad relativa en el veranero.

Conclusiones

1. La diferencia entre la temperatura exterior e interior del veranero se mantuvo durante el experimento en 5 °C como promedio. Esto es debido a que la capacidad frigorífica calculada, seleccionada e instalada se corresponde por una parte con los cálculos ópticos y de carga térmica realizados; y por otra, con las mediciones efectuadas.
2. La capacidad frigorífica instalada permitió acumular la cantidad de frío necesaria que aportó una velocidad de respuesta suficientemente rápida para restablecer el valor de la temperatura interior del veranero dentro del rango de trabajo fijado, en los momentos de ausencia de corriente eléctrica.
3. El filtro óptico líquido permitió regular el nivel de iluminación y de radiación solar en el interior de la cámara dentro del rango de valores de los parámetros de explotación previamente fijados y contribuyó a regular los rangos de temperatura de trabajo necesario y previamente establecido.
4. El comportamiento óptico y térmico de la instalación durante el período experimental demostró la veracidad de las metodologías y los criterios de cálculo utilizados, dentro del límite de errores permisibles para aplicaciones ingenieriles.

Bibliografía

BÉRRIZ, L.; L. VÁZQUEZ Y M. ÁLVAREZ. «Controlled climate chambers using solar energy to agricultural applications for tropical countries». *World Renewable Energy Congress. Proceedings*. Vol. III. Denver, Colorado, USA. 15-21 de junio de 1996. Editado por A. A. M. Sayigh. Pergamon. pp. 1876-1879.

BÉRRIZ, L.; L. VÁZQUEZ Y M. ÁLVAREZ. «Veranero para el cultivo de vegetales en clima tropical». Certificado de autor de invención No.22384. Clasif. Int.: A010 9/14. 25.04.1995.

-----, «Veranero para el cultivo de vegetales en clima tropical. Propuesta de desarrollo». Informe del CIES. Marzo de 1992.

-----, «Veranero para el cultivo de vegetales en clima tropical. Principios básicos y concepción general». Informe del CIES. Octubre de 1992.

Obtención de la superficie selectiva cromo negro a nivel de planta piloto para colectores solares planos

Obtention of Black Chrome Selective Surfaces at Pilot Plants for Solar Collectors

Manuel Álvarez González¹, Juan Bermúdez Torres² y Yalile Alfonso Valdés¹

*¹Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGÍA),
Ciudad de La Habana, Cuba.*

*²Centro de Investigación de Energía Solar (CIES), Santiago de Cuba, Cuba.
e-mail: malvarez@cubaenergia.cu y yalile@cubaenergia.cu*

Resumen

Con la experiencia obtenida en el electrodeposición de superficies selectivas cromo negro en el laboratorio se ha depositado este recubrimiento a nivel de planta piloto sobre aletas de cobre previamente niqueladas, con vista a su utilización en colectores solares planos. En este trabajo se describe la preparación de superficies selectivas cromo negro y se reportan los valores de la absorbencia y la emisividad con respecto a los parámetros experimentales.

Palabras clave: Superficie selectiva, cromo negro, planta piloto, colectores solares planos.

Abstracts

With the experience obtained in the electrodeposition of black chrome selective surfaces in the laboratory, this covering has been deposited on the copper blades previously bathed with nickel at the pilot plant to be used in flat solar collectors. This paper describes the preparation for black chrome selective surfaces, absorbency and emissivity values are reported on the experimental parameters.

Key words: Selective surface, black chrome, pilot plant, flat solar collectors.

Introducción

Del estudio del balance de energía de los colectores solares [Duffie y Beckman, 1996] se demuestra la conveniencia de que la superficie selectiva absorbidora posea un valor alto del coeficiente de absorción solar α_s y una baja emisividad térmica ϵ para longitudes de onda larga $\lambda > 2 \mu\text{m}$. Esta combinación de las propiedades ópticas de la superficie es posible debido a que existe una separación en el rango de longitudes de onda de la radiación solar incidente (fuera de la atmósfera terrestre 98 % del espectro corresponde a longitudes de onda menores que $3 \mu\text{m}$) y las correspondientes a las emitidas por la superficie (menores de 1 % son menores que $3 \mu\text{m}$ para una superficie negra a $130 \text{ }^\circ\text{C}$).

