

INVESTIGACIÓN DE ENERGÍA Y EXERGÍA DE UNA NUEVA PROPUESTA DE ORC HÍBRIDO: PARTE 1

Delia Mariana Olascoaga Martínez¹, Vanessa Paola Yáñez Paz^{1*}, Ambriz-Díaz Víctor M.², Rubio-Maya Carlos³, Ruiz-Casanova Eduardo³

¹ Tecnológico Nacional de México/I. T. Chihuahua
Departamento de Ingeniería Química y Bioquímica
Av. Tecnológico, 2909, C.P. 31310, Chihuahua, México.
L21060898@chihuahua.tecnm.mx

² Tecnológico Nacional de México/I. T. Chihuahua
División de Estudios de Posgrado e Investigación
Av. Tecnológico, 2909, C.P. 31310, Chihuahua, México.
victor.ad@chihuahua.tecnm.mx

³ Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo
Facultad de Ingeniería Mecánica
Av. Francisco J. Mújica s/N, C.P. 58030, Morelia, Michoacán, México
carlos.maya@umich.mx; lalo.r.casanova@gmail.com

RESUMEN

Este artículo presenta una primera parte de una investigación energética y exergética de una nueva propuesta de un ciclo Rankine orgánico (ORC) híbrido flash, en el cual se implementan dos fuentes de energía renovable: la energía solar y la energía geotérmica, para impulsar el ciclo. Para la investigación, se desarrollan modelos termodinámicos basados en las leyes de la termodinámica y se resuelven utilizando el software EES. Los resultados muestran que el ciclo logra una potencia neta de 42.18 kW y una eficiencia energética y exergética de 6.22% y 41.5%, respectivamente. Asimismo, se encontró que el incremento de la presión en el campo solar mejora tanto la potencia neta como las eficiencias de energía y exergía, además de reducir la destrucción de exergía. Finalmente, los resultados obtenidos evidencian la posibilidad de implementar estrategias que optimicen el diseño y funcionamiento de los ciclos ORC.

Palabras Clave: Nueva propuesta, ORC híbrido, energía, exergía.

ABSTRACT

This paper presents the first part of an energy and exergy investigation of a novel hybrid flash Organic Rankine Cycle (ORC) configuration, in which two renewable energy sources, solar and geothermal energy, are integrated to drive the cycle. For this research, thermodynamic models based on the laws of thermodynamics were developed and solved using the EES software. The results show that the proposed cycle achieves a net power output of 42.18 kW, with energy and exergy efficiencies of 6.22% and 41.5%, respectively. It was also found that increasing the pressure in the solar field enhances the net power output as well as the energy and exergy efficiencies, while simultaneously reducing exergy destruction. These findings demonstrate the potential of implementing strategies to optimize the design and performance of ORC systems driven by renewable energy sources.

Keywords: New proposal, hybrid ORC, energy, exergy.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años el uso de energía proveniente de combustibles fósiles ha propiciado distintos problemas ambientales, económicos y sociales; al ser una fuente de energía finita que además se favorece la producción de gases de efecto invernadero que a su vez impulsan el cambio climático y el calentamiento global [1]. En este contexto, para contrarrestar estas problemáticas, se ha comenzado a promover el uso de fuentes de energía renovable, tales como la solar y la geotermia. Estas alternativas ofrecen múltiples ventajas, entre ellas, la nula emisión de gases contaminantes durante su uso y una menor dependencia de combustibles fósiles, consolidándose, así como alternativas más seguras y respetuosas con el medio ambiente. La geotermia es considerada inagotable, debido a que el calor se repone constantemente desde el núcleo de la Tierra. Sin embargo, actualmente su uso representa apenas el 0.34% de la contribución energética mundial [2]. Actualmente, el aprovechamiento efectivo de esta fuente de energía se logra gracias a los sistemas geotérmicos. Un sistema geotérmico típico está compuesto por tres partes principales: una fuente de calor, un fluido portador de calor y un depósito de calor. En cuanto al principio de operación, primero se extrae el calor de la corteza terrestre a través de tuberías subterráneas donde circula el fluido geotérmico, después el calor extraído se envía a la superficie, donde puede ser usado para generar electricidad mediante tecnologías de conversión de energía térmica.

