

ORIENTACIÓN ÓPTIMA DEL COLECTOR DE UN REFRIGERADOR SOLAR

Ernesto Cyrulies y Andrés Sartarelli

Instituto de Desarrollo Humano, Universidad Nacional de General Sarmiento (IDH, UNGS)
J.M. Gutiérrez 1150 Los Polvorines, Provincia de Buenos Aires. ecyrulie@ungs.edu.ar

Recibido:30-6-2016; Aceptado:31-7-2016.

RESUMEN.- En este artículo se presentan los resultados de un estudio que determina cual es la orientación más adecuada que debe tener el colector de un refrigerador solar que funciona por medio de la adsorción de metanol sobre carbón activado. A diferencia de otros sistemas de aprovechamiento de la energía solar, un dispositivo como éste, para el cual se desestima un sistema de seguimiento solar horario, amerita un estudio específico sobre su orientación debido a que la temperatura ambiente es una variable clave ya que es determinante de la temperatura del colector y porque el condensador del dispositivo emite el calor resultante de la condensación al medio ambiente. Se construyó un modelo semiempírico que utiliza la irradiancia y la temperatura ambiente para encontrar los valores óptimos de los ángulos que son tradicionalmente utilizados en la orientación de un colector solar.

Palabras clave: Eficiencia, refrigeración, adsorción.

OPTIMAL ORIENTATION OF THE COLLECTOR OF A SOLAR REFRIGERATOR

ABSTRACT.- In this article we present the results of a study that determines which is the more appropriate direction that must have the manifold of a solar refrigerator that is operated by means of the adsorption of methanol on activated carbón. Unlike other systems for exploiting solar energy, a device like this, for which there is no recommended a system of solar tracking schedule, justify a specific study on its orientation due to the fact that the ambient temperature is a key variable since it is a determining factor in the temperature of the manifold and because the condenser from the device emits heat resulting from the condensation to the environment. A model was built semiempirical that uses the irradiance and ambient temperature to find the optimal values of the angles that are traditionally used in the orientation of a solar collector.

Keywords: Efficiency, refrigeration, adsorption.

1. INTRODUCCIÓN

Existen diferentes tipos de dispositivos que utilizan la energía solar para diferentes fines prácticos. Podemos citar, entre muchos otros, los paneles fotovoltaicos, los colectores para calentamiento de agua y también se tiene el caso de dispositivos que permiten lograr refrigeración a través de la captación de energía solar. En la mayoría de los casos, obtener la mayor cantidad de energía en un tiempo determinado constituye un desafío y una cuestión que puede convertirse en decisiva en el funcionamiento del dispositivo.

Para el caso de colectores planos utilizados para calentamiento de agua y de paneles fotovoltaicos se opta, como regla general, por orientar los captadores con una inclinación respecto del suelo igual a 10° por encima del valor de la latitud. Por otro lado, el rendimiento máximo de estos dispositivos se obtiene cuando la normal a su superficie captora apunte esencialmente al Sol. De este modo, si se espera que esto ocurra para todo momento del día, requerirá algún mecanismo de seguimiento. Además del movimiento aparente producido por la rotación terrestre, debe considerarse que la declinación del Sol varía

notablemente a lo largo del año (aproximadamente 47 grados) lo que agrega otro grado de libertad para obtener aquella orientación óptima. Estas consideraciones pueden desanimar la construcción de dispositivos con mecanismos de seguimiento, particularmente si deben estar automatizados, de lo contrario requerirán una atención permanente. En algunos casos, un mecanismo de seguimiento puede comprometer la viabilidad de un proyecto.

