



## Factibilidad del uso de la climatización solar de pequeña capacidad

### *Feasibility of the use of solar cooling of small capacity*

César A.- Cisneros Ramírez

Recibido: febrero de 2013

Aprobado: agosto de 2013

#### Resumen/ Abstract

En el trabajo se presenta la evaluación económica de la implementación de la climatización con empleo de la energía solar para las condiciones de radiación y temperatura ambiente en La Habana, Cuba. La evaluación se realizó para máquinas de pequeña capacidad (7-35 kW) las cuales se encuentran en el mercado internacional. El estudio se realizó empleando el tiempo de recuperación de la inversión y el ahorro en el ciclo de vida como criterios de medida. Además se analizó la influencia que tiene la relación volumen de almacenamiento/área de captación (V/A) sobre la fracción solar, la energía auxiliar, el costo de la energía ahorrada, ahorro de la energía primaria y ahorro en la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido. Se empleó el método P<sub>1</sub>-P<sub>2</sub> para los cálculos económicos así como el método  $\Phi$ -fchart para la obtención de la fracción solar. El precio del petróleo se varió entre los 100 y 200 \$/barril.

**Palabras clave:** absorción, análisis económico, refrigeración solar.

*This work presents an economical evaluation of implementing a solar air-conditioning system using solar energy in Havana, Cuba. It was studied the feasibility of systems of small and medium capacities (7-35 kW) of absorption refrigeration machines which be in the world market. The parameters that were taken for the feasibility were the payback time and life cycle savings. Also it was analyzed the influence of the ratio storage volume/solar collector area (V/A) on solar fraction, auxiliary energy, saved energy cost, saved primary energy and emitted CO<sub>2</sub>. Besides, it was used the P<sub>1</sub>-P<sub>2</sub> method for the economical aspects and the  $\Phi$ -fchart method in order to determine de solar fraction. The price of petroleum was varied from 100 to 200\$/barrel.*

**Key words:** absorption, economic analysis, solar cooling.

#### INTRODUCCIÓN

Los motivos del incremento en la demanda de refrigeración y aire acondicionado a nivel mundial son diversos. Entre ellos se tienen el aumento de los hábitos de bienestar, los todavía bajos costos energéticos, tendencias arquitectónicas de aumentar las áreas acristaladas y, en una gran medida, las condiciones climáticas. La creciente demanda de refrigeración y aire acondicionado en edificios implica el aumento del consumo de combustibles fósiles. Por ello, es interesante reconsiderar los conceptos de construcción para lograr la reducción de las cargas de climatización y por otro lado el uso de tecnologías alternativas que permitan cubrir la demanda de climatización y refrigeración en edificios.

Es importante observar que en el mismo momento en el que se produce la demanda pico de frío, es que se dispone de grandes cantidades de radiación solar que podrían usarse para accionar sistemas de refrigeración y climatización. La refrigeración y climatización generadas térmicamente se ha aplicado durante las últimas décadas en nichos de mercado, preferentemente en categorías de gran capacidad, usando el calor residual o el calor procedente de la producción combinada de calor y energía (cogeneración). Sin embargo, la combinación de esta tecnología con calentamiento solar hace más complicado el proceso. Hasta la fecha, la refrigeración solar y el aire acondicionado solar se han probado en unos pocos centenares de instalaciones [1-2].

El consumo total de energía eléctrica en Cuba se muestra en la figura 1, en la cual se refleja como este consumo ha ido incrementándose paulatinamente [3].

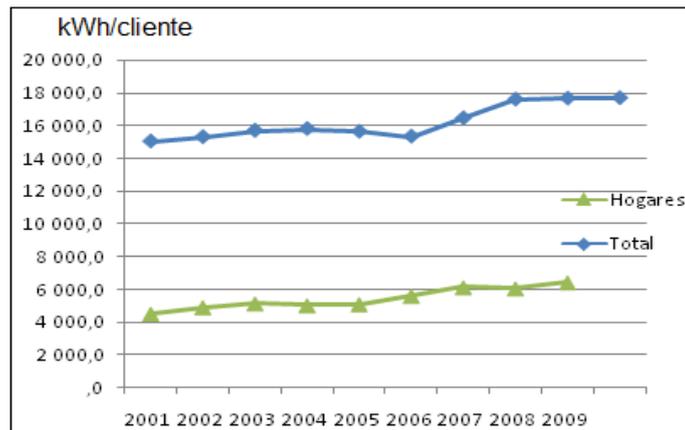


Fig. 1. Consumo per cápita (kWh/cliente) global y residencial.

