

# Ciencia Nicolaita 90

ISSN: 2007-7068



Universidad  
Michoacana  
de San Nicolás  
de Hidalgo

## Análisis termodinámico y económico de un sistema geotérmico de trigeneración de energía, integrado con los ciclos Flash, Kalina y Stirling

## Thermodynamic and economic analysis of a geothermal trigeneration energy system, integrated with the Flash, Kalina and Stirling cycles

Alejandra Belem Mendoza Maldonado\*, Luis Felipe Pasillas Villalobos, Jesús Ricardo Rosado Fierro, Luis Manuel Lazos Durán, Jeandery Alexandra Jurado Chávez, Víctor M. Ambriz-Díaz

**Para citar este artículo:** Mendoza Maldonado AB\*, Pasillas Villalobos LF, Rosado Fierro JR, Lazos Durán LM, Jurado Chávez JA, Ambriz-Díaz VM (2024). Análisis termodinámico y económico de un sistema geotérmico de trigeneración de energía, integrado con los ciclos Flash, Kalina y Stirling. *Ciencia Nicolaita* 90: 57-71.  
DOI: <https://doi.org/10.35830/cn.vi90.725>

### Historial del artículo



Recibido: 30 de junio de 2023  
Aceptado: 15 de diciembre de 2023  
Publicado en línea: abril 2024



**Ver material suplementario**



**\*Correspondencia de autor:** [alejandra.mendoza.md@gmail.com](mailto:alejandra.mendoza.md@gmail.com)



**Términos y condiciones de uso:** <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/privacy>



**Envíe su manuscrito a esta revista:** <https://www.cic.cn.umich.mx/cn/about/submissions>

# Análisis termodinámico y económico de un sistema geotérmico de trigeneración de energía, integrado con los ciclos Flash, Kalina y Stirling

## Thermodynamic and economic analysis of a geothermal trigeneration energy system, integrated with the Flash, Kalina and Stirling cycles

Alejandra Belem Mendoza Maldonado\*, Luis Felipe Pasillas Villalobos, Jesús Ricardo Rosado Fierro, Luis Manuel Lazos Durán, Jeandery Alexandra Jurado Chávez, Víctor M. Ambriz-Díaz

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

### Resumen

En la presente investigación se realiza un análisis de desempeño termodinámico y económico de los ciclos Kalina, Flash y el motor Stirling, integrados de una forma innovadora para el aprovechamiento de los recursos geotérmicos en la generación de energía. Se establece un modelo basado en la primera ley de la termodinámica, con la finalidad de presentar las potencias netas entregadas de cada ciclo y del motor Stirling. Los resultados indican una potencia neta del sistema de 31.35 MW, el cual comparado en términos de potencia con otros métodos para obtención de energía es relevante. Por otro lado, a través de un modelo económico basado en indicadores económicos, se tiene la conclusión de que el sistema tiene una viabilidad favorable alcanzando valores en el tiempo de recuperación de la inversión y el valor presente neto de 1.5 años y 139,100,000 USD, respectivamente.

**Palabras clave:** Sistema geotérmico, Trigeneración, Ciclo Flash, Ciclo Kalina, Motor Stirling

### Abstract

In the present investigation an analysis of the thermodynamic and economic performance of the Kalina cycle, Flash cycle and Stirling engine is made, integrated in an innovative way to take advantage of the geothermal resources in power generation. A model based on the first law of thermodynamics presents the net power output of each cycle and the Stirling engine. The results indicate a net power output of 31.35MW from the system, which compared with other methods to obtain energy, in terms of power is relevant. On the other hand, through an economic model based on economic indicators, it is concluded that the system has a favorable viability with a return of investment in 1.5 years, and a net value of 139,100,000 USD.

**Keywords:** Geothermal system, Trigeneration, Flash Cycle, Kalina Cycle, Stirling Engine

\*Autor de correspondencia: [alejandra.mendoza.md@gmail.com](mailto:alejandra.mendoza.md@gmail.com)  
Copyright © Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



## 1. Introducción

La energía geotérmica cuenta con múltiples ventajas, dentro de ellas se encuentra que no necesita combustible, pues aprovecha cualidades de la tierra, por ende, puede reducir de 90% hasta 100% las emisiones de gases de efecto invernadero. Durante casi 100 años, la energía geotérmica ha sido empleada para generar electricidad, para fines domésticos, agrícolas, entre otros. Sin embargo, no ha logrado el alcance merecido, dado que algunos recursos, en su mayoría contaminantes son comercializados con mayor facilidad (Gupta y Roy, 2007a; Glassley, 2014). Por otra parte, una de las aplicaciones más relevantes de la energía geotérmica, es el aprovechamiento para la generación de electricidad mediante las plantas de simple flash, las cuáles se distinguen por su cámara flash, encargada de disminuir la presión del recurso de activación extraído, donde luego de ello, el fluido en forma de mezcla llega a un separador, ahí el líquido se reinyecta y el vapor es enviado a la turbina para generar electricidad. El vapor saliente de la turbina es enviado al condensador, que se encarga de convertir el recurso a líquido saturado y a la vez disipa el calor al medio ambiente (Gupta y Roy, 2007a). Esta descripción es una característica típica de una planta simple flash en su esquema de operación tradicional.

En la actualidad, diseños innovadores de plantas geotérmicas implican la recuperación de calor del condensador para generar electricidad nuevamente a través de tecnologías con menores requerimientos de temperatura, tal es el caso del motor Stirling y el ciclo Kalina (Roeinfard y Moosavi, 2022). Este último, utiliza una mezcla de amoníaco y agua como fluido de trabajo (Zare y Palideh, 2018), y donde la temperatura de activación del ciclo generalmente oscila desde 100 a 130 °C (Lan *et al.*, 2022). Dentro de sus ventajas se tiene que; su eficiencia térmica otorga un 36% más que un generador termoeléctrico (Lan *et al.*, 2022). También se ha comprobado que tiene una alta eficiencia para fuentes de calor de bajo grado de temperatura, y logra disminuir el uso de energía entre 20 y 30 %, lo que se traduce como un muy alto rendimiento, esto lo posiciona incluso mejor que el bien conocido ciclo Rankine orgánico (ORC) (Roeinfard y Moosavi, 2022). El motor Stirling, propuesto por Robert Stirling en 1816, de igual manera es conocido por su alta eficiencia en aplicaciones de energía, tal es el caso de la

geotérmica (Tavakolpour-Saleh *et al.*, 2021).

En la actualidad, la energía geotérmica también se emplea en la calefacción, electricidad y refrigeración. A dicho esquema de aplicación simultánea, se le conoce como trigeneración. Dicho sistema también puede ser definido por la cantidad de productos que es capaz de producir, por ejemplo, tres productos de electricidad. Un esquema de trigeneración de energía otorga mejoras monetarias, ecológicas y tecnológicas (Zare, 2016). Estos sistemas tienen un potencial para mejorar e involucrar nuevas configuraciones e interconexiones de tecnologías que permiten incrementar el ahorro energético y el uso eficiente de la energía. Por ejemplo, Batenin *et al.* (2014) demostraron los beneficios de la trigeneración en comparación con plantas de vapor convencionales. En el estudio, encontraron que el ahorro anual de recursos energéticos puede llegar a un 24% y el gasto anual de estos recursos es un 30% menor. En la misma dirección, Ren *et al.* (2021), integraron un sistema implementando el ciclo flash y un ciclo que opera con el par de trabajo agua-amoniaco (cogeneración). Con base en simulaciones realizadas, el sistema a una temperatura de activación de 170 °C alcanza una eficiencia del 81.8% en el ciclo flash y 46.99% en el ciclo que opera con el par de trabajo agua-amoniaco. Por otro lado, Cao *et al.* (2021), realizaron un estudio de un sistema de trigeneración, entre sus elementos destacables está el ciclo Kalina modificado. Uno de los puntos más importantes es en la mejora de eficiencia donde se obtuvo un 51.3%.