Debido a lo anterior, en muchas aplicaciones prácticas se toma la decisión de orientar el colector de manera permanente a un punto fijo de la bóveda celeste. Esto, naturalmente, reduce la energía total que se capte a lo largo del día, pero resulta ser una solución de compromiso con la que se obtiene una gran simplificación de montaje con la consecuente disminución de costos. Considerando que la trayectoria solar en la bóveda celeste es simétrica con respecto al meridiano local, y que el punto más alto de dicha trayectoria se encuentra en la intersección con dicho meridiano, es evidente que un plano de captación cuyo vector normal esté contenido en el plano meridiano obtendrá un mayor rendimiento (para una inclinación dada respecto

de la horizontal). Esto significa que el panel tendrá un acimut (γ) igual a cero (ángulo medido desde el norte, positivo hacia el este, negativo hacia el oeste). Por otro lado, como la declinación solar (δ) varía permanentemente, si se elige un sistema inmóvil deberá elegirse algún valor intermedio en el cual no se vea seriamente afectada la eficiencia tanto en invierno como en verano. Esto explica que se adopte la regla práctica mencionada más arriba, en la cual se acepta una inclinación (β) respecto del plano horizontal de 10° más que el valor absoluto de la latitud local (ϕ). Cabe aclarar que el ángulo β es negativo para el hemisferio sur. Es decir que para el caso de la ciudad de Buenos Aires ($\phi = -34,5^\circ$) un colector allí instalado con dicho criterio apuntaría al norte y con una inclinación de unos -45° aproximadamente.

2. REFRIGERADORES SOLARES

Con la disposición descrita anteriormente no resulta evidente que se obtienen los mejores resultados cuando se trata de refrigeradores solares que hacen uso de la adsorción, equipos que se desarrollan en el grupo de investigación de la UNGS. Para comprender esto, es preciso conocer básicamente el principio de funcionamiento de esta clase de dispositivos. Desde una descripción general, los mismos cuentan con tres componentes principales: colector, condensador y evaporador (ver figura 1).

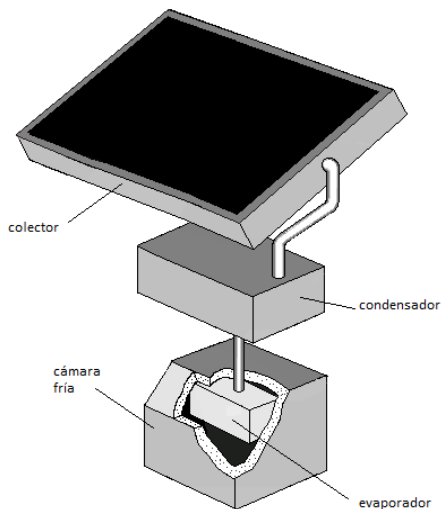


Fig. 1: Componentes básicos de un refrigerador solar

La elevación de la temperatura producida por la energía solar es utilizada para desorber algún tipo de fluido (metanol en nuestro caso) que se encuentra adsorbido sobre un lecho de carbón activado dentro del colector. Durante esta fase, dicho fluido alcanza el condensador cuya finalidad es intercambiar calor con el medio ambiente, lo que produce que el fluido se licúe. Inmediatamente, por acción de la gravedad, el líquido se dirige al evaporador donde es almacenado (figura 2). Este proceso se invierte durante la noche, en la cual la baja temperatura en el colector ocasiona nuevamente la evaporación e inmediata adsorción en el carbón activado. Este último cambio de estado ocasiona que el evaporador tome calor del medio que lo rodea (cámara fría) produciendo hielo que es utilizado con el propósito de la refrigeración (Figura 3). El ciclo, como puede entenderse,

es diario. (Pueden verse más detalles en "Construcción de una heladera solar por adsorción" Sergio Vera et al, 2008, "Prototipos de refrigeradores solares por adsorción", Sergio Vera et al, 2011).

