



Evaluación energética y factibilidad económica de la integración de un ciclo de refrigeración por absorción y turbina Tesla en la recuperación de calor de un ciclo Rankine orgánico de baja temperatura geotérmica

Energy evaluation and economic feasibility of the integration of an absorption refrigeration cycle and a Tesla turbine in the heat recovery of a low-temperature geothermal organic Rankine cycle

Héctor Isaac Cardoza Villegas¹, Aneth Lizbeth Trejo Marmolejo¹, Carlos David González Gachupin¹, Oscar Chavez² , Israel Y. Rosas² , Víctor M. Ambriz Díaz^{2*}

¹ Estudiante Ingeniería Electromecánica, Tecnológico Nacional de México/I. T. Chihuahua, Av. Tecnológico, 2909, Chihuahua 31310, Chihuahua, México

² Profesor Investigador, Tecnológico Nacional de México/I. T. Chihuahua, Av. Tecnológico, 2909, Chihuahua 31310, Chihuahua, México

Historial

Manuscrito recibido: 28 de junio de 2024

Manuscrito aceptado: 22 de agosto de 2024

Manuscrito publicado: agosto 2024

*Autor para correspondencia

Víctor M. Ambriz Díaz

e-mail: victor.ad@chihuahua.tecnm.mx

ORCID: 0000-0002-2314-2314

Resumen

En este trabajo se presenta la evaluación energética y factibilidad económica de integración de un ciclo de refrigeración por absorción de medio efecto y una turbina Tesla en la recuperación de calor de un ciclo Rankine orgánico activado con energía geotérmica de baja temperatura. El fluido geotérmico activa el sistema en condiciones de agua líquida saturada y a razón de 10 kg/s y una temperatura de 90 °C. Se establecen los modelos para la evaluación energética a partir del primer principio de la termodinámica y del principio de conservación de la masa. Los resultados indican que el sistema integrado con las tres tecnologías puede lograr una producción de potencia de 52.94 kW y una eficiencia general de utilización de la energía de 20.31%. Finalmente, la inversión inicial ha resultado muy alta, por lo que, la implementación práctica de este proyecto solamente se justifica por la utilización de energía limpia de una manera eficiente.

Palabras clave: Energía geotérmica, recuperación de calor, ciclo Rankine orgánico, refrigeración por absorción, turbina Tesla.

Introducción

La energía geotérmica, es el calor almacenado en el interior de la corteza terrestre y se puede clasificar de manera general en recursos geotérmicos de alta, media y baja temperatura. Los recursos geotérmicos de alta temperatura ($T > 150$ °C y $T < 300$ °C) son co-

Abstract

This work presents the energy evaluation and economic feasibility of integrating a medium-effect absorption refrigeration cycle and a Tesla turbine in the heat recovery of an organic Rankine cycle activated with low-temperature geothermal energy. The geothermal fluid activates the system under conditions of saturated liquid water at a rate of 10 kg/s and a temperature of 90 °C. The models for energy evaluation are established based on the first principle of thermodynamics and the principle of conservation of mass. The results indicate that the system integrated with the three technologies can achieve a power production of 52.94 kW and an overall energy utilization efficiency of 20.31%. Finally, the initial investment has been very high, so the practical implementation of this project is only justified by the efficient use of clean energy.

Keywords: Geothermal energy, heat recovery, organic Rankine cycle, absorption cooling, Tesla turbine.

múnmente empleados en la producción de electricidad (Aghahosseini y Breyer 2020). Mientras que los recursos de media y baja temperatura ($T < 150$ °C) también pueden ser implementados en la generación de electricidad utilizando ciclos binarios (Alimonti *et al.*, 2021). Entre estos ciclos se distin-

que como tecnología primordial los ciclos Rankine orgánicos (ORC) de baja temperatura. Estos ciclos se encuentran dentro de los pocos sistemas termodinámicos que ofrecen la capacidad de transformar la energía presente en forma de calor de baja temperatura (a partir de los 60 °C) a partir de sus elementos básicos; caldera, turbina, condensador y bomba, así como de un fluido de trabajo de origen orgánico (Ahmadi *et al.*, 2020).

Comúnmente, cuando se tiene el aprovechamiento de recursos geotérmicos de baja temperatura, los ORC son integrados con otros tipos de tecnologías de recuperación de calor residual, esto para incrementar la viabilidad del aprovechamiento de la energía geotérmica. Dentro de la limitada categoría de tecnologías encargadas de la transformación de energía residual, se encuentra el Ciclo de Refrigeración por Absorción (ARC) (Maragna *et al.*, 2024). Esta tecnología se define como un ciclo termodinámico capaz de producir frío a partir de calor. Por lo que los ARC pueden generar frío a partir del calor geotérmico e incrementar el rendimiento general de los sistemas geotérmicos cuando se acoplan en la recuperación de calor residual. En la actualidad existen diferentes tipos de configuraciones de ARC; efecto único, doble efecto, medio efecto y efectos múltiples, entre otros (Srikhirin *et al.*, 2001). Sin embargo, el criterio principal de integración de los ARC en los sistemas geotérmicos, es la temperatura de activación. La mayoría se activan con un fluido geotérmico que se encuentra a temperaturas superiores a los 100 °C (Gong *et al.*, 2021), excepto el ARC de único efecto y medio efecto. No obstante, el ARC candidato para la recuperación de calor residual de baja temperatura, es el ARC de medio efecto (Loreti *et al.*, 2019). Así, el producto frigorífico del ARC de medio efecto puede lograrse desde 80 °C, y puede usarse para aplicaciones de confort o para lograr una menor temperatura de condensación del ORC. De esta forma, se logra incrementar la producción de electricidad del ORC y se garantiza una operación más estable (Ambriz-Díaz *et al.*, 2020).

Otra tecnología candidata para recuperar los desechos de calor residual en sistemas térmicos, es la turbina Tesla (Sheikhnejad *et al.*, 2020). La

turbina Tesla compuesta por un rotor con múltiples discos es una tecnología candidata para generar electricidad aprovechando fluidos viscosos y su energía de presión, por lo que los fluidos geotérmicos residuales de sistemas geotérmicos son una opción (Pfenniger *et al.*, 2014). Una ventaja significativa de la turbina Tesla sobre las máquinas térmicas es la temperatura de activación. A diferencia de las máquinas térmicas en donde la temperatura geotérmica juega un papel importante para su activación, en la segunda este parámetro no es tan crucial debido a que funciona según el principio de transmisión de par mediante esfuerzo cortante de la pared (Manfrida *et al.*, 2018). De esta forma, la turbina Tesla presenta una flexibilidad interesante de integrarse como tecnología complementaria en la recuperación de calor de sistemas geotérmicos y para maximizar el potencial de aprovechamiento de los recursos en la generación de electricidad (Ji *et al.*, 2019).

Por lo anterior, la recuperación de calor en sistemas geotérmicos mediante tecnologías de baja temperatura se ha vuelto un tema de interés para la comunidad científica. Entre las tecnologías más analizadas durante los últimos años se encuentran los ORC y los ARC. Por su parte, la turbina Tesla está en una etapa de adopción en el área de geotermia y puede ser una potencial candidata para generar electricidad mediante calor residual en el mediano plazo. Entre los análisis realizados por la comunidad científica para valorar la viabilidad de la integración de estas tecnologías en sistemas geotérmicos se destaca el análisis de energía, basado en la primera ley de la termodinámica. Por ejemplo, Braimakis *et al.* (2015), evaluaron un ORC activado con energía geotérmica. Al realizar ciertas variaciones en el fluido de trabajo del ORC, encontraron que la eficiencia del sistema puede variar entre el 15 y 40%. Ahmadi *et al.* (2020), caracterizaron un sistema geotérmico de generación de electricidad y refrigeración mediante un ORC y un ARC. En dicho estudio, los resultados se basaron en el análisis de energía y en la recuperación de calor del ORC para activar el ARC. Encontraron un aumento en la eficiencia energética del sistema del 9.3 al 47.3%. Liang *et al.* (2018), analizaron un ciclo

de refrigeración por absorción que emplea el par de trabajo amoníaco-agua. El estudio se centra en un análisis termodinámico de un sistema regenerativo geotérmico innovador. Se implementa un ORC y se analiza desde el punto de vista energético. Mediante el análisis encontraron que el sistema alcanza valores de 5 MW en la generación de electricidad y de 16.37% en la eficiencia, en condiciones óptimas de funcionamiento.

