



Evaluación termodinámica de un sistema híbrido solar-combustible fósil en la generación de electricidad y agua caliente sanitaria

Thermodynamic evaluation of a solar-fossil fuel hybrid system in the generation of electricity and domestic hot water

Alejandra Belem Mendoza Maldonado*, Luis Felipe Pasillas Villalobos, Víctor M. Ambriz-Díaz, Oscar Chávez, Israel Y. Rosas

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

Historial

Manuscrito recibido: 9 de agosto de 2024

Manuscrito aceptado: 4 de noviembre de 2024

Manuscrito publicado: abril 2025

*Autor para correspondencia

Alejandra Belem Mendoza Maldonado

e-mail: alejandra.mendoza.md@gmail.com

Resumen

Este trabajo presenta la evaluación termodinámica de un sistema híbrido solar y combustible fósil. El sistema se compone de un circuito de agua caliente para el aporte de calor solar-fósil, un ORC con recalentamiento para generar electricidad y un circuito de Agua Caliente Sanitaria (ACS). El sistema híbrido fue evaluado y los modelos desarrollados se resolvieron utilizando el software EES. Los resultados indican que el aporte de calor solar logra incrementar la temperatura del circuito de agua caliente en 5 °C, lo que representa un incremento de la viabilidad energética. Además, los resultados se muestran altamente atractivos debido a que el sistema logra una eficiencia global del 62.12%, y un suministro eléctrico y térmico en ACS para 266 y 2078 viviendas, respectivamente.

Palabras clave: Sistema híbrido, solar-fósil, generación de electricidad, agua caliente sanitaria, análisis termodinámico.

Abstract

This work presents the thermodynamic evaluation of a solar-fossil fuel hybrid system. The system is made up of a hot water circuit to supply solar-fossil heat, an ORC with reheating to generate electricity and a domestic hot water (DHW) circuit. The hybrid system was evaluated and the developed models were solved using the EES software. The results indicate that the contribution of solar heat manages to increase the temperature of the hot water circuit by 5 °C, which represents an increase in energy viability. Furthermore, the results are highly attractive because the system achieves an overall efficiency of 62.12%, and an electrical and thermal supply in DHW for 266 and 2078 homes, respectively.

Keywords: Hybrid system, solar-fossil, electricity generation, domestic hot water, thermodynamic analysis.

Introducción

En la actualidad, los combustibles fósiles, son las principales fuentes de energía primaria para la generación de electricidad (Ibrahim *et al.*, 2023). Dentro de las tecnologías principales de generación de energía eléctrica a partir de combustibles fósiles se encuentran las centrales basadas en generación de vapor como lo es el ciclo Rankine, donde para aplicaciones de pequeña escala y baja temperatura el ciclo Rankine Orgánico es el candidato primordial (Aliahmadi *et al.*, 2021). El ciclo Rankine, es el ciclo ideal para las centrales eléctricas de vapor. Sin embargo, existen una serie de modificaciones que permiten mejorar el rendimiento del ciclo Rankine ideal, como por ejemplo el recalentamiento. Mediante este proceso se puede mejorar el rendimiento de la turbina del ciclo. Para ello, el vapor realiza una expansión parcial en la turbina y se introduce nuevamente el vapor

en la caldera para que se recaliente a presión constante. A continuación, vuelve a la turbina (a otra sección de la misma turbina o a otra turbina) y se expande nuevamente (Khaleel *et al.*, 2022).

Por mucho tiempo en el ciclo Rankine de vapor de agua o de fluido orgánico, el calor suministrado ha sido por medio de quema de combustible fósil, pero con el aumento en la contaminación del planeta, el aumento de costos de combustibles y el avance en tecnología de energías renovables se ha conseguido cambiar esta situación, un ejemplo es la utilización de la energía solar (Zhang *et al.*, 2019). En esta dirección, la combinación de la energía solar y los combustibles fósiles como recursos primarios en la generación de energía eléctrica, da origen al concepto de las plantas híbridas de energía (Wang *et al.*, 2019). Mediante este nuevo concepto, se puede mejorar la rentabilidad económica y explorar

el uso de los recursos y las plantas termo-solares. En cuanto al diseño, las plantas solares-combustible fósil se integran por un ciclo de vapor y una tecnología de captación solar, donde se destacan los captadores cilíndricos-parabólicos (Alam *et al.*, 2023). En el modo de operación se apoyan del concepto del ciclo binario, por lo que el ciclo Rankine Orgánico (ORC) juega un papel importante (Al-Sulaiman, 2014).

El hecho de diseñar sistemas híbridos utilizando el ORC, tiene como objetivo principal la producción de electricidad a partir del aprovechamiento de dos fuentes de energía primarias. En el caso del sistema híbrido solar-combustible fósil, la hibridación se fundamenta en la combinación del aprovechamiento de los recursos captados de la energía solar y la energía contenida en algún hidrocarburo. En este sendero, el uso del gas natural ha tenido una gran atracción (Wang *et al.*, 2020). Sin embargo, una parte medular en el diseño de los sistemas híbridos es el desempeño termodinámico del sistema. Por lo tanto, la viabilidad tecnológica de los sistemas híbridos depende en gran medida del rendimiento de los colectores solares y del uso eficiente de la energía que

se logra capturar (Javadi *et al.*, 2020). Es por ello, que, para mejorar el desempeño termodinámico de los sistemas híbridos es preciso integrar otros procesos que mejoren el aprovechamiento de la energía térmica, tal es el caso del Agua Caliente Sanitaria (Fuentes *et al.*, 2018). El aprovechamiento de la energía residual del ORC en aplicaciones de Agua Caliente Sanitaria (ACS), es una aplicación típica del uso directo de calor, y puede ser empleada en viviendas en usos comunes como lavado de platos, ropa, en la ducha, entre otros. Mediante el aprovechamiento de la energía en aplicaciones de ACS, es posible ahorrar combustible, obteniendo el diseño de un sistema híbrido realmente sustentable (Pomianowski *et al.*, 2020). En relación con lo anterior, y con la finalidad de mejorar el desempeño termodinámico de los sistemas híbridos, la comunidad científica ha tomado conciencia y ha realizado esfuerzos en la investigación, evaluación y desarrollo de los sistemas híbridos. **La Tabla 1**, concentra una revisión de la literatura en antecedentes de sistemas híbridos.