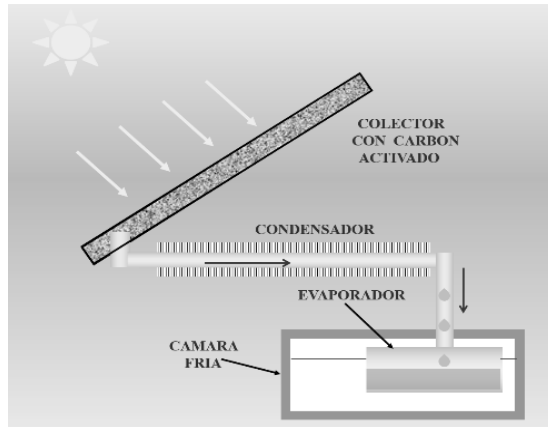


Fig. 2: Desorción producida por el aumento de temperatura en el colector y acumulación de metanol líquido en el evaporador durante el día.

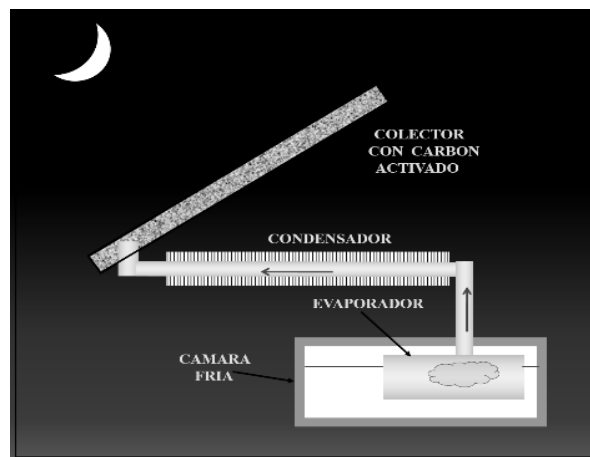


Fig. 3: Adsorción en el carbón activado que provoca la evaporación de metanol que es aprovechada para la producción de frío.

En el caso de un refrigerador de este tipo, la orientación del colector requiere un análisis más cuidadoso si desea determinar con cual dirección del colector efectivamente se obtiene el mayor aprovechamiento del equipo. Una cuestión a considerar es que la temperatura del colector es dependiente, tanto de la irradiancia como de la temperatura ambiente. El otro aspecto clave a considerar aquí es la necesidad de condensar el fluido que está siendo desorbido durante el día, ya que el condensador utilizado es un intercambiador de calor cuyo rendimiento depende de la temperatura ambiente. Por lo tanto, para la máxima irradiancia, la que se alcanza en el mediodía solar (con cielo claro), el condensador tendrá que liberarse del calor contra una temperatura ambiente habitualmente mayor a la correspondiente a otras horas del día (pero en las que la irradiancia será menor). El proceso de desorción podría producirse durante un intervalo temporal en el cual la irradiancia sea suficiente (aunque no alcance los valores más altos para ese día) como para desorber y condensar una

determinada cantidad de metanol. La hipótesis en un trabajo previo del grupo (Cyrulies et al. 2010) fue que el intervalo más adecuado no esté en torno al mediodía solar, sino que se situaría hacia horas más tempranas, cuando la temperatura ambiente por lo general es inferior. Esta última característica que es propia de días claros, puede observarse en la figura 4, correspondiente al 21 de diciembre para la ciudad de Buenos Aires, (promedio de ocho años) en el cual se registran mayores temperaturas hacia la tarde.

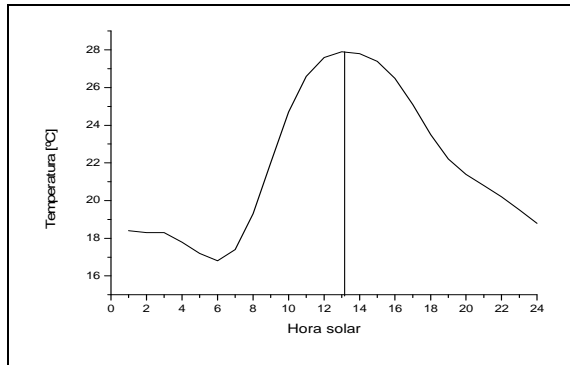


Fig. 4: Temperatura ambiente en función de la hora solar

3. DESARROLLO

Para determinar la dependencia del proceso de la desorción con la orientación del colector del equipo, se requiere conocer la temperatura ambiente para cada momento del día, lo cual, naturalmente es diferente a lo largo del año. Para esto se recurrió a datos que han sido otorgados por el Servicio Meteorológico Nacional en la ciudad de Buenos Aires (estación Villa Ortúzar). Con los registros mencionados (de ocho años) se ha tomado un promedio para las mismas horas del día ajustando para los valores intermedios con un modelo matemático adecuado, quedando entonces un registro cada minuto.