Jawad Al-Tameemi *et al.* (2019), evaluaron la incorporación de un ORC junto a una bomba de calor y un quemador de gas para producir electricidad, refrigeración y agua caliente para una calefacción central. Los resultados indicaron que este sistema puede mantener el rango de temperaturas ideal absorbiendo 12 kW de calor para elevar la temperatura del agua caliente a 80 °C. Roumpedakis *et al.* (2019), analizaron una integración entre un ORC con un ciclo de refrigeración para proporcionar energía, calefacción y frío simultáneamente. En la investigación evaluaron las eficiencias de la primera ley para una variedad de fluidos orgánicos en condiciones subcríticas y supercríticas en ciclos Rankine, y se optimizaron los sistemas considerando las diferencias mínimas de temperatura de los intercambiadores de calor. Se estimó que un enfriador basado en agua podría proporcionar una capacidad de refrigeración de 13 kW. Maryami y Dehghan (2017), compararon el rendimiento energético en sistemas de refrigeración por absorción. Demostraron que el sistema más eficiente en el manejo de bajas temperaturas es el de doble efecto, posicionándose sobre las diferentes configuraciones de ciclos de refrigeración. Ji *et al.* (2019), analizaron el rendimiento de la recuperación de calor residual mediante una turbina Tesla. Los resultados indicaron que la potencia total y la eficiencia térmica global del sistema aumentaron en un rango de velocidad de rotación baja. Además, observaron que estos parámetros pueden mejorarse mediante la selección adecuada de la viscosidad del fluido de trabajo y el número de boquillas. Finalmente, Song *et al.* (2017), llevaron a cabo una investigación acerca del uso de turbinas Tesla en sistemas ORC de pequeña escala. Encontraron que, a una temperatura de evaporación de 350 K, el sistema ORC tiene la capacidad de producir una

potencia neta de salida de 1.27 kW, demostrando la viabilidad de las turbinas Tesla en aplicaciones de ORC.

Por otra parte, acorde con la información anterior, está demostrado que la recuperación de calor residual en sistemas geotérmicos de baja temperatura contribuye en la eficiencia y potencia de los sistemas geotérmicos. Sin embargo, al implementar la recuperación de calor, se incluyen tecnologías adicionales para el aprovechamiento del calor residual. Este incremento de tecnologías, incrementa también el costo de inversión inicial de los sistemas geotérmicos. Es por ello, que la comunidad científica ha investigado sobre la viabilidad económica de este tipo de sistemas. Los métodos implementados son una combinación entre la primera ley de la termodinámica y conceptos económicos. Mediante esta metodología se puede determinar la factibilidad económica de los sistemas geotérmicos de baja temperatura con recuperación de calor residual. Por ejemplo, Rubio-Maya *et al.* (2016), realizaron un análisis económico de un sistema geotérmico con recuperación de calor residual a un ORC de hasta 280 kW. El calor residual lo implementaron en la activación de un ARC de medio efecto y el calor residual restante en usos directos de calor. Para evaluar la factibilidad económica implementaron el Valor Actual Neto (VAN) y el Periodo de Recuperación de la Inversión Simple (PRS), y encontraron que el sistema geotérmico puede alcanzar una recuperación de la inversión inicial de 1.7 años.

En la misma dirección, Ambriz-Díaz *et al.* (2021), realizaron un análisis de factibilidad económica de la recuperación de calor residual geotérmico de baja temperatura a tres tecnologías diferentes de generación de electricidad. Entre las tecnologías de generación eléctrica, consideraron un ORC de 40 kW e implementaron un ARC para la producción de frío y un deshidratador para la recuperación de calor residual. En la factibilidad económica emplearon indicadores como el VAN y el PRS, encontrando que el sistema integrado con ORC puede alcanzar una recuperación de la inversión de 3.7 años. Astolfi *et al.* (2019), realizaron el estudio económico de un ORC geotérmico de 1765 kW con novedosas unidades de rechazo de calor. Entre los indicadores

de evaluación de la factibilidad económica incluyeron el PRS y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Los resultados muestran un PRS de 3.74 años y una TIR de 28.2%. Cao y Ehyaei (2021), realizaron una evaluación económica de un sistema geotérmico con recuperación de calor en un ORC. La energía residual del ORC la emplearon en usos directos de calor como producción de agua potable e hidrógeno. Para la evaluación de la factibilidad económica utilizaron el PRS, y encontraron que el sistema geotérmico con recuperación de calor residual puede tener una recuperación de la inversión inicial en un periodo de 4.6 a 5.3 años. Li *et al.* (2021), realizaron una investigación sobre la factibilidad económica de un sistema geotérmico con recuperación de calor residual en un ORC de 580 kW. El calor residual se emplea para la producción de frío por un ARC y usos directos de energía térmica como lo es la calefacción. La factibilidad económica evaluada a través del PRS indica un periodo de recuperación de 3.07 años.

La revisión de literatura ha mostrado que existe una gran variedad de trabajos de sistemas geotérmicos con ORC en la generación de electricidad y que integran el ARC y los usos directos de calor, en la recuperación de calor residual. Sin embargo, no se han reportado trabajos en donde se indique la integración de la turbina Tesla en la recuperación de calor de sistemas geotérmicos de baja temperatura. De la misma manera, no se han encontrado investigaciones con un enfoque únicamente en la generación de electricidad a través de recursos geotérmicos de baja temperatura. Es necesario resaltar que los trabajos encontrados utilizan recursos geotérmicos con temperaturas superiores a los 100 °C. Lo anterior ha motivado a los autores a contribuir en llenar ese vacío existente en la literatura y en presentar por primera vez una propuesta teórica de un sistema geotérmico que se activa con una temperatura de 90 °C, y cuyo fin es solamente la generación de electricidad con un ORC y potenciar dicha generación de electricidad mediante la recuperación de calor residual con una turbina Tesla. Del mismo modo, se pretende mediante la propuesta, potenciar aún más la generación de electricidad del ORC utilizando un ARC de medio efecto activado con el calor re-

sidual, para reducir la temperatura de condensación ORC e incrementar su producción eléctrica. Por los hechos expuestos anteriormente, esta investigación tiene como objetivo principal realizar la evaluación energética y de factibilidad económica de la integración de un ciclo de refrigeración por absorción y una turbina Tesla en la recuperación de calor de un ciclo Rankine orgánico de baja temperatura geotérmica, y para alcanzar el objetivo general, se plantean las siguientes actividades: 1) Realizar el análisis de energía de los componentes del sistema geotérmico implementado la primera ley de la termodinámica, para determinar las magnitudes de los flujos de energía de cada uno de los componentes e interacciones energéticas entre ellos. 2) Determinar en función de la primera ley de la termodinámica, la potencia de salida y la eficiencia energética del sistema geotérmico, así como las ventajas que conlleva la implementación de la integración propuesta para la recuperación de calor residual geotérmico de baja temperatura. 3) Estimar la probable factibilidad económica del sistema geotérmico, determinando costos de inversión, beneficios e indicadores de factibilidad económica, así como discutir posibles vías para llevar a la práctica el sistema propuesto.

Descripción de la integración

Sistema geotérmico total

El sistema propuesto es impulsado por un recurso geotérmico de baja temperatura para producir dos productos de electricidad, este sistema utiliza diferentes configuraciones termodinámicas, que se integran en diferentes niveles térmicos de temperatura en la misma planta geotérmica. El recurso geotérmico (agua líquida saturada) utilizado para la activación de la planta cuenta con una temperatura de 90 °C y un flujo másico de 10 kg/s (Ambriz-Díaz *et al.*, 2021). De acuerdo con la **Figura 1**, la planta de generación cuenta con dos ciclos termodinámicos y una turbina Tesla para su funcionamiento. El recurso geotérmico activa el ORC a una temperatura de 90 °C y cede 10 °C de su temperatura en el proceso de generación de electricidad en el ORC (Zhou *et al.*, 2022). El flujo geotérmico sigue el trayecto



ahora con 80 °C, el cual activa un ciclo de refrigeración por absorción de medio efecto (ARC de medio efecto) (Alvi *et al.*, 2021). El frío generado por este ciclo de refrigeración se implementa para bajar la temperatura de condensación del ORC, y en consecuencia garantizar un funcionamiento más estable e incrementar su eficiencia y producción de potencia. Una fracción del fluido geotérmico (0.6 - 1.32 kg/s) con una temperatura de 70 °C activa una turbina Tesla mediante la que se genera electricidad en una segunda etapa (Ji *et al.*, 2019). Finalmente, todos los fluidos residuales son enviados a reinyección.

