DOI: 10.21134/0m844z15

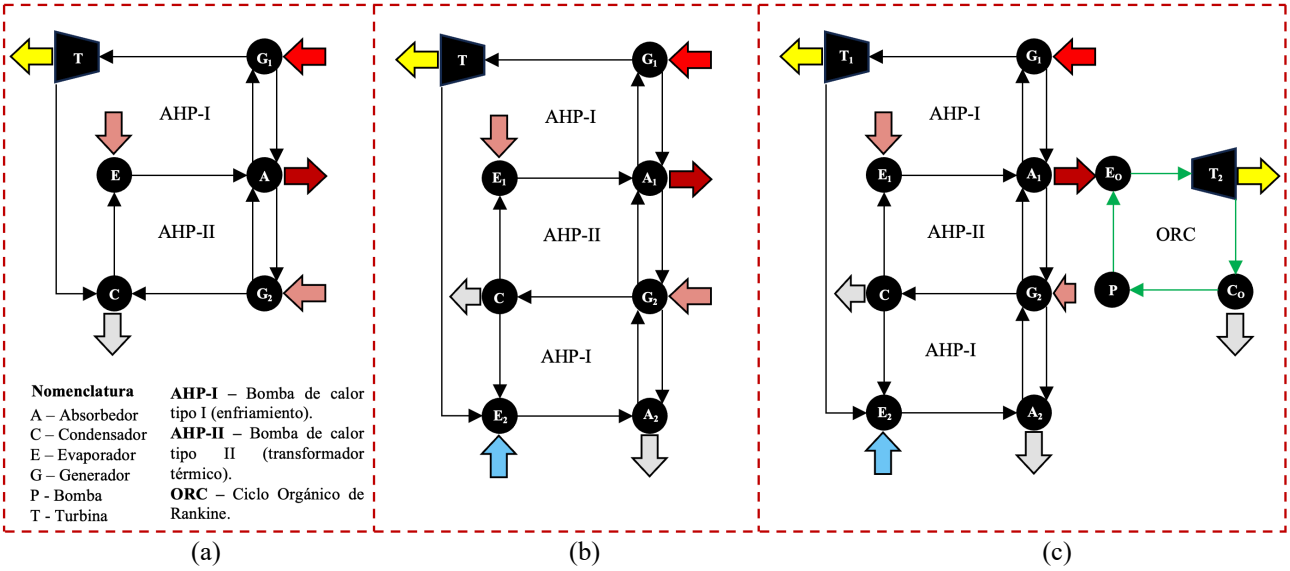
CYTEF XII Congreso Ibérico y X Congreso Iberoamericano de Ciencias y Técnicas del Frio
Universidad Miguel Hernández de Elche
26-06 28-06/2024
UNIVERSITAS Miguel Hernández

ANÁLISIS ENERGÉTICO DE UNA BOMBA DE CALOR MODIFICADA. COMPARATIVO ENTRE SISTEMA SIMPLE, CON REFRIGERACIÓN, Y CON ORC.

Javier Alejandro Hernández Magallanes[1*], Diana De Santiago[1], Andrea Cerdán-Pasarán[1], Sanal Kozhiparambil[1], Shadai Lugo-Loredo[1], Camilo Jiménez[2].

1: Ciencia y Tecnología en Energía Sustentable, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Nuevo León. San Nicolas de los Garza, Nuevo León, México, 66455.
e-mail: javier.hernandezmg@uanl.edu.mx
2: Refrigeración y Bombas de Calor, IER-UNAM, Temixco, Morelos, México, 62580.