Además, se ha desarrollado un modelo (en Matlab) que hace uso de las ecuaciones que son normalmente utilizadas en los estudios de aprovechamiento de la energía solar. Con el mismo se obtuvo el valor de la irradiancia instantánea cada minuto durante las horas de sol y en función del día juliano para nuestra posición geográfica (Los Polvorines, provincia de Buenos Aires, - 34° 31', 58° 42' O). Se determinó además la fracción de la irradiancia que es capaz de captar el colector para diferentes valores de los ángulos β y γ dentro de un intervalo suficientemente amplio para cada uno. La razón de considerar la variación de ambos ángulos obedece a que la modificación de γ , con el propósito planteado en el presente trabajo, requiere reconsiderar el ángulo β para optimizar las condiciones de desorción. Concretamente (y si sólo se considera la radiación directa), para un $\gamma = 0$, es decir con el colector en la dirección del plano meridiano y orientado al norte, puede entenderse que β debe tener un valor tal que la normal al plano del colector señale al punto que surge de la intersección de la eclíptica con el meridiano local en la esfera celeste (con lo dicho resulta $\beta = \varphi - \delta$; con $\delta < 0$ en hemisferio sur). Pero, si en estas condiciones se gira horizontalmente el colector ($\gamma \neq 0$), aquella normal deja de apuntar al punto referido como tampoco lo hará, esencialmente, a ningún otro correspondiente a la trayectoria solar con la consecuente baja en la captación de energía. Sin embargo, una adecuada combinación de ambos ángulos

puede resultar en un mayor aprovechamiento del equipo. Cabe aclarar que además es necesario considerar la radiación difusa que alcanza el colector teniendo en cuenta que el factor de visión del mismo dependerá también del ángulo β . Esto, junto a todo lo expuesto anteriormente, será otra variable que defina la adecuada orientación. Vale aclarar que luego de una evaluación del valor de la incidencia del albedo, se decidió despreciarlo en función del tipo de terreno donde se emplazaron los equipos.

En el modelo matemático semiempírico construido, se toma la irradiancia global y la temperatura ambiente para determinar la temperatura del colector, la que a su vez define la concentración de metanol en el colector cada minuto considerando un estado estacionario. Esto se consiguió a partir de una serie de mediciones de temperatura de los componentes de un prototipo de refrigerador y la irradiancia en diferentes días del año. Esta última fue registrada con un solarímetro diseñado y construido por el grupo de investigación (Echarri et. al, 2009; Sartarelli et. al, 2010).

En la figura 5 se muestra el diagrama que sintetiza el proceso efectuados por el programa para obtener los resultados.