De este consumo, una parte es debida a la demanda de aire acondicionado en los edificios administrativos, centros comerciales, hoteles, laboratorios, hospitales, etc., en los cuales el consumo de energía eléctrica por ese concepto oscila entre el 55 y 65% de la energía total que consumen esos edificios.

Tomando en consideración lo planteado y además que en Cuba se dispone de una radiación media anual aproximada de 5 kWh/m<sup>2</sup>día [4], se convierte en un sistema atractivo la aplicación del frío mediante el empleo de la energía en el país.

En este sentido la refrigeración y climatización solar pueden contribuir a:

- Reemplazar la demanda de combustible fósil, contribuyendo así a los objetivos y necesidades mundiales en el uso creciente de fuentes renovables de energía.
- Reducción de las emisiones del efecto invernadero, por un lado ahorrando en fuentes de energía no fósiles y por otro evitando el empleo de sustancias refrigerantes lesivas para el medio ambiente.

Partiendo de las premisas antes mencionadas, el objetivo de este trabajo se centra en determinar la factibilidad de la implementación de la climatización solar para pequeñas capacidades, para condiciones del clima en Cuba.

## DESARROLLO

La tecnología de absorción empleando energía solar se utiliza en el acondicionamiento de aire para pequeña y mediana capacidad. La clasificación de pequeña y mediana está en concordancia con los productos de refrigeración disponibles en el mercado; en este sentido, las aplicaciones pequeñas son sistemas con una capacidad refrigerante nominal por debajo de 35kW y los sistemas medianos de aproximadamente 100kW [5-6]. En general, esta tecnología está diseñada para funcionar con bajas temperaturas de calentamiento y por lo tanto se pueden aplicar captadores solares térmicos estacionarios. La menor capacidad enfriadora disponible actualmente

en el mercado es de 4.5kW. Junto a la mezcla de trabajo bromuro de litio-agua (BrLi/H<sub>2</sub>O), también se aplican el cloruro de litio-agua (CLi/H<sub>2</sub>O) y amoníaco-agua (NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O). La aplicación de la mezcla NH<sub>3</sub>/H<sub>2</sub>O con amoníaco como refrigerante es relativamente nueva para la climatización de edificios, puesto que este tipo de tecnología se usaba sobre todo en la refrigeración industrial para aplicaciones a temperaturas por debajo de 0°C.

Prácticamente era un mito muchos años atrás que la tecnología de absorción con el empleo de energía solar reemplazara a las que emplean combustibles fósiles; a medida que han pasado los años se ha abierto una brecha, aunque no llega a los estándares aún deseados. Por solo brindar algunos datos, la producción de instalaciones de climatización solar en el mundo en el año 2009 fue de alrededor de 400 veces más respecto al año 2004, con solo más de 100 instalaciones en el 2009 significando más del 50% [7-8].

En el mercado, entre las tecnologías de climatización accionadas térmicamente, dominan las tecnologías de absorción y adsorción, representando alrededor de un 85% del total de todas las tecnologías de climatización solar, y de ellas, la tecnología de absorción es la más dominante representando un 71% del total de estas tecnologías [9]. Es por esta razón que este trabajo se centra en la tecnología de absorción.

## MÉTODO EMPLEADO

El **comportamiento energético**, definido como la fracción solar, se determinó aplicando el método **Φ-fchart** [10-11], para lo cual se tomó como temperatura mínima de calentamiento al sistema de absorción 75°C y como condiciones de diseño exterior se tomaron las de La Habana.