La literatura revisada muestra un campo explorado en el análisis de sistemas híbridos en la producción de

Tabla 1. Revisión de antecedentes de sistemas solar-combustible fósil.

Referencia	Descripción y principales hallazgos de la investigación
(Wang <i>et al.</i> , 2019)	Análisis termodinámico con fundamento en la primera ley de la termodinámica de un sistema híbrido solar-combustible fósil en condiciones de trabajo fuera de diseño. Los resultados arrojan una eficiencia óptima del 63.24% y un aporte de calor solar de 133 MWt.
(Vakilabadi <i>et al.</i> , 2019)	Análisis termodinámico de una planta de energía híbrida solar-combustible fósil. Los resultados indican que el 47% de la energía se pierde en el condensador, y la eficiencia máxima del sistema es de 23%.
(Akbari Vakilabadi <i>et al.</i> , 2018)	Análisis termodinámico (energético) de una de planta solar térmica con incorporación de sistema de recuperación de calor. Los resultados muestran un posible incremento en la potencia de salida de 34.01 MW a 34.92 MW.
(Li <i>et al.</i> , 2017)	Evaluación del desempeño termodinámico de una central híbrida solar-combustible fósil. Según los resultados, la máxima entrada de energía solar para el funcionamiento de la caldera se determina en 66,544 kW.
(Peng <i>et al.</i> , 2014)	Rendimiento termodinámico de una planta de energía híbrida solar-combustible fósil en China. Los resultados muestran, una eficiencia máxima del 26.3 % y del 11.5%, en verano e invierno, respectivamente.
(Zhao y Bai, 2014)	Análisis del rendimiento termodinámico de una central térmica híbrida solar-combustible fósil. Los resultados muestran una eficiencia de 39.35%, un incremento de potencia del 6.13% y una reducción de consumo de combustible de 13.14 g/kWh.
(Fontalvo <i>et al.</i> , 2014)	Análisis para plantas de energía híbridas solar-combustibles fósiles. Los resultados muestran que las temperaturas del vapor que alcanzan el mejor rendimiento termodinámico oscilan entre 638.2 y 638.7 K.
(Sheu y Mitsos, 2013)	Optimización termodinámica de una planta híbrida solar-combustible fósil. Los resultados muestran una eficiencia del sistema híbrido del 47.59 %.
(Reddy <i>et al.</i> , 2012)	Evaluación termodinámica de una planta solar térmica de concentradores cilindro parabólicos. Los resultados muestran que la eficiencia energética puede incrementarse en un 1.49% incrementando la presión 15 bar.

energía. Sin embargo, los sistemas híbridos encontrados carecen de la integración del proceso de ACS. Esto ha motivado a los autores de este trabajo a realizar la evaluación termodinámica de un sistema híbrido solar-combustible fósil en la generación de electricidad y producción de ACS, y en consecuencia llenar ese vacío existente en la literatura. Por lo tanto, para lograr el objetivo general de la evaluación termodinámica de un sistema híbrido solar-combustible fósil en la generación de electricidad y agua caliente sanitaria, esta investigación se ha estructurado mediante los siguientes objetivos específicos:

1. Realizar la evaluación termodinámica del sistema híbrido, con la finalidad de estimar la distribución de energía del sistema (balance térmico), productos energéticos del sistema, el potencial ahorro de combustible debido al aporte de calor solar, y el desempeño termodinámico en términos de eficiencia energética logrado por el sistema híbrido solar-combustible fósil.
2. Estimar de acuerdo con la electricidad generada del sistema híbrido, el número de viviendas que podrían ser cubiertas en demanda de electricidad.
3. Estimar mediante una evaluación termodinámica, el calor disponible para ACS y el número de viviendas que podrían ser cubiertas en agua caliente.

Metodología

La **Figura 1**, muestra la metodología implementada en este trabajo. Primeramente, se realiza la descripción y definición del sistema híbrido. Después, se introducen los datos de entrada, y finalmente se realiza el modelado termodinámico del sistema y se obtienen los resultados.

Descripción del sistema híbrido

El sistema híbrido integrado se activa mediante una combinación de energías primarias, en este caso la energía de un combustible fósil y la energía solar captada mediante colectores solares parabólicos (**Figura 2**). El sistema opera en una configuración de ciclo binario, en donde en un primer circuito (estados termodinámicos del 1 a 5) circula agua caliente obtenida a partir del calor suministrado al ciclo mediante la caldera y los colectores solares. Posteriormente, en este primer circuito se cede calor mediante un intercambiador (evaporador) de calor a un ciclo Rankine orgánico que opera con un fluido de trabajo denominado isopentano con la finalidad de generar electricidad. El ciclo Rankine Orgánico opera mediante una configuración de ciclo Rankine con recalentamiento (circuito con estados termodinámicos del 6 al 11). Una vez que el agua caliente del primer circuito cede calor en el intercambiador de calor del ciclo Rankine Orgánico, esta pasa a otro intercambiador