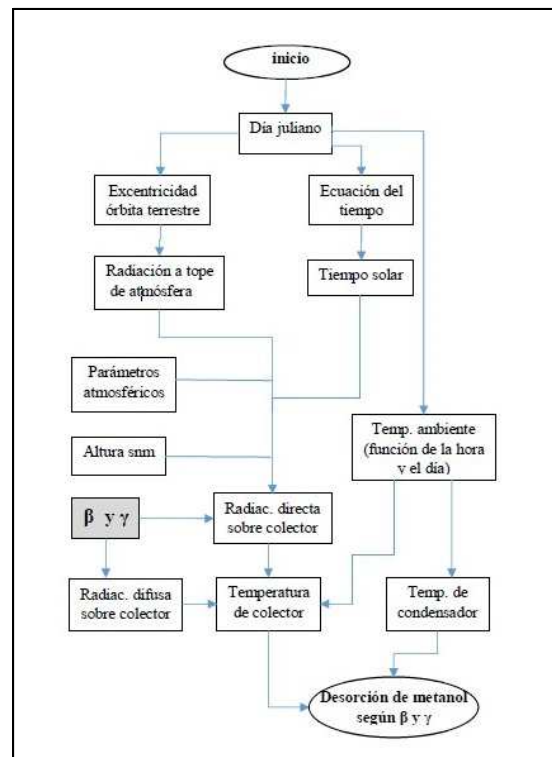


Fig. 5: Diagrama de flujo del programa desarrollado en Matlab

Por otro lado, puede verse en la figura 6 las gráficas, correspondientes a los días de equinoccio y a los de solsticio, donde se representan la temperatura de colector como función de la hora del día. Luego, con el modelo descrito, se hizo uso del valor teórico de radiación y del promedio de temperaturas para obtener aquella función.

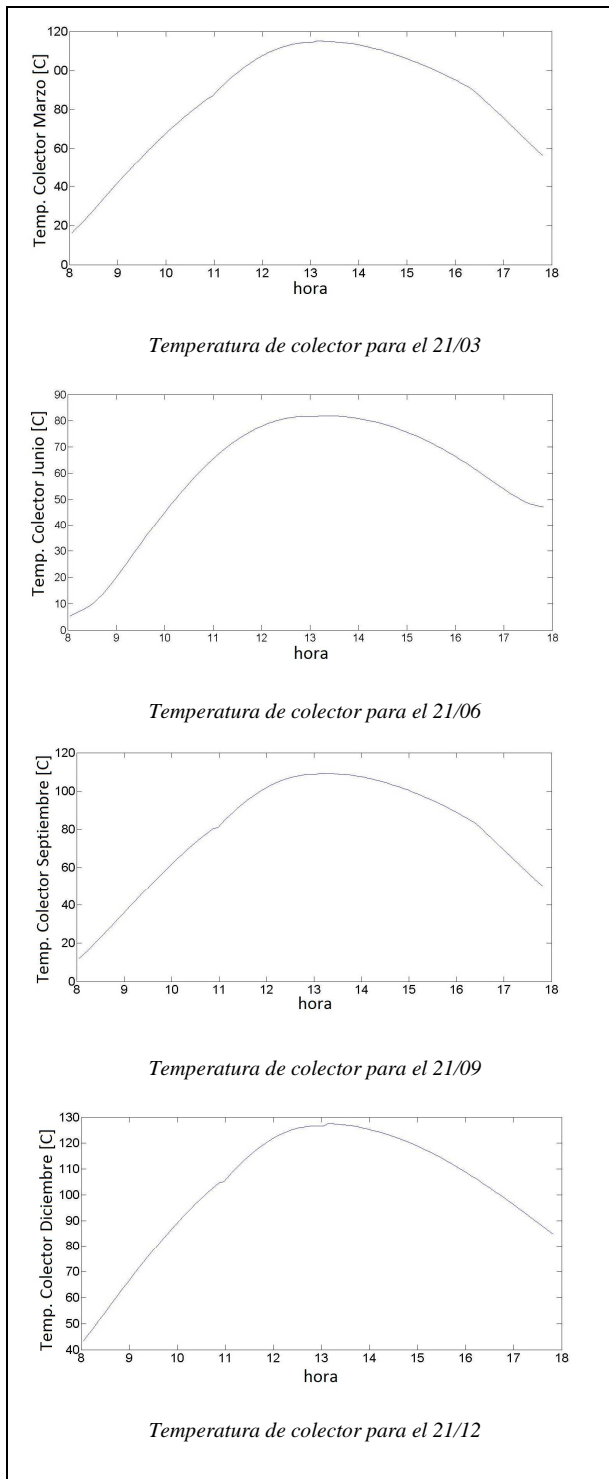


Fig. 6: Gráficos de temperatura de colector en función de la hora. Los mismos se construyeron a partir de datos empíricos estableciendo una relación funcional con la temperatura ambiente y la irradiancia.