Fan *et al.* (2021), se centraron en la producción de energía limpia mediante el ciclo flash con una fuente geotérmica y otras energías, obteniendo valores en la eficiencia energética de 58.03%. En términos económicos, encontraron que la planta tiene un retorno de inversión de 5.6 años. Ansarinasab y Hajabdollahi (2020), presentaron un sistema con capacidad de producir 7,774 kW mediante los ciclos Kalina y Stirling. Moradpoor y Ebrahimi (2019), analizaron un sistema de trigeneración que integra tecnologías como el ciclo Kalina y motor Stirling, que tiene un ahorro de combustible de 45%, y una eficiencia eléctrica del 50%. Musharavati *et al.* (2021), presentaron un sistema con capacidad de producir electricidad y otros productos utilizando el ciclo Kalina, con un análisis termodinámico a partir del software *Engineering Equation Solver* (EES).

Kaczmarczyk *et al.* (2020), evaluaron un

sistema que aprovecha la energía geotérmica de baja entalpía para la producción de electricidad, utilizando el ciclo Rankine y el Kalina, obteniendo resultados que indican que el ciclo Kalina es capaz de producir 6.3 GWh/año de electricidad. Nasruddin *et al.* (2009), presentaron un análisis de una instalación práctica de un ciclo Kalina que se encuentra en Husavik, Islandia, con la finalidad de aprovechar el calor desperdiciado para incrementar la eficiencia de la planta. Zhili *et al.* (2023), detectaron un área de oportunidad del motor Stirling activado con energía geotérmica, encontrando que el sistema alcanza una eficiencia de conversión térmica de 38%.

La literatura estudiada muestra un vacío existente en el análisis termodinámico y económico enfocado en la fusión de las plantas Flash, Kalina y Stirling. Este trabajo pretende llenar ese vacío existente y se desarrolla por la necesidad de integrar una planta geotérmica con capacidad de generar tres productos de electricidad a partir de diferentes tecnologías de conversión de energía térmica. Analizar y enlazar por primera vez un ciclo Kalina, Simple Flash y un Motor Stirling, representa la innovación dentro de este proyecto, el cual como en cualquier modelado de esta índole, tiene la intención de obtener una eficiencia y potencia significativa de una manera sustentable. Los autores del presente artículo se ven motivados por encontrar un nuevo modelo donde la entrega de potencia total sea competente con otros métodos de generación de electricidad a partir de energía limpia, así como económicamente más conveniente que ciclos activados con combustible. Por lo tanto, el propósito de este estudio es llevar a cabo la implementación de un análisis termodinámico exhaustivo enfocado en determinar la viabilidad energética y económica del sistema para la generación eficiente de energía eléctrica, utilizando tecnologías de conversión de energía térmica como lo son el ciclo de simple flash, Kalina y Stirling. De esta manera, se busca que el sistema geotérmico sea diseñado y operado de manera óptima, maximizando la eficiencia energética y obteniendo un retorno de inversión conveniente. El análisis se basará en la utilización de herramientas teóricas y metodologías adecuadas, aprovechando los fundamentos de investigación y los avances en la tecnología de generación de energía geotérmica.

## 2. Descripción del sistema

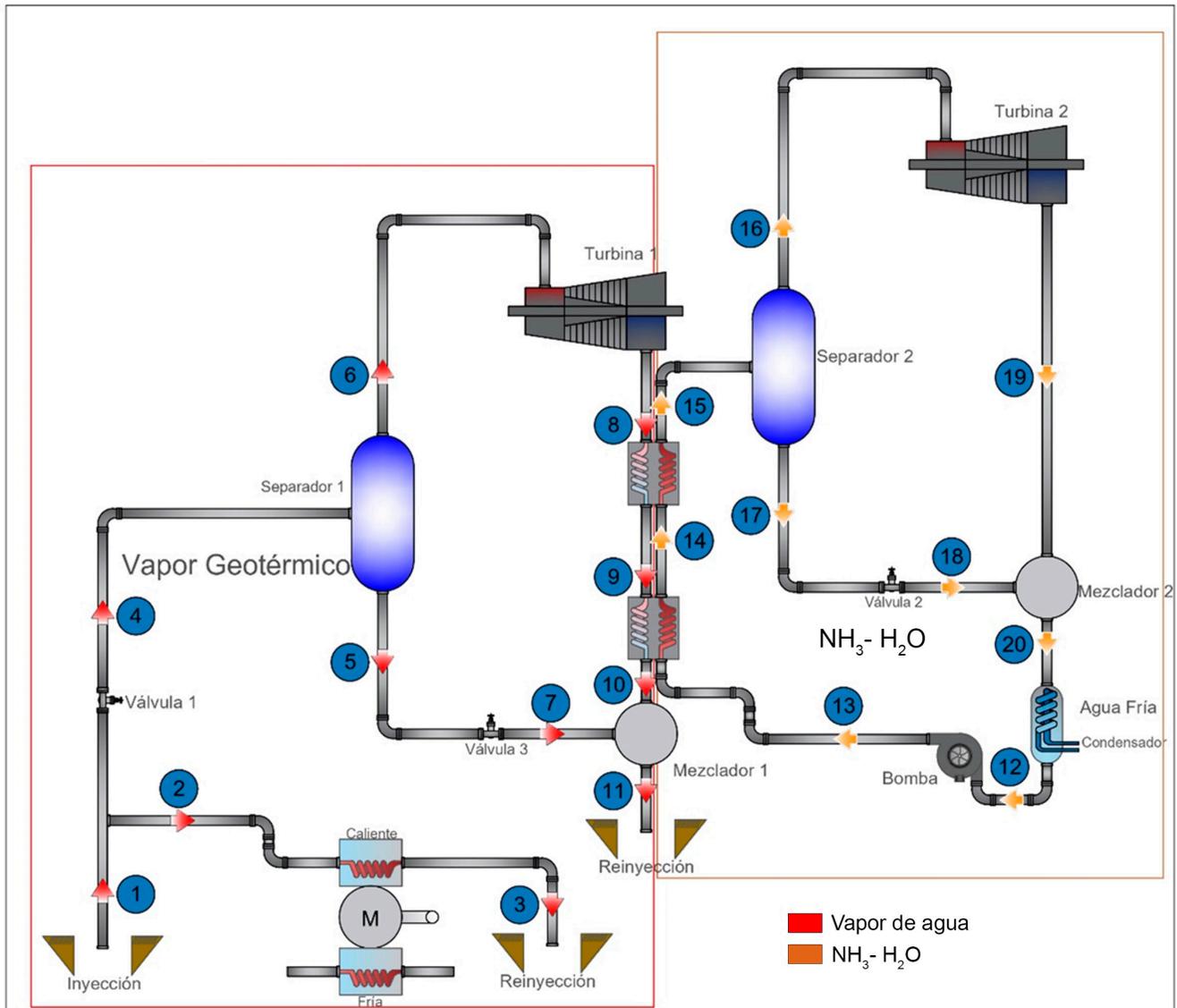
La planta es impulsada por un recurso geotérmico para producir tres productos de electricidad utilizando como subsistemas diferentes configuraciones termodinámicas. Las configuraciones se integran en diferentes niveles térmicos de temperatura en la planta geotérmica. El recurso geotérmico utilizado para la activación de la planta cuenta con una temperatura de 295 °C y un flujo masico de 104 kg/s (Zhou *et al.*, 2020). De acuerdo a la **Figura 1**, la planta de trigeneración cuenta con tres ciclos termodinámicos o subsistemas para su funcionamiento. Entre los ciclos que se activan con un régimen de mayor temperatura (295 °C) se encuentran el motor Stirling (estados 2-3) y la configuración geotérmica de simple Flash (estados 3-10). En un régimen de activación de menor temperatura se encuentra el ciclo Kalina (estados 11-19). El ciclo Kalina que opera con el par de trabajo  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ , representa una relevancia en la integración en la planta geotérmica debido a que es activado con calor residual de la configuración de simple Flash, mientras que la innovación de la integración del motor Stirling, se centra en la integración en este tipo de plantas, tratando de implementar y explorar un área de oportunidad para la implementación de los motores Stirling en geotermia.