Resumen: *El presente estudio muestra un análisis energético comparativo de tres sistemas avanzados de poligeneración. En primer lugar, se expone un sistema base que sirve como punto de referencia, Ciclo I (potencia-calentamiento) (Figura 1a). Luego, se introducen modificaciones para incorporar el efecto de refrigeración, Ciclo II (Figura 1b), y finalmente se aumenta la producción global de potencia añadiendo un Ciclo Orgánico de Rankine ORC, Ciclo III (Figura 1c). Para analizar los sistemas propuestos, se llevaron a cabo diversos estudios paramétricos, abarcando una variedad de aspectos como los niveles de temperaturas, la relación de presiones, la relación de flujos másicos, y las cargas térmicas, entre otros. Con los resultados obtenidos se examinaron los parámetros energéticos η_{th}, $\eta_{Ieff,}$ y ratio de los sistemas propuestos. Como valores promedio, para los ciclos I, II y III, se obtuvieron valores de η_{th} de 0.53, 0.46 y 0.58; $\eta_{I,eff}$ de 0.14, 0.15 y 0.07; y ratios de 0.07, 0.17 y 0.25, respectivamente. Con los resultados obtenidos se muestran tres propuestas energéticas alternativas que funcionan con temperaturas bajas de operación (150 °C) para producir potencia-calor revalorizado, y enfriamiento.*



(a) (b) (c)

Figura 1. Bombas de calor modificadas para la producción de refrigeración, potencia y calentamiento.

Palabras clave: bombas de calor, eficiencia energética, refrigeración, potencia, calentamiento.

1. INTRODUCCIÓN

El progreso industrial a nivel global y la creciente dependencia de los combustibles fósiles han impulsado una demanda cada vez mayor de recursos naturales y energéticos. Esta situación ha desencadenado una crisis energética y, como consecuencia, ha causado un significativo deterioro ambiental debido a las elevadas emisiones de dióxido de carbono (CO_2). Se estima que dicha tendencia continúe en aumento debido a que la generación de energía eléctrica refleja un papel importante en la creciente población para el desarrollo de la vida humana y las tendencias en cada estilo de vida [1]. Según la agencia internacional de energía (EIA), en 2022 se observó el mayor aumento de emisiones de CO_2 en el sector de generación de calor y electricidad, con un incremento del 1.8% (equivalente a 261 millones de toneladas, Mt) respecto a las emisiones registradas en 2021. Este aumento condujo a un nuevo máximo histórico neto de emisiones en el sector energético, alcanzando las 14.6 gigatoneladas (Gt). Dicho aumento se relaciona con el incremento en la demanda mundial de electricidad, el cual creció un 2.7 %. A nivel mundial, las emisiones provenientes de procesos industriales y otras actividades, medidas en términos equivalentes de dióxido de carbono, alcanzaron un máximo incrementándose a 39.3 $GtCO_2e$, mientras que las emisiones del uso de energía aumentaron a 34.4 $GtCO_2e$. En conjunto, las emisiones derivadas del consumo de energía representaron el 87% del total de emisiones globales [2]. Actualmente, muchas industrias mundiales desperdician calor residual liberándolo a la atmósfera a bajas temperaturas, lo que reduce la eficiencia global de las plantas industriales. Se estima que sólo en Estados Unidos se desaprovechan alrededor de 950 PJ/año (900 TBtu/año) de calor residual a temperaturas inferiores de 230 °C. Este calor residual industrial puede originarse a partir de gases de escape de combustión, gases calientes de hornos de secado, agua de refrigeración, entre otros [3]. En años recientes se han implementado políticas para promover la adopción de sistemas energéticos sostenibles con el fin de mitigar las emisiones de carbono, así como diversas tecnologías para recuperar calor en los procesos industriales entre las cuales se incluyen intercambiadores de calor, precalentadores, bombas de calor de absorción (AHP), ciclos orgánicos de Rankine (ORC), ciclos de Kalina y Goswami, entre otras [4]. Respecto a la implementación de AHP en sistemas de poligeneración Xudong Ma et al. [5] analizó un sistema de vapor con bomba de calor de alta temperatura para la recuperación de calor residual y producción de vapor a alta temperatura, los resultados mostraron un valor de coeficiente de rendimiento (COP) de 2.73 y una eficiencia exergética máxima de 43.26% concluyendo en la mejora para la reducción anual de emisiones en este tipo de bombas de calor. Tong Wang et al. [6] diseñó un sistema que utiliza calor residual emitido de centrales eléctricas que junto con el ciclo Rankine orgánico de baja temperatura (ORC) y otras tecnologías genera energía, desala aguas residuales salinas y proporciona regeneración en sistemas residenciales, se evaluó mediante parámetros de ganancia y medios de trabajo en el ORC reflejando que la pérdida de exergía del condensador disminuyó un 33 % y la ganancia total de salida del sistema aumentó un 47% en comparación con el sistema ORC independiente. Kuanrong Qiu y Martin Thoma [7] desarrollaron un modelo para un sistema de bomba de calor por compresión de dos etapas con la configuración del sistema que contiene un ciclo economizador cerrado e inyección de refrigerante entre etapas, evaluando con los parámetros intermedios óptimos al COP máximo posible. Demostró que la bomba de calor de las dos etapas alcanza un COP de 2.85 y un COP de 2.7 a una temperatura ambiente de −30 °C utilizando R290 y R410A, respectivamente. Uche J. et al. [8] realizó un análisis 3E integral (energético, ambiental y económico) para una serie de configuraciones de poligeneración para la producción de frío y agua desalinizada ya sea a partir de calor o electricidad, lo que resulta en cuatro poligeneraciones distintas con esquemas que dependen de la energía solar y de biomasa, los resultados revelaron que los esquemas demostraron valores favorables para PESR (índice de ahorro de energía primaria) y índice de reducción de CO_2, de alrededor de 0.72 y 0.85, respectivamente. Shanshan Zheng et al. [9] presentó un innovador sistema poligenerativo de energía, calefacción, refrigeración, aguadulce y metano mediante energía geotérmica, empleado enfoques económicos y ambientales de análisis dando como resultado la eficiencia exergética, el costo total de los productos y las tasas de impacto exergo ambiental de 28,30%, 4,153 $/h y 73,48 mPts/h, respectivamente. M. A. Alharthi et. al [10] analizaron un sistema de energía combinada con la capacidad de generar electricidad, calefacción y refrigeración, maximizando el uso de la radiación solar independientemente de las limitaciones de los colectores, usando la solución LiBr-H_2O. Los resultados de la simulación revelaron una eficiencia de la primera ley entre el 64% y el 72%, y una eficiencia de la segunda ley del 19% al 25% con un aumento en la irradiación solar de 400 a 1000 W/m^2. Cheng Xu et. al [11] formuló un análisis termodinámico de un sistema de poligeneración alimentado por biomasa, diseñado para la síntesis de amoníaco y la generación simultánea de electricidad usando el ciclo de energía Allam. Como resultado de este análisis, se obtuvo una destacada relación de ahorro de energía del 7.61% en comparación con otros sistemas. La eficiencia de generación y consumo de energía equivalente para la síntesis de amoniaco se registraron en 50.95% y 30.25 de GJ/tonelada-NH_3, respectivamente. Además, se demostró que la eficiencia