Precisamente, el presente trabajo describe un proceso tecnológico en el cual se experimentó con cromo negro como superficie selectiva absorbidora de recubrimiento de aletas de colectores solares planos, basados en

experiencias reportadas en trabajos anteriores [Azimov, *et al.*, 1980-1981; Álvarez y Faysiev, 1982, Álvarez y Perera, 1985].

Materiales y métodos

Aplicación de sistema absorbedor selectivo a colectores solares para calentamiento de agua. Como sustratos de los sistemas para la evaluación se utilizaron los siguientes materiales: superficie de cobre, con la que se construyeron las aletas captadoras, y capa de níquel electrofítico semibrillante (espesor 15-20 μm). En calidad de absorbedor se aplicaron capas de cromo negro, por vía electrofítica a nivel semindustrial, en la planta piloto de recubrimientos metálicos del Centro de Investigaciones Metalúrgicas (CIME).

Instalación para la aplicación del cromo negro

Debido a que el equipamiento disponible para la aplicación electroquímica del cromo negro, para el recubrimiento de aletas de colectores solares, no presentó la capacidad requerida tanto en volumen de las cubas como los rectificadores de corriente, se procedió a llevar las aletas a las dimensiones de 315 x 135 mm.

La figura 1 muestra un esquema de la instalación utilizada para el cromado negro, que consta de un rectificador de corriente de 250 A y 12 V (1). La cuba electrofítica (4) está construida con láminas de acero al carbono recubierta interiormente en PVC y dimensiones interiores 500 x 500 x 400 mm, volumen de trabajo 0,1 m³ (100 L). La aleta que se debe recubrir (2) se conecta a la barra catódica, la cual está conectada al polo negativo de la fuente de corriente. Para cerrar el circuito eléctrico se conecta a la barra anódica (que va al polo positivo de la fuente) una lámina de plomo estaño (Pb-90 %) que actúa como ánodo insoluble (3) de dimensiones 500 x 250 x 10 mm.

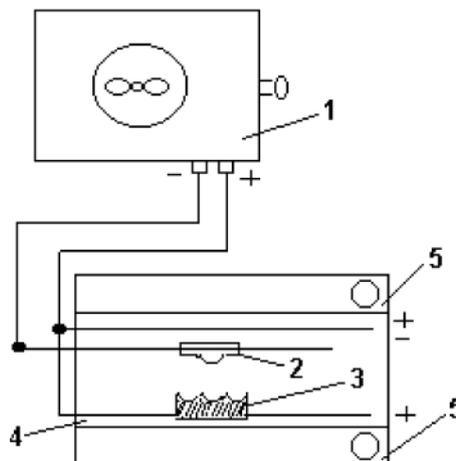


Fig. 1. Instalación para cromado negro.

En el proceso de cromado negro se generan grandes volúmenes de hidrógeno y oxígeno en los electrodos, por lo que resulta imprescindible la instalación en los bordes de la cuba de cajuelas de PVC (5), para la extracción local de aerosoles de solución electrofítica arrastrados por los

gases que se liberan al exterior y que pueden contaminar la atmósfera del puesto de trabajo.

Dispositivo para la aplicación del cromado negro

Para el recubrimiento de la parte frontal de las aletas (Fig. 2), se diseñó un dispositivo construido con láminas de plexiglás (1) con un contacto de platina de cobre (2), al cual se fija la pieza con un tornillo de $\Phi = 6 \text{ mm}$ (3). Las dimensiones del dispositivo corresponden con las medidas de las secciones de aletas de los colectores que se deben recubrir.