### 2.1. Consideraciones generales para el modelado

En la **Tabla 1**, se muestran las condiciones iniciales con las que fue modelado este sistema, cuyo recurso de activación es un recurso geotérmico. Para el modelado de dicha planta se consideró valores típicos de operación de plantas geotérmicas, también se contempló estado estable, sin pérdidas de energía cinética ni pérdidas por energía potencial.

## 3. Modelo termodinámico y económico

Los modelos termodinámico y económico se han establecido a partir de la primera ley de la termodinámica y de conceptos e indicadores económicos. Ambos modelos se han implementado utilizando el software *Engineering Equation Solver* (EES).



**Figura 1.** Diagrama general del sistema geotérmico de trigeneración.

### 3.1. Modelo termodinámico

#### 3.1.1. Balances de masa y energía

Tomando como base la primera ley de la termodinámica, la **Tabla 2** muestra los balances de los flujos de masa y energía que están involucrados en cada uno de los componentes de los ciclos termodinámicos que integran la planta geotérmica.

#### 3.1.2. Parámetros de eficiencia

En esta sección se muestran las ecuaciones utilizadas para calcular la eficiencia del ciclo Kalina y del motor Stirling, dentro de la **Tabla 3**.

#### 3.1.3. Áreas de transferencia de calor

Las tecnologías que integran la planta de trigeneración incluyen componentes que involucran transferencia de calor, la cual es la encargada de transformar el recurso principal en productos. Para obtener una estimación de las áreas de transferencia de calor de los componentes que componen al ciclo Kalina y al Ciclo Flash se utilizaron las ecuaciones que se encuentran en la **Tabla 4**.

### 3.2. Modelo económico

#### 3.2.1. Inversión inicial

La inversión depende directamente de distintos

**Tabla 1.** Condiciones iniciales en el sistema.

Ciclo	Condición	Símbolo	Valor	Ref.
<b>Simple flash</b>	Flujo masico del recurso geotérmico	$\dot{m}_1$	104 kg/s	(Zhou <i>et al.</i> , 2020)
	Temperatura del recurso geotérmico	$T_1$	295 °C	(Zhou <i>et al.</i> , 2020)
	Calidad del recurso geotérmico	$x_1$	0.45	(Zhou <i>et al.</i> , 2020)
	Temperatura inicio simple flash	$T_4$	173 °C	(Mohammadzadeh Bina <i>et al.</i> , 2018)
	Presión salida de la turbina 1	$P_8$	150 KPa	(Mohammadzadeh Bina <i>et al.</i> , 2018)
	Temperatura salida precalentador	$T_{10}$	65 °C	(Mohammadzadeh Bina <i>et al.</i> , 2018)
<b>Stirling</b>	Relación de compresión	RV	1.23	(Du <i>et al.</i> , 2019)
	Efectividad ST	$\epsilon_{ST}$	0.94	(Du <i>et al.</i> , 2019)
	Temperatura baja del Stirling	$T_{LS}$	25 °C	(Zhu <i>et al.</i> , 2021)
	Temperatura alta del Stirling	$T_{HS}$	295 °C	(Zhou <i>et al.</i> , 2020)
	Diferencial de temperatura baja	$\Delta T_L$	40 °C	(Du <i>et al.</i> , 2019)
	Diferencial temperatura alta	$\Delta T_H$	90 °C	(Du <i>et al.</i> , 2019)
	Eficiencia mecánica del Stirling	$\eta_{mech}$	0.88	(Du <i>et al.</i> , 2019)
	Gamma	$\gamma$	1.667	(Du <i>et al.</i> , 2019)
	Corriente del Stirling	$\dot{m}_2$	1 kg/s	(Hasanpour Omam, 2021)
<b>Kalina</b>	Temperatura inicial	$T_{12}$	35 °C	(Du <i>et al.</i> , 2019)
	Fracción de masa	$x_{12}$	0.82	(Du <i>et al.</i> , 2019)
	Presión de la bomba	$P_{13}$	3000 kPa	(Ambriz-Díaz <i>et al.</i> , 2021)
	Temperatura de salida del evaporador	$T_{15}$	85.6 °C	(Ambriz-Díaz <i>et al.</i> , 2021)

parámetros específicos como lo es la ubicación, tiempo, demanda, oferta, entre otros. En las **Tablas 5**, y **6** se abordan las ecuaciones encargadas de lograr un cálculo aproximado de cada elemento, y por ende del sistema total.

Para la proyección del gasto y la inversión de esta planta, es de suma importancia contemplar los pozos involucrados en ella. En la **Tabla 6**, se presenta la ecuación específica para el cálculo del costo de pozo de reinyección, así como extracción.

Para el modelado del costo total, se comenzó modelando el costo por ciclo, donde se sumó el costo de cada elemento que lo compone. En el flash se contempla su turbina, válvulas, y separador, por otro lado, para el Kalina se contempla; el precalentador, evaporador, turbina, bomba, condensador, separador, mezclador y válvula, y por último el costo del motor Stirling se predice directamente en base a su potencia, como se

observa en la **Tabla 5**. Todos los costos anteriores se encuentran en dólares, por ende, el costo por KW se representa como el cociente del costo de cada ciclo que compone esta planta, entre la potencia neta respectiva. Finalmente, para calcular el costo total del sistema se sumó el costo total del ciclo flash, ciclo Kalina, motor Stirling y el costo implicado por los pozos de la **Tabla 6**.

### 3.2.2. Viabilidad económica

Una vez conocidos los costos globales del ciclo Kalina, Ciclo Flash y el motor Stirling, se tienen las herramientas suficientes para predecir la viabilidad del proyecto, la cual se rige por las ecuaciones especificadas en la **Tabla 7**, donde se contempla que los ingresos serán por la venta de electricidad en kWh.