Ciclo Rankine Orgánico. El ORC integrado en el sistema geotérmico, es de configuración básica, con cuatro componentes: evaporador (intercambiador de calor 1), turbina, condensador y bomba (Rahbar *et al.*, 2017). El fluido orgánico implementado en el ORC es R134a (estados termodinámicos 11-14 de la **Figura 1**), el cual se encuentra en diferentes fases a lo largo del ciclo.

Ciclo de refrigeración por absorción de medio efecto. El ciclo de refrigeración integrado en el sistema geotérmico es de configuración de medio efecto, con diez componentes: un evaporador, un condensador, dos absorbedores, tres válvulas, dos generadores y dos bombas (Sriksirin *et al.*, 2001). El par de trabajo del ARC de medio efecto es amoníaco-agua ($\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$).

Turbina Tesla. La turbina Tesla integrada en el sistema geotérmico es una máquina de flujo de fluidos sin aspas que, a diferencia de las turbinas de aspas convencionales, convierte la energía de los fluidos en energía mecánica (Song *et al.*, 2017). La conversión tiene lugar en el rotor, que consta de múltiples discos. El fluido geotérmico entra en la turbina Tesla y cede de 5 grados de temperatura (Talluri *et al.*, 2020).

Formulación del modelado energético

Ecuaciones gobernantes

Los modelos termodinámicos se han establecido a partir de la primera ley de la termodinámica y de la

ecuación de conservación de la masa Ec. (1) y Ec. (2) y se han evaluado con el software Engineering Equation Solver (EES):

$$0 = \dot{Q} - \dot{W} + \sum (\dot{m} \cdot h)_{\text{entrada}} - \sum (\dot{m} \cdot h)_{\text{salida}} \quad (1)$$

$$0 = \sum \dot{m}_{\text{entrada}} - \sum \dot{m}_{\text{salida}} \quad (2)$$

Suposiciones generales para el modelado

A continuación, se presentarán todas las condiciones iniciales para ciclo de baja temperatura geotérmica (Eyerer *et al.*, 2020):

- La planta de energía geotérmica opera en una condición de estado estacionario.
- Las caídas de presión a lo largo de los intercambiadores de calor y tuberías se desprecian.
- Las turbinas y bombas operan de manera ideal.
- El fluido de aporte térmico se considera como agua caliente en estado de líquido incompresible.
- Los cambios de energía cinética y potencial son insignificantes.

Ciclo Rankine Orgánico

En la **Tabla 1**, se muestran las ecuaciones de balance y energía del ORC utilizado en el sistema geotérmico (Aliahmadi *et al.*, 2021).

Ciclo de refrigeración por absorción de medio efecto

La **Tabla 2**, resume la formulación del modelado termodinámico del ARC de medio efecto integrado en el sistema geotérmico (Sriksirin *et al.*, 2001).

Turbina Tesla

El análisis de la turbina Tesla desde un punto de vista energético puede ser posible si la consideramos como un sistema global y tomando en cuenta los flujos de energía que entran y salen de dicho sistema. En este trabajo se han asumido las irreversibilidades termodinámicas durante el proceso de acuerdo con (Sengupta y Guha, 2016). La **Tabla 3**, resume la formulación del modelado termodinámico para la Turbina Tesla (Rusin *et al.*, 2021).

Tabla 1. Ecuaciones de masa y energía del ORC.

Componentes	Masa	Energía
Evaporador	$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$ $\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13} = \dot{m}_R$ $\dot{m}_R = \frac{\dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_2)}{h_{13} - h_{12}}$	$\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_R \cdot h_{12} = \dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_R \cdot h_{13}$ $\dot{Q}_{Evap} = \dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_2)$ $\dot{Q}_{Evap} = \dot{m}_R \cdot (h_{13} - h_{12})$
Turbina	$\dot{m}_{13} = \dot{m}_{14}$	$\dot{W}_T = \dot{m}_{14} \cdot (h_{13} - h_{14})$
Condensador	$\dot{m}_{14} = \dot{m}_{11}$ $\dot{m}_{31} = \dot{m}_{32}$ $\dot{m}_{31} = \frac{\dot{m}_{14} \cdot (h_{14} - h_{11})}{h_{32} - h_{31}}$	$\dot{Q}_{Cond} = \dot{m}_{14} \cdot (h_{14} - h_{11})$ $\dot{Q}_{Cond} = \dot{m}_{31} \cdot (h_{32} - h_{31})$
Bomba	$\dot{m}_{11} = \dot{m}_{12}$	$\dot{W}_B = \dot{m}_{11} \cdot (h_{12} - h_{11})$

Tabla 2. Ecuaciones de masa y energía del ARC de medio efecto.

Componentes	Masa	Energía
Generador 1	$\dot{m}_{22} = \dot{m}_{25} + \dot{m}_{23}$ $\dot{m}_4 = \dot{m}_5$	$\dot{Q}_{G1} + \dot{m}_{22} \cdot h_{22} = \dot{m}_{25} \cdot h_{25} + \dot{m}_{23} \cdot h_{23}$ $\dot{Q}_{G1} = \dot{m}_4 \cdot (h_4 - h_5)$
Válvula 1	$\dot{m}_{23} = \dot{m}_{24}$	-
Absorbedor 1	$\dot{m}_{20} + \dot{m}_{24} = \dot{m}_{21}$ $\dot{m}_{20} \cdot X_{20} + \dot{m}_{24} \cdot X_{24} = \dot{m}_{21} \cdot X_{21}$	$\dot{m}_{20} \cdot h_{20} + \dot{m}_{24} \cdot h_{24} = \dot{m}_{21} \cdot h_{21} + \dot{Q}_{A1}$
Bomba 2	$\dot{m}_{21} = \dot{m}_{22}$	$\dot{W}_{B2} + \dot{m}_{21} \cdot h_{21} = \dot{m}_{22} \cdot h_{22}$
Condensador 2	$\dot{m}_{25} = \dot{m}_{26}$	$\dot{Q}_{C2} + \dot{m}_{25} \cdot h_{25} = \dot{m}_{26} \cdot h_{26}$
Válvula 3	$\dot{m}_{26} = \dot{m}_{27}$	-
Evaporador	$\dot{m}_{27} = \dot{m}_{15}$ $\dot{m}_{28} = \dot{m}_{29}$	$\dot{m}_{15} \cdot h_{15} = \dot{m}_{27} \cdot h_{27} + \dot{Q}_E$ $\dot{Q}_E = \dot{m}_{29} \cdot (h_{29} - h_{28})$
Absorbedor 2	$\dot{m}_{15} + \dot{m}_{19} = \dot{m}_{16}$ $\dot{m}_{15} \cdot X_{15} + \dot{m}_{19} \cdot X_{19} = \dot{m}_{16} \cdot X_{16}$	$\dot{m}_{15} \cdot h_{15} + \dot{m}_{19} \cdot h_{19} = \dot{m}_{16} \cdot h_{16} + \dot{Q}_{A2}$
Bomba 3	$\dot{m}_{16} = \dot{m}_{17}$	$\dot{W}_{B3} + \dot{m}_{16} \cdot h_{16} = \dot{m}_{17} \cdot h_{17}$
Generador 2	$\dot{m}_{17} = \dot{m}_{18} + \dot{m}_{20}$ $\dot{m}_3 = \dot{m}_7$	$\dot{Q}_{G2} + \dot{m}_{17} \cdot h_{17} = \dot{m}_{18} \cdot h_{18} + \dot{m}_{20} \cdot h_{20}$ $\dot{Q}_{G2} = \dot{m}_3 \cdot (h_3 - h_7)$
Válvula 2	$\dot{m}_{18} = \dot{m}_{19}$	-

Tabla 3. Ecuaciones de masa y energía de la turbina Tesla.

Componente	Masa	Energía	Referencia
Turbina Tesla	$\dot{m}_6 = \dot{m}_9$	$\dot{Q}_{Tesla} = \dot{m}_6 \cdot (h_6 - h_9)$ $\dot{W}_{Tesla} = \eta \cdot \dot{Q}_{Tesla}$ $\eta = 0.56$	(Sengupta y Guha 2016)

Componentes auxiliares

En la **Tabla 4**, se presenta el análisis energético de los componentes auxiliares del sistema (Ceglia *et al.*, 2021). Básicamente, los componentes auxiliares del sistema geotérmico es el intercambiador de calor 4.

