

Análisis comparativo del comportamiento del ciclo rankine regenerativo de vapor en simuladores de código abierto

Comparative analysis of the behavior of the regenerative steam rankine cycle in open-source simulators

Lucio Álvarez-Pérez¹, Irieri Reyes-Scott^{2*}, Luis David Huerta-Hernández³,
Oswaldo Guzmán López¹ y Carlos Alberto Martínez-Hernández¹

¹Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas, Av. Universidad Km 7.5,
CP 96523, Coatzacoalcos, Veracruz, México.

²Instituto Tecnológico Superior de Santiago Papasquiaro, Km. 114 Carretera J. Gpe. Aguilera
Guanaceví, Col. Altamira, CP 34600, Santiago Papasquiaro, Durango, México.

³Universidad del Istmo campus Ixtepec, Carretera Chihuitán-Ixtepec S/N Ciudad Universitaria,
CP 70110, Ciudad Ixtepec, Oaxaca, México.

*Corresponding author:

irieri.rs@spapasquiaro.tecnm.mx

Resumen. La simulación de ciclos de vapor es fundamental para optimizar el desempeño térmico en la generación de energía industrial. Este estudio analiza el ciclo Rankine regenerativo, una configuración que mejora la eficiencia global al reutilizar parte del calor del vapor en distintas etapas del proceso. Se emplearon dos simuladores de código abierto: DWSIM y COCO Simulator, los cuales permiten representar de forma detallada turbinas, bombas, calderas y condensadores bajo diferentes condiciones operativas, utilizando agua como fluido de trabajo. Los resultados muestran que la eficiencia térmica disminuye progresivamente conforme se reduce la eficiencia isentrópica de la turbina y la bomba. DWSIM presenta ventajas en la automatización, al corregir errores de flujo y conexión de manera automática, mientras que COCO Simulator requiere mayor intervención técnica para estabilizar el modelo. La comparación permitió identificar fortalezas y limitaciones de ambos entornos, aportando criterios útiles para la selección

de herramientas de simulación en ingeniería térmica.

Palabras clave: Simulación de procesos, ciclo Rankine regenerativo, eficiencia térmica, DWSIM, COCO Simulator.

Abstract. The simulation of vapor cycles is essential for optimizing thermal performance in industrial power generation. This study analyzes the regenerative Rankine cycle, a configuration that improves overall efficiency by reusing part of the steam heat at different stages of the process. Two open-source simulators, DWSIM and COCO Simulator, were employed, allowing detailed representation of turbines, pumps, boilers, and condensers under various operating conditions, using water as the working fluid. The results show that the cycle's thermal efficiency decreases progressively as the isentropic efficiency of the turbines and pumps is reduced. DWSIM presents clear advantages in automation, automatically detecting and correcting

flow and connection errors, while COCO Simulator requires more technical intervention to ensure model stability. The comparison highlights the strengths and limitations of both tools, providing valuable criteria for selecting appropriate simulation environments for thermal engineering studies, optimization tasks, and preliminary analysis of industrial energy systems.

Keywords: Process simulation, regenerative Rankine cycle, thermal efficiency, DWSIM, COCO Simulator.

I. INTRODUCCIÓN

El vapor de agua es el fluido de trabajo más comúnmente utilizado en los ciclos de potencia de vapor, debido a sus numerosas y atractivas características, tales como su bajo costo, amplia disponibilidad y elevada entalpía de vaporización (Çengel & Boles, 2019). En el ámbito industrial, la generación de energía representa un proceso costoso, especialmente cuando se persigue la sostenibilidad. Esto es evidente en el caso de la producción de hidrógeno, que, si bien es una fuente limpia, requiere inversiones significativas (Tahmasbi et al., 2025). Por esta razón, el vapor se emplea con frecuencia en sistemas de generación de energía, ya que permite aprovechar dichas propiedades dentro de un ciclo termodinámico de alta eficiencia. Las plantas de energía de vapor operan como grandes máquinas térmicas en las que el fluido de trabajo, el agua (H₂O), circula en estado estacionario a través de una bomba, una caldera, una turbina y un condensador. Este proceso cíclico posibilita la conversión continua del agua en vapor, con la recirculación del condensado hacia el sistema, lo cual contribuye a reducir el consumo de combustible y a maximizar la eficiencia energética. Este principio ha sido implementado y ampliado en sistemas híbridos modernos como los ciclos Rankine orgánicos alimentados por energía solar, que permiten generar simultáneamente electricidad, refrigeración e hidrógeno verde (Fouda et al., 2024).

