

SIMULACIÓN DE UN CONCENTRADOR SOLAR DE DISCO PARABÓLICO PARA PRODUCCIÓN DE POTENCIA Y ENFRIAMIENTO

Reyes J.J.*, Zacarias A.*, Jiménez J.A.***, Pineda J.***, Nieto M.***, Angeles R.A.*

* ESIME Azcapotzalco, Instituto Politécnico Nacional, Av. De las Granjas 682, Santa Catarina, Ciudad de México, 02550, México. jerz70@gmail.com, azacarias@ipn.mx, rangelesz@ipn.mx

** LABINTHAP, Instituto Politécnico Nacional, ESIME UPALM, Ciudad de México, 07738, México. jjimenezb@ipn.mx

*** CICATA Querétaro, Instituto Politécnico Nacional, Cerro blanco 141, Colinas del Cimatario, Querétaro, 76090, México. jpinedap@ipn.mx

<https://doi.org/10.34637/cies2020.1.2042>

RESUMEN

En este trabajo se presenta la modelación y simulación de un concentrador solar de disco parabólico para alimentar térmicamente a un sistema de refrigeración por absorción y a un motor Stirling, con diferente eficiencia, acoplado con un sistema de refrigeración por compresión. El enfriamiento producido por este sistema se utiliza para aire acondicionado de una vivienda. El estudio fue realizado mediante balances de energía y de masa, en cada componente de los sistemas de refrigeración y del sistema solar. La transferencia de calor por convección y por radiación también fueron considerados. Los resultados muestran que el colector solar alcanza eficiencia térmica de hasta 0.82 para relación de concentración de 100. El concentrador solar produce hasta 1.3 kW. En tanto que el sistema completo puede producir enfriamiento de 2.3 kW y 0.47 kW por el sistema de compresión y el de absorción respectivamente. La potencia de la bomba de la disolución es hasta 20 veces menor que la potencia requerida por el compresor del sistema de compresión.

PALABRAS CLAVE: Colector solar de disco parabólico, Modelación y simulación, Motor Stirling.

ABSTRACT

This paper presents the dish solar collector modeling and simulation for thermally driving an absorption refrigeration system and a Stirling engine, with different efficiency, coupled with a compression refrigeration system. The cooling produced by the system is used for home air conditioning. The study by means energy and mass balances, in each component of the cooling systems and the solar system was carried out. The Convection and radiation heat transfer also has been considered. The results show that the solar collector reaches thermal efficiency of up to 0.82 for a concentration ratio of 100. The solar concentrator produces up to 1.3 kW. While the complete system 2.3 kW and 0.47 kW of cooling by the compression and absorption system respectively can produce. The power of the solution pump is up to 20 times less than the power required by the compressor of the compression system.

KEYWORDS: Parabolic Disc Solar Collector, Modeling and Simulation, Stirling Engine.

INTRODUCCIÓN

El costo actual de operación de los sistemas de acondicionamiento de aire para vivienda, cada vez es mayor, debido principalmente al elevado costo de los energéticos. El uso de enfriadores más eficientes, o en su caso, enfriadores alternativos, demanda investigación cada vez más específica. El uso de sistemas de enfriamiento híbridos ya ha sido propuesto por diferentes investigadores como el mostrado por (Guan et al. 2014 o Fatouh et al. 2017) en donde los autores, muestran las bondades de un sistema de refrigeración por compresión en conjunto con un sistema de enfriamiento evaporativo considerando la humidificación del aire.

Los sistemas de refrigeración por absorción ya han sido combinados con los sistemas de refrigeración por compresión como lo muestran (Wang et al. 2016), en donde los autores muestran que puede aumentar el rendimiento global del sistema de enfriamiento si se recupera calor desde el vapor a alta presión utilizando compresores en dos etapas. Los autores (Li et al. 2019) han mostrado que un sistema de refrigeración por absorción de burbujas puede proporcionar potencias de enfriamiento de 2.95 kW con calor a temperaturas de 340 °C y 210 l/hr de solución. En tanto que (Liu et al. 2019) han mostrado que un sistema híbrido de enfriamiento compresión/absorción puede mejorar en función de los fluidos de trabajo, y de la ubicación de un compresor en el circuito del refrigerante en el sistema de absorción.