Dimensionamiento del equipo

Mediante el dimensionamiento del intercambiador de calor 4, se obtiene el área de transferencia de calor necesaria para la transferencia de calor entre el producto frigorífico del ARC y el agua de enfriamiento del ORC. El área de transferencia de calor se obtiene a partir del método de la Diferencia Media Logarítmica de Temperaturas (DMLT) mostrado en la **Tabla 5**.

Sistema geotérmico total

El desempeño energético del sistema geotérmico total depende de los productos de electricidad logrados por el ORC y la turbina Tesla. La Ec. (3) define la producción de potencia total del sistema geotérmico:

$$\dot{W}_{Tot} = \dot{W}_{ORC} + \dot{W}_{Tesla} \quad (3)$$

Otro parámetro importante para determinar la viabilidad energética del sistema geotérmico total es la eficiencia energética. De acuerdo con Parikhani

et al. (2021), la eficiencia por primera ley de un sistema geotérmico se puede obtener a partir de la Ec. (4):

$$\eta_{en} = \frac{\dot{W}_{Tot}}{\dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_0)} \quad (4)$$

Modelo de factibilidad económica

El modelo de factibilidad económica se establece en función de los costos de inversión de los componentes que integran el sistema geotérmico, los beneficios del sistema, e indicadores de factibilidad económica.

Costos de inversión

Los costos de inversión se determinan a partir de las capacidades nominales de los componentes. Para el ORC y la turbina Tesla el costo de inversión es función la potencia, mientras que para el ARC el costo de inversión depende de la capacidad frigorífica. En el caso del IC4, el costo es función de las dimensiones del intercambiador de calor (área de transferencia de calor), y finalmente, los costos de inversión de los pozos geotérmicos (pozo productor y pozo reinyector) son función de la profundidad. Por otra parte, para estimar los costos de inversión se han utilizado ecuaciones de costo encontradas en otras investigaciones (**Tabla 6**).

Tabla 4. Ecuaciones de masa y energía de los componentes auxiliares.

Componente	Masa	Energía
Intercambiador de calor 4 (IC4)	$\dot{m}_{30} = \dot{m}_{31}$ $\dot{m}_{28} = \dot{m}_{29}$	$\dot{m}_{30} \cdot h_{30} + \dot{m}_{28} \cdot h_{28} = \dot{m}_{31} \cdot h_{31} + \dot{m}_{29} \cdot h_{29}$ $\dot{Q}_{IC4} = \dot{m}_{30} \cdot (h_{30} - h_{31})$ $\dot{Q}_{IC4} = \dot{m}_{29} \cdot (h_{29} - h_{28})$

Tabla 5. Parámetros de transferencia de calor del intercambiador de calor 4.

Componente	DMLT	Área	Referencia
Intercambiador de calor 4	$DMLT = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)}$ $\Delta T_1 = T_{31} - T_{28}$ $\Delta T_2 = T_{30} - T_{29}$	$A = \frac{\dot{Q}_{IC4}}{U \cdot DMLT}$ $U = 0.8 kW / m^2 \cdot K$	(Dimian y Bildea 2008)

Tabla 6. Ecuaciones para estimar los costos de inversión.

Componente	Ecuación	Referencia
Pozos geotérmicos	$C_{Pozo} = 2150 \cdot Z_{Pozo}$ $Z_{Pozo} = 200 \text{ m}$	(Rubio-Maya <i>et al.</i> , 2016)
ORC	$C_{ORC} = 4541 \cdot \dot{W}_{ORC}$	(Lemmens 2016)
ARC	$C_{ARC} = 1424.5 \cdot \dot{Q}_E$	(Ambriz <i>et al.</i> , 2017)
Turbina Tesla	$C_{Tesla} = 5717 \cdot \dot{W}_{Tesla}$	(Gyroscope, 2024)
Intercambiador de calor 4	$C_{IC4} = 309.14 \cdot A_{IC4}^{0.85}$	(Ding <i>et al.</i> , 2021)

Balance de beneficios económicos

El balance de beneficios económicos, consiste en realizar un balance anual entre los beneficios y gastos del sistema. Los gastos anuales corresponden a la inversión total anualizada, esta inversión se calcula en función de una tasa de inversión y una vida útil de los componentes. Por otro lado, los beneficios se evalúan en función de los productos del sistema. En este caso, los productos corresponden a la electricidad que produce el sistema anualmente. La

electricidad total que genera el sistema geotérmico es función del tiempo de operación anual y del precio de venta de la electricidad. La **Tabla 7** resume las ecuaciones empleadas para el cálculo de los beneficios económicos del sistema.

Indicadores de factibilidad

Los indicadores de factibilidad permiten predecir la rentabilidad económica del sistema. Los indicadores que generalmente se implementan en sistemas

Tabla 7. Ecuaciones para el balance de beneficios económicos.

Concepto	Ecuación	Referencia
Costo de inversión anualizado	$C_{Anual} = C_{Total} \cdot \left[\frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right]$ $i = 15\%; n = 15 \text{ años}$	(Boyaghchi y Chavoshi 2017)
Beneficio de la electricidad anual	$I_e = \dot{W}_{ORC} \cdot t_{op} \cdot P_e$ $t_{op} = 7500 \text{ h}$ $P_e = 0.13 \text{ USD/kWh}$	(Teng <i>et al.</i> , 2021)
Balance económico anual	$BE = I_e - C_{Anual}$	(Maldonado <i>et al.</i> , 2024)

térmicos son el Valor Actual Neto y el Periodo de Recuperación Simple. Es preciso que VAN tenga un valor elevado y que el PRS sea un periodo corto de años para recuperar la inversión. La **Tabla 8**, muestra las ecuaciones de los indicadores de factibilidad.

Resultados y discusión

En esta sección se presentan los resultados y discusión de la evaluación energética y factibilidad económica. Con la finalidad de observar el desempeño del sistema geotérmico y de la influencia que tiene el ARC de medio efecto en el ORC, se presentan primeramente los resultados para el ORC operando sin el sistema de refrigeración y posteriormente se presenta el desempeño que puede lograr el ORC cuando opera de manera en conjunto con el ARC. También se muestran los resultados energéticos y económicos para el sistema geotérmico total, mismo que integran los ciclos ORC, ARC de medio efecto y turbina Tesla.

Propiedades termofísicas

La **Tabla 9**, muestra las propiedades termofísicas del sistema geotérmico. Estas propiedades se han obtenido implementando las condiciones iniciales de operación del sistema en el software EES. También, para la obtención de algunas de estas propiedades ha sido necesario implementar los balances de masa y energía.

Resultados del ciclo Rankine orgánico

Los resultados obtenidos para el ORC se muestran en la **Figura 2**. El sistema propuesto ORC puede alcanzar una producción de potencia de 46.9 kW en la turbina. Sin embargo, la bomba consume 4.1 kW, por lo que la producción de potencia

neto del ciclo es de 42.8 kW. Para alcanzar este producto, el ORC requiere de 419.9 kW de carácter térmicos, y en este caso corresponde al aporte de calor geotérmico en el evaporador. Sin embargo, para lograr el funcionamiento en configuración de máquina térmica el ORC requiere disipar 377.1 kW a la atmósfera.

Una variante que puede afectar la producción de potencia es la temperatura de activación del evaporador del ORC, por lo que, a menor temperatura, los flujos de energía se observan en menor magnitud. Sin embargo, al incrementar la temperatura de activación del ORC, la viabilidad energética del ciclo se observa favorecida, como se muestra en la **Figura 3**.

Resultados del ciclo de refrigeración por absorción de medio efecto

Los resultados obtenidos para el ARC de medio efecto se muestran en la **Figura 4**. Se puede destacar que el calor consumido de los generadores es diferente ya que en el generador 2 tiene 8 veces más flujo geotérmico que el generador 1. La potencia consumida por las bombas es casi despreciable a excepción de la bomba 3 que es la bomba de baja presión la cual consume 10 veces más que la bomba 2 de alta presión. Como en el generador 2 se tiene 8 veces más de calor así mismo se disipa 5 veces más calor a la atmósfera en el absorbedor 2, junto con el condensador disipan un total de 454.67 kW de para producir 34.59 kW frigoríficos.