En este contexto, surge la necesidad de optimizar continuamente la operación de los sistemas térmicos industriales. Una estrategia eficaz consiste en emplear el condensado del ciclo para precalentar el agua de alimentación de la caldera, reduciendo así la energía requerida para la generación de vapor. Esta práctica, además de mejorar la eficiencia térmica, puede traducirse en ahorros energéticos y económicos significativos para las industrias. Paralelamente, la simulación de estos sistemas se ha consolidado como una herramienta clave para predecir su comportamiento bajo distintas condiciones operativas sin necesidad de intervenir físicamente en la planta. El análisis y modelado permiten representar de manera general los componentes esenciales de los sistemas de vapor, ofreciendo un entorno seguro y flexible para evaluar mejoras energéticas. Estas capacidades convierten a los simuladores en recursos

indispensables tanto en el ámbito industrial como en la formación técnica (Salimi et al. 2023).

La simulación permite representar el sistema de producción de una planta mediante esquemas de procesos, facilitando la identificación y resolución de ineficiencias antes de su implementación en una planta real. Además, los simuladores permiten comparar alternativas de diseño sin los altos costos que implican los experimentos a escala real, lo que optimiza la toma de decisiones en las etapas de diseño y operación de los procesos industriales (Psakis et al., 2024).

Existen diversos simuladores de procesos disponibles en el ámbito de la ingeniería química, tanto comerciales como de código abierto, entre los que destacan Aspen HYSYS, DWSIM, COCO Simulator y CHEMCAD. Estas herramientas permiten replicar de forma virtual los procesos industriales y analizar el efecto de diferentes variables sobre su comportamiento, lo que contribuye a reducir riesgos operativos y a mejorar la eficiencia en la operación de plantas. Su aplicación ha sido ampliamente validada en estudios comparativos que demuestran su utilidad en el modelado de instalaciones reales y en la optimización de condiciones de operación (Tangsrivong et al., 2020). En este estudio se emplearon dos simuladores de acceso libre, DWSIM y COCO Simulator, para realizar simulaciones del ciclo Rankine regenerativo, un ciclo de potencia de vapor en el que el fluido de trabajo alterna entre las fases de vapor y líquido. Este ciclo es considerado una referencia ideal para sistemas térmicos debido a su alta eficiencia y a su capacidad para disminuir el consumo de combustible (Çengel & Boles, 2019). Por todo lo anterior, este estudio tiene como objetivo hacer un análisis comparativo del comportamiento de ambos simuladores de código abierto con el propósito de establecer si pueden ser utilizados en estudios con el ciclo Rankine regenerativo estableciéndose las condiciones operativas e identificar las oportunidades de mejora en su diseño y desempeño.

Un ciclo de vapor es un proceso termodinámico en el que el agua se convierte en vapor y posteriormente se condensa nuevamente en estado líquido, completando un ciclo cerrado. Este tipo de ciclos constituye la base de numerosos sistemas de generación de energía, ya que permiten accionar turbinas que transforman la energía térmica en energía mecánica y, finalmente, en electricidad (Marzouk, 2025).

Los ciclos de potencia de vapor son sistemas diseñados específicamente para convertir energía térmica en energía mecánica y, posteriormente, en energía eléctrica. Aunque el ciclo de Carnot se considera el modelo teórico ideal para la generación de energía, presenta limitaciones técnicas que dificultan su implementación práctica. En contraste, el ciclo Rankine se ha consolidado como una alternativa más viable y eficiente para las centrales

eléctricas de vapor, al superar diversas limitaciones inherentes al ciclo de Carnot (Çengel & Boles, 2019). Este ciclo emplea un fluido de trabajo, comúnmente agua, que alterna entre las fases líquida y de vapor a lo largo del proceso termodinámico. Para su implementación, se requiere un fluido que posea ciertas propiedades deseables, tales como baja capacidad calorífica, alta conductividad térmica, bajo costo, estabilidad química, abundancia, no inflamabilidad y que se mantenga en estado líquido a temperatura y presión ambiente (Becerra et al., 2022). Los componentes fundamentales del ciclo Rankine son: caldera, turbina, bomba y condensador (véase Figura 1).