Una de las tecnologías más prometedoras dentro del campo de la geotermia es el ciclo Rankine orgánico (ORC). Mediante la tecnología ORC es posible aprovechar las fuentes de calor de media o baja temperatura gracias al uso de fluidos orgánicos que poseen bajas temperaturas de cambio de fase, lo cual facilita la conversión de energía geotérmica a energía eléctrica [3]. Un

sistema geotérmico puede generar electricidad con la tecnología ORC a partir de temperaturas desde los 90°C y hasta los 170°C [4]. Sin embargo, la eficiencia térmica del ORC depende de la temperatura de la fuente de calor. Por tanto, a medida que la temperatura de la fuente de calor es menor, la eficiencia térmica decrece. Una manera de mejorar la eficiencia de un ORC geotérmico es incrementar la temperatura de la fuente de calor mediante la integración de energía auxiliar. En esta dirección, la energía solar al ser una fuente renovable e infinita es una excelente candidata para integrarse en sistemas geotérmicos y mejorar el rendimiento global del sistema. La combinación de la energía geotérmica con la solar ha demostrado mayores alcances de conversión de energía y ha originado el nacimiento de sistemas híbridos renovables [5]. En este contexto, la hibridación permite crear una sinergia de las fortalezas presentes en ambas tecnologías.

En la actualidad la conversión de energía térmica mediante sistemas híbridos ha despertado un gran interés científico. Comúnmente para la evaluación, el desempeño y diseño de estos sistemas se emplean las leyes de la termodinámica basándose en conceptos de energía y exergía. Suresh et al. [6] realizaron un análisis termodinámico de una central eléctrica híbrida de ciclo Rankine con turbina de vapor, empleando un colector solar cilindro-parabólico. Según los datos obtenidos la hibridación incrementa la capacidad de la central eléctrica de 1 a 20 MW y mejora la eficiencia del sistema entre un 20% y un 36%. Asimismo, reduce la superficie del campo solar. Khosravi et al. [7] destacaron las ventajas de la energía geotérmica frente a la energía solar y eólica, específicamente en la continuidad que presenta; sin embargo, indican que posee una vida útil corta, por lo que la hibridación se presenta como una estrategia para superar dichas limitaciones. Concluyeron que el desempeño de la geotermia es superior al de la energía solar, logrando una reducción de costos energéticos. Wan et al. [8] llevaron a cabo el análisis de un sistema híbrido geotérmico-solar, donde observaron que la energía solar aumenta la capacidad de generación de energía del sistema hasta un valor máximo de 12.76MW y una eficiencia del 23.82%. Anaya et al. [9] demostraron que al integrar un ciclo Rankine geotérmico de doble flash con un campo solar de torre central existe la capacidad de tener un incremento de producción energética, sobrecalentando el vapor que sale del proceso flash proveniente de un pozo geotérmico, a la entrada de las turbinas con la ayuda de un campo solar. El líquido saliente del proceso flash pasa por un intercambiador de calor, donde con ayuda de la energía solar se calienta, para convertirse en vapor y ser enviado también a las turbinas. Los descubrimientos realizados evidencian el potencial de la aplicación de configuraciones híbridas como las mencionadas previamente.

A partir de las evidencias presentadas, surge la necesidad de investigar y proponer nuevas configuraciones que integren los sistemas geotérmicos y solares para maximizar la eficiencia. Por

lo anterior, la innovación de este trabajo se centra en la propuesta de un nuevo sistema híbrido integrando un ciclo Rankine orgánico flash activado con energía geotérmica y aporte de calor auxiliar solar. Básicamente, el calor geotérmico se utiliza para calentar el fluido de trabajo y posteriormente obtener líquido y vapor mediante un proceso flash. La energía solar se incorpora en el ciclo al incluir colectores solares parabólicos para asegurar el aprovechamiento del líquido saliente del proceso flash, aportando una mayor capacidad de generación energética. Por lo anterior, para evaluar la viabilidad de la propuesta los autores persiguen el objetivo de realizar una investigación de energía y exergía del sistema híbrido, con el fin de ofrecer una visión clara y fundamentada sobre su verdadero potencial de implementación.