Resultados de la turbina Tesla

Los resultados obtenidos para la turbina Tesla muestran una adecuada viabilidad energética al integrarse en el sistema geotérmico. Para el sistema propuesto, la turbina Tesla puede alcanzar una pro-

Tabla 8. Indicadores de factibilidad económica.

Indicador	Ecuación	Referencia
Valor Actual Neto	$VAN = \left(\frac{(1+i)^n - 1}{i \cdot (1+i)^n} \right) BE - C_{Total}$	(Maldonado <i>et al.</i> , 2024)
Periodo de recuperación	$PRS = \frac{C_{Total}}{BE}$	(Shaghaghi <i>et al.</i> , 2024)

Tabla 9. Propiedades termo físicas del sistema geotérmico.

Estado	Fluido	$T(^{\circ}\text{C})$	$P(\text{kPa})$	$h(\text{kJ/kg})$	$\dot{m}(\text{kg/s})$
1	Geotérmico	90	800	376.9	10
2	Geotérmico	80	800	334.9	10
3	Geotérmico	80	800	334.9	8.47
4	Geotérmico	80	800	334.9	1.52
5	Geotérmico	70	800	293	1.52
6	Geotérmico	70	800	293	1
7	Geotérmico	70	800	293	8.47
8	Geotérmico	70	800	293	0.52
9	Geotérmico	66	-	276.3	1
11	R134a	40	1,017	108.3	2.47
12	R134a	35.5	2,928	109.9	2.47
13	R134a	85	2,928	279.5	2.47
14	R134a	21.3	1,017	260.6	2.47
15	NH ₃ -H ₂ O	2	180	1262	0.03
16	NH ₃ -H ₂ O	34.9	180	-58.91	1.75
17	NH ₃ -H ₂ O	35.0	600	-58.91	1.75
18	NH ₃ -H ₂ O	74.9	600	120.2	1.72
19	NH ₃ -H ₂ O	46.5	180	120.2	1.72
20	NH ₃ -H ₂ O	74.9	600	1484	0.03
21	NH ₃ -H ₂ O	34.9	600	-74.84	0.13
22	NH ₃ -H ₂ O	35.0	1,100	-74.21	0.13
23	NH ₃ -H ₂ O	74.9	1,100	99.06	0.10
24	NH ₃ -H ₂ O	57.9	600	99.06	0.10
25	NH ₃ -H ₂ O	74.9	600	1452	0.03
26	NH ₃ -H ₂ O	28.3	1,100	126.4	0.03
27	NH ₃ -H ₂ O	-20.9	180	126.4	0.03
28	H ₂ O	-10	1200	-345.1	0.08
29	H ₂ O	15	1200	62.92	0.08
30	H ₂ O	25	100	104.8	9.01
31	H ₂ O	24.08	100	100.9	9.01
32	H ₂ O	35	100	146.6	9.01

ducción de potencia de entre 7 – 13 kW (**Figuras 5 y 6**). Para alcanzar dicha producción de potencia se tienen ciertos parámetros fundamentales, uno de

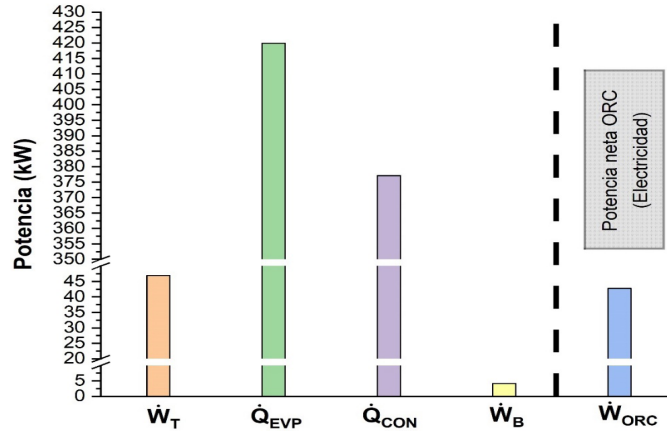


Figura 2. Flujos de energía de los componentes del ORC.

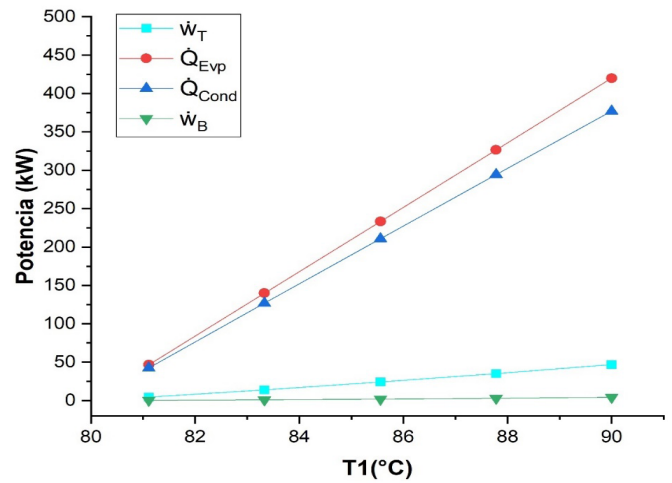


Figura 3. Influencia de la temperatura del fluido geotérmico en el ORC.

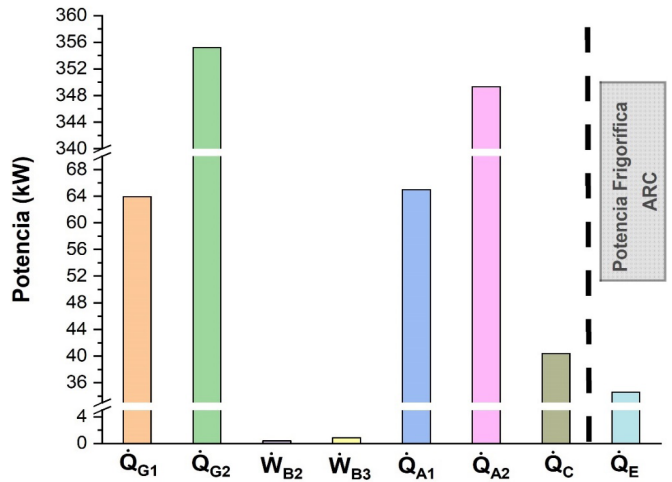


Figura 4. Flujos de energía en el ARC de medio efecto.

ellos es el flujo másico geotérmico, ligado estrechamente a la cantidad de energía que activa la turbina Tesla. Otro parámetro importante, es la eficiencia de la

turbina Tesla, la cual está estrechamente enlazada a las irreversibilidades termodinámica de la misma. Otra particularidad que se ha obtenido de la turbina Tesla integrada en el sistema geotérmico es el comportamiento energético, a medida que se incrementa el flujo másico y la eficiencia, la potencia de la turbina Tesla se observa incrementada.

Resultados para los sistemas auxiliares

El intercambiador de calor 4, tiene la función de disminuir la temperatura del agua de enfriamiento del ORC. Para ello, este intercambiador requiere interactuar 34.59 kW frigoríficos entre el agua fría producida por el ARC y el agua de enfriamiento del ORC. En la misma dirección, para la interacción de la capacidad frigorífica del ARC y el agua de enfriamiento del ORC, se requiere un área de transferencia de calor del intercambiador de calor 4 de 2.2 m². Por otra parte, en condiciones normales, sin implementar el ARC para disminuir la temperatura del agua de enfriamiento del ORC, el ORC es refrigerado por un recurso de agua de enfriamiento de 25 °C. En estas condiciones, la temperatura del R134a a la salida del condensador alcanza 40 °C. Sin embargo, al implementar el ARC para disminuir la temperatura de enfriamiento del ORC, se logra una temperatura de condensación de 39 °C. Lo que indica que, mediante la configuración geotérmica propuesta en este trabajo, el ARC apoyado del intercambiador de calor 4, logra disminuir la temperatura de enfriamiento del ORC en 1 °C. Cabe mencionar que el ARC disminuye solamente un 1 °C la temperatura del agua de enfriamiento debido a que el flujo de agua de enfriamiento del ORC es 109.8 veces más grande que el flujo de agua fría producida por el ARC. Sin embargo, este grado centígrado disminuido en la temperatura de enfriamiento del ORC, repercute positivamente en su eficiencia y potencia producida. Por otra parte, si se pretendiera reducir la temperatura del agua de enfriamiento del ORC en 10 °C, se tendría que incrementar la capacidad de enfriamiento del ARC en al menos 10 veces más, lo que conllevaría a incrementar el calor de aporte geotérmico hasta al menos 4,000 kW térmicos (Tabla 10).