Una mayor temperatura en el colector produce una menor concentración de metanol adsorbido, lo que significa que se tendrá mayor cantidad del mismo, en estado líquido, dentro del evaporador; lo cual es un indicativo de la cantidad de hielo que pueda producir el refrigerador durante el período nocturno subsiguiente (pero como se adelantó, la temperatura ambiente también es una variable relevante en el proceso).

Naturalmente, el modelo requiere ser ajustado para el caso de otros refrigeradores similares debido a que la correlación de la temperatura del colector con las variables mencionadas será diferente. Estrictamente, esto no sólo se diferencia por las características constructivas, inclusive el tipo de carbón activado a utilizar influye en la temperatura del colector ya que una mayor capacidad adsorptiva ocasionará una disminución de aquella.

Con todo lo anterior, para obtener finalmente la concentración de metanol en el carbón activado se hace uso de la ecuación de Dubinin - Astakhov, la cual modeliza adecuadamente el comportamiento de nuestro refrigerador:

$$x(P, T) = W_0 \rho_l \exp \left[- D \left(T \ln \frac{P_{SAT}}{P} \right)^n \right] \quad (1)$$

En esta expresión, la razón entre la masa de metanol adsorbido y la de carbón utilizado como adsorbente está representada por $x(P, T)$, P es la presión, T es la temperatura absoluta (en grados Kelvin). El parámetro W_0 es la razón máxima de metanol adsorbido y ρ_l a la densidad del metanol adsorbido. D representa un parámetro de "afinidad" que depende del potencial de interacción entre el metanol y el carbón activado. P_{SAT} es la presión de equilibrio líquido-vapor del fluido. Estudios previos (Sartarelli et. al. 2012, Sartarelli et al, 2015) arrojaron, efectivamente, diferentes valores para los parámetros mencionados según el carbón utilizado en el colector, lo cual incide sensiblemente en la cantidad de metanol circulante en el sistema. Se eligieron para los cálculos en el presente trabajo los parámetros de un carbón activado en particular, cuya denominación comercial es WS470.

4. RESULTADOS

Con el modelo construido se logró calcular la cantidad teórica de metanol circulante en función de la inclinación β del colector y de su acimut γ para diferentes días del año. Se presentan a continuación los resultados para cuatro días que pueden ser considerados claves por establecer cambio de estación del año: los correspondientes a equinoccios y solsticios. Para este trabajo se acotaron los intervalos de los ángulos considerados a los valores más allá de los cuales no resultan de interés por disminuir notoriamente la eficiencia del refrigerador.

Para el caso del acimut el intervalo elegido es:

$$-20 \leq \gamma \leq 20$$

Luego, para β centramos su intervalo en el valor correspondiente al caso en el que el vector normal al plano colector apunta al Sol en el mediodía solar, para cada día considerado. Esto es:

$$\varphi - \delta - 20 \leq \beta \leq \varphi - \delta + 20$$

Con las consideraciones anteriores se construyeron gráficos que representan la producción de metanol en función de los ángulos de colector. Los mismos se muestran en la figura 7 de donde se puede interpretar que la orientación del colector es decisiva para un adecuado funcionamiento del refrigerador.