Los datos mensuales de temperatura media ambiente y radiación en La Habana se reflejan en la tabla 1. El comportamiento térmico (**COP**) de la máquina de refrigeración se determinó a partir de la temperatura característica **ΔΔt**, la cual depende de las temperaturas de calentamiento, enfriamiento y de evaporación. El COP se determinó a través de la ecuación (1), [12-13]:

$$\text{COP} = \frac{\Delta\Delta t - 0.3}{1.04 \Delta\Delta t + 1.2} \quad (1)$$

Tabla 1. Temperatura media ambiente y radiación solar.													
MES	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ag	Sept	Oct	Nov	Dic	Año
Temperatura [°C]	21.3	21.5	22.7	24.3	25.7	26.6	26.9	26.9	26.3	25.1	23.7	22	24.4
Radiación, [MJ/m <sup>2</sup> ]	8.96	12.38	17.39	21.53	26.06	29.2	28.55	25.49	21.17	15.34	10.33	7.92	18.7

La evaluación económica de la instalación solar se llevó a cabo teniendo en cuenta tanto los costos de inversión como los costos de operación [11, 14-15]. En el costo de inversión se tuvo en cuenta el costo de los equipos que conforman la instalación (colector, tanque de almacenamiento, bombas, tuberías, intercambiadores de calor, controles, y otros equipos asociados a la instalación) y el costo de instalación de los equipos.

Para pequeñas capacidades, es característico que estas instalaciones se adquieran de forma modular, la cual ya tiene en cuenta los colectores solares, equipo de refrigeración, tanque de almacenamiento de agua caliente, tanque almacenamiento de agua fría, sistema de bombas, y sistema de control. El costo específico de estas instalaciones oscila entre los 7140 y 4340 \$/kW para capacidad de 7 y 35 kW respectivamente [9]. Los costos de instalación y mantenimiento, los cuales no están reflejados en los valores dados más arriba, se tomaron en función del costo de

inversión a partir de la experiencia internacional [16], costo de mantenimiento, 2% para el sistema convencional y 1% para el solar; costo de instalación, 12%

El ahorro en el ciclo de vida (ACV) se define como diferencia entre el costo del ciclo de vida de un sistema convencional y uno solar. El mismo se calcula a partir del costo de la energía  $C_{F1}$ , la fracción solar  $f$ , la relación entre el ahorro del costo del combustible en el ciclo de vida y el ahorro en el primer año  $P_1$ , la carga a cubrir  $L$ , la relación entre los costos adicionales y el costo inicial  $P_2$ , y el costo de la instalación solar  $C_{sist}$  a través de la ecuación (2), [10-11]:

$$ACV = P_1 C_{F1} L f - P_2 C_{sist} \quad (2)$$

La relación entre el ahorro del costo de combustible en el ciclo de vida y el ahorro en el primer año  $P_1$  está influenciado por el período que se hace el análisis  $N_e$ , la inflación  $i_f$  y el interés del mercado  $d$ , a través del factor de valor presente  $PWF(N_e, i_f, d)$  según la ecuación (3):

$$P_1 = (1 - C_t) PWF(N_e, i_f, d) \quad (3)$$

En la ecuación (3), el término  $C_t$  tiene en cuenta si la instalación es comercial o no. Para este trabajo se considera que la instalación no genera ingresos, por lo que  $C_t=0$

La relación entre los costos adicionales y el costo inicial  $P_2$  está influenciada por la relación entre los costos parásitos y el costo inicial  $M_s$ , interés anual de pago  $m$ , pago inicial  $D$ , inflación  $i$ , la tasa de interés  $t$  y los años de depreciación  $N_D$  y de pago de la inversión inicial  $N_L$ , según la ecuación (4):

$$\begin{aligned} P_2 = & D + (1 - D) \frac{PWF(N_{min}, 0, d)}{PWF(N_L, 0, m)} \\ & - i(1 - D) \left[ PWF(N_{min}, m, d) \left( m - \frac{1}{PWF(N_L, 0, m)} \right) \frac{PWF(N_{min}, 0, d)}{PWF(N_L, 0, d)} \right] \quad (4) \\ & + M_s (1 - C_t) PWF(N_e, i, d) + tV(1 - t) PWF(N_e, i, d) \\ & - \frac{C_i}{N_D} PWF(N_{min}, 0, d) - \frac{R_v}{(1 + d)^{N_e}} (1 - C_t) \end{aligned}$$

El valor de  $N_{min}$  se toma el menor entre  $N_e$  y  $N_L$ . La razón entre el costo de venta al final del período de análisis y la inversión inicial se tomó  $R_v=0$  y la razón entre el valor del sistema solar en el primer año y la inversión inicial del sistema se tomó  $V=1$ .

### Tiempo de retorno

El tiempo de retorno ( $N_p$ ) es el tiempo necesario para recuperar la inversión realizada y se determina a través de ecuación (5), [11]:

$$N_p = \frac{\ln \left( \frac{C_{sist} i_F}{f L C_{Fi}} + 1 \right)}{\ln(1 + i_F)} \quad (5)$$

Donde  $i_F$  en la ecuación (5), es la inflación del combustible.