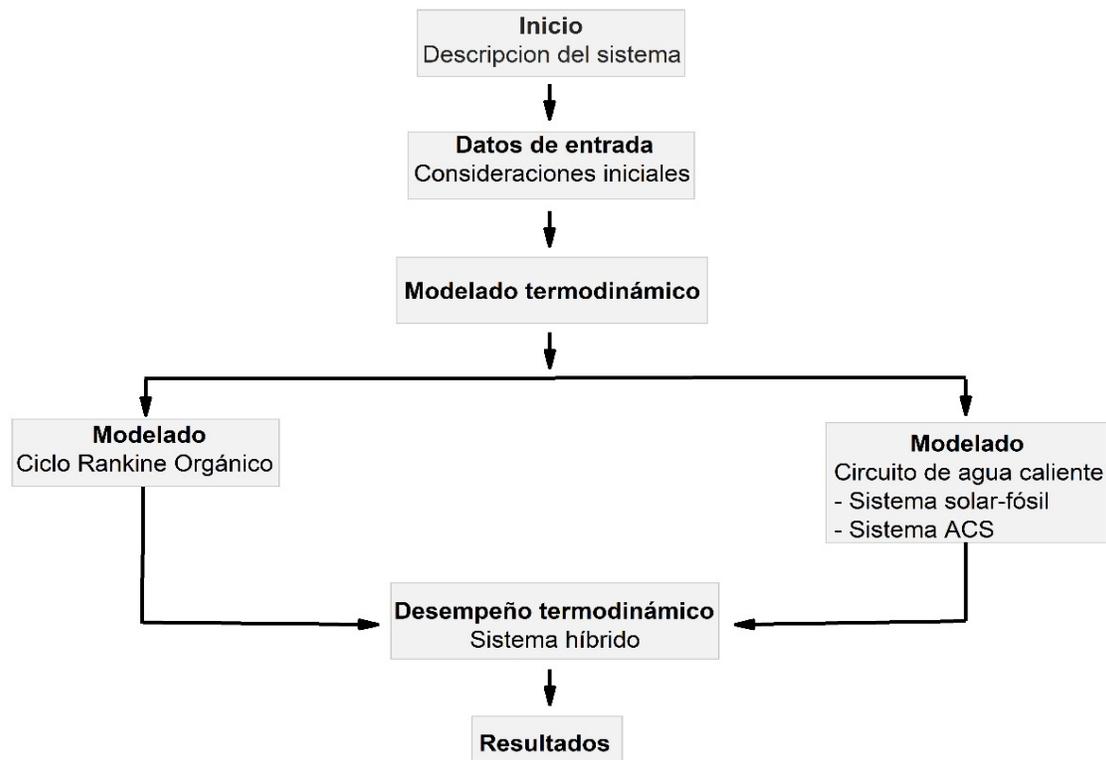


Figura 1. Metodología del presente trabajo.

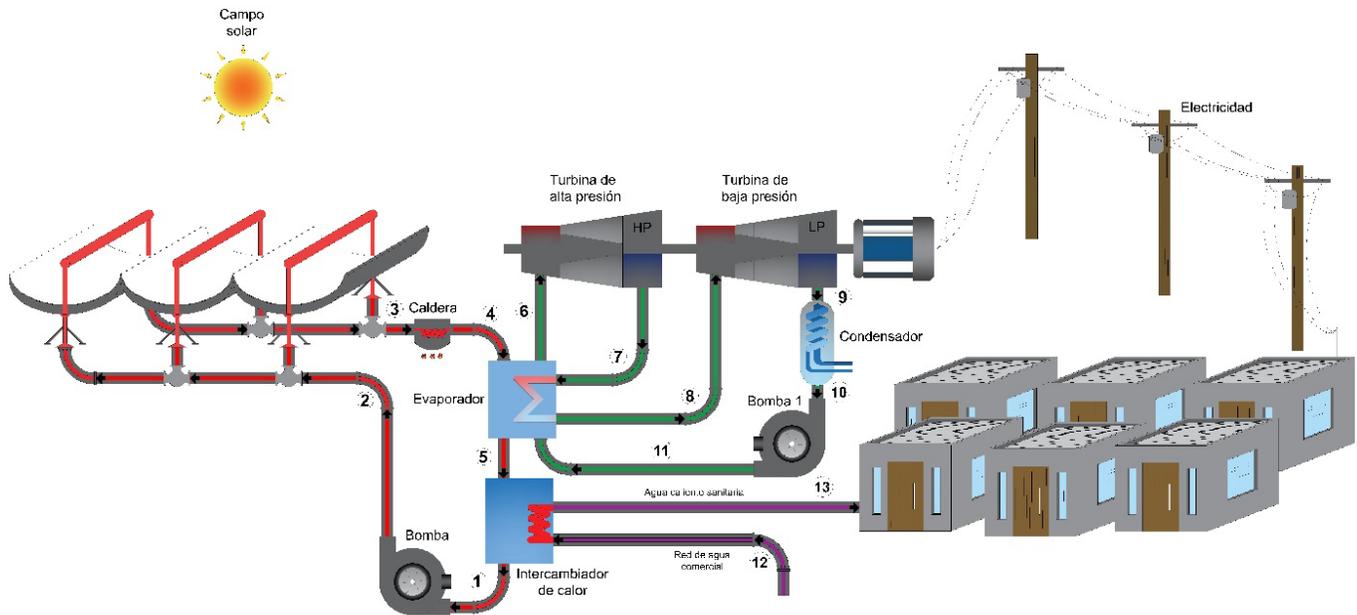


Figura 2. Diagrama del sistema híbrido.

de calor con la finalidad de ceder calor y que este calor sea utilizado en aplicaciones de agua caliente sanitaria y satisfaga la demanda térmica de un conjunto de viviendas. En la etapa de agua caliente sanitaria se tiene a la entrada del intercambiador de calor agua a temperatura ambiente suministrada por la red pública. En el intercambiador, el agua de red aumenta su temperatura hasta la temperatura requerida para suministrar agua caliente sanitaria.

Consideraciones para el modelado termodinámico

A continuación, se presentan las principales suposiciones para el análisis del sistema híbrido solar-combustible fósil (Tocci *et al.*, 2017; Akbari y Mahmoudi, 2014; Ambriz-Díaz *et al.*, 2020):

1. Se considera estado estable y los cambios de energía cinética y potencial son despreciables.
2. La temperatura del estado 4 (entrada del intercambiador 1/evaporador), es de 150 °C y la presión de 800 kPa.
3. El circuito de agua caliente se analiza como líquido incompresible y se considera agua caliente.
4. En la salida del intercambiador de ACS se tiene una temperatura de 100 °C por el lado del circuito de agua caliente.
5. La temperatura del vapor a la entrada de las turbinas, es de 140 °C.
6. La eficiencia de ambas turbinas y bomba es considerada isentrópica.
7. La calidad en el estado 10, es de 0.
8. La potencia neta de las turbinas, es de 100 kW.