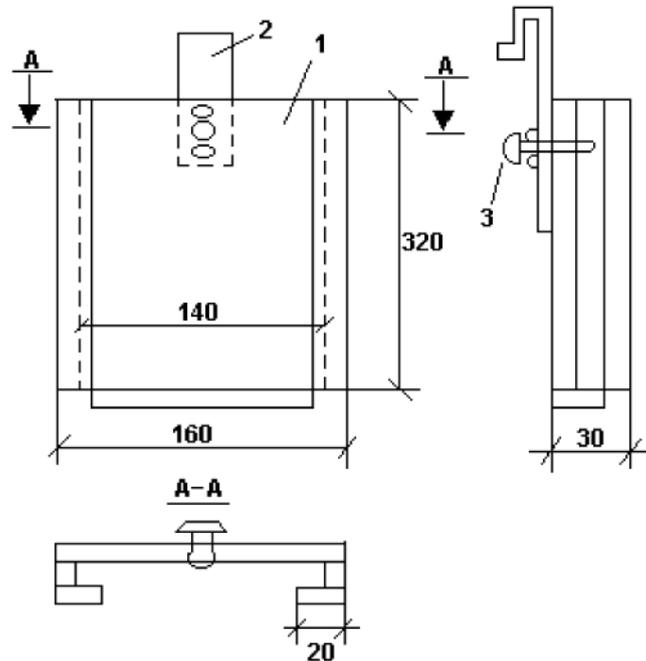


Fig. 2. Dispositivo para la aplicación de cromo negro.

Secuencia tecnológica de elaboración de aletas para colectores solares planos para la aplicación de recubrimientos electrolíticos selectivos

Superficie de trabajo: Para el niquelado es de $8,50 \text{ dm}^2$; para el cromado negro, $4,25 \text{ dm}^2$. El niquelado se realizó por ambas caras y el cromado negro se efectuó por la cara frontal (de captación solar). La figura 3 muestra un diagrama de bloques de cada uno de los pasos del proceso.

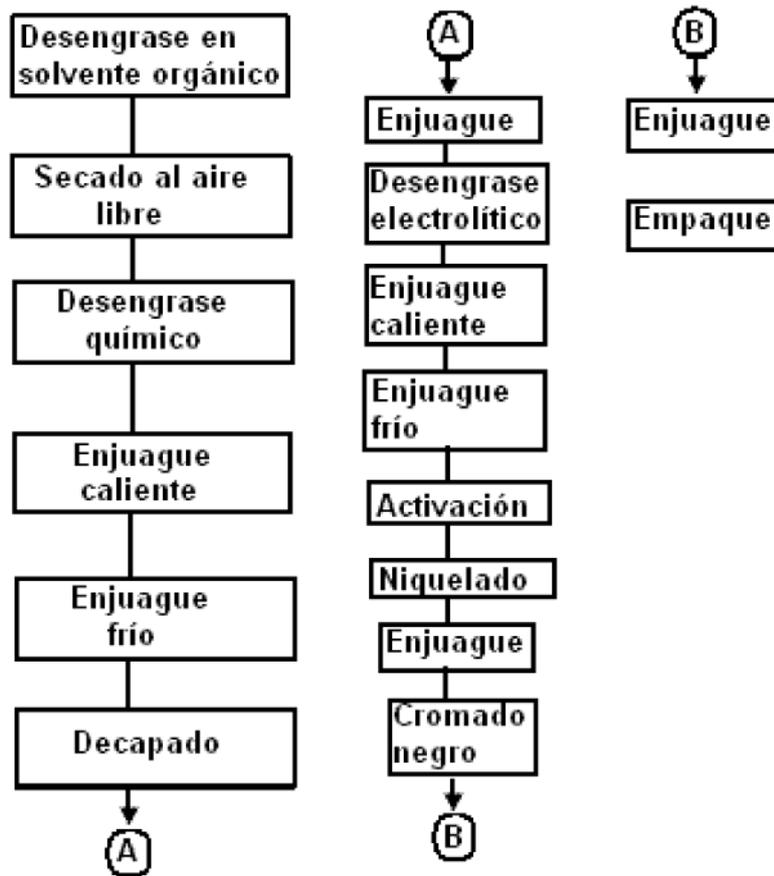


Fig. 3. Diagrama de flujo del proceso tecnológico de cromado negro.