El costo de la energía ahorrada ( $C_{\Delta PE}$ ) se evaluó a partir del costo anual del sistema analizado  $C_{sist}$  y del sistema de compresión patrón  $C_{sist patrón}$ ; además del consumo de energía primaria del sistema de compresión patrón  $CEP_{comp patrón}$  y del sistema analizado  $CEP_{sist}$  a través de la ecuación (6), [17]:

$$C_{\Delta PE} = \frac{C_{sist} - C_{sist patrón}}{CEP_{comp patrón} - CEP_{sist}} \left[ \frac{\$}{GJ} \right] \quad (6)$$

El comportamiento ambiental del sistema de climatización solar se evaluó a partir del cálculo de las emisiones de  $\text{CO}_2$  al ambiente y para lo cual se empleó el índice de  $73.1\text{kgCO}_2$  por kilogramo de petróleo.

El escenario escogido para la evaluación de la aplicación del sistema de climatización solar se muestra en la tabla 2:

Tabla 2. Valores del escenario escogido para la evaluación.		
Temperatura mínima de calentamiento.	75°C	C
Capacidad frigorífica.	7-35	$\text{kW}_{\text{frío}}$
Relación área de captación/capacidad de enfriamiento.	2,6	$\text{m}^2/\text{kW}$
Tiempo de trabajo del sistema de climatización.	10	h/d
Coefficiente de comportamiento del sistema de compresión (COP).	3	
Eficiencia del sistema eléctrico nacional.	0,3	
Precio del petróleo ( $C_{\text{Fi}}$ ).	100-200	\$/barril
Pago inicial (D).	20	%
Años de pago ( $N_L$ ).	10	años
Años para el análisis económico ( $N_e$ ).	20	años
Inflación del combustible ( $i_F$ ).	9	%
Conversión € a \$	1,4	

## RESULTADOS

La figura 2, muestra los valores del coeficiente de comportamiento (COP) de la máquina y la fracción solar para cada mes del año. La variación del COP viene dada fundamentalmente por la variación de la temperatura de enfriamiento (temperatura ambiente) porque las temperaturas de generación y de evaporación se consideraron constantes.

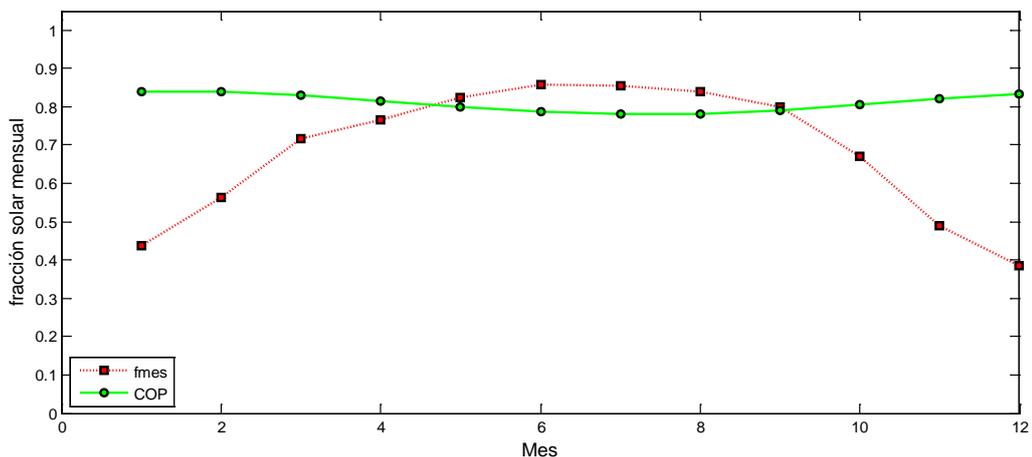
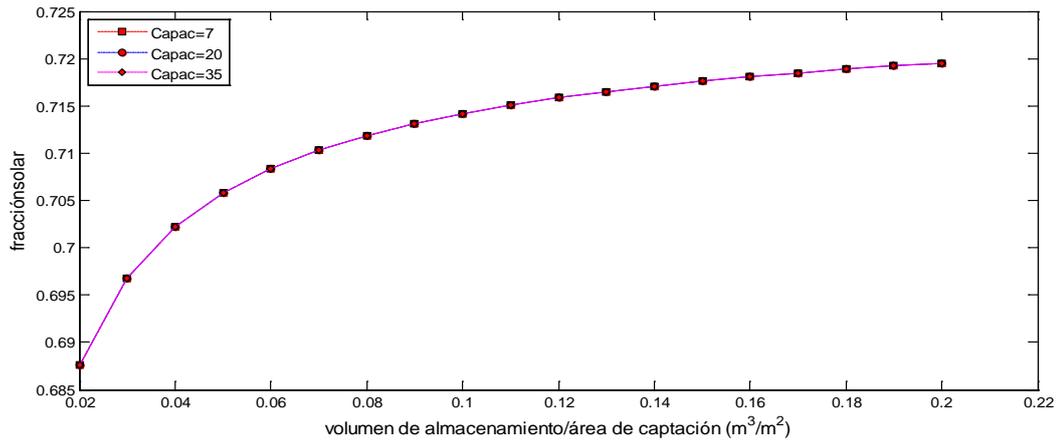