9. El calor específico del agua se asume de 4.19 kJ/kg °C.

Modelado termodinámico

El modelo termodinámico del sistema híbrido se ha desarrollado en el software EES. El sistema se analiza mediante la primera ley de la termodinámica, realizando balances de masa y energía en cada componente, y para conocer las condiciones de cada estado y así determinar su comportamiento, Ecuaciones (1) y (2):

$$0 = \dot{Q}_{VC} - \dot{W}_{VC} + \sum_E \dot{m}_i \cdot h_i - \sum_S \dot{m}_i \cdot h_i \quad (1)$$

$$0 = \sum_E \dot{m}_i - \sum_S \dot{m}_i \quad (2)$$

En los casos de líquidos incompresibles, el cambio de energía específica de flujo se modela a partir de la definición de calor específico:

$$C_P = \frac{\Delta h}{\Delta T} \quad (3)$$

Ciclo Rankine Orgánico

Para la potencia neta del ciclo Rankine con recalentamiento, se tiene una capacidad nominal de 100 kW. Esta capacidad nominal es función de la potencia de ambas turbinas y el consumo de potencia de la bomba. La Ecuación (4), define la capacidad nominal del ORC:

$$\dot{W}_{ORC} = \dot{W}_{THP} + \dot{W}_{TLP} - \dot{W}_B \quad (4)$$

Donde la potencia producida por la turbina de alta presión, la potencia generada por la turbina de baja presión y la potencia consumida por la bomba, son determinadas a partir de las Ecuaciones (5), (6) y (7), respectivamente:

$$\dot{W}_{THP} = \dot{m}_{iso} \cdot (h_6 - h_7) \quad (5)$$

$$\dot{W}_{TLP} = \dot{m}_{iso} \cdot (h_8 - h_9) \quad (6)$$

$$\dot{W}_B = \dot{m}_{iso} \cdot (h_{11} - h_{10}) \quad (7)$$

La cantidad de potencia generada por el ORC, depende en su totalidad del flujo másico de isopentano, involucrado en las Ecuaciones (5) - (7). Este flujo másico se evalúa mediante la Ecuación (8):

$$\dot{m}_{iso} = \frac{\dot{W}_{ORC}}{h_6 - h_7 + h_8 - h_9 - h_{11} + h_{10}} \quad (8)$$

Por otra parte, el aporte de calor requerido por el ORC para producir los 100 kW, se determina mediante un balance de energía en el evaporador, Ecuación (9). Además, la fracción de energía térmica encargada de efectuar el recalentamiento, también puede ser determinada en el evaporador mediante la Ecuación (10):

$$\dot{Q}_{EVP} = \dot{m}_{iso} \cdot (h_6 - h_{11}) + \dot{m}_{iso} \cdot (h_8 - h_7) \quad (9)$$

$$\dot{Q}_R = \dot{m}_{iso} \cdot (h_8 - h_7) \quad (10)$$

La energía que requiere disipar el ORC al medio ambiente y lograr operar en su configuración de maquina térmica se define por un balance de energía en el condensador, Ecuación (11):

$$\dot{Q}_{COND} = \dot{m}_{iso} \cdot (h_9 - h_{10}) \quad (11)$$

El desempeño termodinámico del ORC se determina mediante la Ecuación (12):

$$\eta_{ORC} = \left(\frac{\dot{W}_{ORC}}{\dot{Q}_{EVP}} \right) \cdot 100 \quad (12)$$

Circuito de agua caliente

Un parámetro fundamental en el desempeño del sistema híbrido, es el flujo másico del circuito de agua caliente. Este flujo, es posible determinarlo en el evaporador del ORC, Ecuación (13):

$$\dot{m}_{hw} = \frac{\dot{Q}_{EVP}}{C_{P,hw} \cdot (T_4 - T_5)} \quad (13)$$

Aporte de calor solar/fósil

Una vez evaluado el flujo másico del circuito de agua caliente, es posible determinar el aporte de calor solar y el aporte de calor de origen fósil aportado por el boiler/caldera del sistema. Para el aporte de calor solar, en este trabajo se ha establecido un área de colectores de 100 m², y una irradiación solar promedio de 0.6 kW/m² (Bou Lawz Ksayer, 2011). La Ecuación (14), define el aporte de calor solar:

$$\dot{Q}_{Solar} = I_s \cdot A_c \quad (14)$$

El incremento de temperatura del flujo másico de agua caliente, a partir del campo solar, se determina a partir de la Ecuación (15):

$$T_3 = \frac{\dot{Q}_{Solar}}{\dot{m}_{hw} \cdot C_{P,hw}} + T_2 \quad (15)$$

Por otra parte, el aporte de calor por el sistema de combustible fósil, se determina a partir de un balance de energía en el boiler, Ecuación (16). Mientras que el consumo de combustible (gas natural) por parte del boiler se determina mediante la Ecuación (17). El Poder Calorífico Inferior (PCI) del Gas Natural (GN) se ha establecido de acuerdo con (Sukpancharoen y Prasartkaew, 2021):

$$\dot{Q}_{Boiler} = \dot{m}_{hw} \cdot C_{P,hw} \cdot (T_4 - T_3) \quad (16)$$

$$\dot{m}_{GN} = \frac{\dot{Q}_{Boiler}}{PCI} \quad (17)$$

Sistema de agua caliente sanitaria

Para evaluar el calor del sistema de ACS, es necesario

aplicar la primera ley de la termodinámica en el intercambiador de calor que permite la cedencia de energía entre el circuito de agua caliente y el sistema ACS, Ecuación (18):

$$\dot{Q}_{ACS} = \dot{m}_{hw} \cdot C_{P,hw} \cdot (T_5 - T_1) \quad (18)$$

Una vez determinado el (\dot{Q}_{ACS}), es necesario establecer el número de viviendas que puede satisfacer dicha cantidad de calor disponible. Para lo anterior, se requiere primeramente estimar el consumo de ACS por vivienda. En este trabajo se ha establecido que dicho valor oscila entre los 120 a 160 Lt/día (Fuentes *et al.*, 2018), por lo que el flujo másico de ACS consumido diariamente por una vivienda se puede estimar a partir de la Ecuación (19):

$$\dot{m}_{ACS} = \rho_{h2o} \cdot \dot{V}_{ACS} \quad (19)$$

Otros parámetros importantes para determinar el número de viviendas, son las temperaturas del agua de la red que se va a calentar y la temperatura deseada del ACS. Para estimar el número de viviendas se ha asumido una temperatura promedio de la red de agua de 25 °C y una temperatura deseada de 80 °C (Wang *et al.*, 2018). Teniendo definidos los parámetros anteriores, el número de viviendas que podría satisfacer el sistema híbrido en ACS, se puede evaluar mediante la Ecuación (20):

$$n_{viviendas} = \frac{\dot{Q}_{ACS}}{\dot{m}_{ACS} \cdot C_{P,h2o} \cdot (T_{13} - T_{12})} \quad (20)$$