De los trabajos encontrados en la literatura se ha mostrado la bondad de utilizar sistemas de refrigeración híbridos. No obstante, no se ha encontrado un sistema de refrigeración híbrido compresión/absorción alimentado con energía solar a temperaturas medias. En el presente trabajo se muestra el estudio de un concentrador solar de disco parabólico para producir energía solar térmica para alimentar térmicamente a un sistema de absorción de simple efecto y un motor Stirling acoplado a un sistema de refrigeración por compresión, ambos para producir enfriamiento para una vivienda.

MODELADO Y SIMULACIÓN

El colector solar de disco parabólico analizado en este trabajo se muestra en la Fig. 1, en donde puede apreciarse que alimenta al sistema de refrigeración por absorción y al motor Stirling acoplado al sistema de compresión. Los dos sistemas de refrigeración alimentan de agua helada a un serpentín ubicado en una vivienda. El concentrador solar tiene un diámetro de apertura de 1.4 m y está fabricado de aluminio reflejante, Reflec Tech de 0.1 mm de espesor. La distancia focal fue determinada en 0.604 m por (Reyes et al. 2018). El motor Stirling está colocado sobre esta posición focal. Este motor térmico está acoplado al compresor del sistema de compresión. En la altura focal, se dispone de una camisa que distribuye el calor hacia el motor Stirling y al sistema de refrigeración por absorción, en este caso, mediante un fluido térmico impulsado por una bomba. El sistema de refrigeración por absorción es un sistema de simple efecto agua-bromuro de litio. Ambos sistemas proporcionan la potencia de enfriamiento necesaria para mantener acondicionado un espacio residencial.

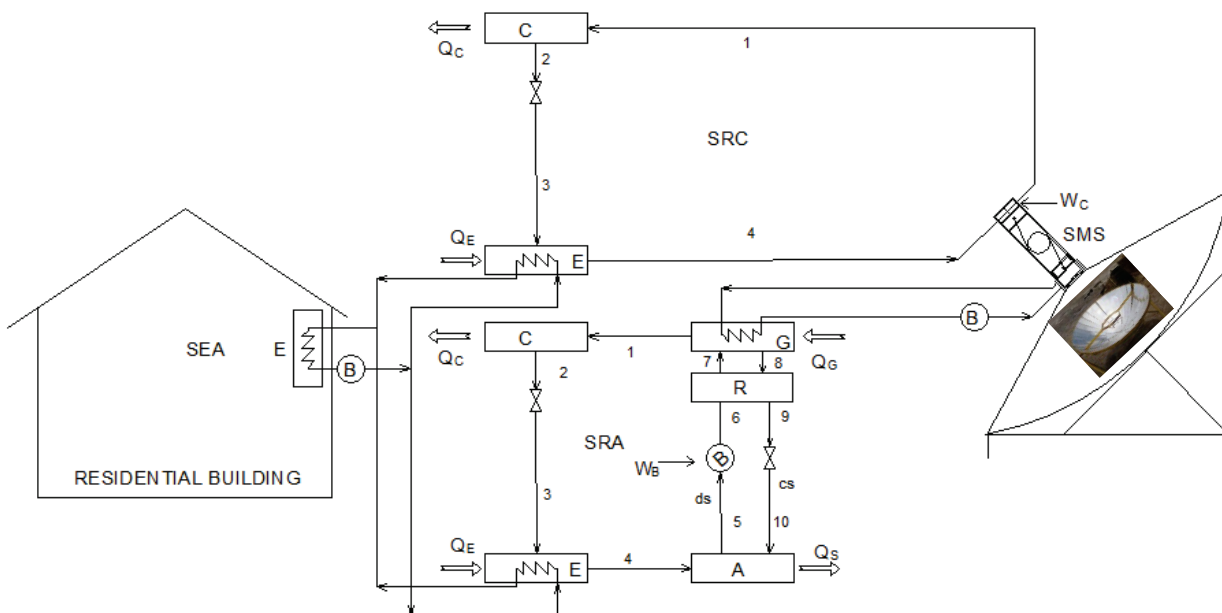


Fig. 1. Concentrador solar de disco parabólico para alimentar a un enfriador híbrido compresión/absorción.