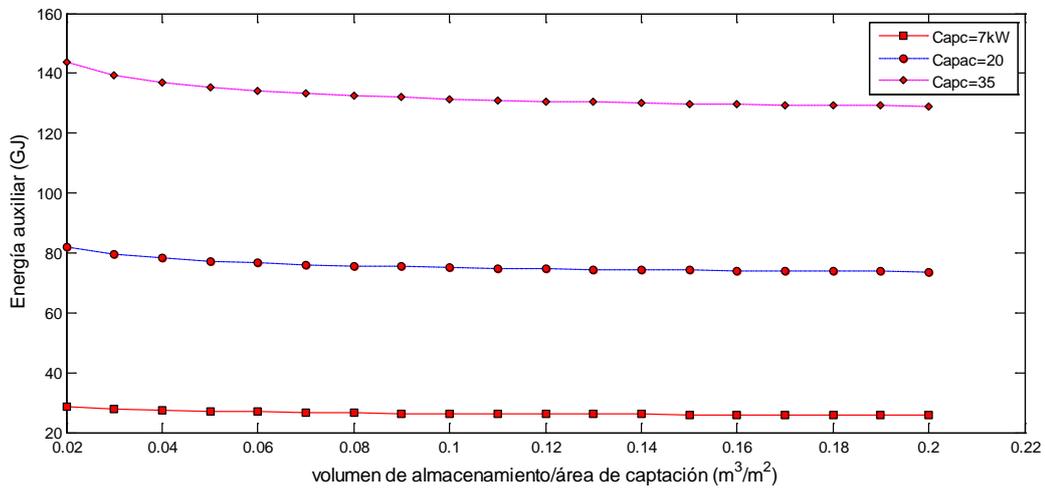
Fig. 2. Fracción solar y COP para cada mes.

El comportamiento de los sistemas solares está influenciado por el nivel de energía que se acumula, la cual puede ser empleada en momentos de poca radiación solar. La figura 3, muestra la variación de la fracción solar para diferentes relaciones de volumen de almacenamiento/área de captación (V/A). Se observa que existe una relación directa entre el aumento de la relación V/A y la fracción solar. Este aumento es significativo para valores menores de  $V/A=0.14$ .