Desempeño termodinámico del sistema híbrido

El desempeño termodinámico por primera ley del sistema híbrido depende fundamentalmente de los productos energéticos que tiene el sistema y de los recursos energéticos consumidos para alcanzar dichos productos. La relación recurso-producto, define la eficiencia, Ecuación (21):

$$\eta_s = \left(\frac{\dot{W}_{ORC} + \dot{Q}_{ACS}}{\dot{Q}_{Boiler} + \dot{Q}_{Solar}} \right) \cdot 100 \quad (21)$$

El (\dot{Q}_{ACS}), producido por el sistema puede satisfacer un determinado número de viviendas, definido en la Ecuación (19). Mientras que el otro producto, la electricidad producida por el ORC (\dot{W}_{ORC}), puede suminis-

trar electricidad a un número aproximado de viviendas. La demanda eléctrica que puede satisfacer, depende del consumo promedio de energía por vivienda (CUE), alrededor de 9 - 12 kWh/día (CFE, 2024), por lo que, el número de viviendas que se puede satisfacer en electricidad depende de la energía diaria generada por el ORC definido en la Ecuación (22), y el consumo unitario en electricidad por vivienda definido en la Ecuación (23):

$$P_E = \dot{W}_{ORC} \cdot \left[24 \frac{kWh}{dia} \right] \quad (22)$$

$$n_{viviendas,E} = \frac{P_E}{C_{UE}} \quad (23)$$

Resultados y discusión

En esta parte, se presentan los resultados y discusión sobre el sistema híbrido solar-combustible fósil. Utilizando las suposiciones establecidas, el sistema ha sido resuelto utilizando la primera ley de la termodinámica e implementando el software EES. Las propiedades termodinámicas del sistema se definen en la **Tabla 2**.

Las propiedades del estado termodinámico 4 (salida de la caldera/boiler) repercuten directamente sobre el rendimiento de los subsistemas del sistema híbrido (ORC, sistema ACS y circuito de agua caliente), en especial la temperatura de dicho estado (temperatura del boiler). Esta temperatura; se encarga de mantener el óptimo funcionamiento del sistema híbrido e influye directamente en la energía térmica que requiere el ORC para

Tabla 2. Propiedades termodinámicas del sistema híbrido.

Estado	h (kJ/kg)	\dot{m} (kg/s)	P (kPa)	S (kJ/kg·K)	T (°C)
1	168.2	2.865	800	0.572	40
2	168.2	2.865	800	0.572	40
3	189.1	2.865	800	0.6383	45
4	632.5	2.865	800	1.842	150
5	419.6	2.865	800	1.306	100
6	184.3	1.123	1256	-0.2661	140
7	169.4	1.123	847.9	-0.2661	127.5
8	198.9	1.123	847.9	-0.1935	140
9	123	1.123	137.5	-0.1935	95.11
10	-322.5	1.123	137.5	-1.6	37
11	-320.6	1.123	1256	-1.6	37.43
12	104.9	3.126	200	0.3669	25
13	335	3.126	200	1.075	80

generar la electricidad. Una variación en la temperatura del boiler no implica un cambio significativo en las potencias del ORC debido a que se está integrando un módulo ORC de 100 kW nominales. Sin embargo, aunque la potencia no tenga cambios significativos, el flujo másico de isopentano que requiere el ORC para generar los 100 kW si se observa influenciado. El flujo másico que requiere el ORC puede variar de 1.08 a 1.57 kg/s en función de la temperatura del boiler. A medida que la temperatura del boiler es mayor, se requiere un menor flujo másico debido a la recepción de energía de mayor calidad termodinámica en el proceso. Esto se puede observar en la **Figura 3**.

La **Figura 4**, muestra una comparativa entre la variación de la temperatura de boiler y las potencias térmicas del evaporador, condensador y recalentador. Se puede apreciar una disminución general de todas las potencias térmicas al elevar la temperatura del boiler como consecuencia de la disminución del flujo másico del ORC. Además, mediante esta **Figura 4**, también se puede destacar que para la configuración de ORC con recalentamiento, el mayor aporte del recalentamiento se origina a una menor temperatura. A una temperatura del boiler de 120 °C, el aporte del recalentador es de alrededor de 700 kW.

Por otra parte, el circuito ORC encargado de mantener un suministro constante de calor para el ORC y el sistema ACS, logra su objetivo gracias a dos principales fuentes de calor: el boiler y los colectores solares. Estas entradas de energía, presentan un comportamiento específico respecto a la temperatura del boiler, si la temperatura aumenta, el flujo de calor necesario entrante por el boiler decrece, pero el flujo de calor captado por los colectores solares se mantiene constante, 60 kW. Esto es debido, por una parte, a que al incrementar la temperatura del boiler se requiere un flujo másico de menor magnitud

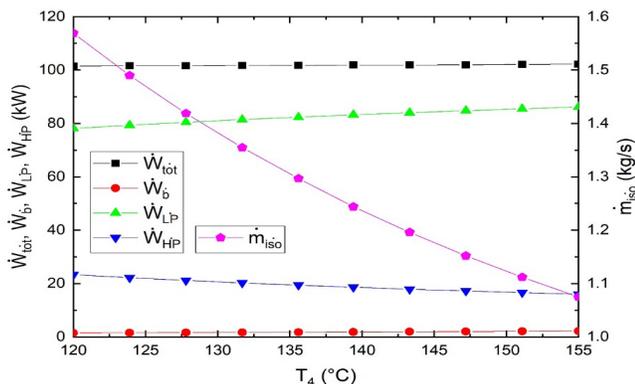


Figura 3. Potencias y flujo de isopentano del ORC en función de la temperatura del boiler.