Preparación superficial previa al recubrimiento

Para la preparación superficial previa al recubrimiento se procedió a realizar las siguientes operaciones:

- Desengrase en solvente orgánico con tetracloruro de carbono por inmersión.
- Secado de aire.
- Desengrase químico: Solución alcalina compuesta por carbonato de sodio (50 g/L), fosfato trisódico (10 g/L) y detergente industrial (3 g/L). Régimen de trabajo: Temperatura 60-70 °C; Tiempo: 15 minutos.
- Enjuague caliente: Agua potable a temperatura entre 60 y 70 °C.
- Enjuague frío: Agua potable.
- Decapado: Inmersión en solución ácida compuesta por ácido nítrico (700 g/L) y ácido clorhídrico (10 mL/L). Régimen de trabajo: Temperatura ambiente; tiempo control usual periódico hasta la total desaparición de los productos de corrosión presentes en la superficie.
- Enjuague corriente: Agua potable.
- Desengrase electrolítico: Solución alcalina compuesta por carbonato de sodio (50 g/L), fosfato trisódico (10 g/L), silicato (2 g/L). Régimen de trabajo: Temperatura 60-70 °C; Tiempo 3 minutos (catódico).
- Enjuague agua caliente.
- Enjuague corriente.

- Activación: Inmersión en solución a 5 % de ácido clorhídrico. Régimen de trabajo: Temperatura ambiental; Tiempo 30-40 segundos.

Aplicación de recubrimiento electrolítico

El primer paso consistió en llevar a cabo el niquelado. Como sustratos de los sistemas para la evaluación se utilizaron los siguientes materiales: superficie de cobre, con la que se construyeron las aletas captadoras, capa de níquel electrolítico semibrillante (espesor 15-20 μm) por ambas caras de la aleta en un baño tipo watt:

Niquelado

Composición:

- Sulfato de níquel (330 g/L).
- Cloruro de níquel (60 g/L).
- Ácido bórico (40 g/L).
- Lauril sulfato de sodio (0,5 g/L).
- Urmarina (3 g/L).

Régimen de trabajo:

- Densidad de corriente (3-4 A/dm^2).
- Temperatura (55-60 $^{\circ}\text{C}$).
- Tiempo (20-30 minutos).
- Enjuague de corriente.

Cromado

Como segundo paso se procedió al cromado negro en calidad de absorbedor por vía electrolítica a nivel semindustrial con la solución electrolítica siguiente: Composición:

- Anhídrido crómico (300 g/L).
- Fluoruro de potasio (0,2 g/L).
- Nitrato de sodio (1 g/L).

Régimen de trabajo

Golpe de corriente inicial:

- Densidad de corriente (50 A/dm^2).
- Tiempo (30-40 segundos).

Posteriormente se ajustó la densidad de corriente a 20 A/dm^2 con tiempo de electrodeposición de 2 minutos. Para la cuba electrolítica empleada la densidad de corriente volumétrica máxima es de 2,5 A/L , lo que se corresponde al régimen permisible para que no haya un calentamiento excesivo por corriente óhmica.

Resultados y análisis

Las tablas 1, 2 y 3 muestran las distribuciones de los valores de la absorbencia y la emisividad, en el área del sustrato con recubrimiento

electroquímico cromo negro, a diferentes densidades de corrientes de trabajo y tiempos después de una densidad de corriente inicial de 50 A/dm² y tiempo de 30 segundos.