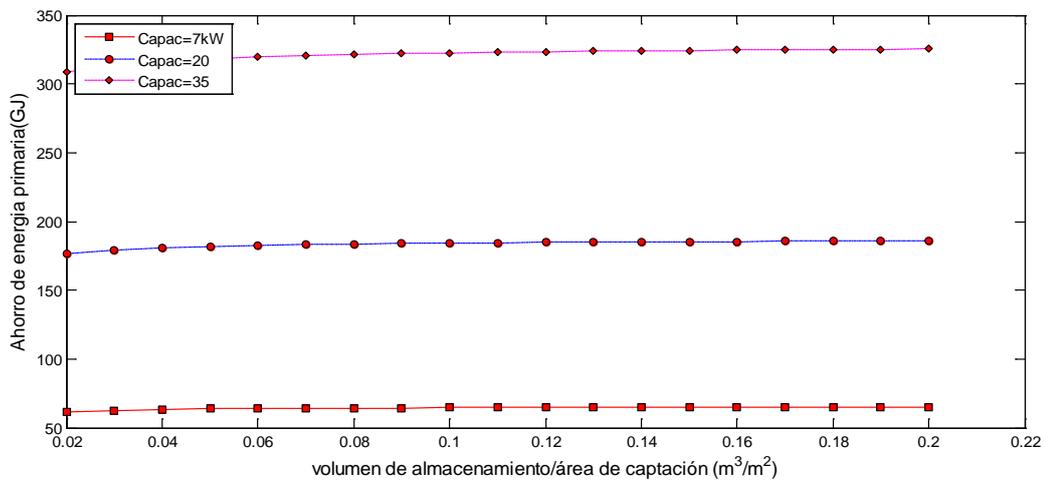


**Fig. 3. Fracción solar vs relación volumen de almacenamiento/área de captación.**

Este comportamiento de la fracción solar tiene su influencia en los valores obtenidos de energía auxiliar (fig.4), ahorro de energía primaria (fig.5), costo de la energía ahorrada (fig.6) y disminución en la cantidad de CO<sub>2</sub> emitida a la atmósfera (fig.7).



**Fig. 4. Energía auxiliar vs relación volumen de almacenamiento/área de captación.**



**Fig. 5. Ahorro de energía primaria vs relación volumen de almacenamiento/área de captación.**

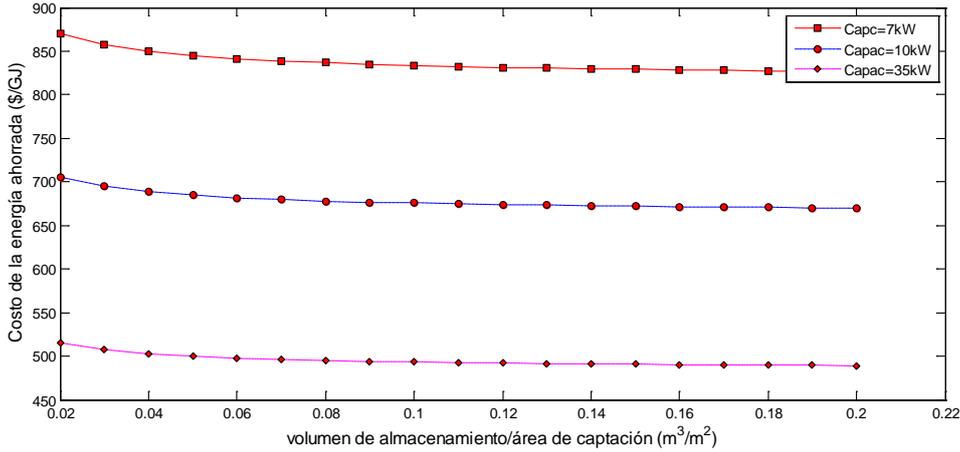


Fig. 6. Costo de la energía ahorrada vs relación volumen de almacenamiento/área de captación.

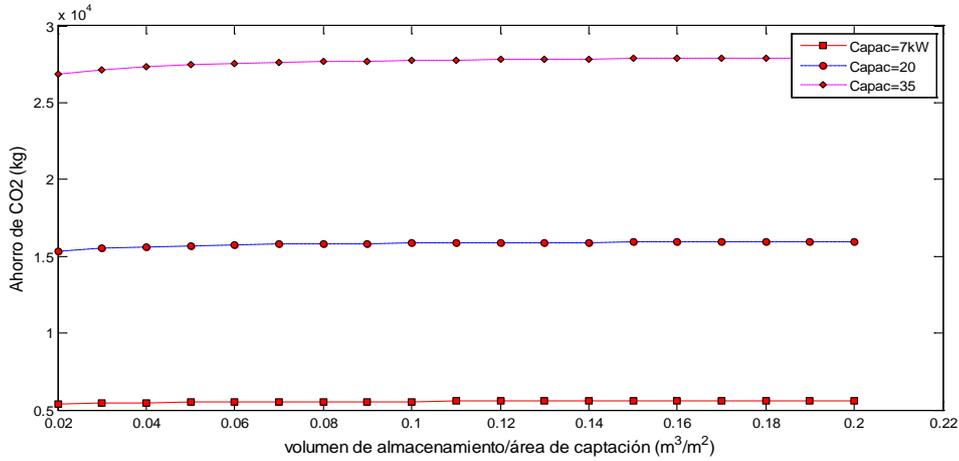


Fig. 7. Ahorro de CO<sub>2</sub> emitido.