de agua caliente para activar el ORC de 100 kW, y en consecuencia el flujo de calor del boiler decrece. Por su parte, el calor captado por los colectores se mantiene constante debido a que para el análisis se consideró un área definida de colectores de 100 m² y se analizó para una irradiación fija en una época del año. La **Figura 5**, plasma este comportamiento, donde también se visualiza

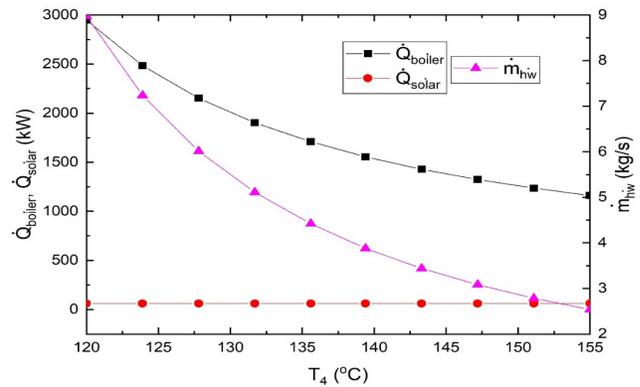


Figura 5. Parámetros del circuito de agua caliente en función de la temperatura del boiler.

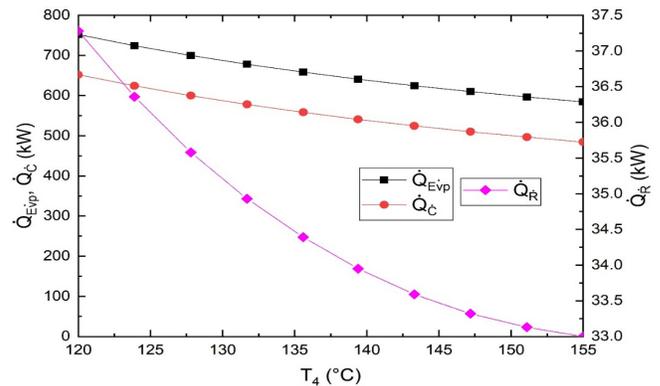


Figura 4. Potencia térmica en componentes del ORC en función de la temperatura del boiler.

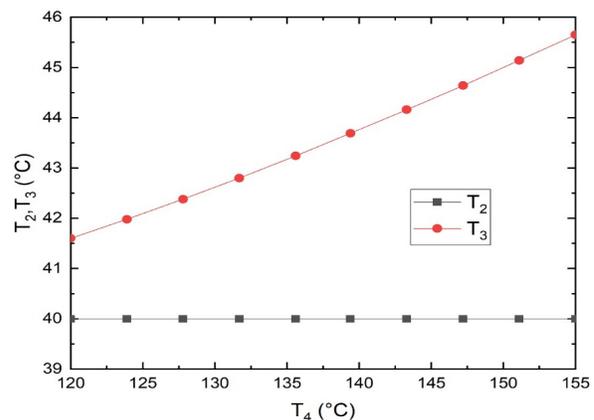


Figura 6. Temperaturas del campo solar en función de la temperatura del boiler.

que entre mayor sea la temperatura en el estado 4, menor será el flujo másico del circuito de agua caliente, entre 2.5 y 9 kg/s.

Para visualizar el efecto del aporte de calor por los colectores solares en el flujo másico del circuito de agua caliente, se presenta la **Figura 6**. En esta dirección, es indispensable evaluar la tendencia de temperaturas de entrada y salida de los colectores, previas al suministro de calor de estos elementos, en función de las posibles variaciones de la temperatura del boiler. La temperatura del boiler, no provocará ningún efecto sobre la temperatura de entrada de los colectores, y esto es debido a que la temperatura de salida del intercambiador de ACS se mantiene constante, y esta temperatura prácticamente es la temperatura de entrada de los colectores. Mientras que, por otro lado, la temperatura que el flujo másico de agua caliente alcanzada a la salida de los colectores solares, sí se observa incrementada. Este incremento se observa en un rango desde 41.56 °C hasta 45.56 °C, en función de un incremento de la temperatura del boiler de 35 °C.

Uno de los productos del sistema híbrido es el ACS, este producto puede ser función de la temperatura del boiler. La manera de cuantificar este producto es a través de la potencia térmica que se tiene disponible para ACS, y en función de esta potencia estimar el número de viviendas que puede ser cubierto en ACS. En esta dirección, se puede apreciar un fuerte impacto en el número de viviendas y la potencia térmica del ACS al realizar una variación de la temperatura del boiler como lo muestra la **Figura 7**. Al elevar la temperatura del boiler se produce una menor potencia térmica del ACS debido a la disminución del flujo másico del boiler. Como consecuencia, al reducir potencia térmica del ACS el número de viviendas se ve afectado de igual forma. El número de viviendas puede variar desde aproximadamente 6,500 hasta 2078, para una temperatura del boiler de entre 120 hasta 155 °C, respectivamente.

Debido a que se trata de un sistema híbrido con consumo de combustible fósil, un importante factor es el consumo de gas natural, este es indispensable para la incorporación del boiler y activar el sistema. En la **Figura 8**, se muestra cómo esta cantidad de gas natural decrece de 0.06 a 0.024 kg/s, si la temperatura a la salida del boiler se aumenta. Este comportamiento se presenta por la disminución de aporte de calor por parte del boiler (de 2,947 a 1,162 kW), y que es función del flujo másico de agua caliente requerido por el ORC. A mayor temperatura del boiler, el ORC requiere un menor flujo másico de agua caliente y es por ello la disminución del consumo de calor y combustible por parte del boiler.