Tabla 1. Distribución de valores de alfa (α_s) y épsilon (ϵ) en el área de sustrato con recubrimiento cromo negro, para densidad de corriente inicial 50 A/dm² y tiempo 30 segundos, seguidode 30 A/dm² y tiempo 2 minutos

α_s	0,97	0,91	0,89	0,89	0,91	0,91
ϵ	0,10	0,07	0,05	0,05	0,07	0,05
α_s	0,98	0,89	0,87	0,87	0,88	0,95
ϵ	0,10	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05
α_s	0,98	0,95	0,94	0,94	0,91	0,95
ϵ	0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,05

Tabla 2. Distribución de valores de alfa (α_s) y épsilon (ϵ) en el área de sustrato con recubrimiento cromo negro, para densidad de corriente inicial 50 A/dm² y tiempo de 30 segundos, seguido de 25 A/dm² y tiempo de 3 minutos

α_s	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
ϵ	0,20	0,18	0,18	0,08	0,11	0,15
α_s	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
ϵ	0,22	0,23	0,23	0,07	0,11	0,18
α_s	0,98	0,97	0,98	0,98	0,98	0,98
ϵ	0,15	0,14	0,07	0,07	0,18	0,20

Tabla 3. Distribución de valores de alfa (α_s) y épsilon (ϵ) en el área de sustrato con recubrimiento cromo negro, para densidad de corriente inicial 50 A/dm² y tiempo de 30 segundos, seguido de 25 A/dm² y tiempo de 4 minutos

α_s	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
ϵ	0,45	0,35	0,32	0,32	0,40	0,40
α_s	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
ϵ	0,56	0,56	0,32	0,32	0,30	0,30
α_s	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98
ϵ	0,55	0,55	0,30	0,30	0,30	0,30

Como se puede observar en las tablas 1, 2 y 3, no se obtuvo una distribución homogénea del espesor de la capa depositada, lo que se pone de manifiesto a los diferentes valores de α_s y ϵ obtenidos en toda el área recubierta, fundamentalmente para tiempos de 2 minutos (ver Tabla 1). Para tiempos de trabajo de 3 y 4 minutos (ver Tablas 2 y 3), los valores de α_s son homogéneos en toda el área, pero los valores de ϵ indican que la capa no es homogénea. Esto se debe a que la distribución de corriente en toda el área que se debe

recubrir no es la misma, por lo que se obtienen valores mayores en aquellos lugares donde la densidad de corriente es mayor. Esto ocurre principalmente en los bordes, siendo mayor la densidad de corriente en el borde izquierdo de cromo, como se observa en las tablas. La constancia de los valores de α_s para tiempos de 3 y 4 minutos (ver Tablas 2 y 3) está dada porque en estos valores se llega a obtener el valor máximo de α_s , y aun cuando se continúe aumentando el espesor de la capa no aumentaría α_s .

Conclusiones

Con este trabajo se demuestra que en las condiciones de Cuba es técnicamente factible la elaboración de superficies con propiedades selectivas para colectores solares. Los valores de absorbencia y emisividad de la radiación infrarroja son lo suficientemente buenos para competir con los que se reportan por comercializadoras ya establecidas.

Debido a que este es un estudio preliminar, se considera que existe la posibilidad de mejorar la homogeneidad en el área del recubrimiento de los valores de emisividad infrarroja con una optimización del proceso con este fin.

Aunque en este proceso el objetivo fue obtener captadores planos con cromo negro, la tecnología elaborada puede ser adecuada para obtener tubos con cromo negro, con vistas a su utilización en colectores concentradores de la radiación solar.

Bibliografía

- ÁLVAREZ, M. Y C. V. PERERA. Reporte anual. «Optimización de las variables del proceso electroquímico cromo negro». Conferencia Científica, Instituto de Investigación Técnica Fundamental (ININTEF), tomo I. octubre de 1985
- ÁLVAREZ, M. Y SH. A. FAYSIEV. Recubrimiento electroquímico selectivo del tipo níquel negro para colectores solares. Investigaciones sobre la utilización de la energía solar. Editora Academia de Ciencias de Cuba. diciembre, 1982,
- AZIMOV, A. S.; M. ÁLVAREZ Y SH. A. FAYZIEV. Superficies selectivas del tipo cromo negro para colectores solares. Investigaciones sobre la utilización de la energía solar, 1980-1981 (tercer número). Editora Academia de Ciencias de Cuba.
- DUFFIE, W. Y J. A. BECKMAN. *Solar energy thermal processes*. Madrid: Ed. Pergamon Press, 1996.