2. DESCRIPCIÓN DEL ORC HÍBRIDO

La nueva propuesta consiste en un ciclo Rankine orgánico híbrido. El diseño térmico del ORC híbrido se basa en un ciclo Rankine orgánico flash. La generación de electricidad del ORC se logra con el aporte de calor geotérmico (estados 12-14) y aporte de calor solar captado con colectores solares parabólicos. La operación del ORC comienza pasando el fluido de trabajo (R152a) por la bomba, donde se eleva la presión, luego el líquido se calienta en el economizador y entra al evaporador cambiando de líquido a una mezcla de vapor-líquido, en ambos procesos de calentamiento la fuente de calor proviene de la geotermia. Posteriormente la mezcla es separada en un separador flash, el vapor es enviado a una turbina de alta presión, mientras que el líquido es sometido a un proceso de estrangulamiento mediante una válvula y trasladado a una zona de colectores solares parabólicos para evaporarlo. A la salida de los colectores y de la turbina de alta presión ambos flujos se mezclan y se envían a una turbina de baja presión. Al salir de la turbina el R152a ingresa a un condensador donde se convierte en líquido, una vez convertido en líquido vuelve a la bomba, dando inicio nuevamente al ciclo.

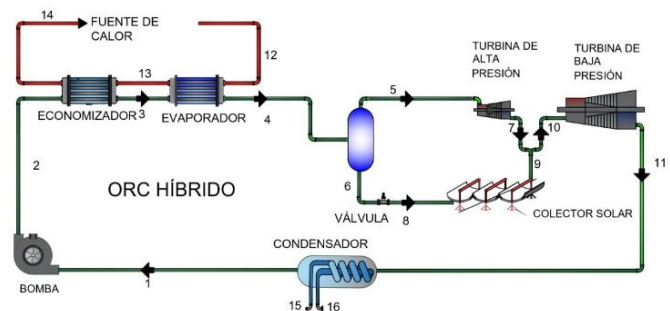


Figura 1. Diagrama del ORC híbrido.

2.1. Consideraciones para el análisis

Para realizar el análisis de energía y exergía del ORC híbrido, se establecen las siguientes suposiciones [10] :

- La temperatura del fluido en la entrada de la bomba es de 40°C.
- El fluido entrante a la bomba es líquido saturado.
- La temperatura de salida en el evaporador es de 75°C.
- El fluido saliente del evaporador posee una calidad de 90%.
- La temperatura del fluido geotérmico a la entrada del ORC es de 90°C y a la salida es de 75°C.
- El flujo másico del fluido geotérmico es de 10 kg/s.
- La eficiencia en las turbinas es de 75% y en la bomba es de 70%.
- El fluido que circula por el condensador entra a una temperatura de 27°C y sale a una temperatura de 32°C.
- A la salida de los colectores solares el fluido es completamente vapor.
- El calor específico de los líquidos se establece en 4.19 kJ/kg-K.
- La irradiación solar utilizada es de 1 kW/m².
- La eficiencia de los colectores solares es de 76.4%.
- Para el análisis exergético se utilizó una temperatura de referencia de 25°C y una presión de referencia de 100 kPa.
- La descarga de la turbina de alta presión y el flujo proveniente de los colectores solares, se unen mediante un mezclador.

3. MODELOS DE ENERGÍA Y EXERGÍA

El modelo energético parte de la primera ley de la termodinámica y la ecuación de conservación de masa. Por otro lado, el modelo exergético se establece a partir de la exergía física y del balance de destrucción de exergía. Ambos modelos se implementan y se resuelven utilizando el software Engineering Equation Solver (EES).

3.1. Modelado energético

La primera ley de la termodinámica (Ecuación 1), permite el modelado de sistemas térmicos, ya que establece el principio de conservación de la energía [11]:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum_e \dot{m} (h + Ec + Ep) - \sum_s \dot{m} (h + Ec + Ep) \quad (1)$$

La Tabla 1 expone los balances de energía y masa de cada uno de los componentes que conforman el ORC híbrido, partiendo de la ley de conservación de la masa.

Tabla 1. Ecuaciones de balance de energía y masa de los componentes del sistema.