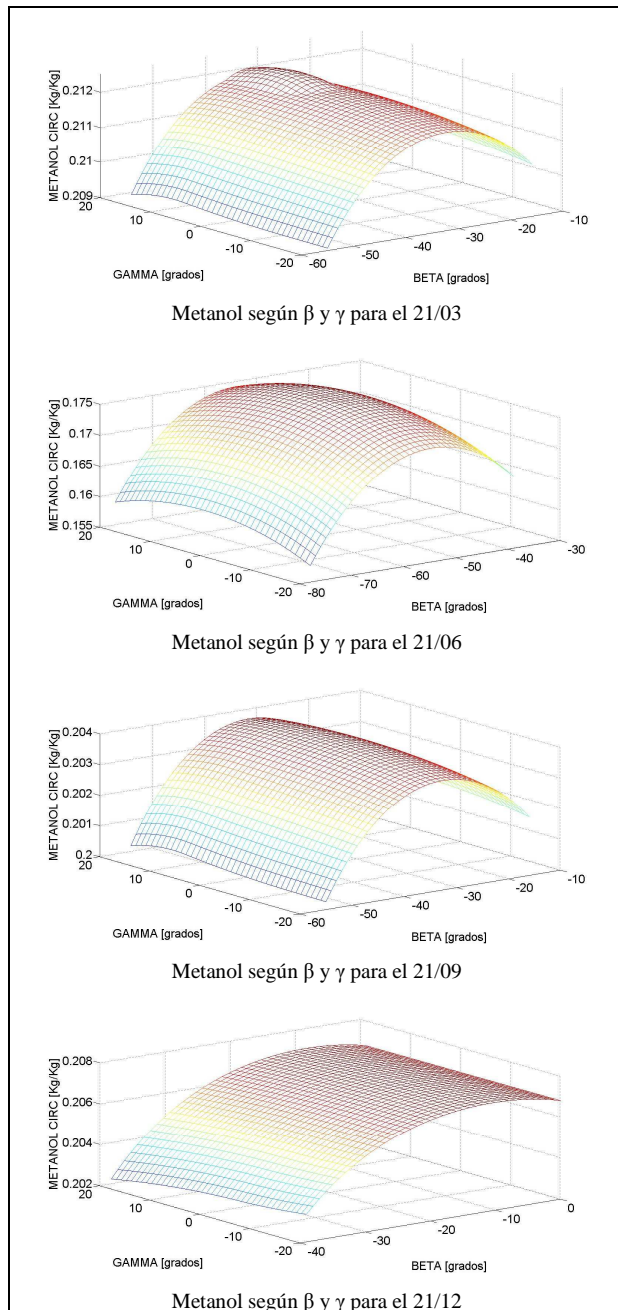


Fig. 7: Gráficos de la desorción de metanol como función de β y γ para los cuatro días elegidos.

De las funciones graficadas en la figura 7 se obtuvieron los máximos valores de desorción que corresponden, como se adelantó, a un prototipo particular de refrigerador solar. En la tabla 1 se presentan los resultados correspondientes a los casos mencionados.

Tabla 1: Valores de la inclinación β y del acimut γ del colector para los cuales se maximiza la desorción que corresponden a los días de inicio de cada estación.

	21/03	21/06	21/09	21/12
β	-32°	-54°	-32°	-10°
γ	11°	4°	6°	7°

Puede verse en la tabla anterior que el modelo predice que una cierta rotación (γ) hacia el este favorece el proceso de desorción. Por otra parte, el valor de β demuestra, en todos los casos, que la inclinación del colector debe modificarse unos pocos grados (disminuyendo β) a partir del valor que corresponde a la altura solar en el meridiano para ese día ($\beta = \varphi - \delta$). La radiación difusa tiene incidencia en esto último, lo cual fue comprobado cuando la misma era eliminada en los cálculos.

Fue de interés conocer además el corrimiento temporal que sería esperable entre el momento del día donde se identifica la máxima desorción y el correspondiente al momento atribuible al tradicional $\gamma=0$ (esencialmente el mediodía solar). Por otro lado, estas dos situaciones producirían potencialmente diferente cantidad de hielo, lo que lleva a una necesaria comparación entre el metanol circulante en uno y otro caso. El aumento obtenido se expresa en términos porcentuales en la tabla 2 junto a los corrimientos temporales.

Tabla 2: Momentos del día en los que se produce la máxima desorción y el porcentaje de aumento de metanol desorbido con la optimización de los ángulos.