Validación en la puesta en marcha del prototipo de veranero de 36 m² del CIES: Respuesta biológica

Validation on the Starting Period of CIES 36 m² Veranero: Biological Response

Manuel Álvarez¹, Lisandro Vázquez¹, Juan M. Bermúdez²
y Graciela Olivares³

¹Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGÍA).

²Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES).

³Empresa de Construcciones Militares No. 1 (ECM).

malvarez@cubaenergia.cu

lisandro@cubaenergia.cu

Resumen

El presente trabajo muestra los resultados obtenidos durante el cultivo de diversas especies vegetales cultivadas experimentalmente en la cámara, para la validación de la instalación durante el período de puesta en marcha. Esta experiencia está destinada a conocer la respuesta biológica del cultivo, principalmente en cuanto a germinación y desarrollo de las plantas, o sea, a conocer si dentro de las condiciones climáticas de la cámara pueden germinar y desarrollar su ciclo vital.

Palabras clave: Energía solar, cámara de clima controlado, fotosíntesis, filtro óptico líquido, climate controled chamber.

Abstract

This paper contains the results achieved during the cultivation of several vegetal species which grew in the chamber under experimental basis for the validation of the equipment during the starting period. This experience is aimed at knowing the biological response of the crop, especially when the period of germination and development of the plant takes place, i.e. the main goal is to know if the vegetal species can complete their vital cycle in the climatic conditions of the chamber.

Keywords: Solar energy, climate controlling chamber, photosynthesis, liquid optical filter, *climate controled chamber*.

Introducción

El veranero es una cámara de clima controlado en la cual se cultivan vegetales y otras especies de plantas típicas de temporada invernal durante todo el año. En la cámara pueden crearse todas las condiciones climáticas para cada cultivo. En el Centro de Investigaciones de Energía Solar (CIES) se concluyó un proyecto de I+D titulado «Veranero para el cultivo de plantas tropicales», que además de la evaluación del comportamiento de los parámetros térmicos y ópticos [Bérriz, *et al.*, 1992 y 1996], abarcó el análisis de la respuesta biológica de diversas especies en regímenes de trabajo diseñados para esta instalación.

Materiales y métodos

En el interior del veranero se colocaron seis canaletas de asbesto-cemento de 30 cm de ancho, dos de las cuales se ubicaron en los extremos Este y Oeste con una longitud de 5,5 m, y las restantes, de 5 m de longitud cada una, se colocaron en dúos con una distancia de separación de 1,3 m. Fuera de la cámara se colocó una canaleta de igual ancho para realizar el cultivo de tomate, que se utilizó como referencia.

El sustrato utilizado está compuesto por 66,6 % de tierra aluvial, y el resto de abono orgánico procedente de ganado vacuno. En el fondo de las canaletas se colocó una capa de gravilla blanca de 7 cm de espesor para facilitar el drenaje. Con el sustrato se completó hasta una altura de 25 cm.

La mezcla utilizada como sustrato se analizó en el laboratorio y sus resultados son los siguientes:

CE = 2,85 Mnh/cm; pH = 8; P₂O₅ = 27,48 ppm; K₂O = 888 ppm;
MgO = 164,26 ppm.

Las mediciones de longitud se realizaron con cinta métrica y con pie de rey con precisión de 0,05 mm. El peso se verificó con una balanza analítica, con precisión de 0,001 g.