Componente	Masa	Energía
Bomba	$\dot{m}_2 = \dot{m}_1$	$\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{W}_B = \dot{m}_2 \cdot h_2$

Economizador	$\dot{m}_2 = \dot{m}_3$ $\dot{m}_{13} = \dot{m}_{14}$	$\dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_{13} \cdot h_{13} = \dot{m}_3 \cdot h_3 + \dot{m}_{14} \cdot h_{14}$
Evaporador	$\dot{m}_3 = \dot{m}_4$ $\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13}$	$\dot{m}_3 \cdot h_3 + \dot{m}_{12} \cdot h_{12} = \dot{m}_4 \cdot h_4 + \dot{m}_{13} \cdot h_{13}$
Separador	$\dot{m}_5 + \dot{m}_6 = \dot{m}_4$	$\dot{m}_5 \cdot h_5 + \dot{m}_6 \cdot h_6 = \dot{m}_4 \cdot h_4$
Válvula	$\dot{m}_6 = \dot{m}_8$	$\dot{m}_6 \cdot h_6 = \dot{m}_8 \cdot h_8$
Colectores solares	$\dot{m}_9 = \dot{m}_8$	$\dot{m}_8 \cdot h_8 + \dot{Q}_{solar} = \dot{m}_9 \cdot h_9$
Turbina de alta presión	$\dot{m}_7 = \dot{m}_5$	$\dot{m}_5 \cdot h_5 = \dot{W}_{Thp} + \dot{m}_7 \cdot h_7$
Mezclador	$\dot{m}_{10} = \dot{m}_7 + \dot{m}_9$	$\dot{m}_7 \cdot h_7 + \dot{m}_9 \cdot h_9 = \dot{m}_{10} \cdot h_{10}$
Turbina de baja presión	$\dot{m}_{10} = \dot{m}_{11}$	$\dot{m}_{10} \cdot h_{10} = \dot{W}_{Tlp} + \dot{m}_{11} \cdot h_{11}$
Condensador	$\dot{m}_{11} = \dot{m}_1$	$\dot{m}_{11} \cdot h_{11} = \dot{Q}_c + \dot{m}_1 \cdot h_1$

Para determinar el área de colectores solares se utiliza [12]:

$$A_T = \frac{Q_{solar}}{I \cdot \eta_{cs}} \quad (2)$$

A partir de la Ecuación (2) se evalúa el número de colectores necesarios mediante:

$$n_{cs} = \frac{A_T}{A_i} \quad (3)$$

La eficiencia energética es la relación entre el trabajo total producido y la suma de energías térmicas entrantes:

$$\eta_{en} = \frac{W_T - W_B}{Q_{ec} + Q_{ev} + Q_{solar}} \cdot 100 \quad (4)$$

3.2. Modelado exergético

El análisis exergético es una herramienta fundamental para complementar y mejorar el análisis energético, debido a que ofrece un panorama donde se muestran los valores reales de aprovechamiento de energía. Dado que dentro del sistema no se presentan reacciones químicas, el análisis exergético únicamente considera la exergía física, la cual representa la exergía total para cada estado.

El cálculo de la exergía para cada componente se realiza mediante [13]:

$$Ex_i = \dot{m}_i (h_i - h_{0R152a} - T_{0k} \cdot (S_i - S_{0R152a})) \quad (5)$$

En el caso del análisis de líquidos compresibles se utiliza la siguiente ecuación:

$$Ex_i = \dot{m}_i \cdot C_p \left[T_i - T_0 - T_{0K} \cdot \ln \left(\frac{T_i + 273.15}{T_{0K}} \right) \right] \quad (6)$$

La destrucción de exergía cuantifica las irreversibilidades presentes en el sistema, la cuales están directamente asociadas con la pérdida de rendimiento. En la Tabla 2 se describen las ecuaciones de destrucción de exergía para cada componente.

Tabla 2. Ecuaciones de destrucción de exergía de los componentes del sistema.