exergética del sistema de poligeneración puede alcanzar el 51.5%, superando en un 3.9% a los sistemas de referencia utilizados en el estudio. A partir de la revisión bibliográfica, se presenta un innovador estudio sobre una bomba de calor modificada diseñada para aplicaciones de poligeneración, la cual tiene la capacidad de producir energía eléctrica, calor revalorizado y refrigeración de manera simultánea. Este sistema propuesto se destaca por su utilización de dos fuentes térmicas de baja temperatura (< 150 °C), lo cual es esencial para la viabilidad de sistemas alternativos de baja entalpía, por ejemplo, energía solar, biomasa, geotermia o calor residual industrial. El objetivo fundamental es generar energía limpia para promover procesos sostenibles y respetuosos con el medio ambiente. En este contexto, es esencial analizar las condiciones de operación, las cantidades de energía y el rendimiento energético alcanzado por el sistema propuesto.

2. CONFIGURACIÓN DE LOS CICLOS Y MODELO TERMODINÁMICO

La Figura 1a muestra el diagrama esquemático de la configuración base propuesta [1, 3-4], que permite la generación simultánea de calor revalorizado y potencia. A partir de esta configuración base, se plantean dos alternativas que incoroporan el efecto de enfriamiento. En la configuración 1b, se acopla una bomba de calor adicional diseñada para generar del efecto de enfriamiento, mientras que en la configuración 1c se agrega un ciclo organico de Rankine (ORC) con la finalidad de aumentar la producción global de potencia del sistema base analizado. En lo que respecta a la simulación y análisis de resultados, se resuelven los balances de materia y energía de los componentes que conforman los ciclos propuestos, así como varias consideraciones termodinámicas que simplifican los análisis [3-4, 12-13]. Los balances de materia y energía en estado estacionario para los componentes de los ciclos se establecen como sigue:

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \tag{1}$$

$$\sum \dot{m}_e h_e - \sum \dot{m}_S h_s + \dot{Q} - \dot{W} = 0 \tag{2}$$

donde $\dot{m}$ denota los flujos másicos (kg/s); $\dot{Q}$ las cargas térmicas (kW); $\dot{W}$ la potencia mecánica (kW); h la entalpía específica (kJ/kg); los subíndices e y s, entrada y salida, respectivamente. Para cuantificar el desempeño de los sistemas propuestos se contemplan tres parámetros diferentes, la eficiencia térmica general (η_{th}), la eficiencia energética de primera ley ($\eta_{I,eff}$), y el ratio. La η_{th} se define como la relación entre los productos totales de salida (potencia mecánica, calor revalorizado, y capacidad de enfriamiento) y las entradas de energía externa al sistema (generadores y evaporador de alta temperatura). Este parámetro se basa en la primera ley de la Termodinámica que analiza el concepto de costo-beneficio para sistemas de conversión de energía [13], tal como se muestra en la Ec. 3.

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{Q}_{A1} + \dot{Q}_{E2}}{\dot{Q}_{G1} + \dot{Q}_{G2} + \dot{Q}_{E1}} \tag{3}$$

La $\eta_{I,eff}$ muestra una alternativa de cuantificar la calidad del calor (calor revalorizado y capacidad de enfriamiento) para sumar con la potencia mecánica en igualdad conceptual. De esta manera se tiene un parámetro en igualdad de condiciones y termodinámicamente consistente para sistemas poligenerativos [13], (Ec. 4).

$$\eta_{I,eff} = \frac{\dot{W}_{net} + \dot{E}x_{A1} + \dot{E}x_{E2}}{\dot{Q}_{G1} + \dot{Q}_{G2} + \dot{Q}_{E1}} \tag{4}$$

donde $\dot{E}x_{A1}$ y $\dot{E}x_{E2}$ representan la exergía producida por el absorbedor (calor revalorizado) y evaporador (capacidad de enfriamiento), respectivamente (Ecs. 5 y 6).

$$\dot{E}x_{A1} = \sum \dot{m}_e \dot{\psi}_e - \sum \dot{m}_s \dot{\psi}_s \tag{5}$$

$$\dot{E}x_{E2} = \left(\sum \dot{m}_e \dot{\psi}_e - \sum \dot{m}_s \dot{\psi}_s\right) / \eta_R \tag{6}$$

la exergía asociada con la salida de enfriamiento ($\dot{E}x_{E2}$) debe dividirse por una eficiencia razonable de la segunda ley para un ciclo de refrigeración, lo que equivale a dividir la capacidad de enfriamiento por un COP práctico. En este caso se toma η_R = 40% [12, 13]. Finalmente, se contempla el Ratio como una relación entre los productos obtenidos por los sistemas propuestos, potencia mecánica, calor revalorizado y capacidad de enfriamiento (Ec. 7).

$$\text{Ratio} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{Q}_{A1} + \dot{Q}_{E2}} \tag{7}$$

Es importante resaltar que las Ecs. 3, 4 y 7 se implementan en los tres sistemas propuestos de la Figura 1, considerando la simplificación del término que no se produce según sea el caso, por ejemplo, $\dot{Q}_{E2}$ = 0 para el caso de la Figura 1a.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La evaluación del desempeño termodinámico de los ciclos de absorción combinados se lleva a cabo estableciendo las siguientes condiciones operativas: T_E = 5 °C (nivel energético para producción de enfriamiento), T_C = 30 °C (temperatura de sumidero térmico), T_{GL} = 75 °C (temperatura de suministro de energía a baja temperatura), T_{GH} = 150 °C (temperatura suministro de energía a alta temperatura), $\dot{m}_{R1} = \dot{m}_{R2}$ = 0.15 kg/s (caudal de refrigerante producido en los generadores), RP = 1.5 (relación de presiones), RM = 0.5 (relación de flujos másicos). La temperatura de revalorización de la energía (T_{AH}) es un parámetro crucial ya que define el calor revalorizado para los ciclos representados en la Figura 1a-b, y establece una conexión con el sistema ORC para mejorar la generación de trabajo mecánico (Figura 1c). En la Figura 2, se muestran los productos obtenidos por los sistemas de absorción combinados respecto a la T_{AH}.