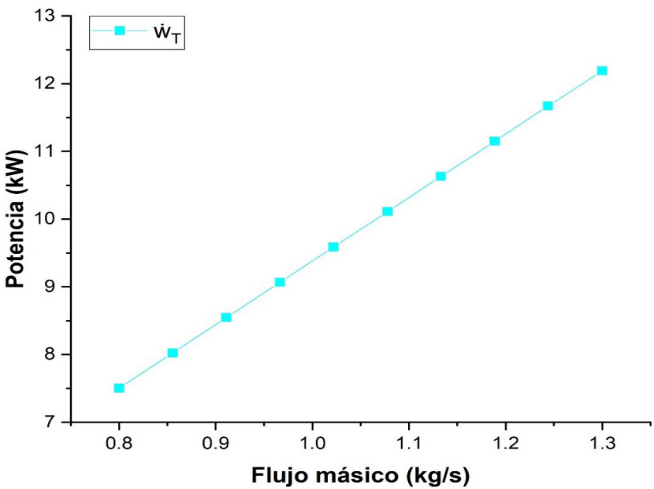


Figura 5. Potencia de la turbina Tesla en función del flujo másico.

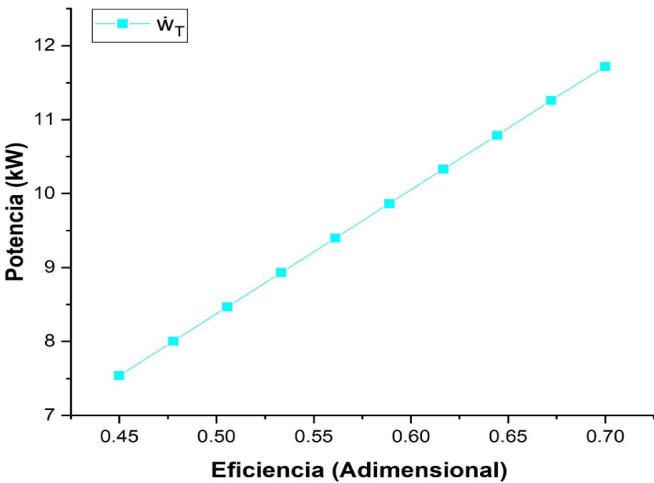


Figura 6. Potencia de la turbina Tesla en función de la eficiencia.

Tabla 10. Variación de parámetros en función de la capacidad de enfriamiento en el intercambiador de calor 4.

(kW)	(kW)	(kg/s)		(°C)	(°C)
35	425	0.083	9.014	25	24.07
75.56	917.5	0.181	9.014	25	23
116.1	1410	0.278	9.014	25	21.92
156.7	1902	0.375	9.014	25	20.85
197.2	2395	0.472	9.014	25	19.77
237.8	2887	0.570	9.014	25	18.69
278.3	3380	0.667	9.014	25	17.62
318.9	3872	0.764	9.014	25	16.54
359.4	4365	0.861	9.014	25	15.47
400	4857	0.959	9.014	25	14.39

Resultados del sistema geotérmico total

Resultados energéticos

La **Figura 7**, muestra el desempeño energético del sistema geotérmico total. El sistema tiene la capacidad de producir dos productos de electricidad, uno en el ORC y otro en la turbina Tesla. Sin embargo, el producto de electricidad del ORC puede ser influenciado de manera positiva por el ARC de medio efecto, lo que conlleva a una mayor producción de potencia del sistema geotérmico total. De esta forma en la **Figura 7**, se puede apreciar que el ORC apoyado con el ARC para su enfriamiento logra un 1.80% superior en la producción de potencia que el ORC sin el ARC como apoyo. Del mismo modo la eficiencia del ORC con ARC se observa incrementada en un 1.92%. Por otra parte, el sistema geotérmico total con ORC tiene una producción de potencia mayor en un 0.85% que el sistema geotérmico sin ORC. Finalmente, la eficiencia energética de la planta, alcanza una magnitud de 19.46% con ARC y un 19.14% sin ARC.

Resultados de factibilidad económica

Los resultados del análisis de factibilidad económica muestran que el sistema geotérmico integrado con el ORC, el ARC y la turbina Tesla no es económicamente factible. Por lo que su ventaja de aplicación y llevar a la práctica solamente se justifica por la parte energética y por el uso de una energía limpia como lo es la energía geotérmica. La factibilidad económica desfavorable es debida a los altos costos de inversión de los componentes que integran el sistema. Los costos de inversión total ascienden a 1,977,501 dólares americanos, y esta inversión inicial al anualizarla (338,187 dólares) supera por mucho (en 6.65 veces) los beneficios anuales derivados por la venta de electricidad (50,866 dólares). Lo anterior, resulta en un balance de beneficios desfavorable, lo que deriva en indicadores económicos negativos.

El mayor costo de inversión se deriva de la perforación de los pozos geotérmicos (pozo productor y pozo reinector), esta inversión representa el 86.97% de la inversión total, en otras palabras, los

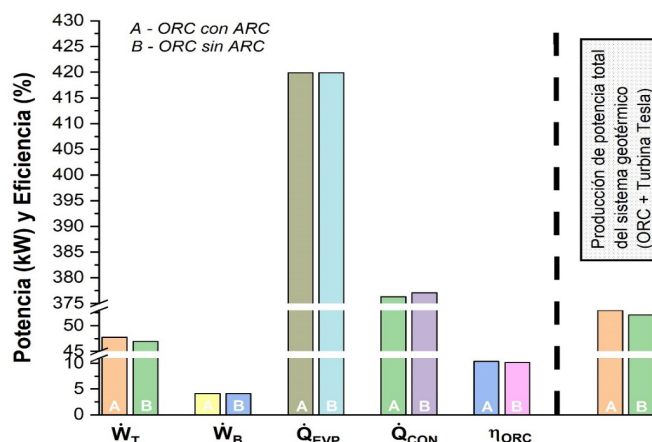


Figura 7. Desempeño del sistema geotérmico total.

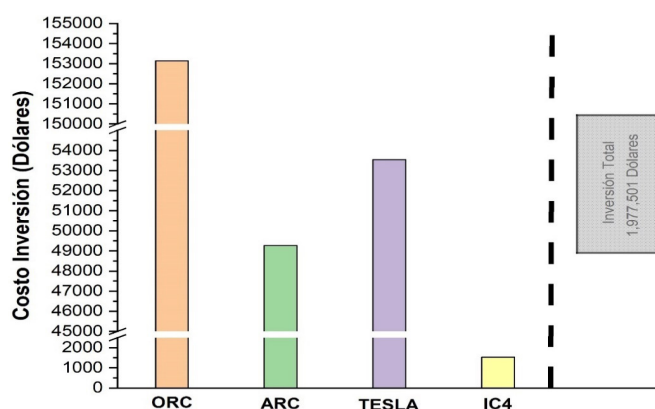


Figura 8. Costos de inversión del sistema geotérmico.

costos de perforación son superiores en 7.6 veces, respecto del costo de todos los componentes del sistema (ORC + ARC + turbina Tesla + IC4). La **Figura 8** muestra los costos de inversión de los componentes del sistema geotérmico, a excepción del costo de los pozos geotérmicos que ascienden a la cantidad de 1,720,000 Dólares. Entre los componentes del sistema geotérmico, el ORC representa el costo mayor, seguido por la turbina Tesla y finalmente el ARC e IC4. Cabe resaltar que el ORC alcanza un mayor costo debido a que es el componente con mayor capacidad nominal. Sin embargo, al realizar una comparativa con la turbina Tesla, la turbina Tesla resulta 25% más costosa de forma unitaria (dólares/kW) que el ciclo ORC.

Discusión

El sistema geotérmico con recuperación de calor residual de baja temperatura presenta ventajas desde

el punto de vista energético. Estas ventajas son claramente notorias en cuanto a la producción de electricidad y eficiencia energética. También estas ventajas pueden presentarse desde el punto de vista ambiental ya que, si se compara la generación de electricidad del sistema geotérmico con una central de combustible fósil, el sistema geotérmico puede evitar una magnitud considerable de emisiones de CO_2 . Una central de combustible fósil puede alcanzar 733 gCO_2/kWh (Peyvandi *et al.*, 2023), por lo que el sistema geotérmico con recuperación de calor residual con una producción de potencia de 52.94 kW y operando con energía limpia, 7,500 horas por año, estarían evitando 291.03 toneladas de emisiones de CO_2 por año a la atmósfera. También, es necesario resaltar que, mediante la propuesta, también se pueden estar abriendo nuevas brechas para la implementación de tecnologías que aún no son ampliamente utilizadas en geotermia.