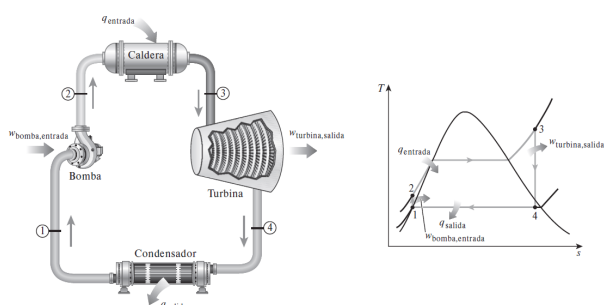


Figura 1. Componentes del ciclo de Rankine. Fuente: Çengel & Boles, 2019.

Está compuesto por cuatro procesos delimitados por los estados que atraviesa el fluido por el mismo:

Proceso 1-2: Expansión isentrópica del fluido de trabajo en la turbina desde la presión de la caldera hasta la presión del condensador. Se realiza en una turbina de vapor y se genera potencia en el eje de la misma.

Proceso 2-3: Transmisión de calor a presión constante desde el fluido de trabajo hacia el circuito de refrigeración, de forma que el fluido de trabajo alcanza el estado de líquido saturado. Se realiza en un condensador (intercambiador de calor), idealmente sin pérdidas de carga.

Proceso 3-4: Compresión isentrópica del fluido de trabajo en fase líquida mediante una bomba, lo cual implica un consumo de potencia. Se aumenta la presión del fluido de trabajo hasta el valor de presión en caldera.

Proceso 4-1: Transmisión de calor hacia el fluido de trabajo a presión constante en la caldera.

El ciclo Rankine regenerativo es una mejora del ciclo Rankine convencional, que incrementa la eficiencia del sistema al precalentar el agua de alimentación utilizando el condensado del ciclo. Este proceso reduce la cantidad de energía necesaria en la caldera para convertir el agua en vapor, lo que disminuye el consumo de combustible y mejora la eficiencia térmica (véase Figura 2). Al agregar etapas de regeneración, el ciclo aprovecha el calor del

vapor que ha salido de la turbina para calentar el agua antes de su entrada en la caldera, optimizando el proceso. Este ciclo es superior a otros ciclos de potencia debido a su capacidad para reducir los costos operativos y maximizar el uso de energía, lo que lo hace más eficiente y sostenible para la generación de electricidad (Çengel & Boles, 2019).

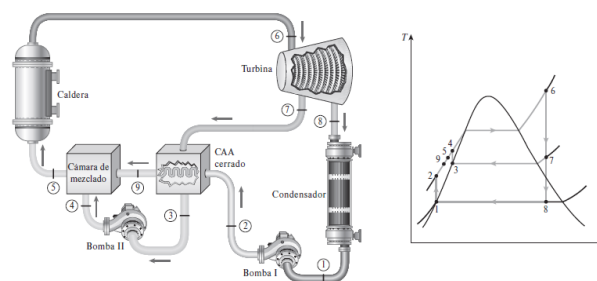


Figura 2. Ciclo Rankine ideal regenerativo con un calentador cerrado de agua de alimentación. Fuente: Çengel & Boles, 2019.

La simulación de procesos se ha consolidado como un recurso fundamental en la ingeniería contemporánea, al integrar metodologías experimentales y herramientas computacionales que permiten representar, analizar y optimizar sistemas químicos y energéticos de alta complejidad. Su evolución se apoya en enfoques predictivos y multiescala orientados a incrementar la eficiencia operativa y a impulsar la innovación tecnológica en los entornos industriales (Palomar et al., 2024). Los avances recientes en las estrategias de modelado numérico han perfeccionado la exactitud y la capacidad de optimización de los sistemas energéticos, reafirmando su relevancia en el desarrollo de soluciones ingenieriles de vanguardia (Krzywański et al., 2024). Asimismo, la incorporación de plataformas de simulación en la educación en ingeniería química fomenta la aplicación práctica del conocimiento, el pensamiento crítico y la autonomía intelectual en la formación de profesionales competentes (Suthar et al., 2024).