**Tabla 2.** Ecuaciones de balance de energía y masa en los diferentes componentes del sistema.

Ciclo	Componente	Masa	Energía
<b>Simple Flash</b>	Separador	$\dot{m}_1 = \dot{m}_5 + \dot{m}_6$	$\dot{m}_4 \cdot h_4 = \dot{m}_5 \cdot h_5 + \dot{m}_6 \cdot h_6$
	Turbina	$\dot{m}_6 = \dot{m}_8$	$\dot{W}_t = \dot{m}_6 \cdot (h_6 - h_7)$
	Mezclador	$\dot{m}_{11} = \dot{m}_7 + \dot{m}_{10}$	$\dot{m}_{11} \cdot h_{11} = \dot{m}_7 \cdot h_7 + \dot{m}_{10} \cdot h_{10}$
	Evaporador	$\dot{m}_8 = \dot{m}_9$	$\dot{Q}_{inS} = \dot{m}_8 \cdot (h_8 - h_{10})$
	Precaentador	$\dot{m}_9 = \dot{m}_{10}$	$\dot{Q}_{pre} = \dot{m}_9 \cdot (h_9 - h_{10})$
<b>Kalina</b>	Separador	$\dot{m}_{15} = \dot{m}_{16} + \dot{m}_{17}$	$\dot{m}_{15} \cdot h_{15} = \dot{m}_{16} \cdot h_{16} + \dot{m}_{17} \cdot h_{17}$
	Turbina	$\dot{m}_{16} = \dot{m}_{19}$	$\dot{W}_t = \dot{m}_{16} \cdot (h_{16} - h_{19})$
	Mezclador	$\dot{m}_{20} = \dot{m}_{18} + \dot{m}_{19}$	$\dot{m}_{20} \cdot h_{20} = \dot{m}_{18} \cdot h_{18} + \dot{m}_{19} \cdot h_{19}$
	Condensador	$\dot{m}_{20} = \dot{m}_{12}$	$\dot{Q}_{Cond} = \dot{m}_{20} \cdot (h_{20} - h_{12})$
	Bomba	$\dot{m}_{12} = \dot{m}_{13}$	$\dot{W}_B = \dot{m}_{12} \cdot (h_{12} - h_{12})$
<b>Motor Stirling</b>	Motor Stirling	$\dot{m}_2 = \dot{m}_3$	$\dot{Q}_{High} = \dot{m}_2 \cdot C\dot{P} \cdot \Delta TH$
			$\dot{Q}_{Low} = \dot{Q}_{High} \cdot (1 - \eta_{Mech})$
			$\dot{W}_M = \eta_{PCY} \cdot (\dot{Q}_{High} - \dot{Q}_{Low})$

**Tabla 3.** Ecuaciones de eficiencia de ciclo Kalina y motor Stirling.

Ciclo	Ecuación	Ref.
<b>Ciclo Kalina</b>	$\eta_{Kal} = \frac{\dot{W}_{n\ Kal}}{\dot{Q}_{Intercambiador}}$	(Akimoto <i>et al.</i> , 2021)
<b>Motor Stirling</b>	$\eta_{PCY} = \frac{1 - RV^{1-r} - \zeta \cdot (RV^{r-1} - 1)}{1 - RV^{1-r} + (1 - \zeta) \cdot (1 - \varepsilon_{st})}$	(Ansarinassab <i>et al.</i> , 2021)

**Tabla 4.** DMLT y diferencia de temperatura.

Componente	Diferencial de temperatura	DMLT	Área	Ref.
<b>Precaentador</b>	$\Delta T_1 = T_{10} - T_{13}$	$DMLT_{Pre} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)}$	$A = \frac{\dot{Q}_{Pre}}{U_{Pre} \cdot DMLT_{Pre}}$	(Holman, 1998)
	$\Delta T_2 = T_9 - T_{14}$			
<b>Evaporador</b>	$\Delta T_3 = T_9 - T_{14}$	$DMLT_{Evap} = \frac{\Delta T_3 - \Delta T_4}{\ln\left(\frac{\Delta T_3}{\Delta T_4}\right)}$	$A = \frac{\dot{Q}_{Evap}}{U_{Evap} \cdot DMLT_{Evap}}$	
	$\Delta T_4 = T_8 - T_{15}$			
<b>Condensador</b>	$\Delta T_5 = T_{12} - T_{1\text{agua}}$	$DMLT_{Cond} = \frac{\Delta T_5 - \Delta T_6}{\ln\left(\frac{\Delta T_5}{\Delta T_6}\right)}$	$A = \frac{\dot{Q}_{Cond}}{U_{Cond} \cdot DMLT_{Cond}}$	
	$\Delta T_6 = T_{20} - T_{2\text{agua}}$			

**Tabla 5.** Modelado costos de componentes.

Componente	Ecuación Costos	Ref.
Turbina ciclo flash	$Z_{TurbinaFlash} = 4405 \cdot (\dot{W}_{TurbinaSimpleFlash})^{0.89}$	(Fan, Gao, <i>et al.</i> , 2021)
Válvula de entrada ciclo flash	$Z_{ValvulaInFlash} = 114.5 \cdot \dot{m}_4$	(Fan, Gao, <i>et al.</i> , 2021)
Válvula de salida ciclo flash	$Z_{ValvulaOutFlash} = 114.5 \cdot \dot{m}_5$	(Fan, Gao, <i>et al.</i> , 2021)
Separador ciclo flash	$Z_{SeparadorFlash} = 280.3 \cdot (\dot{m}_4)^{0.67}$	(Fan, Gao, <i>et al.</i> , 2021)
Precalentador	$Z_{Precalentador} = 309.14 \cdot (A_{precalentador})^{0.85}$	(Fan, Yang, <i>et al.</i> , 2021)
Evaporador	$Z_{Evaporador} = 309.14 \cdot (A_{Evaporador})^{0.85}$	(Fan, Yang, <i>et al.</i> , 2021)
Turbina ciclo Kalina	$Z_{TurbinaKalina} = 4405 \cdot (\dot{W}_{TurbinaKalina})^{0.7}$	(Fan, Gao, <i>et al.</i> , 2021)
Bomba ciclo Kalina	$Z_{BombaKalina} = 1120 \cdot (\dot{W}_{BombaKalina})^{0.6}$	(Abam <i>et al.</i> , 2020)
Condensador ciclo Kalina	$Z_{CondensadorKalina} = 516.62 \cdot A_{Condensador}$	(Abam <i>et al.</i> , 2020)
Separador ciclo Kalina	$Z_{SeparadorKalina} = 280.3 \cdot (\dot{m}_{15})^{0.67}$	(Fan, Gao, <i>et al.</i> , 2021)
Mezclador ciclo Kalina	0	(Fan, Gao, <i>et al.</i> , 2021)
Válvula ciclo Kalina	$Z_{ValvulaKalina} = 114.5 \cdot \dot{m}_{17}$	(Fan, Yang, <i>et al.</i> , 2021)
Motor Stirling	$Z_{MotorStirling} = 2200 \cdot \dot{W}_{Stirling}$	(Ansarinab <i>et al.</i> , 2021)

**Tabla 6.** Modelado costos de pozos.

Tipo de Pozo	Ecuación	Ref.
Pozo de extracción/ Reinyección	$Z_{PerforacionExtraccion} = a \cdot n_p \cdot \text{Log}_{10}(d) + (b \cdot n_p \cdot d^{2+c}) [USD]$ <p style="text-align: center;">Donde:</p> $a = 5.218 \cdot 10^5; b = 0.1982; c = 1.977 \cdot 10^6; n_p = 1; d = 800 \text{ a } 2800 \text{ m}$	(Gupta y Roy, 2007b; Shamoushaki <i>et al.</i> , 2021)
$Z_{TotalPozos} = Z_{PerforacionExtraccion} + Z_{PerforacionReinyeccion} [USD]$		

## 4. Resultados y discusión

En esta Sección 4, primero se discuten los resultados de todos los estados termodinámicos obtenidos para los ciclos Kalina, simple flash, motor Stirling y del sistema geotérmico de trigeneración en general. Posteriormente, se presentan los resultados del análisis termodinámico y, finalmente los resultados y discusiones del modelado económico. Estos resultados permiten conocer las prestaciones energéticas y económicas de la integración del ciclo Kalina, ciclo simple flash y del motor Stirling, en un esquema de trigeneración geotérmico.