Esta experiencia tuvo como objetivo conocer la respuesta biológica del cultivo, principalmente en cuanto a germinación y desarrollo de las plantas; o sea, conocer si dentro del rango de valores de los parámetros que determinan las condiciones climáticas de la cámara pueden germinar y desarrollar su ciclo vital. Además, se controlaron los siguientes parámetros:

- En el tomate se controlaron el tiempo y el porcentaje de germinación, la longitud promedio de la planta en determinados días después de la germinación (DDG), el porcentaje de floración a los 50 días, el tiempo de fructificación en DDG, el tiempo de comienzo de la cosecha en DDG, así como el número, el tamaño y el peso promedio de los frutos.
- En la habichuela se determinaron el tiempo de germinación, la longitud del tallo a determinados DDG, el tamaño promedio de las vainas y el número promedio de semillas por vaina.
- En la zanahoria y la remolacha se determinaron el número promedio de hojas, las longitudes máxima y promedio de las hojas, y la longitud, el diámetro máximo y el peso promedio de la raíz.
- En el caso de la lechuga se realizó un estudio cualitativo y se pesaron algunas muestras.

Las condiciones de trabajo de la cámara en régimen de explotación para estos cultivos fueron el mantenimiento de un nivel de radiación solar superior a 150 W/m², los niveles de temperatura diurna en un rango de 25 a 28 °C y nocturna de 15 a 17 °C. Para esto fue necesario efectuar mediciones de estos parámetros cada 15 minutos y en dependencia de los valores obtenidos por

los instrumentos de medición, accionar manualmente el sistema de climatización a través de la bomba centrífuga de agua fría, y el nivel de altura del filtro óptico líquido a través de las correspondientes válvulas de carga y descarga.

Análisis de los resultados

Los resultados obtenidos en el cultivo del tomate se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros controlados en el cultivo del tomate

No. de canaleta	Germinación Días y %	% floración 50 DDG	Fructificación DDG	Inicio de cosecha DDG	Diámetro polar (mm)	Diámetro ecuatorial (mm)	Peso del fruto (g)
Co	7 (83,3)	100	54	82	42,6	46,3	48,3
C2	7 (94,4)	82	56	106	56,7	47,5	68,1
C4	7 (29,4)	88	64	96	56,7	47,5	68,1

En la tabla 1 se aprecia que no existió diferencia en el tiempo de germinación, pero el porcentaje de germinación tuvo valores diferentes. En la canaleta C4 se obtuvo un valor bajo, debido fundamentalmente a la baja homogeneidad de la mezcla del sustrato y al hecho de que el abono orgánico no tenía la calidad requerida.

El comienzo de la floración se manifestó igualmente dentro y fuera de la cámara. Para un DDG = 36 en todas las canaletas se presentaron esbozos florales. La floración en el interior de la cámara reportó un retraso y se observó que el porcentaje de floración a los 50 días era menor entre 12 y 18 %, cuando la canaleta exterior ya había llegado a 100 %. Esto contribuyó a que el tiempo de fructificación también se extendiera un poco más, entre 2 y 10 días para las canaletas C2 y C4, respectivamente, con relación a la canaleta de control, y la canaleta C4 tuvo mayor diferencia, pero también fue la de mayor crecimiento.

En cuanto al tamaño promedio de los frutos se observó una diferencia marcada en el diámetro polar (aproximadamente 14 mm) y el peso promedio fue de 19,8 g; se destaca que los resultados obtenidos en las dos canaletas interiores fueron similares (Fig.1).