El ahorro de la instalación durante su ciclo de vida, para lo cual se tomaron 20 años para el análisis, se muestra en la figura 8. Este ahorro experimenta valores positivos y a su vez una variación más pronunciada respecto al precio del petróleo en el caso de la instalación de 35kW.

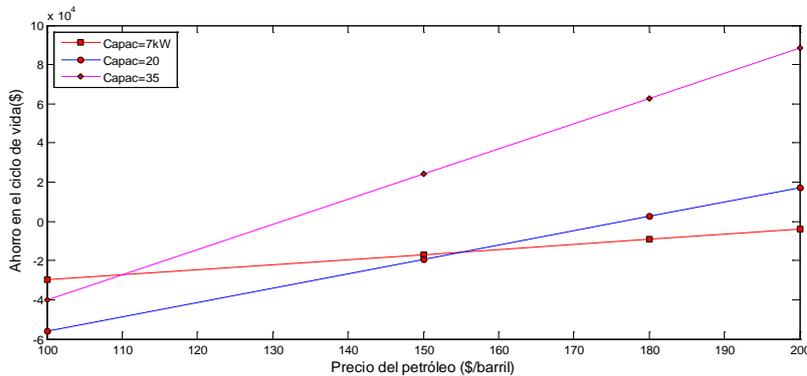
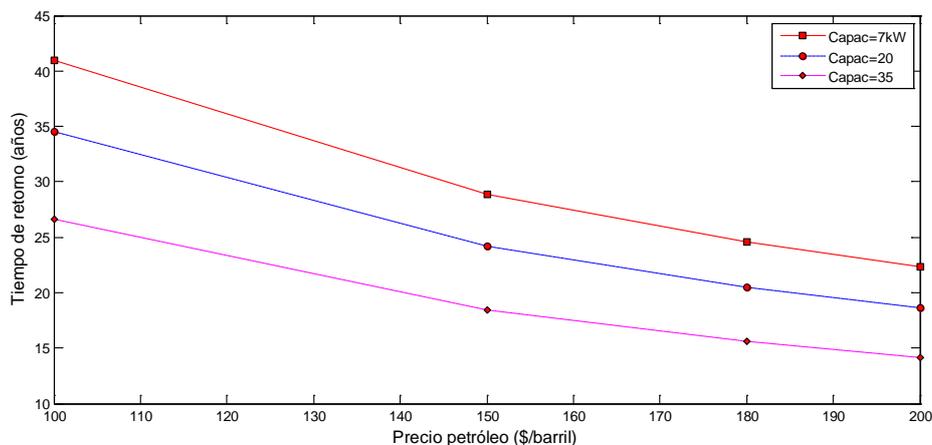


Fig. 8. Ahorro en el ciclo de vida vs precio del petróleo.

El tiempo de retorno de la inversión con relación al precio del petróleo se muestra en la figura 9. La instalación que experimenta menor tiempo de retorno es la de 35 kW. A pesar de ello, este tiempo

de 26 años para precio de 100\$/barril y 14 años para precio de 200\$/barril aún es alto para los análisis de factibilidad económica.



**Fig. 9. Tiempo de retorno vs precio del petróleo.**

## CONCLUSIONES

Durante el trabajo se evaluó el comportamiento de sistemas de refrigeración por absorción de pequeñas capacidades empleando como fuente energética principal la energía solar. Se determinó la influencia del almacenamiento sobre la fracción solar media anual y en consecuencia sobre la energía auxiliar a emplear para el funcionamiento de la instalación, ahorro de energía primaria empleada, el costo de la energía ahorrada y disminución en la cantidad de CO<sub>2</sub> emitido a la atmósfera. De los resultados se observó que la relación volumen de almacenamiento/área de captación ejerce su mayor influencia para valores menores a 0.14.

Por otro lado se obtuvieron tanto el ahorro durante el ciclo de vida como el tiempo de retorno de la inversión. En el caso del ahorro durante el ciclo de vida se obtuvo que solo se obtienen ahorros para la instalación de 35kW cuando el precio del petróleo es mayor a los 130 \$/barril.

El tiempo de retorno de la inversión para la instalación de 35kW resultó ser de 14 años cuando el precio del combustible es de 200\$/barril.