Por otra parte, aunque la eficiencia y la potencia del sistema crecen con la recuperación de calor residual, el sistema no ha resultado económicamente factible. Esta factibilidad desfavorable se atribuye al elevado costo de la inversión inicial. De esta inversión inicial, la parte medular que vuelve desfavorable la factibilidad económica, es la inversión derivada de los costos de preformación de los pozos geotérmicos y de las bajas capacidades nominales de producción de electricidad de las tecnologías, por lo que el sistema podría convertirse en factible incrementando la potencia eléctrica de salida del sistema geotérmico. Sin embargo, el incremento de dicha potencia, depende de las características termodinámicas del recurso geotérmico disponible. Li *et al.* (2021), indican que la rentabilidad económica de un sistema geotérmico de estas características puede ser económicamente viable a partir de una temperatura del recurso geotérmico de 100 °C. No obstante, para la propuesta de este trabajo no sería una opción debido a que, si se contara con una temperatura del recurso geotérmico de 100 °C, se podría proponer un ARC de simple efecto, ya que alcanza un mayor desempeño termodinámico que el ARC de medio efecto. Lo anterior representaría un desvío del objetivo de la integración propuesta en este trabajo.

Otra forma de obtener una factibilidad económica favorable, es implementar los denominados usos directos, que tienen grandes beneficios en la factibilidad económica. Esto se puede confirmar de acuerdo con la revisión de antecedentes. Sin embargo, el objetivo principal de esta investigación es proponer un sistema con fines solamente de generación de electricidad. Por lo que, finalmente, se puede resaltar que la implementación práctica de esta propuesta dependería de dos factores. El primer factor para la implementación práctica sería que los pozos geotérmicos fueran donados de algún campo geotérmico abandonado y el segundo factor sería que el proyecto fuera financiado. Se puede resaltar que al llevar a la práctica este tipo de sistemas activados con recursos de muy baja temperatura, se podría estar dando un paso más hacia un futuro sustentable.

Conclusiones

En este trabajo se ha presentado la evaluación energética y económica de la integración de un ARC de medio efecto y una turbina Tesla en la recuperación de calor residual de un ciclo Rankine orgánico activado con energía geotérmica de baja temperatura. Se puede resaltar que la integración de las tres tecnologías presenta un incremento en la producción de potencia global del sistema geotérmico. Por una parte, si el sistema contemplará solamente el ORC y no se integrará la turbina Tesla en la recuperación de calor, el sistema geotérmico solamente tendría la capacidad de producir una potencia de 42.8 kW. Sin embargo, al integrar la Turbina Tesla en la recuperación de calor residual se logra una producción de potencia adicional de 9.3 kW. Por otra parte, al integrar el ORC, la turbina Tesla y el ARC de medio efecto, el sistema puede aun incrementar en mayor medida la producción de potencia total. Incluyendo el ARC de medio efecto como apoyo de refrigeración del ORC, el sistema puede alcanzar una producción de potencia total de 52.9 kW y lograr un desempeño general de la utilización de la energía de 20.31%. En la misma dirección, la mejora de la factibilidad económica podría encontrarse en la utilización de campos geotérmicos con pozos perforados

en estado inactivo que pudieran ser donados y con el apoyo a proyectos por tratarse de energías limpias. Lo anterior, podría hacer atractiva la exploración eficiente de los recursos geotérmicos de baja temperatura y contribuir en la generación de electricidad de pequeña escala.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco de los proyectos de Investigación Científica, Desarrollo Tecnológico e Innovación del Instituto Tecnológico Nacional de México (TecNM) – Proyecto: 19424.24-P. Los autores agradecen el apoyo para la realización de esta investigación.

Referencias

Aghahosseini A, Breyer C (2020). From hot rock to useful energy: A global estimate of enhanced geothermal systems potential. *Applied Energy* 279:115769. doi:10.1016/j.apenergy.2020.115769

Ahmadi A, El Haj Assad M, Jamali DH, Kumar R, Li ZX, Salameh T, Al-Shabi M, and Ehyaei MA (2020). Applications of geothermal organic Rankine Cycle for electricity production. *Journal of Cleaner Production* 274:122950. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122950

Aliahmadi M, Moosavi A, and Sadrhosseini H (2021). Multi-objective optimization of regenerative ORC system integrated with thermoelectric generators for low-temperature waste heat recovery. *Energy Reports* 7:300–313. doi:10.1016/j.egyr.2020.12.035

Alimonti C, Conti P, and Soldo E (2021). Producing geothermal energy with a deep borehole heat exchanger: Exergy optimization of different applications and preliminary design criteria. *Energy* 220:119679. doi:10.1016/j.energy.2020.119679

Alvi JZ, Feng Y, Wang Q, Imran M, and Pei G (2021). Effect of working fluids on the performance of phase change material storage based direct vapor generation solar organic Rankine cycle system. *Energy Reports* 7:348–361. doi:10.1016/j.egyr.2020.12.040

Ambriz-Díaz VM, Rubio-Maya C, Chávez O, Ruiz-Casanova E, and Pastor-Martínez E (2021). Thermodynamic performance and economic feasibility of Kalina, Goswami and Organic Rankine Cycles coupled to a polygeneration plant using geothermal energy of low-grade temperature: *Energy Conversion and Management* 243:114362. doi:10.1016/j.enconman.2021.114362

Ambriz-Díaz VM, Rubio-Maya C, Pacheco Ibarra JJ, Galván SR, and Patiño J (2017). Analysis of a sequential production of electricity, ice and drying of agricultural products by cascading geothermal energy. *International Journal of Hydrogen Energy* 42(28):18092–18102. doi:10.1016/j.ijhydene.2017.02.154

Ambriz-Díaz VM, Rubio-Maya C, Ruiz-Casanova E, Martínez-Patiño J, and Pastor-Martínez E (2020). Advanced exergy and exergoeconomic analysis for a polygeneration plant operating in geothermal cascade. *Energy Conversion and Management* 203:112227. doi:10.1016/j.enconman.2019.112227

Astolfi M, La Diega LN, Romano MC, Merlo U, Filippini S, and Macchi E (2020). Techno-economic optimization of a geothermal ORC with novel “Emeritus” heat rejection units in hot climates. *Renewable Energy* 147:2810–2821. doi:10.1016/j.renene.2019.01.065

Boyaghchi FA, Chavoshi, M (2017). Multi-criteria optimization of a micro solar-geothermal CCHP system applying water/CuO nanofluid based on exergy, exergoeconomic and exergoenvironmental concepts. *Applied Thermal Engineering* 112:660–675. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.10.139

Braimakis K, Preißinger M, Brüggemann D, Karellas S, and Panopoulos K (2015). Low grade waste heat recovery with subcritical and supercritical Organic Rankine Cycle based on natural refrigerants and their binary mixtures. *Energy* 88:80–92. doi:10.1016/j.energy.2015.03.092

Ceglia F, Marrasso E, Roselli C, Sasso M (2021). Effect of layout and working fluid on heat transfer of polymeric shell and tube heat exchangers for small size geothermal ORC via 1-D numerical analysis. *Geothermics* 95:102118. doi:10.1016/j.geothermics.2021.102118

Cao Y, Ehyaei MA (2021). Energy, exergy, exergoenvironmental, and economic assessments of the multigeneration system powered by geothermal energy. *Journal of Cleaner Production* 313:127823. doi:10.1016/j.jclepro.2021.127823

Eyerer S, Dawo F, Wieland C, Spliethoff H (2020). Advanced ORC architecture for geothermal combined heat and power generation. *Energy* 205:117967. doi:10.1016/j.energy.2020.117967

Dimian AC, Bildea CS (2008). Appendix B: Heat-Exchanger Design. In *Chemical Process Design* (pp. 474–482). Wiley. doi:10.1002/9783527621583.app2