Finalmente, la **Figura 9**, muestra el desempeño termodinámico del sistema híbrido y del ciclo ORC operando de manera individual. Se puede apreciar que, a medida que se incrementa la temperatura del boiler la eficiencia del ORC se incrementa, este incremento de eficiencia oscila alrededor del 3.81%. Por su parte, la

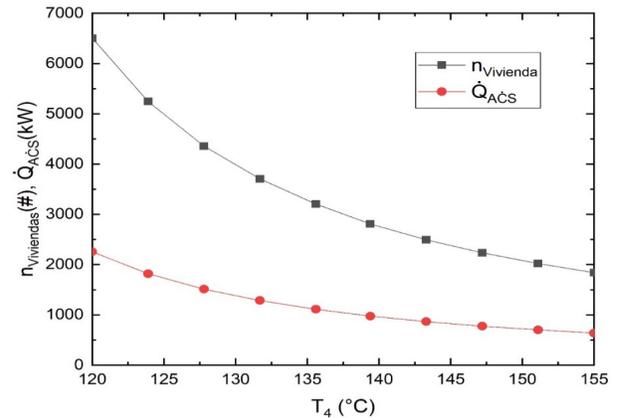


Figura 7. Parámetros del sistema de ACS en función de la temperatura del boiler.

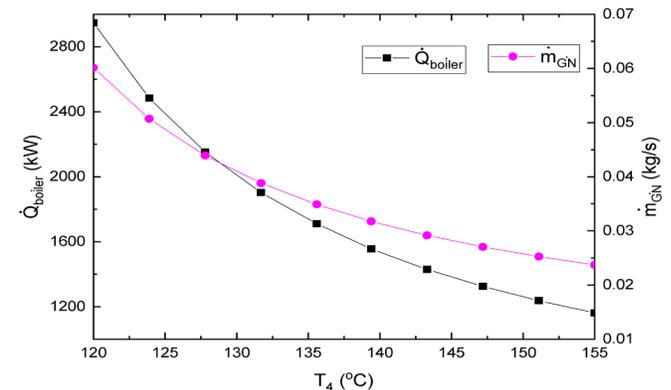


Figura 8. Aporte de potencia calorífica y consumo de GN en el boiler.

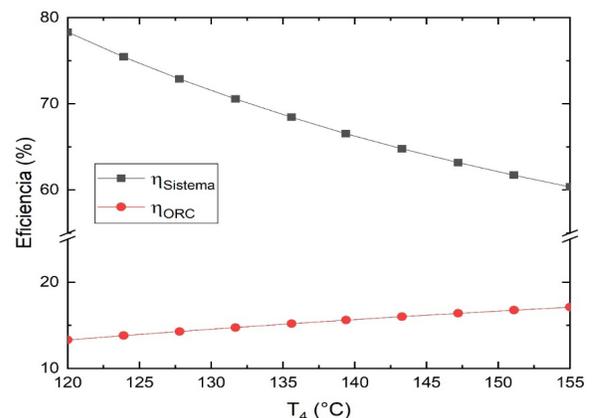


Figura 9. Eficiencia del sistema híbrido y del ORC en función de la temperatura del boiler.

eficiencia del sistema se observa disminuida a medida que, se incrementa la temperatura del boiler. Esta disminución en la eficiencia es debida a que a medida que la temperatura del boiler se incrementa, se reduce el flujo másico de agua caliente del circuito de agua caliente, y esto tiene como consecuencia una menor producción de ACS. Al tener una menor producción de ACS, se disminuyen los productos energéticos del sistema híbrido, lo que se traduce en una reducción en la eficiencia energética del sistema total.

Conclusiones

En este trabajo se presentó la evaluación termodinámica de un sistema híbrido solar-combustible fósil para la generación de electricidad y agua caliente sanitaria. La evaluación ha resultado altamente atractiva desde el punto de vista energético, por una parte, el ciclo Rankine orgánico puede lograr la producción de 100 kW netos, de los cuales 16.78 kW se producen en la turbina de alta presión y 85.3 kW se obtienen a partir de la turbina de baja presión, convirtiendo esta potencia neta a energía, se puede satisfacer la demanda eléctrica de al menos 267 viviendas. Además, el ORC, resulta altamente eficiente debido a su temperatura de activación y a la configuración de operación en recalentamiento. La eficiencia lograda por el ORC operando de manera independiente puede llegar al 16.66%, lo que es atractivo para ciclos de estas características.

Por otro lado, el sistema de agua caliente sanitaria ha permitido incrementar el uso de la energía primaria del sistema, logrando que el sistema híbrido solar-fósil alcance una eficiencia combinada de calor-electricidad del 62.12%, donde el sistema ACS puede aprovechar 720.4 kW lo que representa el suministro de agua caliente sanitaria para 2078 viviendas. En recopilación, la configuración de sistema híbrido-solar ha permitido un incremento en los productos del sistema, y el campo solar logra un ahorro de combustible de hasta 4.4 kg/h de gas natural debido a la energía térmica captada a través de los colectores, presentando como resultado un incremento de la rentabilidad energética del sistema.

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

- Akbari AD, Mahmoudi SMS (2014). Thermo-economic analysis & optimization of the combined supercritical CO₂ (carbon dioxide) recompression Brayton/organic Rankine cycle. *Energy* 78:501–512. doi:10.1016/j.energy.2014.10.037
- Akbari Wakilabadi M, Bidi M, Najafi AF (2018). Energy, Exergy analysis and optimization of solar thermal power plant with adding heat and water recovery system. *Energy Conversion and Management* 171:1639–1650. doi:10.1016/j.enconman.2018.06.094
- Alam MI, Nuhash MM, Zihad A, Nakib TH, Ehsan MM (2023). Conventional and Emerging CSP Technologies and Design Modifications: Research Status and Recent Advancements. In *International Journal of Thermofluids* (Vol. 20). Elsevier B.V. doi:10.1016/j.ijft.2023.100406
- Aliahmadi M, Moosavi A, Sadhosseini 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.egy.2020.12.035
- Al-Sulaiman FA (2014). Exergy analysis of parabolic trough solar collectors integrated with combined steam and organic Rankine cycles. *Energy Conversion and Management* 77:441–449. doi:10.1016/j.enconman.2013.10.013
- Ambriz-Díaz VM, Rubio-Maya C, Ruiz-Casanova E, Martínez-Patiño J, Pastor-Martínez E (2020). Advanced exergy and exergoeconomic analysis for a polygeneration plant operating in geothermal cascade. *Energy Conversion and Management* 203. doi:10.1016/j.enconman.2019.112227
- Bou Lawz Ksayer E (2011). Design of an ORC system operating with solar heat and producing sanitary hot water. *Energy Procedia* 6:389–395. doi:10.1016/j.egypro.2011.05.045
- CFE (2024). *Cuántos kwh por día es normal*. <https://recibodeluzcfe.mx/blog/cuantos-kwh-por-dia-es-normal/>
- Fontalvo A, García J, Sanjuan M, Padilla RV (2014). Automatic control strategies for hybrid solar-fossil fuel power plants. *Renewable Energy* 62:424–431. doi:10.1016/j.renene.2013.07.034
- Fuentes E, Arce L, Salom J (2018). A review of domestic hot water consumption profiles for application in systems and buildings energy performance analysis. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 81, pp. 1530–1547). Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.rser.2017.05.229
- Ibrahim HA, Ayomoh MK, Bansal RC, Gitau MN, Yadavalli VSS, Naidoo R (2023). Sustainability of power generation for developing economies: A systematic review of power sources mix. In *Energy Strategy Reviews* (Vol. 47). Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.esr.2023.101085
- Javadi FS, Metselaar HSC, Ganesan P (2020). Performance improvement of solar thermal systems integrated with phase change materials (PCM), a review. In *Solar Energy* (Vol. 206, pp. 330–352). Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.solener.2020.05.106