Modelado

En primer lugar, se realiza el dimensionamiento del colector solar de disco parabólico como se describe a detalle en (Reyes et al. 2018). Una vez determinada la altura focal, f , con la eficiencia del colector, η_c , y la radiación solar, I , la temperatura del colector solar, T_H se determina mediante:

$$\eta_c = \eta_o - \frac{1}{IC} [h(T_H - T_o) + \varepsilon\sigma(T_H^4 - T_o^4)] \quad (1)$$

Donde, como lo muestra (Dai et al. 2019):

η_o	: eficiencia óptica igual a 0.9,
h	: coeficiente de transferencia de calor por convección. Del mismo autor, $h = 20 \text{ W/m}^2\text{K}$.
T_o	: temperatura ambiente, °C
T_H	: temperatura del colector solar, °C

La relación de áreas se determina de:

$$C = \frac{A_{app}}{A_{ab}} \quad (2)$$

donde

A_{app}	: área de apertura del colector, m^2
A_{ab}	: área del absorbedor, m^2

El calor útil se determina como lo muestra (Açikkalp et al. 2019) de:

$$Q_u = IA_{app}\eta_o - A_{ab}[h(T_H - T_o) + \varepsilon\sigma(T_H^4 - T_o^4)] \quad (3)$$

Finalmente, el rendimiento del concentrador solar fue calculado usando:

$$\eta_c = \frac{Q_u}{IA_{app}} \quad (4)$$

El calor producido por el colector solar, Q_u , es dividido para alimentar tanto al sistema de absorción con Q_g , como al motor Stirling, con Q_H . El rendimiento del motor Stirling, η_s , está relacionado con la potencia del motor, \dot{W}_s , y el calor de la fuente térmica, $\dot{Q}_{H,s}$, como lo muestran (Açikkalp et al. 2019), mediante:

$$\eta_s = \frac{\dot{W}_s}{\dot{Q}_{H,s}} \quad (5)$$

El calor del depósito frío del motor Stirling es calculado mediante:

$$\dot{W}_s = \dot{Q}_{H,s} + \dot{Q}_{L,s} \quad (6)$$

La potencia producida por el motor Stirling después de considerar el rendimiento, se usa como la potencia proporcionada por el compresor, \dot{W}_c . Si se considera un proceso isoentrópico en el compresor, y una vez determinadas las propiedades del refrigerante a la salida del condensador, y del evaporador, el flujo de refrigerante es:

$$\dot{W}_c = \dot{m}_r (h_1 - h_4) \quad (7)$$

La potencia frigorífica que puede producir el sistema de compresión se determinada de:

$$\dot{Q}_e = \dot{m}_r (h_4 - h_3) \quad (8)$$

En tanto que el Coeficiente de Operación, COP, del sistema de compresión se determina por:

$$COP_c = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{W}_c} \quad (9)$$

Como ya se ha mencionado entre las ecuaciones (3) y (4), el calor útil del concentrador solar es dividido para alimentar tanto al motor Stirling como al sistema de absorción. En el trabajo presentado por (Zacarias et al. 2020) se muestra el desarrollo para el análisis de un sistema de refrigeración por absorción de simple efecto agua-bromuro de litio. En

el presente trabajo, en primer lugar, se determinan las propiedades como la entalpía y las concentraciones de la solución, a las presiones de operación dadas por las temperaturas de evaporación y de condensación. Los flujos másicos se encuentran una vez determinadas estas variables. Una vez hecho lo anterior, se sustituye en la ecuación del flujo de calor en el generador, Q_g , como:

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_r h_1 + \dot{m}_{cs} h_8 - \dot{m}_{ds} h_7 \quad (10)$$

El balance de masa en el generador proporciona:

$$\dot{m}_7 = \dot{m}_8 + \dot{m}_r; \dot{m}_7 X_7 = \dot{m}_8 X_8 + \dot{m}_r X_1 \quad (11)$$

La eficiencia del recuperador:

$$\epsilon_{HE} = \frac{T_7 - T_6}{T_8 - T_6} \quad (12)$$

Potencia de la bomba de disolución:

$$\dot{W}_p = (P_6 - P_5) v_{ds} \dot{m}_{ds} \quad (13)$$

El calor del condensador y del absorbedor respectivamente son:

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_r (h_1 - h_2) \quad (14)$$

$$\dot{Q}_a = \dot{m}_r h_4 + \dot{m}_{cs} h_{10} - \dot{m}_{ds} h_5 \quad (15)$$

La potencia frigorífica, \dot{Q}_e , producida por el sistema de absorción se determina con una ecuación como la ec. (8). El coeficiente de rendimiento es:

$$COP_a = \frac{\dot{Q}_e}{\dot{Q}_g + \dot{W}_p} \quad (16)$$

Simulación

El modelo descrito de la ecuación (1) a la (16), fue programado en software especializado por los autores. Entre las consideraciones realizadas, están:

- No se consideran las pérdidas de calor en el absorbedor solar
- Sin sobrecalentamiento ni subenfriamiento a la salida del evaporador y del condensador respectivamente
- La concentración a la salida de cada componente del sistema de absorción se encuentra en equilibrio

Para la simulación, fue considerado que el 40% del calor producido por el concentrador solar es utilizado para alimentar al sistema de absorción, en tanto que el 60% restante, es utilizado para alimentar al motor Stirling. Esta proporción es recomendada en base al trabajo presentado por (Romage et al. 2020). Las condiciones de operación del sistema de enfriamiento híbrido alimentado por el colector solar, se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Coeficientes de ajuste y valor de los errores ópticos

Parámetro	Rango
Diámetro del concentrador solar, D , m	1.4
Relación de concentración, C	5-100
Temperatura del concentrador solar, T_H , °C	200, 300, 400
Radiación solar, I , W/m ²	200-1000
Eficiencia de motor Stirling, η_s	0.15, 0.2, 0.3
Temperatura del generador, T_g , °C	120

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Con el modelo desarrollado, y las condiciones de operación establecidas, el sistema de enfriamiento híbrido fue simulado para obtener los siguientes resultados. En la Fig. 2, se muestra el área y diámetro del absorbedor en el concentrador solar, respecto a la relación de concentración. De la figura puede apreciarse que, con relación de concentración de 30, el área y el diámetro del absorbedor aproximadamente pueden ser de 0.05 m² y 0.25m respectivamente. El diámetro puede ser tan pequeño como 0.14 m si la relación de concentración se aumenta a 100.

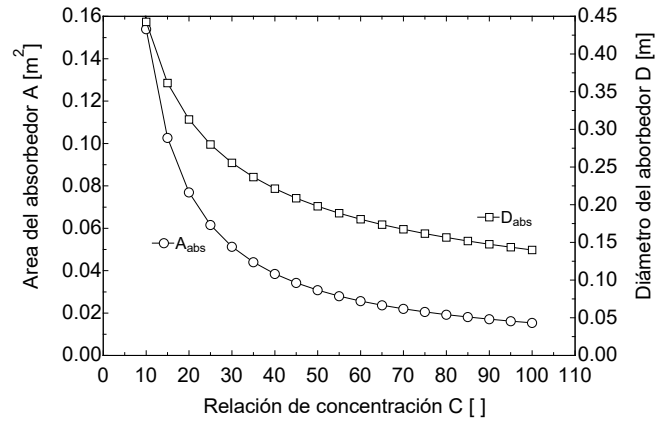


Fig. 2. Área y diámetro del absorbedor solar en función de la relación de concentración.

Cuando la relación de concentración junto con la temperatura del concentrador, se consideran para evaluar la eficiencia del colector solar, puede apreciarse en la Fig. 3 que la eficiencia del concentrador solar alcanza valores de 0.73 y 0.82 respectivamente para 200°C y 400°C, con la relación de concentración igual a 30. Cuando esta relación de áreas vale 100, la eficiencia para todos los casos está en torno a 82.5%.

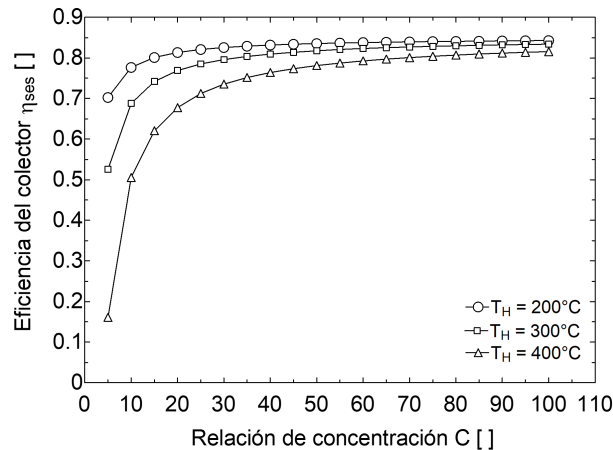


Fig. 3. Eficiencia del concentrador solar respecto a la relación de concentración.

La influencia de la radiación solar y de la temperatura del concentrador solar, sobre el calor producido por el concentrador, es mostrado en la Fig. 4, en donde puede apreciarse que con el concentrador solar de disco parabólico aquí planteado, puede producirse hasta 1.3 kW en el absorbedor. De este calor, puede utilizarse hasta 0.78 kW y 0.5 kW respectivamente para alimentar al motor térmico y al sistema de absorción.