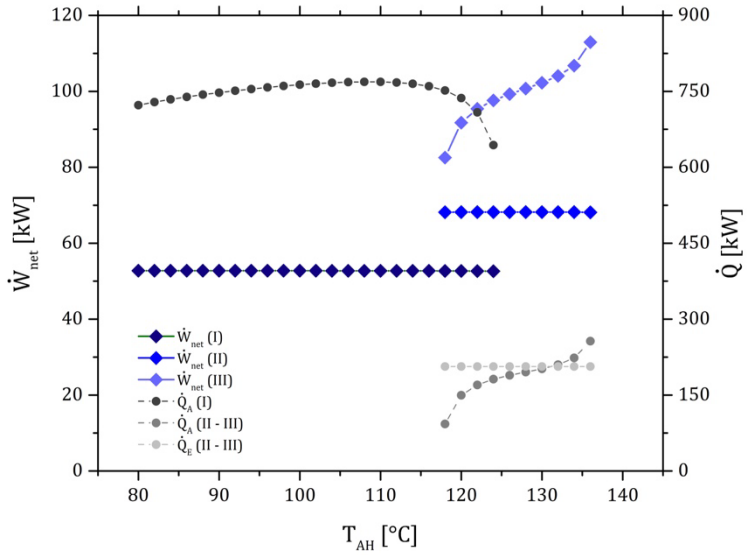


Figura 2. Principales productos energéticos obtenidos por las bombas de calor modificadas ($\dot{W}$, $\dot{Q}_A$ y $\dot{Q}_E$).

Como se puede ver en la Figura 2, grosso modo existen dos rangos de operación: el primero entre 80 y 125 °C de T_{AH} para el ciclo de la Figura 1a, y el segundo que opera en el rango entre 118 y 138 °C para los ciclos de la Figura 1b-c. El cambio en los rangos de temperaturas de operación obedece a que los ciclos II y III quedan más restringidos debido a la adición de una tercera bomba de calor, en estos casos para añadir el efecto de enfriamiento. Respecto a las potencias mecánicas obtenidas, se obtuvieron valores de 53 y 68 kW para los ciclos I y II, respectivamente, y un rango de 83 a 122 kW para el ciclo III. En lo que respecta a la producción de calor revalorizado, el ciclo I produce entre 570 y 770 kW, mientras que los ciclos II y III producen entre 92 y 256 kW. La disminución considerable en el calor revalorizado se debe a que los sistemas II y III también producen un efecto de enfriamiento (187 kW), y en este último caso, la energía revalorizada se utiliza para producir más trabajo mecánico en el ORC. En la Figura 3 se presentan los parámetros de eficiencias mostrados en el capítulo 2. Para el ciclo I, entre valores de T_{AH} de 80 a 120 °C, se presentan valores cuasi constantes en

la η_{th}, de 0.53, llegando al límite de operación termodinámico en 125 °C con η_{th}, de 0.46 [1, 3, 4]. Por su parte, en el ciclo II y III se obtienen rangos entre 0.38-0.49, y 0.53-0.59, respectivamente. Para el caso particular del ciclo II se reduce ligeramente le η_{th}, para producir también el efecto de enfriamiento, y para el caso III se puede apreciar que la generación extra de potencia mecánica del ORC ofrece la mejor relación de energía entregada. En lo que respecta a la $\eta_{I,eff}$, se obtienen rangos de 0.12-0.16, 0.14-0.17 y 0.12-0.14, respectivamente. Si bien el ciclo III es el que ofrece la mejor potencia mecánica a las condiciones de operación establecidas, también es el que ofrece la menor relación energética $\eta_{I,eff}$, debido a las irreversibilidades que se van añadiendo con los sistemas adicionales propuestos. Los valores obtenidos son coherentes con los reportados en la bibliografía, y ligeramente superiores a otras propuestas energéticas [12, 13].