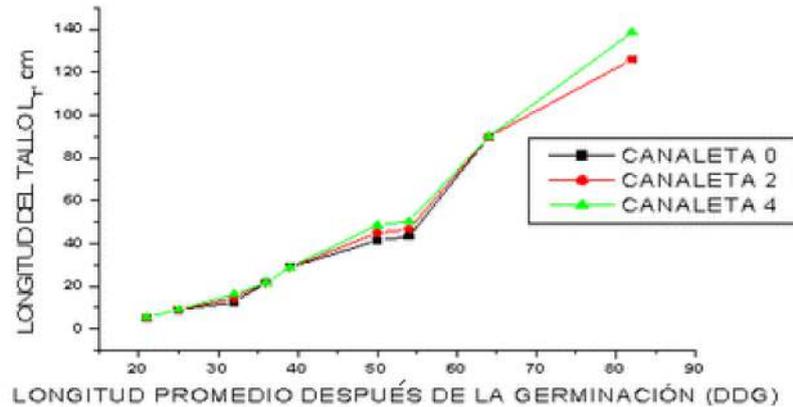


Fig. 1. Comportamiento de la longitud del tallo en función del tiempo.

Como se puede apreciar en la figura 1, las diferencias en la longitud entre las plantas que estaban dentro de la cámara (C2 y C4) con la de control (C0) no son significativas hasta el DDG = 25, cuyo valor está alrededor de los 2 cm. A partir de aquí se puede observar un incremento de la diferencia de longitudes entre ambos grupos, con valores de alrededor de 8 cm para DDG = 54 y alcanzando un máximo de alrededor de 75 cm para DDG = 82.

Se observa, asimismo, una ligera diferencia de longitudes entre C2 y C4 de 5 cm para DDG = 54 y de 17 cm para DDG = 82. Pero en este aspecto debe profundizarse en próximos experimentos, ya que los valores promedio de longitudes se obtuvieron a partir de cinco plantas seleccionadas por cada canaleta (deben considerarse todas las plantas en cada canaleta, para tener una valoración más exacta de la influencia de la sombra y de la temperatura). Los resultados obtenidos para los cultivos de zanahoria y remolacha se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de crecimiento de las zanahorias y remolachas en centímetros y gramos

Número de canaleta	Número promedio de hojas	Longitud máxima promedio de hojas	Longitud promedio de las hojas	Longitud promedio de la raíz	Diámetro máximo promedio de la raíz	Peso promedio de la raíz
C1 Zanahoria	9	75,8	55,4	10,3	3,1	45,6
C5 Remolacha	15	51,6	41,7	7,6	4,8	36,4

Estos dos tipos de hortalizas se cultivaron con las mismas condiciones de cultivo establecidas para el tomate. En este caso la prueba principal fue la obtención de una respuesta de las plantas y la demostración de que podían desarrollarse en estas condiciones de iluminación, radiación solar, temperatura y humedad. Estos valores no son representativos para hacer estudios y conclusiones de productividad.

En la tabla 3 se muestran los valores que se obtuvieron para la habichuela.

Tabla 3. Parámetros controlados de la habichuela (días y cm)

DDG	10	14	21	25	32	36	39
Longitud del tallo	11,05	18,96	24,82	26,62	38,9	77,4	102,2

Además, el tiempo de germinación en este caso fue de 4 días; el tamaño promedio de las vainas, de 30,6 cm, y el número promedio de semillas por vaina, de 12.

Conclusiones

1. La respuesta biológica de las especies cultivadas en el período de validación del prototipo de veranero de 36 m², puesto en marcha en el polígono del CIES, fue positiva y aportó datos de interés para las investigaciones de la variedad de tomate INCA-33.
2. La etapa experimental que se reporta avala al veranero como cámara de clima controlado en condiciones de clima tropical húmedo como el cubano.

Bibliografía

- BÉRRIZ, L.; L. VÁZQUEZ Y M. ÁLVAREZ. «Controlled climate chambers using solar energy to agricultural applications for tropical countries». *World Renewable Energy Congress. Proceedings*. Vol. III. Denver, Colorado, USA. 15-21 de junio de 1996. Editado por A. A. M. Sayigh. Pergamon. pp. 1876-1879.
- .«Veranero para el cultivo de vegetales en clima tropical. Propuesta de desarrollo». Informe del CIES, marzo de 1992.
- .«Veranero para el cultivo de vegetales en clima tropical. Principios básicos y concepción general». Informe del CIES, octubre de 1992.

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>