DWSIM es un simulador de procesos químicos de código abierto y descarga gratuita que cumple con el estándar CAPE-OPEN, un protocolo de interoperabilidad ampliamente utilizado en la ingeniería de procesos. Este estándar permite integrar componentes de distintos simuladores, lo que brinda al usuario la posibilidad de combinar interfaces de modelado de diferentes programas. DWSIM fue el primer simulador de código abierto en adoptar el estándar CAPE-OPEN, el cual es comúnmente utilizado en simuladores comerciales. La plataforma ofrece múltiples opciones para la simulación de procesos químicos y ha sido adoptada por consultores, estudiantes y empresas debido a su accesibilidad y versatilidad. Además, es compatible con diversos sistemas operativos y presenta bajos requerimientos de hardware, lo que facilita su implementación. Cabe destacar que su versión comercial DWSIM Pro incorpora herramientas

avanzadas, como funciones de aprendizaje automático (machine learning), ampliando así su capacidad para el análisis y optimización de procesos (Andreasen, 2022).

COCO Simulator es una herramienta de simulación de procesos químicos de código abierto que ha ganado relevancia dentro de la comunidad de ingeniería química. Se trata de un simulador bastante completo y robusto, que incorpora las funcionalidades esenciales para ser considerado una alternativa competitiva frente a simuladores comerciales ampliamente utilizados, como Aspen HYSYS o Pipephase. Como parte del estándar CAPE-OPEN, COCO funciona como un entorno de simulación en estado estacionario. Este estándar establece normas para la interoperabilidad de software en la industria de procesos, lo que permite que COCO se integre fácilmente con otros simuladores y herramientas comerciales, dotándolo de una gran versatilidad y adaptabilidad (Alqaheem & Alobaid, 2024). La Tabla 1 compara las principales características de COCO Simulator y DWSIM.

Tabla 1. Comparación entre COCO Simulator y DWSIM, Fuente: Elaboración propia.

criterio	COCO Simulator	DWSIM
Facilidad de uso	Interfaz más técnica; requiere mayor Familiaridad.	Interfaz amigable; intuitiva para estudiantes.
Flexibilidad	Alta flexibilidad para ajustes termodinámicos.	Buena flexibilidad con múltiples bibliotecas.
Precisión	Alta precisión en procesos con equipos definidos.	Alta precisión en balances de energía y masa.
Ventajas	Integración con CAPE-OPEN, uso en industria.	Código abierto, personalización, uso educativo.
Desventajas	Mayor curva de aprendizaje.	Algunas limitaciones en procesos avanzados.
Aplicación educativa	Útil para niveles avanzados o formación profesional.	Ideal para introducción a simulación y procesos.

La selección de un modelo termodinámico adecuado es un factor decisivo para asegurar la confiabilidad de las simulaciones de procesos, ya que determina la precisión con que se representan las propiedades de equilibrio y las interacciones entre fases bajo diferentes condiciones de operación. Diversos estudios de comparación entre simuladores comerciales y de código abierto han demostrado que la elección correcta de los parámetros termodinámicos permite reproducir con alta fidelidad los resultados experimentales, consolidando la simulación como una herramienta confiable para el análisis, optimización y escalamiento de procesos en la ingeniería química moderna (Barde et al., 2024).

Para la simulación del ciclo Rankine regenerativo se emplearon los programas COCO Simulator y DWSIM, seleccionados por su orientación hacia la ingeniería de procesos, su precisión en la representación de propiedades termodinámicas y su accesibilidad como herramientas de código abierto. Estudios recientes han demostrado que ambos simuladores pueden utilizarse de manera análoga para modelar procesos energéticos complejos con resultados consistentes y confiables, confirmando su idoneidad para el análisis térmico y la conversión de energía en sistemas de generación (Giftkuna et al., 2024). COCO Simulator, desarrollado bajo el marco CAPE-OPEN, incorpora la biblioteca termodinámica TEA para simulaciones en estado estacionario, mientras que DWSIM, también de código abierto, permite realizar cálculos tanto en régimen estacionario como dinámico. Ambos utilizan la ecuación de estado Peng–Robinson, ampliamente empleada para la predicción del equilibrio líquido-vapor en sistemas químicos (Varandas et al., 2024).