Ding P, Zhang K, Yuan Z, Wang Z, Li D, Chen T, Shang J, Shofahaei R (2021). Multi-objective optimization and exergoeconomic analysis of geothermal-based electricity and cooling system using zeotropic mixtures as the working fluid. *Journal of Cleaner Production* 294:126237. doi:10.1016/j.jclepro.2021.126237

jclepro.2021.126237

Gong Y, Yang L, Lu Z, Wang L, Li H (2021). Thermodynamic performance assessment of ammonia/ionic liquid based half-effect absorption refrigeration cycle. *Case Studies in Thermal Engineering* 25:100924. doi:10.1016/j.csite.2021.100924

Gyroscope (2024). Tesla turbine. <https://www.gyroscope.com/d.asp?product=Teslaturbine4>

Jawad Al-Tameemi MR, Liang Y, Yu Z (2019). Combined ORC-HP thermodynamic cycles for DC cooling and waste heat recovery for central heating. *Energy Procedia* 158:2046–2051. doi:10.1016/j.egypro.2019.01.471

Ji F, Bao Y, Zhou Y, Du F, Zhu H, Zhao S, Li G, Zhu X, Ding S (2019). Investigation on performance and implementation of Tesla turbine in engine waste heat recovery. *Energy Conversion and Management* 179:326–338. doi:10.1016/j.enconman.2018.10.071

Lemmens S (2016). Cost engineering techniques & their applicability for cost estimation of organic rankine cycle systems. *Energies* 9(7):485. doi:10.3390/en9070485

Li T, Liu Q, Xu Y, Dong Z, Meng N, Jia Y, Qin, H (2021). Techno-economic performance of multi-generation energy system driven by associated mixture of oil and geothermal water for oilfield in high water cut. *Geothermics* 89:101991. doi:10.1016/j.geothermics.2020.101991

Liang Y, Shu G, Tian H, Sun Z (2018). Investigation of a cascade waste heat recovery system based on coupling of steam Rankine cycle and NH₃-H₂O absorption refrigeration cycle. *Energy Conversion and Management* 166:697–703. doi:10.1016/J.enconman.2018.04.064

Loreti G, Facci AL, Baffo I, Ubertini S (2019). Combined heat, cooling, and power systems based on half effect absorption chillers and polymer electrolyte membrane fuel cells. *Applied Energy* 235:747–760. doi:10.1016/j.apenergy.2018.10.109

Maldonado M, Belem A, Villalobos P, Felipe L, Fierro R, Ricardo J, Durán L, Manuel L, Chávez J, Alexandra J, Víctor A-D. (2024). Thermodynamic and economic analysis of a geothermal trigeneration energy system, integrated with the flash, Kalina and Stirling cycles. *Ciencia Nicolaita* 90:57-71. doi:10.35830/cn.vi90.725

Manfrida G, Pacini L, Talluri L (2018). An upgraded Tesla turbine concept for ORC applications. *Energy* 158:33–40. doi:10.1016/j.energy.2018.05.181

Maragna C, Altamirano A, Tréméac B, Fabre F, Rouzic L, Barcellini P (2024). Design and optimization of a geothermal absorption cooling system in a tropical climate. *Applied*

Energy 364:123102. doi:10.1016/j.apenergy.2024.123102

Maryami R, Dehghan AA (2017). An exergy based comparative study between LiBr/water absorption refrigeration systems from half effect to triple effect. *Applied Thermal Engineering* 124:103–123. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.05.174

Parikhani T, Delpisheh M, Haghghi MA, Holagh SG, Athari H (2021). Performance enhancement and multi-objective optimization of a double-flash binary geothermal power plant. *Energy Nexus* 2:100012. doi:10.1016/j.nexus.2021.100012

Peyvadi M, Hajinezhad A, Moosavian S (2023). Investigating the intensity of GHG emissions from electricity production in Iran using renewable sources. *Results in Engineering*, 100819. doi:10.1016/j.rineng.2022.100819

Pfenniger A, Vogel R, Koch VM, Jonsson M (2014). Performance Analysis of a Miniature Turbine Generator for Intracorporeal Energy Harvesting. *Artificial Organs* 38(5):E68-E81. doi:10.1111/aor.12279

Rahbar K, Mahmoud S, Al-Dadah RK, Moazami N, Mirhadizadeh SA (2017). Review of organic Rankine cycle for small-scale applications. *Energy Conversion and Management* 134:135–155. doi:10.1016/j.enconman.2016.12.023

Roumpedakis TC, Christou T, Monokrousou E, Braimakis K, Karellas S (2019). Integrated ORC-Adsorption cycle: A first and second law analysis of potential configurations. *Energy* 179:46–58. doi:10.1016/j.energy.2019.04.069

Rubio-Maya C, Pastor E, Romero CE, Ambriz VM, Pacheco-Ibarra JJ (2016). Techno-economic assessment for the integration into a multi-product plant based on cascade utilization of geothermal energy. *Applied Thermal Engineering* 108:84–92. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.07.108

Rusin K, Wróblewski W, Rulik S (2021). Efficiency based optimization of a Tesla turbine. *Energy* 236:121448. doi:10.1016/j.energy.2021.121448

Sengupta S, Guha A (2016). Flow of a nanofluid in the microspacing within co-rotating discs of a Tesla turbine. *Applied Mathematical Modelling* 40(1):485–499. doi:10.1016/j.apm.2015.05.012

Shaghghi A, Honarvar F, Jafari M, Solati A, Zahedi R, Taghitahoone M (2024). Thermodynamic and thermoeconomic evaluation of integrated hybrid solar and geothermal power generation cycle. *Energy Conversion and Management: X* 23:100685. doi:10.1016/j.ecmx.2024.100685

Sheikhnejad Y, Simões J, Martins N (2020). Introducing Tesla turbine to enhance energy efficiency of refrigeration cycle. *Energy Reports* 6:358–363. doi:10.1016/j.egy.2019.08.073

Song J, Gu C wei, Li X song (2017). Performance estimation of Tesla turbine applied in small scale Organic Rankine Cycle (ORC) system. *Applied Thermal Engineering* 110:318–326. doi:10.1016/j.applthermaleng.2016.08.168

Srikhirin P, Aphornratana S, Chungpaibulpatana S (2001). A review of absorption refrigeration technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 5(4):343-372.

Talluri L, Dumont O, Manfrida G, Lemort V, Fiaschi D (2020). Experimental investigation of an Organic Rankine Cycle Tesla turbine working with R1233zd(E). *Applied Thermal Engineering* 174:115293. doi:10.1016/j.

applthermaleng.2020.115293

Teng S, Wang M, Xi H, Wen S (2021). Energy, exergy, economic (3E) analysis, optimization and comparison of different ORC based CHP systems for waste heat recovery. *Case Studies in Thermal Engineering* 28:101444. doi:10.1016/j.csite.2021.101444

Zhou Y, Ruan J, Hong G, Miao, Z (2022). Dynamic Modeling and Comparison Study of Control Strategies of a Small-Scale Organic Rankine Cycle. *Energies* 15(15):5505. doi:10.3390/en15155505

Nomenclatura

Símbolos

A	Área de transferencia de calor (m^2)
BE	Beneficio anual (Dólares americanos)
C	Costo de inversión (Dólares americanos)
$DMLT$	Diferencia media logarítmica de temperaturas ($^{\circ}\text{C}$)
h	Entalpía (kJ kg^{-1})
i	Tasa de interés (%)
I_e	Ingreso por venta de electricidad (Dólares americanos)
$\dot{m}$	Flujo másico (kg s^{-1})
P	Presión (kPa)
P_e	Precio de venta de electricidad (Dólares americanos kWh^{-1})
PRS	Periodo de recuperación simple (años)
$\dot{Q}$	Potencia calorífica (kW)
T	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$, K)
t_{op}	Tiempo de operación (h)
U	Coefficiente global de transferencia de calor ($\text{kW m}^{-2} ^{\circ}\text{C}^{-1}$)

VAN	Valor actual neto (Dólares americanos)
$\dot{W}$	Potencia (kW)
X	Fracción de masa (-)
Z	Profundidad de pozo geotérmico (m)

Letras griegas

η	Eficiencia (%)
--------	----------------

Subíndices

0	Estado de referencia
1...27	Estados termodinámicos
A1, A2	Absorbedor 1 y 2
B, B2 y B3	Bombas
Cond	Condensador
en	Energía
Evp, E	Evaporador
G1, G2	Generador 1 y 2
IC4	Intercambiador de calor 4
T	Turbina
R	Refrigerante (R134a)