### 4.1. Análisis termodinámico

#### 4.1.1. Propiedades termo físicas

En esta Subsubsección 4.1.1, se muestran las propiedades termofísicas del sistema geotérmico

de trigeneración haciendo referencia a los estados mostrados en la **Figura 1**, bajo las condiciones de activación planteadas anteriormente. En la **Tabla 8**, se agrupan estas propiedades y se puede distinguir las características relevantes de todos los estados termodinámicos del sistema geotérmico, y de los ciclos que lo integran.

#### 4.1.2. Flujos de energía

A continuación, en la **Tabla 9**, se muestran los resultados obtenidos de todas las potencias netas del sistema. Se puede apreciar que la potencia de la turbina del ciclo simple flash es mayor que la del ciclo Kalina y del motor Stirling. El ciclo simple flash aporta alrededor de 18.79 MW siendo así más de la mitad de la potencia total del sistema de trigeneración. Por otro lado, el motor Stirling a pesar de que aporta muy poca potencia en comparación a los otros dos ciclos, 54.93 kW es una

**Tabla 7.** Ecuaciones viabilidad económica.

Costo anual	$Z_{Anual} = Z_{Total} \cdot \frac{i \cdot (1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$ <p>Donde:  <math>i = 0.15; n = 20</math></p>	(Farsi y Rosen, 2021; Köse <i>et al.</i> , 2021)
Ingresos por venta de electricidad	<p>Ingresos = <math>\dot{W}_{neta} \cdot T_o \cdot p</math></p> <p>Donde:  <math>T_o = 7800</math> [Horas]; <math>p = 0.15 \left[ \frac{USD}{kW \cdot h} \right]</math></p>	(Ambriz-Díaz <i>et al.</i> , 2022; Fan, Yang, <i>et al.</i> , 2021; Köse <i>et al.</i> , 2021)
Beneficio anual	<p><math>BA = Ingresos - Z_{Anual} - Z_{O\&amp;M}</math></p> <p><math>Z_{O\&amp;M} = Z_{Anual} \cdot \frac{\varphi \cdot Z_{Total}}{T_o}</math></p> <p>Donde:  <math>\varphi = 1.06</math></p>	(Ambriz-Díaz <i>et al.</i> , 2022; Farsi y Rosen, 2021; Parikhani <i>et al.</i> , 2021)
Recuperación	$R = \frac{Z_{Total}}{BA}$	(Ambriz-Díaz <i>et al.</i> , 2022)
Valor presente neto	$VPN = BA \cdot \frac{(1+i)^n - 1}{(1+i)^n \cdot i} - Z_{Total}$	(Ambriz-Díaz <i>et al.</i> , 2022)

**Tabla 8.** Estados termodinámicos de la planta de trigeneración.

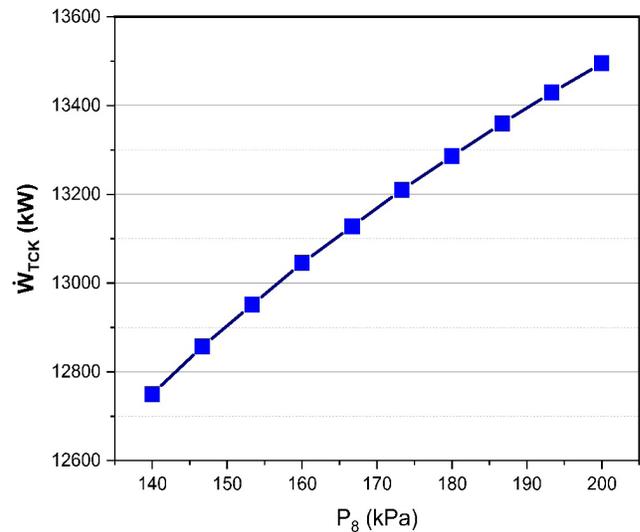
#	T (°C)	P (KPa)	$h \left( \frac{kJ}{Kg} \right)$	$s \left( \frac{kJ}{Kg \cdot k} \right)$	$\dot{m}$	Qu	x
1	295	7,995	1,965	4.348	104	0.45	-
2	295	7,995	1,965	4.348	1	0.45	-
3	295	7,995	1,965	4.348	1	0.45	-
4	173	850.5	1,965	4.834	103	0.6045	-
5	173	850.5	732.4	2.072	40.73	0	-
6	173	850.5	2771	6.642	62.27	1	-
7	111.4	150	732.4	2.124	40.73	0	-
8	111.4	150	2470	6.642	62.27	0.8995	-
9	111.4	150	467.1	1.433	62.27	0	-
10	65	150	272.2	0.8934	62.27	0	-
11	108.3	150	454.2	1.4	103	0	-
12	35	11.15	35.96	0.4904	140.6	0	0.82
13	35.5	3,000	38.74	0.4904	140.6	-	0.82
14	74.7	3,000	231.7	1.079	140.6	0	0.82
15	102.5	3,000	1,012	3.249	140.6	0.6329	0.8198
16	102.5	3,000	1,450	4.358	88.97	1	0.9808
17	102.5	3,000	256.6	1.337	51.61	0	0.5423
18	102.5	3,000	256.6	1.337	51.61	0	0.5423
19	52.9	1,115	1,305	4.358	88.97	0.9577	0.9808
20	66.3	1,115	920.2	3.265	140.6	0.6404	0.82

potencia aceptable debido a que se está buscando un área de oportunidad para la utilización de los motores Stirling en esquemas geotérmicos. Los motores Stirling, actualmente se fabrican en el orden de capacidad nominal de 1 – 50 kW. Algunos fabricantes han optado por integrar diferentes motores en un solo modulo para alcanzar mayores potencias según sea la demanda. Por otra parte, contemplando los productos de los ciclos Kalina, flash y Stirling, el sistema geotérmico total logra obtener una potencia neta final de 31.359 MW.