Componente	Destrucción de exergía
Bomba	$BEx_1 = W_B + \dot{m}_1 \cdot ex_1 - \dot{m}_2 \cdot ex_2$
Economizador	$BEx_2 = \dot{m}_2 \cdot ex_2 + Ex_{13} - \dot{m}_3 \cdot ex_3 - Ex_{14}$
Evaporador	$BEx_3 = \dot{m}_3 \cdot ex_3 + Ex_{12} - \dot{m}_4 \cdot ex_4 - Ex_{13}$
Separador	$BEx_4 = \dot{m}_4 \cdot ex_4 - \dot{m}_6 \cdot ex_6 - \dot{m}_5 \cdot ex_5$
Válvula	$BEx_5 = \dot{m}_6 \cdot ex_6 - \dot{m}_8 \cdot ex_8$
Colectores solares	$BEx_6 = ex_{solar} + \dot{m}_8 \cdot ex_8 - \dot{m}_9 \cdot ex_9$
Turbina de alta presión	$BEx_7 = \dot{m}_5 \cdot ex_5 - \dot{m}_7 \cdot ex_7 - W_{Thp}$
Mezclador	$BEx_m = \dot{m}_9 \cdot ex_9 + \dot{m}_7 \cdot ex_7 - \dot{m}_{10} \cdot ex_{10}$
Turbina de baja presión	$BEx_8 = \dot{m}_{10} \cdot ex_{10} - \dot{m}_{11} \cdot ex_{11} - W_{Tlp}$
Condensador	$BEx_9 = \dot{m}_{11} \cdot ex_{11} + Ex_{15} - \dot{m}_1 \cdot ex_1 - Ex_{16}$

La eficiencia exergética es la relación entre el trabajo neto y la suma de exergía en la entrada del sistema:

$$n_{ex} = \frac{W_{neto}}{Ex_{12} + Ex_{14}} \cdot 100 \quad (7)$$

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En esta sección 4 se muestran los resultados y discusiones derivados de esta investigación.

4.1. Resultados de energía

En esta subsección 4.1, se presentan los resultados energéticos, de los componentes que conforman el ORC híbrido flash. En la Figura 2, se observa la energía implicada en el ORC. Es visible que el componente que más energía requiere es el evaporador, correspondiente a 454.3 kW. La bomba ocupa 5.008 kW. El economizador demanda 174.2 kW. Los colectores solares exigen 50.16 kW. En cuanto a la distribución de energía de entrada al

ORC, el condensador representa la mayor distribución con un 93.1% (636.5 kW). La turbina de baja presión presenta un 5.7% (38.93 kW), y por último, la turbina de alta presión produce un 1.2% (8.26 kW). Finalmente, la válvula, el separador y el mezclador, no se representan debido a que sus flujos de energía no cruzan las fronteras del sistema termodinámico.

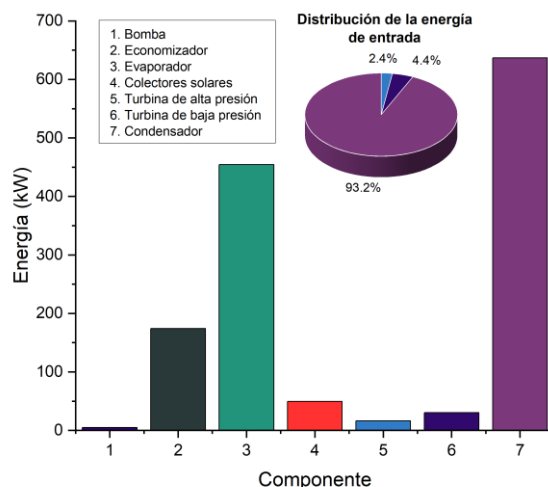


Figura 2. Flujos de energía en cada uno de los componentes.

4.2. Resultados de destrucción de exergía

En esta subsección 4.2, se muestran los resultados de la destrucción de exergía de los componentes que conforman el ORC híbrido, denotando que los colectores solares presentan la mayor destrucción de exergía, correspondiente al 41.9% (40.56 kW) del total. Mientras que, el separador no genera destrucción de exergía. El economizador manifiesta una destrucción de exergía de 8.412 kW. El evaporador presenta una destrucción de exergía de 10.38 kW. La válvula destruye solamente 0.1297 kW. La turbina de alta presión destruye 2.409 kW, y la turbina de baja presión destruye 12.36 kW. Por último, el condensador muestra una destrucción de exergía de 21.06 kW (ver Figura 3).