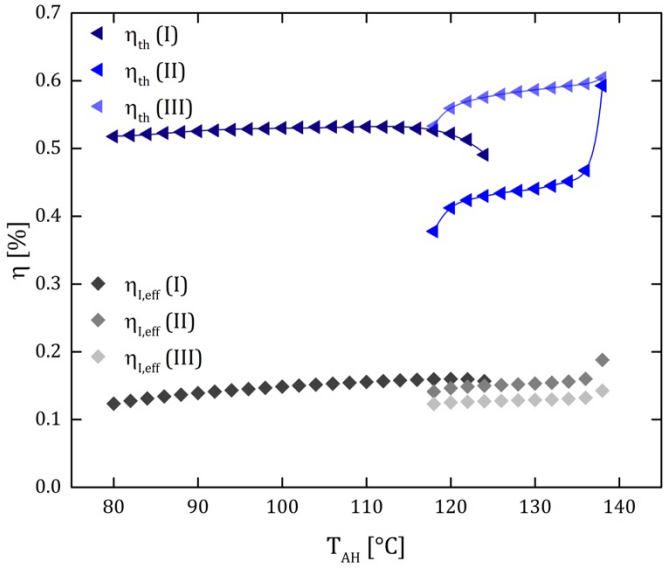


Figura 3. Parámetros de eficiencia en función de la T_{AH} de los ciclos termodinámicos propuestos.

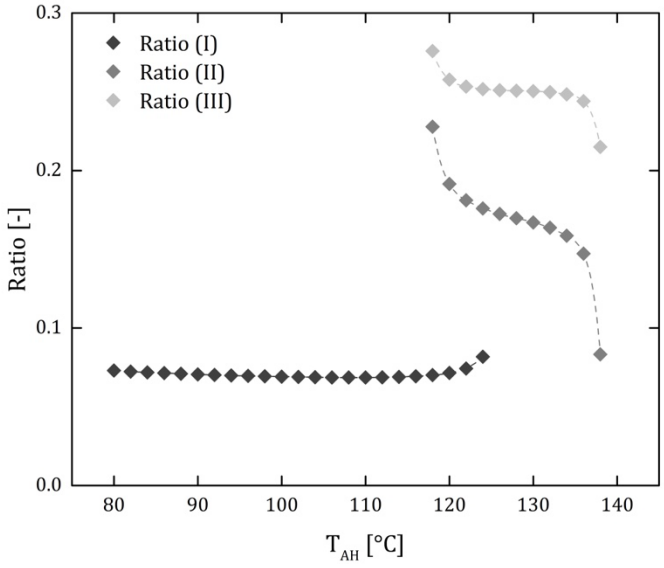


Figura 4. Parámetros ratio en función de la T_{AH} de los ciclos termodinámicos propuestos.

Finalmente, en la Figura 4 se presenta el parámetro Ratio en función de la T_{AH}. Este indicador muestra las regiones que ofrecen la mejor relación de potencia generada por el sistema, respecto al calor revalorizado y potencia frigorífica producidas.

4. CONCLUSIONES

El presente estudio se centra en el análisis de un sistema de absorción modificado que combina la generación de potencia y calentamiento, además de incorporar dos modificaciones alternativas para producir efectos de enfriamiento y mejorar adicionalmente la potencia generada mediante un ORC. Estos sistemas ofrecen la capacidad de operar con fuentes térmicas de baja temperatura (150 °C), lo que les permite aprovechar una amplia gama de fuentes térmicas sostenibles, como la energía solar, biomasa, geotermia o el calor residual industrial. En las condiciones operativas simuladas, se lograron alcanzar potencias mecánicas máximas de 53, 68 y 122 kW para los ciclos I, II y III, respectivamente. En cuanto a las cargas térmicas, se obtuvieron calores de revalorización máximos de 770 kW para el ciclo I, y 256 kW para los ciclos II y III. Respecto a la producción de las cargas de enfriamiento, los ciclos II y III lograron producciones de 187 kW. La reducción de los calores de revalorización de energía en los ciclos II y III está directamente relacionada con la producción de enfriamiento y la potencia mecánica adicional. Finalmente, se evaluaron los ciclos propuestos según parámetros de eficiencia térmica global (η_{th}), eficiencia efectiva de primera ley ($\eta_{I,eff}$) y ratio. Como valores promedio, para los ciclos I, II y III, se obtuvieron valores de η_{th} de 0.53, 0.46 y 0.58; $\eta_{I,eff}$ de 0.14, 0.15 y 0.07; y ratios de 0.07, 0.17 y 0.25, respectivamente. Es importante destacar que la mejor propuesta depende directamente de la aplicación a la que se destine el ciclo termodinámico. Para obtener mejores producciones de potencia-calor revalorizado, se recomienda el ciclo I, mientras que para efectos de enfriamiento se sugieren los ciclos II y III, y para una mayor potencia mecánica se prefiere el ciclo III.