DWSIM y COCO Simulator se han incorporado en programas de formación en ingeniería de procesos dentro de diversas instituciones de educación superior en México, donde permiten realizar simulaciones sin incurrir en los altos costos asociados a licencias comerciales. DWSIM, en particular, ha sido utilizado tanto en entornos académicos como en proyectos de investigación debido a su accesibilidad y versatilidad (Andreasen, 2022).

II. METODOLOGÍA

La metodología se desarrolló bajo un diseño comparativo y descriptivo basado en simulaciones numéricas. Se implementaron dos entornos de modelado con el propósito de evaluar las diferencias en el comportamiento termodinámico de un ciclo Rankine regenerativo. Se realizó un análisis computacional reproducible mediante la definición de condiciones iniciales controladas (presión, temperatura, flujo másico y eficiencia de los equipos). Los datos utilizados en el análisis corresponden a las propiedades termodinámicas obtenidas directamente de ambos simuladores, lo que asegura la consistencia entre modelos. Finalmente, el análisis se centró en comparar las eficiencias térmicas calculadas y la coherencia de los balances de energía obtenidos en cada entorno de simulación.

Con el propósito de simular el ciclo Rankine regenerativo, se emplearon los simuladores DWSIM y COCO Simulator, los cuales fueron configurados e instalados en sus versiones más recientes y estables compatibles con sistemas operativos Windows. Ambas plataformas se mantuvieron con sus parámetros predeterminados, lo que permitió conservar condiciones homogéneas entre los entornos de simulación y asegurar la comparabilidad de los resultados. Estas herramientas fueron seleccionadas por su enfoque en la simulación de procesos térmicos, su flexibilidad operativa y su carácter de código abierto.

La Figura 3 muestra la metodología empleada para la simulación del ciclo termodinámico utilizando DWSIM.

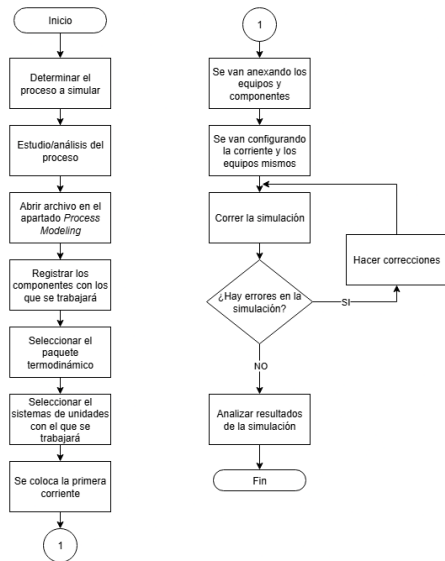


Figura 3. Metodología de simulación en DWSIM. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4 muestra la metodología utilizada en la simulación del ciclo termodinámico utilizando COCO Simulator.

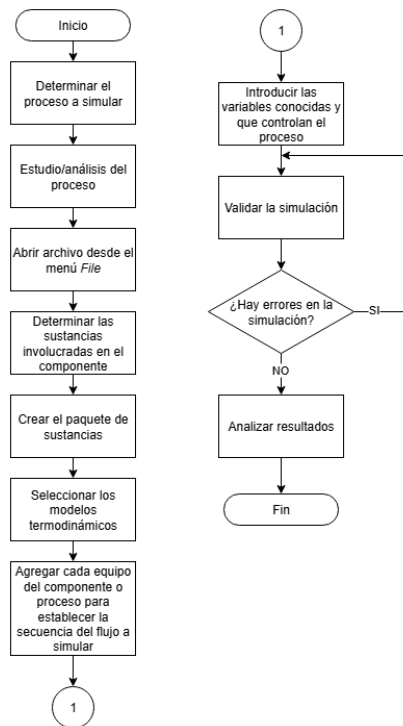


Figura 4. Metodología de simulación en COCO Simulator. Fuente: Elaboración propia.

En el primer caso, se consideró una planta termoeléctrica que operaba bajo un ciclo Rankine regenerativo ideal con un calentador abierto de agua de alimentación. El vapor ingresa a la turbina a 15 MPa y 600 °C, mientras que la condensación ocurre en el condensador a una presión de 10 kPa. Parte del vapor se extrae de la turbina a 1.2 MPa y se dirige al calentador de agua de alimentación (Çengel & Boles, 2019). El análisis se enfoca en determinar la fracción de vapor extraído y la eficiencia térmica del ciclo bajo estas condiciones operativas (véase Figura 5).