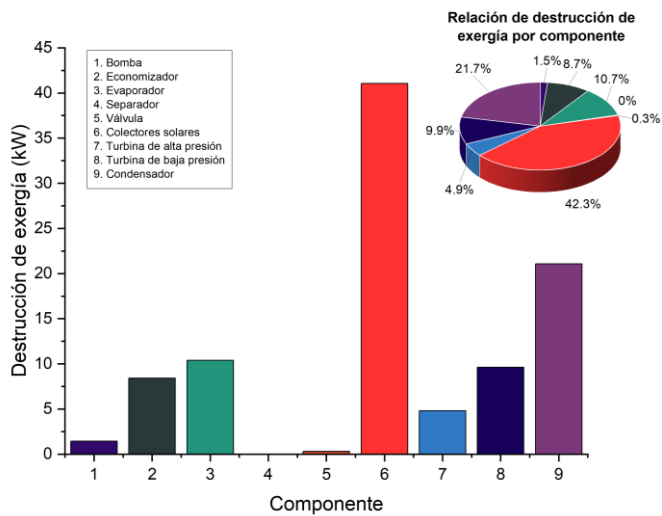


Figura 3. Destrucción de exergía en los componentes del ORC.

4.3. Desempeño del ciclo

En la Figura 4, se puede observar la gráfica que relaciona la presión (P_8) con el área de colectores solares requerida (A) y con la potencia neta generada en el sistema (W_{Neta}). El incremento de la potencia genera un aumento en ambos parámetros, lo que indica que al aumentar este valor se requiere una mayor superficie correspondiente al 3% más, lo que involucra una mayor cantidad de colectores solares y por lo tanto una inversión mayor. Sin embargo, también se presenta una mayor potencia de salida, la cual incrementa en 2.23 kW.

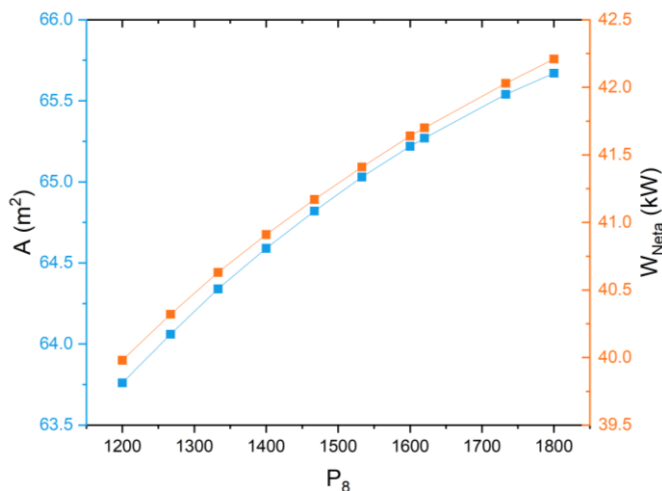


Figura 4. Influencia de la presión P_8 sobre el área de colectores solares y la potencia neta generada.

La Figura 5 analiza la relación entre la presión (P_8), la potencia neta generada y la destrucción total de exergía del ORC (Ex_{Total}). Se puede notar que, al incrementar la presión, la

potencia neta aumenta progresivamente hasta 42.21 kW una vez que la presión llega a 1,800 kPa. En contraste, la destrucción de exergía total disminuye en 0.85 kW. En consecuencia, se puede resaltar que mientras se obtiene mayor potencia, las irreversibilidades del sistema disminuyen, por lo tanto, a mayor presión se obtendría una mejor eficiencia exergética total.

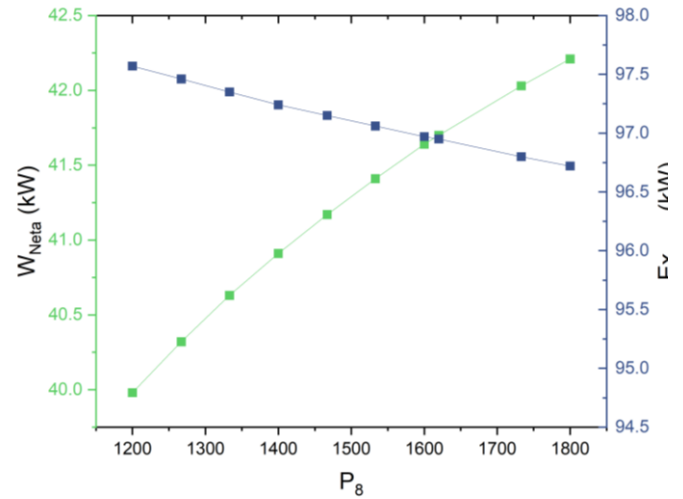


Figura 5. Relación entre la presión P_8 , la potencia neta generada y la destrucción total de exergía del sistema.