Khaleel OJ, Basim Ismail F, Khalil Ibrahim T, bin Abu Hassan SH (2022). Energy and exergy analysis of the steam power plants: A comprehensive review on the Classification, Development, Improvements, and configurations. In *Ain Shams Engineering Journal* (Vol. 13, Issue 3). Ain Shams University. doi:10.1016/j.asej.2021.11.009

Li J, Wu Z, Zeng K, Flamant G, Ding A, Wang J (2017). Safety and efficiency assessment of a solar-aided coal-fired power plant. *Energy Conversion and Management* 150:714–724. doi:10.1016/j.enconman.2017.08.049

Peng S, Hong H, Wang Y, Wang Z, Jin H (2014). Off-design thermodynamic performances on typical days of a 330MW solar aided coal-fired power plant in China. *Applied Energy* 130:500–509. doi:10.1016/j.apenergy.2014.01.096

Pomianowski MZ, Johra H, Marszal-Pomianowska A, Zhang C (2020). Sustainable and energy-efficient domestic hot water systems: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 128). Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.rser.2020.109900

Reddy VS, Kaushik SC, Tyagi SK (2012). Exergetic analysis and performance evaluation of parabolic trough concentrating solar thermal power plant (PTCSTPP). *Energy* 39(1):258–273. doi:10.1016/j.energy.2012.01.023

Sheu EJ, Mitsos A (2013). Optimization of a hybrid solar-fossil fuel plant: Solar steam reforming of methane in a combined cycle. *Energy* 51:193–202. doi:10.1016/j.energy.2013.01.027

Sukpancharoen S, Prasartkaew B (2021). Combined heat and power plant using a multi-objective Henry gas solubility optimization algorithm: A thermodynamic investigation of energy, exergy, and economic (3E) analysis. *Heliyon* 7(9). doi:10.1016/j.heliyon.2021.e08003

Tocci L, Pal T, Pasmazoglou I, Franchetti B (2017). Small scale Organic Rankine Cycle (ORC): A techno-economic review. In *Energies* (Vol. 10, Issue 4). MDPI AG. doi:10.3390/en10040413

Vakilabadi MA, Bidi M, Najafi AF, Ahmadi MH (2019). Exergy analysis of a hybrid solar-fossil fuel power plant. *Energy Science and Engineering* 7(1):146–161. doi:10.1002/ese3.265

Wang J, Duan L, Yang Y, Pang L, Yang L (2019). Multi-objective optimization of solar-aided coal-fired power generation system under off-design work conditions. *Energy Science and Engineering* 7(2):379–398. doi:10.1002/ese3.280

Wang J, Duan L, Yang Y, Yang Z, Yang L (2019). Study on the general system integration optimization method of the solar aided coal-fired power generation system. *Energy* 169:660–673. doi:10.1016/j.energy.2018.12.054

Wang J, Han Z, Guan Z (2020). Hybrid solar-assisted combined cooling, heating, and power systems: A review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 133). Elsevier Ltd. doi:10.1016/j.rser.2020.110256

Wang J, Xie X, Lu Y, Liu B, Li X (2018). Thermodynamic performance

analysis and comparison of a combined cooling heating and power system integrated with two types of thermal energy storage. *Applied Energy* 219:114–122. doi:10.1016/j.apenergy.2018.03.029

Zhang N, Hou H, Yu G, Hu E, Duan L, Zhao J (2019). Simulated performance analysis of a solar aided power generation plant in fuel saving operation mode. *Energy* 166:918–928. doi:10.1016/j.energy.2018.10.014

Zhao H, Bai Y (2014). Thermodynamic performance analysis of the coal-fired power plant with solar thermal utilizations. *International Journal of Energy Research* 38(11):1446–1456. doi:10.1002/er.3166

Nomenclatura

Símbolos

A_C	Área de colectores solares, m ²
C_P	Calor específico a presión constante, kJ/kg-K
C_{UE}	Consumo específico de electricidad, kWh/día
\dot{m}	Flujo másico, kg/s
h	Entalpía específica, kJ/kg
I_s	Irradiación solar, kW/m ²
PCI	Poder Calorífico inferior, kJ/kg-k
P_E	Energía eléctrica, kWh
\dot{Q}	Tasa de calor, kW
T	Temperatura, °C
\dot{V}	Caudal, m ³ /s
\dot{W}	Potencia, kW

Símbolos griegos

Δ	Diferencia, -
η	Eficiencia, %
ρ	Densidad, kg/m ³

Subíndices

1,...13, i	Estados termodinámicos
ACS	Agua Caliente Sanitaria
B	Bomba
$COND$	Condensador
E	Electricidad
EVP	Evaporador
GN	Gas natural
hw	Agua caliente
iso	Isopentano
ORC	Ciclo Rankine Orgánico

<i>R</i>	Recalentamiento
<i>S</i>	Sistema
<i>THP</i>	Turbina de alta presión
<i>TLP</i>	Turbina de baja presión
<i>VC</i>	Volumen de control