	21/03	21/06	21/09	21/12
Hora de máxima desorción para los valores de β y γ calculados	12:44	12:42	12:30	12:34
Hora teórica de máxima desorción para $\gamma=0$ y $\beta = \varphi - \delta$	13:02	12:54	12:45	12:51
% de aumento de metanol circulante respecto al que se obtendría con $\gamma = 0$ y $\beta = \varphi - \delta$	0,1	0,4	0,05	0,05

Se ve en la tabla 2 que en todos los casos se produce un adelantamiento en el proceso de desorción, produciéndose algunos minutos más temprano. Finalmente, el aumento en la cantidad de metanol desorbido (y con ella la potencial ganancia en la producción de frío) no resulta un valor significativamente elevado, sin embargo se asume que es un conocimiento generado que resulta de interés para la línea de investigación.

5. CONCLUSIONES

Los resultados preliminares obtenidos en un estudio anterior sobre el tema (Cyrules et al, 2010) no validaban, como oportunamente se afirmó, la hipótesis de un aumento del rendimiento del equipo de refrigeración con acimut distinto de cero (en aquel trabajo sólo se consideró un ángulo γ mayor a cero). Por otro lado, aquellos resultados mostraban que un cambio en dicha orientación no afectaría significativamente el rendimiento del equipo. Se ha mejorado el modelo que permite calcular el metanol circulante y se amplió el estudio para γ con valores menores a cero (el cual no aparece en los resultados), obteniendo en esta ocasión la orientación más adecuada (con día claro) que debería tener el colector según el día del año. Si bien no resulta práctico (ni necesario) reorientar el colector en el día a día (lo que además significa rotar toda la estructura del refrigerador dado el diseño que lo caracteriza), el presente estudio permitirá tomar los valores óptimos de los ángulos γ y β para ajustar la orientación del colector cuando se desee maximizar la eficiencia del sistema.

Vale aclarar que el método desarrollado podrá ser aplicado a otros refrigeradores solares por adsorción a condición de establecer el modelo semiempírico particular de cada caso que correlacione la temperatura del colector con la irradiancia y la temperatura ambiente. Puede entenderse que en esto serán determinantes las condiciones climáticas propias del lugar donde se emplace el equipo.

AGRADECIMIENTO

Se agradece al Servicio Meteorológico Nacional por facilitar gentilmente los datos históricos de temperatura ambiente (Exp. 158.241)

REFERENCIAS

- Cyrulies. E. Sartarelli A., Vera, S. Echarri, R. Samson, Inna (2010). Estudio del acimut para un refrigerador solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Comunicación*.
- Dubinín M.M. and Astakhov V.A. (1970). Description of adsorption equilibria of vapors on zeolites over wide ranges of temperature and pressure. *Adv Chem Ser* 102:69.
- Echarri, R.; Vera, S.; Cyrulies, E.; Sartarelli, A.; Samsón, I. (2009). Estudio del comportamiento de un solarímetro de bajo costo. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 13 .
- Fernández Diez Pedro. (2015). Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura. Universidad de Cantabria.
- González Martín M. (2006). Refrigeración solar por adsorción con sistema de captación CPC: experimentos y modelo. Departamento de Física. Universidad de Burgos.
- Grossi Gallegos, H. y Richijk, C. (2008). VI Curso de aprovechamiento energético de la radiación solar. UNLu..
- Sartarelli A., Cyrulies E., Echarri R., Vera S. (2012). Método para la determinación de parámetros de adsorción del par metanol-carbón activado utilizado en sistemas de refrigeración solar. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16, 08.01- 08.08.
- Sartarelli A., Echarri R., Cyrulies E., Vera S. (2015). Análisis de un método para la determinación de parámetros de adsorción del modelo de Dubinín-Astakhov. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 19
- Sartarelli A., Vera S., Echarri R., Cyrulies E., Samsón I., (2010). Heat flux solarimeter. *Solar Energy*, 84,(12),2173-2178.
- Vera S, Echarri R., Sartarelli A., Cyrulies E., Samson I.(2008). Construcción de una heladera solar por adsorción. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 12.
- Vera S., Sartarelli A., Echarri R., Cyrulies E., Samson I. (2011). Prototipos de refrigeradores solares por adsorción. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 15, 3.41-3.50.