Por último, la Figura 6 muestra el efecto de la presión (P_8) sobre las eficiencias energética (η_{en}) y exergética (η_{ex}), donde se puede apreciar que, al aumentar la presión, ambas eficiencias aumentan. La eficiencia exergética aumenta un 2.19% y la eficiencia energética un 0.316%. Esto refuerza que dentro del rango analizado es mejor operar a mayores presiones.

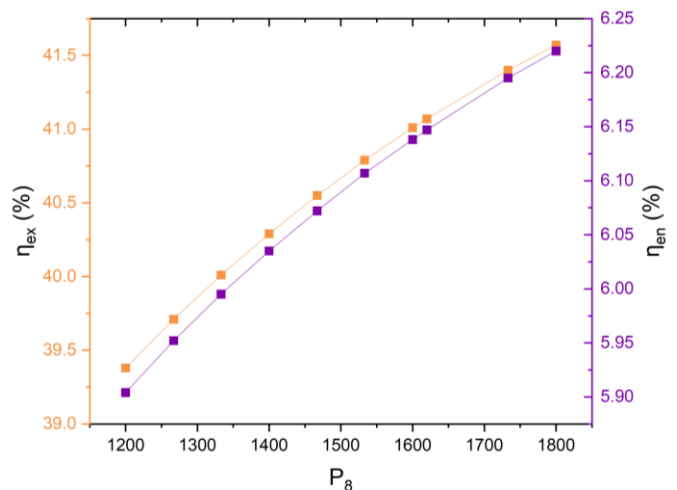


Figura 6. Variación de la eficiencia energética y exergética en función de la presión P_8 .

5. DISCUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

Los resultados obtenidos permiten identificar aspectos que complementan la evaluación del sistema propuesto. Los supuestos del modelo, como la eficiencia de la bomba y las turbinas o la temperatura del fluido geotérmico, se encuentran dentro de los rangos reportados en la literatura, aunque su variación tendría efectos directos en el desempeño. Una menor eficiencia de los equipos reduciría la potencia neta y las eficiencias, mientras que un aumento en la temperatura de la fuente geotérmica mejoraría el aprovechamiento del recurso. De igual forma, el área de colectores solares representa un factor crítico en la inversión inicial, pues un aumento de la presión en el campo solar implica mayores costos de capital, pero también un incremento en la potencia neta, lo que plantea un compromiso costo-beneficio que deberá abordarse en estudios tecnoeconómicos posteriores. En cuanto a la literatura, la propuesta constituye una configuración inédita y no permite comparaciones directas, aunque las tendencias observadas son coherentes con la primera y la segunda ley de la termodinámica, lo que refuerza la validez del modelo y de los resultados obtenidos.

Por otra parte, el análisis de sensibilidad no se incluyó en esta etapa, pero se reconoce su relevancia para estimar el comportamiento del sistema bajo variaciones de irradiación solar o temperatura geotérmica, lo que será abordado en investigaciones futuras. Asimismo, la mitigación de irreversibilidades en los colectores solares, identificados como el componente con mayores pérdidas, no se exploró en detalle en este trabajo, aunque se considera fundamental aplicar un análisis de exergía avanzada que permita distinguir entre irreversibilidades evitables y no evitables. Este enfoque ofrecerá bases sólidas para proponer estrategias de optimización en el diseño y operación de los colectores, y con ello mejorar la eficiencia global del sistema. En conjunto, estas consideraciones amplían la interpretación de los resultados y señalan líneas de investigación futuras para avanzar en la optimización técnica y económica de sistemas híbridos ORC geotérmico-solares.