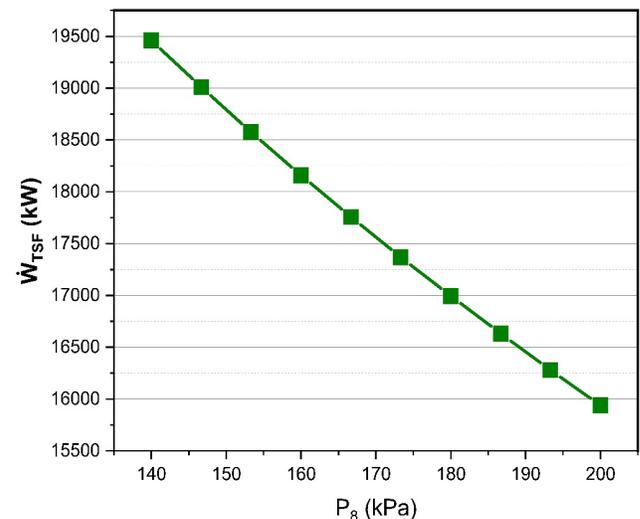
Con la finalidad observar variaciones en la potencia de salida de los diferentes ciclos termodinámicos, la **Figura 2** muestra el comportamiento de la potencia del ciclo Kalina, al aumentar la presión a la salida de la turbina flash. La potencia del ciclo Kalina aumenta de manera significativa, pero, por otro lado, la potencia del ciclo flash decrece y, en consecuencia, la potencia neta también decrece (**Figuras 3 y 4**). Aunque no sea de manera lineal es notable que, si la presión a la salida de la turbina del ciclo simple flash aumenta habrá menos kW producidos. Es por ello que se recomienda una presión de descarga de entre 140-160 kPa de la turbina del ciclo simple flash, ya que es en este rango donde la potencia del ciclo flash no tiene una caída tan abrupta, cuidando así también la potencia neta del sistema geotérmico.

**4.1.3. Parámetros de eficiencia**

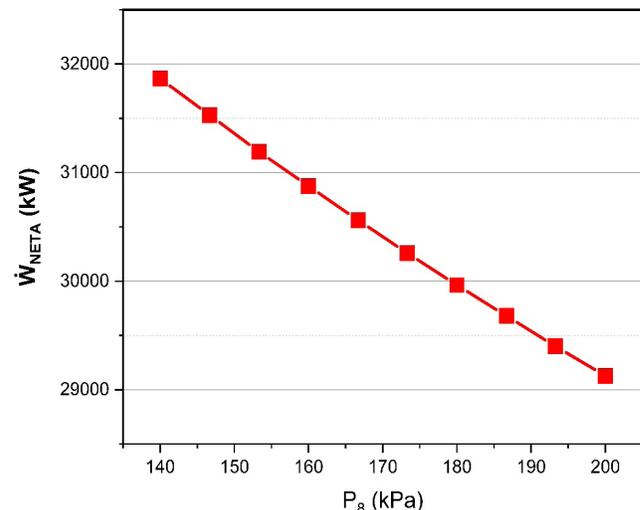
Dentro del análisis termodinámico realizado, se evaluaron tres ciclos diferentes: comenzando por el ciclo Kalina y el motor Stirling. Estos ciclos se distinguen por su propia eficiencia energética, lo que los hace sobresalir en términos de rendimiento en la generación de energía. En el caso del ciclo Kalina, se logró una eficiencia de 9.146%. Este valor de eficiencia es debido a la baja temperatura de activación del ciclo Kalina y, que está limitada por la temperatura de descarga de vapor de la



**Figura 2.** Comportamiento de la potencia del ciclo Kalina.



**Figura 3.** Comportamiento de la potencia de la turbina simple flash.



**Figura 4.** Comportamiento de la potencia neta del sistema geotérmico.

**Tabla 9.** Resultados potencias netas.

Componente	Potencia neta
Turbina simple Flash	18.79 MW
Turbina ciclo Kalina	12.514 MW
Motor Stirling	54.93 KW
Potencia total de planta	31.359 MW

turbina del ciclo simple flash. Sin embargo, la eficiencia energética de 9.146%, también indica que es posible convertir una fuente de bajo grado de temperatura en trabajo útil. Por otro lado, el motor Stirling mostró una eficiencia de 16.55%, lo que destaca su practicidad para aprovechar el calor y convertirlo en trabajo mecánico de manera más efectiva. Finalmente, la eficiencia del ciclo simple flash, no ha sido evaluada debido a que es necesario realizar un análisis por segunda ley de la termodinámica y no se encuentra dentro del alcance de este trabajo. La evaluación del sistema de trigeneración geotérmico desde una perspectiva exergética se tiene contemplada como una meta futura de la presente investigación.

#### 4.1.4. Áreas de transferencia de calor

Dentro de este apartado, se presenta una descripción de las áreas de transferencia de calor correspondientes a cada componente del sistema (**Tabla 10**). Estas áreas se presentan en metros cuadrados y reflejan las áreas designadas a la transferencia eficiente de calor en el sistema. Analizando los resultados obtenidos, se puede observar que el condensador es el componente que tiene el área de transferencia de calor más grande de todo el sistema, por otro lado, el precalentador es el que ocupa el área más pequeña.

## 4.2. Análisis económico

### 4.2.1. Costos de inversión

Basándose en el modelado económico especificado en el apartado 3.2, se obtuvo los siguientes costos contenidos en la **Tabla 11**. Cabe destacar que se están contemplando 2 pozos, uno encargado de reinyección y otro de extracción, con 800 y 2800 metros de profundidad respectivamente, ubicados en los Azufres, Michoacán.

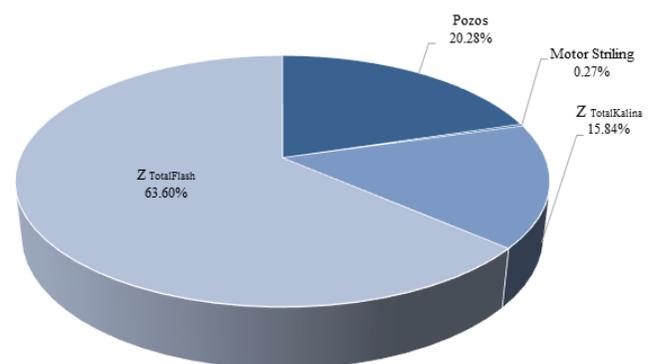
Los valores en la **Figura 5** representan los costos de cada ciclo respecto al costo total, donde;  $Z_{\text{Total Flash}}$  es el costo total del ciclo flash y tiene un valor de 28,060,000 USD,  $Z_{\text{Total Kalina}}$  es el costo total del ciclo Kalina y es de aproximadamente 6,989,000 USD, y el motor Stirling el cual tiene un costo final de 120,849 USD. El costo total de los pozos es de 8,948,000 USD, donde aproximadamente el 60% (5,330,000 USD) corresponde al pozo de extracción, y el 40% restante (3,619,000 USD) corresponde al pozo de reinyección. Tomando en cuenta los costos mencionados se obtiene el costo total del sistema

**Tabla 10.** Resultados áreas de intercambiadores.

Áreas de transferencia de calor	
Componente	Área en m <sup>2</sup>
Evaporador	4,904
Precalentador	334.1
Condensador	6,090

**Tabla 11.** Costos de componentes.

Componente	Costos [USD]
Turbina ciclo flash	28,040,000
Válvula de entrada ciclo flash	11,794
Válvula de salida ciclo flash	4,664
Separador ciclo flash	6,255
Precalentador	43,199
Evaporador	423,746
Turbina ciclo Kalina	3,323,000
Bomba ciclo Kalina	40,198
Condensador ciclo Kalina	3,146,000
Separador ciclo Kalina	7,704
Mezclador ciclo Kalina	0
Válvula ciclo Kalina	5,910
Motor Stirling	120,849



**Figura 5.** Contribuyentes del costo Total. Distribución de costos de los ciclos en el sistema geotérmico.

de trigeneración que representa el 100% de los gastos y es de 44,120,000 USD.