## REFERENCIAS

- [1]. Eicker, U.; Pietruschka D., "Design and performance of solar powered absorption cooling systems in office buildings". *Energy and Buildings*, 2009, vol. 41, n.1, p. 81-91, ISSN 0378-7788.
- [2]. Desideri, U.; *et al.*, "Solar-powered cooling systems Technical and economic analysis on industrial refrigeration and air conditionings applications". *Applied Energy*, 2009, vol.86, n.9, p. 1376-1386, ISSN 0306-2619.
- [3]. Oficina Nacional de Estadística, "Anuario estadístico de Cuba 2012". La Habana, "consulta: Diciembre 2011", Disponible en [http://www.one.cu/aec2011/esp/10\\_tabla\\_cuadro.htm](http://www.one.cu/aec2011/esp/10_tabla_cuadro.htm).
- [4]. Bérriz, L.; Álvarez, M., "Manual para el Cálculo y Diseño de Calentadores Solares". 2008, Habana: Edit. Cubasolar, ISBN 978-959-7113-36-2.
- [5]. Fong, K.F.; *et al.*, "Comparative study of different solar cooling systems for buildings in subtropical city". *Solar Energy*, 2010. vol.84, n.2, p. 227-244, ISSN 0038-092X.

- [6]. Mokhtar, M.; *et al.*, "Systematic comprehensive techno-economic assessment of solar cooling technologies using location-specific climate data". *Applied Energy*, 2010, vol.87, n.12, p. 3766-3778, ISSN 0306-2619.
- [7]. Kim, D.S.; Infante, C.A., "Solar refrigeration options - a state-of-the-art review". *International Journal of Refrigeration*, 2008. vol.31, n.1, p. 3-15, ISSN 0140-7007.
- [8]. Project SOLAIR. "Requirements on the design and configuration of small and medium sized solar air-conditioning applications". Guidelines. 2009, Intelligent Energy-Europe Programme of the European Commission: Germany, Disponible en: [http://www.solair-project.eu/uploads/media/SOLAIR\\_Guidelines\\_DE.pdf](http://www.solair-project.eu/uploads/media/SOLAIR_Guidelines_DE.pdf).
- [9]. Mugnier, D., "Solar cooling economics. Solar air conditioning and refrigeration workshop, task 38". 2010. Orlando: International Energy Agency, Disponible en: <http://www.google.com/url?q=http://iea-shc-task38.org/documents/workshops/iea-workshop-aarhus-2010/11-SolarCoolingEconomic-Workshop-Aarhus-Mugnier.pdf/view&sa=U&ei=kHtZU4GKE8T4yAH4h4GQBg&ved=0CB4QFjAA&usg=AFQjCNEj4r4Z3UEuE0z-MUB0ZvPizUVdpg>.
- [10]. Duffie, J.; Beckman, W., "Solar Engineering of Thermal Processes". 3th ed., 2006, USA: Edit. John Wiley & Sons, Inc., ISBN 13-978-0-471-69876-8.
- [11]. Kalogirou, S., "Solar Energy Engineering Processes and Systems". 2009, San Diego, California, USA: Edit. Elsevier Inc., p. 760, ISBN 978-959-7113-36-2.
- [12]. Villada, J.L., "Integración de sistemas de refrigeración solar en redes de distrito de frío y de calor". Doctoral thesis, 2010, Tarragona: Universitat Rovira i Virgili, Disponible en: <http://www.google.com/url?q=http://www.tdx.cat/handle/10803/8500&sa=U&ei=d3pZU6vYFaqa2gXggoDoAw&ved=0CB4QFjAA&usg=AFQjCNGxflfF75Na6Ui4LNnCGXUQo9M2AA>.
- [13]. Puig-Arnavat, M., *et al.*, "Analysis and parameter identification for characteristic equations of single- and double-effect absorption chillers by means of multivariable regression". *International Journal of Refrigeration*, 2010. vol.33, p. 70-78, ISSN 0140-7007.

## AUTOR

### **César Arnaldo Cisneros Ramírez**

Ingeniero Mecánico, Doctor en Ciencias Técnicas, Profesor Titular, Centro de Estudio de Tecnologías Energéticas Renovables (CETER). Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana, Cuba.

e-mail: [cesar@ceter.cujae.edu.cu](mailto:cesar@ceter.cujae.edu.cu)