6. CONCLUSIONES

A lo largo de este trabajo se presentó un análisis energético y exergético de un ciclo Rankine orgánico (ORC) híbrido de tipo flash, impulsado por energía solar y geotérmica. Derivado de ello, los principales hallazgos de esta investigación sugieren que los colectores solares son el componente que concentra la mayor destrucción de exergía, alcanzando hasta el 41.9% de la destrucción de exergía total. También se encontró que, al aumentar la presión de operación del campo solar, se puede incrementar la potencia neta generada hasta 41.21 kW, a 1800 kPa. De la misma manera las eficiencias de energía y exergía se incrementaron en 0.316% y 2.19%, respectivamente. Sin embargo, el área de colectores solares requerida también aumentó (3%), lo que representa una posible limitante

económica y de diseño. Asimismo, a partir de los resultados se puede sugerir que este tipo de configuración tiene un potencial de aplicación mayor en regiones con alta irradiación solar, que además dispongan de fuentes de energía geotérmica de baja temperatura. Especialmente en contextos donde se busque reducir las emisiones sin sacrificar el rendimiento. En términos generales, los ORC destacan por su flexibilidad operativa con fuentes de calor de baja y media temperatura, además de su compatibilidad con las energías renovables. Finalmente, este trabajo puede aportar información valiosa para futuras investigaciones enfocadas en ORC híbridos, contribuyendo de esta forma al avance hacia sistemas más eficientes y sostenibles.

7. REFERENCIAS

- [1] W. J. Ripple et al., "The 2024 state of the climate report: Perilous times on planet Earth", *Bioscience*, vol. 74, núm. 12, pp. 812–824, dic. 2024, doi: 10.1093/biosci/biae087.
- [2] C. M. Nkinyam, C. O. Ujah, C. O. Asadu, y D. V. V. Kallon, "Exploring geothermal energy as a sustainable source of energy: A systemic review", el 1 de abril de 2025, KeAi Communications Co. doi: 10.1016/j.uncres.2025.100149.
- [3] A. Haghighi, M. R. Pakatchian, M. E. H. Assad, V. N. Duy, y M. Alhuyi Nazari, "A review on geothermal Organic Rankine cycles: modeling and optimization", el 1 de junio de 2021, Springer Science and Business Media B.V. doi: 10.1007/s10973-020-10357-y.
- [4] Rank, "Rank® LT – Soluciones ORC de baja temperatura", Rank.
- [5] D. Gonidaki y E. Bellos, "A Detailed Review of Organic Rankine Cycles Driven by Combined Heat Sources", el 1 de febrero de 2025, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/en18030526.
- [6] N. S. Suresh, N. C. Thirumalai, y S. Dasappa, "Modeling and analysis of solar thermal and biomass hybrid power plants", *Appl Therm Eng*, vol. 160, sep. 2019, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114121.
- [7] A. Khosravi, S. Syri, X. Zhao, y M. E. H. Assad, "An artificial intelligence approach for thermodynamic modeling of geothermal based-organic Rankine cycle equipped with solar system", *Geothermics*, vol. 80, pp. 138–154, jul. 2019, doi: 10.1016/j.geothermics.2019.03.003.
- [8] P. Wan, L. Gong, y Z. Bai, "Thermodynamic analysis of a geothermal-solar flash-binary hybrid power generation system", en *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2019, pp. 3–8. doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.023.
- [9] O. Anaya-Reyes, D. A. Rodríguez-Alejandro, A. Zaleta-Aguilar, y S. Cano-Andrade, "Exergetic Analysis of a Double Flash Geothermal Plant Integrated with a Central Solar Receiver", en *Proceedings of the XV Ibero-American Congress of Mechanical Engineering*,

- Springer International Publishing, 2023, pp. 244–250.
doi: 10.1007/978-3-031-38563-6_36.
- [10] Absolicon, “Colector solar T160 – Diseñado para procesos industriales”, Absolicon.
- [11] Y. A. Çengel y M. A. Boles, Termodinámica, 7a ed. Ciudad de México: McGraw-Hill Educación, 2011.
- [12] Y. Xu, N. Jiang, F. Pan, Q. Wang, Z. Gao, y G. Chen, “Comparative study on two low-grade heat driven absorption-compression refrigeration cycles based on energy, exergy, economic and environmental (4E) analyses”, Energy Convers Manag, vol. 133, pp. 535–547, 2017, doi: 10.1016/j.enconman.2016.10.073.
- [13] Y. A. Çengel y M. A. Boles, Termodinámica, 7a ed. Ciudad de México: McGraw-Hill Educación, 2011.