REFERENCIAS

[1] J.A. Hernández-Magallanes, L. Domínguez-Inzunza, K. Lugo-Loredo, K. Sanal, A. Cerdán-Pasarán, S. Tututi-Avila, L. Morales. Energy and Exergy Analysis of a Modified Absorption Heat Pump (MAHP) to Produce Electrical Energy and Revaluated Heat, Processes, 2022, 10: 1-19.

[2] O. Chen, V. García-Tapia, A. Rogé, ..., G. Viscusi. Statistical review of world energy, Energy Institute, 2023, 72: 3-9.

[3] J.A. Hernández-Magallanes, C.L. Heard, R. Best, W. Rivera. Modeling of a new absorption heat pump-transformer used to produce heat and power simultaneously, Energy. 2018, 165: 112-133.

[4] J.A. Hernández-Magallanes, Salvador Tututi-Avila, Andrea Cerdán-Pasarán, L.I. Morales, W. Rivera. Thermodynamic simulation of an absorption heat pump-transformer-power cycle operating with the ammonia-water mixture, Applied Thermal Engineering, 2021, 182: 1-15.

[5] M. Xudong, D. Yanjun, L. Biao and W. Yuting . Energy, exergy, economic, and environmental analysis of a high-temperature heat pump steam system, International Journal of Refrigeration, 2024, 160: 423-436.

[6] T. Wang, T. Zhou, Y. Feng, M. Zhang, S. Zhu and H. Yang, Poly-generation system with waste heat of low-temperature flue gas in power plants based on organic Rankine cycle, Applied Thermal Engineering, 2024, 242: 1-16.

[7] K. Qiu, M. Thomas. Modeling and optimization of two-stage compression heat pump system for cold climate applications, Journal of Building Engineering, 2024, 82: 1-11.

[8] J. Uche, A. Martínez-Gracia, I. Zabalza, S. Usón. Renewable Energy Source (RES)-Based Polygeneration Systems for Multi-Family Houses, Sustainability, 2024, 16: 945.

[9] S. Zheng, Q. Hai, X. Zhou, R.J. Stanford. A novel multi-generation system for sustainable power, heating, cooling, freshwater, and methane production: Thermodynamic, economic, and environmental analysis, Energy, 2024, 290: 1-17.

[10] M. A. Alharthi, A. Khaliq, S. Alqaed, y F. Almehmadi. Investigation of new combined cooling, heating and power system based on solar thermal power and single-double-effect refrigeration cycle, Energy Reports, 2023, 9: 289–309.

[11] C. Xu, Y. Liu, Q. Zhang, T. Xin, R. Zhao, M. Wang, … y S. Lu. Thermodynamic analysis of a novel biomass polygeneration system for ammonia synthesis and power generation using Allam power cycle, Energy Convers Manag, 2021, 247: 1-15.

[12] S. Vijayaraghavan, D. Y. Goswami. On evaluating efficiency of a combined power and cooling cycle, Journal of Energy Resources Technology, ASME, 2003, 125: 221-227.

[13] D. Ayou, R. Saravanan, J. C. Bruno, A. Coronas. Analysis and simulation of modified ammnonia/water absorption cycle for power and cooling applications, International Journal of Low-Carbon Technologies, 2013, 8: i19-i26.