La **Figura 6**, muestra una representación gráfica de los costos en función de la capacidad

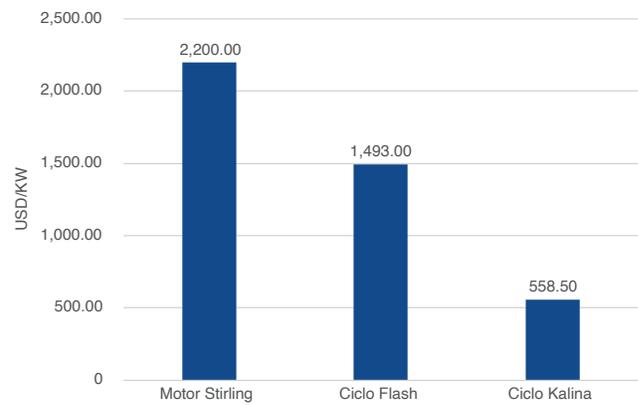
nominal de cada ciclo. El ciclo flash tiene un costo unitario de 1,493 USD/kW, mientras que el costo del ciclo Kalina por unidad de potencia generada es de 558.5 USD/kW, y el costo del Motor Stirling por unidad de potencia generada es de 2,200 USD/kW.

#### 4.2.2. Viabilidad económica

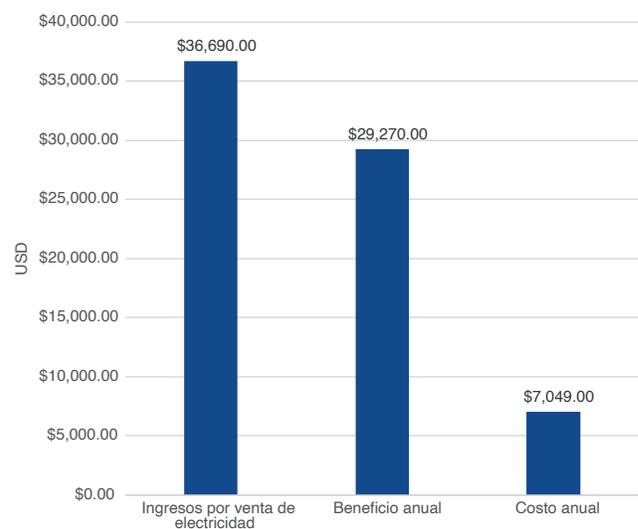
A continuación, se presentan los resultados de la aplicación del modelado de viabilidad económica, donde se está contemplando una tasa de interés del 15% y vida útil de 20 años para el cálculo del costo anual, además se considera el precio de venta de electricidad en 0.15 USD/kWh para el ingreso por venta de esta energía, y finalmente un factor de mantenimiento de 1.06 para el beneficio anual. Los datos obtenidos y representados en la **Figura 7**, representan una viabilidad económica favorable del sistema. Bajo las condiciones de operación establecidas, el sistema de trigeneración alcanza un periodo de recuperación de la inversión de 1.507 años, con un valor presente neto de 139,100,000 USD.

### 5. Conclusiones

El modelado de esta nueva propuesta demostró que una nueva configuración es capaz de entregar 31.359 MW en total, los cuales pueden ser implementados en varias aplicaciones. Dicha potencia por ciclo o total, se ve afectada directamente por el ciclo flash, puesto que, al variar propiedades de sus elementos, como ejemplo la turbina; la eficiencia y la potencia neta del ciclo Kalina sufre un cambio significativo. Al analizar dicho comportamiento es fácil entender la importancia de encontrar un balance, el cual dependerá directamente de las necesidades que cubra la planta. Puesto que si la energía eléctrica entregada por el ciclo Kalina sostiene una alta demanda se recomienda aumentar la presión de salida en la turbina del ciclo flash, sin embargo, si se espera una mayor carga para el ciclo flash, bajar la presión de salida de la turbina de este ciclo sería lo adecuado. Finalmente, al tener un retorno de inversión de aproximadamente 1.5 años y obteniendo un VPN positivo es fácil confirmar que esta configuración es viable bajo las condiciones especificadas en este artículo.



**Figura 6.** Costos unitarios de los ciclos flash, Kalina y Stirling por kW.



**Figura 7.** Resultados de la viabilidad económica del sistema geotérmico.

### 6. Referencias

Abam FI, Briggs, Tobinson A, Diemuodeke OE, Ekwe EB, Ujoatuonu KN, Isaac J, Ndukwu MC (2020). Thermodynamic and economic analysis of a Kalina system with integrated lithium-bromide-absorption cycle for power and cooling production. *Energy Reports* 6: 1992–2005. doi:10.1016/j.egy.2020.07.021

Akimoto R, Yamaki T, Nakaiwa M, Matsuda K (2021). Applicability study of micro Kalina cycle for regional low grade geothermal heat in Japan. *Case Studies in Thermal Engineering* 28: 101506. doi:10.1016/j.csite.2021.101506

Ambriz-Díaz VM, Rosas IY, Chávez O, Rubio-Maya C (2022). 4E Assessment of an Organic Rankine Cycle (ORC) Activated with Waste Heat of a Flash-Binary Geothermal Power Plant. *Entropy*