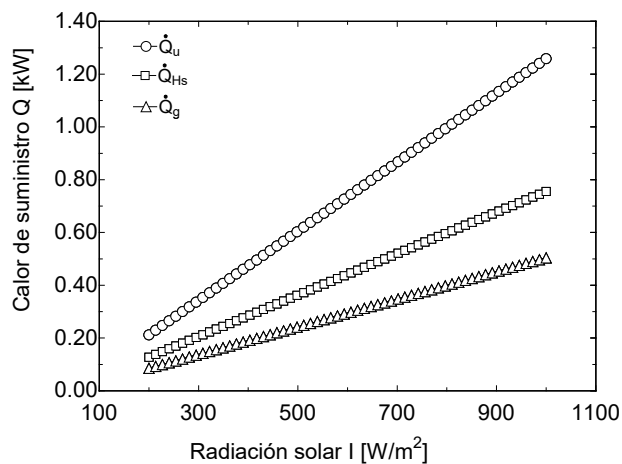


Fig. 4. Calor producido por el concentrador solar y proporcionado a los sistemas de enfriamiento.

En la Figura 5 se presenta el calor de enfriamiento producido por los dos sistemas de refrigeración, en donde puede apreciarse que el sistema de compresión puede producir 2.25 kW de enfriamiento, con eficiencia del motor Stirling de 0.3, en tanto que en todos los casos evaluados, el sistema de absorción produce hasta 0.47 kW de enfriamiento.

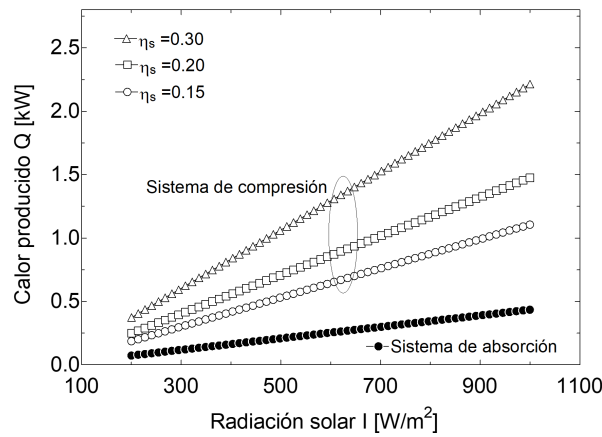


Fig. 5. Calor producido por los sistemas de enfriamiento después de ser alimentados por el concentrador solar.

La potencia requerida por el compresor del sistema de compresión y la bomba de disolución del sistema de absorción se presentan en la Fig. 6, en donde, puede apreciarse que el primero requiere en torno a 230 W en tanto que el segundo sólo necesita cerca de 12 W.

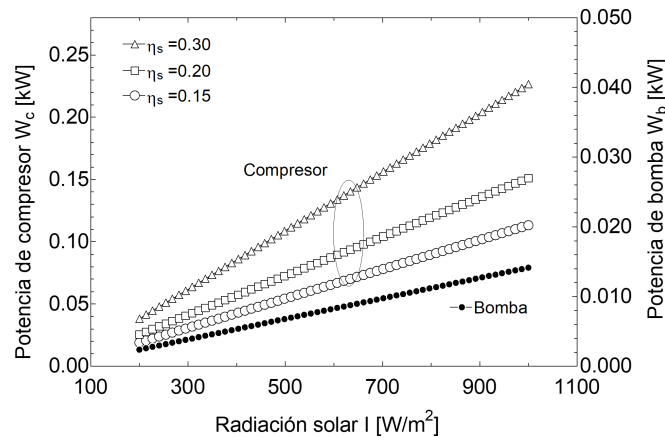


Fig. 6. Potencia requerida por el compresor del sistema de compresión y por la bomba de disolución.

En la Figura 7 se presenta el COP de los sistemas de refrigeración y la eficiencia del concentrador solar y del motor Stirling. De la figura puede apreciarse, como ya se ha mostrado antes, la eficiencia del colector solar depende de la radiación solar. El COP de los sistemas de refrigeración no cambiaron.

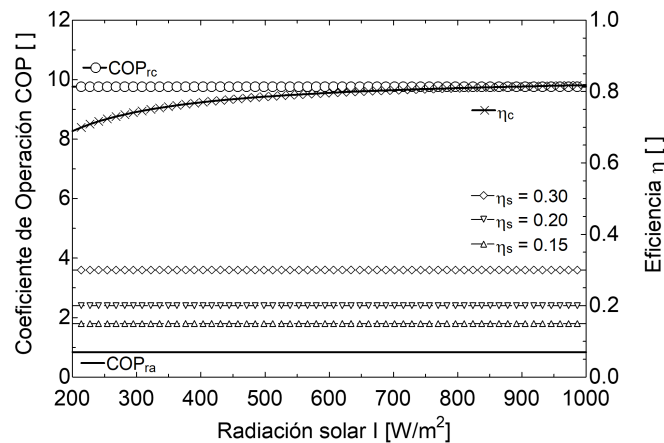


Fig. 7. COP y eficiencia de los sistemas.

CONCLUSIONES

Del estudio realizado al concentrador solar de disco parabólico para producir potencia mecánica y potencia térmica para alimentar a un sistema de enfriamiento híbrido se han encontrado las siguientes conclusiones:

- la eficiencia del colector solar a 300°C, puede ser hasta 0.78 y 0.82 si el diámetro del absorbedor es de 0.30 m y 0.15 m respectivamente (con relación de concentración de 100 y 30 respectivamente).
- el calor producido por el concentrador solar es hasta 1.3 kW aproximadamente, en tanto que el calor de enfriamiento producido por el sistema híbrido puede ser de 2.3 kW y 0.47 kW por el sistema de compresión y el de absorción respectivamente.
- la potencia de la bomba del sistema de absorción es aproximadamente 20 veces menor que la potencia requerida por el compresor del sistema de compresión.
- la eficiencia del concentrador solar a temperatura promedio de 300°C, está entre 0.7 y 0.82.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Instituto Politécnico Nacional por el proyecto SIP20190076, por el año sabático DG-2019-171-1-15 y por el Apoyo Económico para la presentación del trabajo; al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACYT por la beca 740638 de Estancia Sabática y a la Universidad Carlos III de Madrid por el apoyo para la Estancia de investigación.

REFERENCIAS

- AÇikkalp E, Kandemir S Y, Ahmadi M H, (2019). Solar Driven Stirling engine -chemical heat pump- absorption refrigerator hybrid system as environmental friendly energy system. *Journal of Environmental Management*. 232, 455-461.
- Dai D, Liu Z, Yuan F, Long R, Liu W. (2019). Finite time thermodynamic analysis of a solar duplex Stirling refrigerator. *Applied Thermal Engineering* Vol. 156, 597-605.
- Fatouh M, Abou-Ziyan H, Mahmoud O, El-Raheim D A. (2017). Experimental analysis of hybrid and conventional air conditioning systems working in hot-humid climate. *Applied Thermal Engineering*. 118, 570-584.
- Guan L, Bennet M, Bell J. (2014). Development of a climate assessment tool for hybrid air conditioner. *Building and Environment* Vol. 82, 371-380.
- Li J, Xu S, Kong X, Liu K, Cui F. (2019). Experimental study on absorption/compression hybrid refrigeration cycle. *Energy* Vol. 168, 1237-1245.
- Liu X, Ye Z, Bai L, He M. (2019). Performance comparison of two absorption-compression hybrid refrigeration systems using R1234yf/ionic liquid as working pair. *Energy Conversion and Management* Vol. 181, 319-330.
- Reyes J, Zacarías A, Jiménez J A, Donís F, Gutiérrez C. (2018). Modelado de un colector solar parabólico con motor Stirling para uso doméstico y pequeña industria. *XXIV Congreso Internacional anual de la SOMIM* 19 al 21 de septiembre de 2018 Campeche, México.
- Romage G, Jiménez C, Zacarías A, Carvajal I, Flores A, Donís F. Simulation of a Stirling engine-compression/absorption hybrid cooling system. *CYTEF 2020. X Congreso Ibérico, VIII Congreso Iberoamericano de las Ciencias y Técnicas del Frío*, Pamplona, España, 1-3 julio, 2020.
- Wang J, Wang B, Wu W, Li X, Shi W, (2016,). Performance analysis of an absorption-compression hybrid refrigeration system recovering condensation heat for generation. *Applied Thermal Engineering*, 108, 54-65.
- Zacarías, J. A. Quiroz, G. L. Gutiérrez-Urueta, M. Venegas, I. Carvajal, J. Rubio. (2020) Comparison between adiabatic and non-adiabatic absorption chillers using ammonia-lithium nitrate and water-lithium bromide solutions. *Heat Transfer Research*. Doi.10.1615/HeatTransRes.2019026621.