- 24(12). doi:10.3390/e24121832
- Ambriz-Díaz VM, Rubio-Maya C, Chávez O, Ruiz-Casanova E, 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. doi:10.1016/j.enconman.2021.114362
- Ansarinassab H, Hajabdollahi H (2020). Multi-objective optimization of a geothermal-based multigeneration system for heating, power and purified water production purpose using evolutionary algorithm. *Energy Conversion and Management* 223. doi:10.1016/j.enconman.2020.113476
- Ansarinassab H, Hajabdollahi H, Fatimah M (2021). Life cycle assessment (LCA) of a novel geothermal-based multigeneration system using LNG cold energy- integration of Kalina cycle, stirling engine, desalination unit and magnetic refrigeration system. *Energy* 231: 120888. doi:10.1016/j.energy.2021.120888
- Batenin VM, Maslennikov VM, Vyskubenko YA, Tsalko EA, Shterenberg VY (2014). A steam-gas power plant for combined generation of electricity, heat, and cold (Trigeneration). *High Temperature* 52(6): 913–919. doi:10.1134/S0018151X14060030
- Cao Y, Xu D, Togun H, Dhahad HA, Azariyan H, Farouk N (2021). Feasibility analysis and capability characterization of a novel hybrid flash-binary geothermal power plant and trigeneration system through a case study. *International Journal of Hydrogen Energy* 46(52): 26241–26262. doi:10.1016/j.ijhydene.2021.05.146
- Du Y, Chen K, Dai Y (2019). A study of the optimal control approach for a Kalina cycle system using a radial-inflow turbine with variable nozzles at off-design conditions. *Applied Thermal Engineering* 149: 1008–1022. doi:10.1016/j.applthermaleng.2018.12.117
- Fan G, Gao Y, Ayed H, Marzouki R, Aryanfar Y, Jarad F, Guo P (2021). Energy and exergy and economic (3E) analysis of a two-stage organic Rankine cycle for single flash geothermal power plant exhaust exergy recovery. *Case Studies in Thermal Engineering* 28: 101554. doi:10.1016/j.csite.2021.101554
- Fan G, Yang B, Guo P, Lin S, Farkoush SG, Afshar N (2021). Comprehensive analysis and multi-objective optimization of a power and hydrogen production system based on a combination of flash-binary geothermal and PEM electrolyzer. *International Journal of Hydrogen Energy* 46(68): 33718–33737. doi:10.1016/j.ijhydene.2021.07.206
- Farsi A, Rosen MA (2021). Exergoeconomic analysis of a geothermal steam turbine combined with multi-effect desalination and reverse osmosis. *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy* 1: 100022. doi:10.1016/j.prime.2021.100022
- Glassley WE (2015). *Geothermal Energy: Renewable Energy and the Environment*, Second Edition (2nd ed.). CRC Press. doi:10.1201/b17521
- Gupta H, Roy S (2007a). *Geothermal Energy. An Alternative Resource for the 21st Century*. Elsevier, Amsterdam. doi:10.1016/B978-0-444-52875-9.X5000-X
- Gupta H, Roy S (2007b). Chapter 7 - THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD, MEXICO. In: Gupta H, Roy S (eds) *Geothermal Energy*. Elsevier, Amsterdam, pp 165–197. doi:10.1016/B978-044452875-9/50007-1
- Hasanpour Omam S (2021). Exhaust waste energy recovery using Otto-ATEG-Stirling engine combined cycle. *Applied Thermal Engineering* 183: 116210. doi:10.1016/j.applthermaleng.2020.116210
- Holman JP (1998). *Transferencia de Calor* (Octava edición).
- Kaczmarczyk M, Tomaszewska B, Pajak L (2020). Geological and thermodynamic analysis of low enthalpy geothermal resources to electricity generation using ORC and Kalina cycle technology. *Energies* 16(3): doi:10.3390/en13061335
- Köse Ö, Koç Y, Yağlı H (2021). Energy, exergy, economy and environmental (4E) analysis and optimization of single, dual and triple configurations of the power systems: Rankine Cycle/Kalina Cycle, driven by a gas turbine. *Energy Conversion and Management* 227: 113604. doi:10.1016/j.enconman.2020.113604
- Lan Y, Wang S, Lu J, Zhai H, Mu L (2022). Comparative analysis of organic rankine cycle, Kalina cycle and thermoelectric generator to recover waste heat based on energy, exergy, economic and environmental analysis method. *Energy Conversion and Management* 273: 116401. doi:10.1016/j.enconman.2022.116401
- Mohammadzadeh Bina S, Jalilinasrabady S, Fujii H (2018). Exergoeconomic analysis and optimization of single and double flash cycles for Sabalan geothermal power plant. *Geothermics* 72: 74–82. doi:10.1016/j.geothermics.2017.10.013

- Moradpoor I, Ebrahimi M (2019). Thermo-environmental analyses of a novel trigeneration cycle based on clean technologies of molten carbonate fuel cell, stirling engine and Kalina cycle. *Energy* 185: 1005–1016. doi:10.1016/j.energy.2019.07.112
- Musharavati F, Khanmohammadi S, Pakseresht A (2021). Proposed a new geothermal based poly-generation energy system including Kalina cycle, reverse osmosis desalination, electrolyzer amplified with thermoelectric: 3E analysis and optimization. *Applied Thermal Engineering* 187. doi:10.1016/j.applthermaleng.2021.116596
- Nasruddin, Usvika R, Rifaldi M, Noor A (2009). Energy and exergy analysis of kalina cycle system (KCS) 34 with mass fraction ammonia-water mixture variation. *Journal of Mechanical Science and Technology* 23(7): 1871-1876. doi:10.1007/s12206-009-0617-8
- 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
- Ren C, Wang J, Chen H, Liu X, An M (2021). Thermodynamic analysis and comparative investigation of a new combined heating and power system driving by medium-and-high temperature geothermal water. *Energy Conversion and Management*, 233. doi:10.1016/j.enconman.2021.113914
- Roeinfard N, Moosavi A (2022). Thermodynamic analysis and optimization of the organic Rankine and high-temperature Kalina cycles for recovering the waste heat of a bi-fuel engine. *Fuel* 322: 124174. doi:10.1016/j.fuel.2022.124174
- Shamoushaki M, Fiaschi D, Manfreda G, Niknam PH, Talluri L (2021). Feasibility study and economic analysis of geothermal well drilling. *International Journal of Environmental Studies* 78(6): 1022–1036. doi:10.1080/00207233.2021.1905309
- Tavakolpour-Saleh AR, Hamzavi A, Omidvar A (2021). A novel solar-powered self-blowing air heating system with active control based on a quasi-Stirling cycle. *Energy* 227: 120454. doi:10.1016/j.energy.2021.120454
- Zare V (2016). A comparative thermodynamic analysis of two tri-generation systems utilizing low-grade geothermal energy. *Energy Conversion and Management* 118: 264–274. doi:10.1016/j.enconman.2016.04.011
- Zare V, Palideh V (2018). Employing thermoelectric generator for power generation enhancement in a Kalina cycle driven by low-grade geothermal energy. *Applied Thermal Engineering* 130: 418–428. doi:10.1016/j.applthermaleng.2017.10.160
- Zhili T, Dongjiao Z, Yong L, Feng Y (2023). Modelling and control strategy of a distributed small-scale low-temperature geothermal power generation system. *IET Renewable Power Generation* 17(3): 539–554. doi:10.1049/rpg2.12613
- Zhou Y, Li S, Sun L, Zhao S, Ashraf Talesh SS (2020). Optimization and thermodynamic performance analysis of a power generation system based on geothermal flash and dual-pressure evaporation organic Rankine cycles using zeotropic mixtures. *Energy* 194: 116785. doi:10.1016/j.energy.2019.116785
- Zhu S, Yu G, Liang K, Dai W, Luo E (2021). A review of Stirling-engine-based combined heat and power technology. *Applied Energy* 294: 116965. doi:10.1016/j.apenergy.2021.116965

## 7. Nomenclatura

BA	Beneficio anual [USD]
d	Profundidad del pozo [m]
$\varepsilon$	Efectividad [%]
i	Tasa de interés [%]
$\dot{m}$	Flujo masico [kg/seg]
n	Vida útil [años]
$\eta$	Eficiencia [%]
$n_p$	Numero de pozos
p	Precio energía eléctrica $\left[ \frac{USD}{kw \cdot h} \right]$
P	Presión [KPa]
$\varphi$	Factor de mantenimiento
$\dot{Q}$	Calor [Watts]
Qu	Calidad



R	Recuperación de la inversión [años]	$T_o$	Tiempo de operación anual [Horas]
RV	Relación de compresión	VPN	Valor presente neto [USD]
s	Entropía $\left[ \frac{KJ}{Kg \cdot k} \right]$	W	Potencia [Watts]
h	Entalpia $\left[ \frac{KJ}{Kg} \right]$	x	Fracción de masa
T	Temperatura [°C]	Z	Costos [USD]
		$Z_{O\&M}$	Costos de operación y mantenimiento [USD]