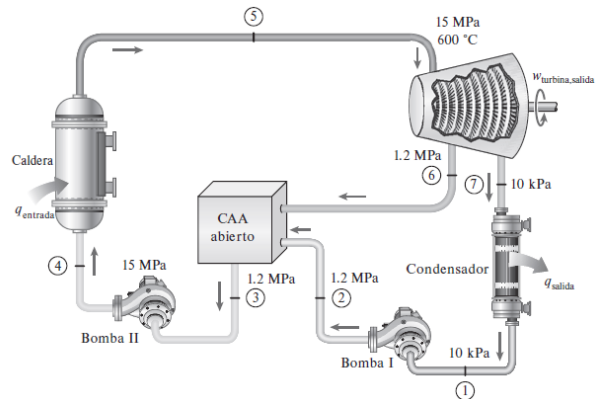


Figura 5. Esquema del ciclo Fuente: Çengel & Boles, 2019.

Simulación del Ciclo Regenerativo en DWSIM

El procedimiento de simulación del ciclo Rankine regenerativo (véase Figura 6) se desarrolló utilizando la plataforma DWSIM. La configuración inicial del proyecto incluyó la definición del agua como componente principal y la selección del modelo termodinámico Peng–Robinson, una ecuación de estado adecuada para representar con precisión sistemas sometidos a condiciones de alta presión y temperatura (Edwards, 2000). Asimismo, se estableció un sistema de unidades coherente con los parámetros, empleando grados Celsius (°C), megapascales (MPa), kilogramos por segundo (kg/s) y vatios (W).

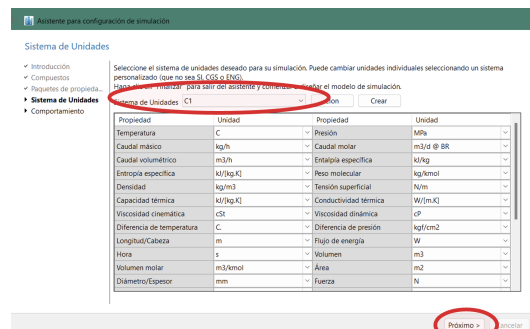


Figura 6. Configuración del paquete termodinámico y las unidades de medida. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se construyó el diagrama de flujo del ciclo, integrando los equipos principales: turbinas, bomba, caldera, condensador, separador, mezclador y las

corrientes intermedias asociadas. La disposición de los elementos respondió a la secuencia lógica del ciclo Rankine regenerativo, iniciando desde la turbina de alta presión hasta el retorno del fluido al generador de vapor. Durante este proceso, DWSIM facilitó el ensamblaje del sistema mediante herramientas como la resolución inteligente de objetos y algoritmos robustos de cálculo flash, lo que permitió configurar cada unidad operativa con mayor precisión. Para cada equipo, se definieron las corrientes de entrada y salida, especificando parámetros clave como presión, temperatura, flujo másico, eficiencia de las turbinas y las bombas, lo cual favoreció una representación clara y detallada del comportamiento global del sistema.

La Figura 7 presenta el diagrama de flujo final, en el que se visualizan todas las operaciones unitarias que conforman el ciclo Rankine regenerativo.

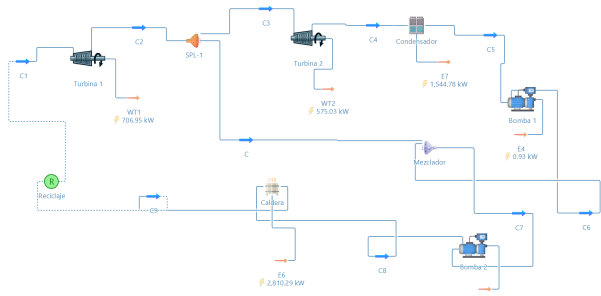


Figura 7. Simulación del Ciclo Rankine Regenerativo en DWSIM. Fuente: Elaboración propia.

Antes de ejecutar la simulación, se verificó minuciosamente la configuración del modelo con el fin de asegurar la ausencia de errores estructurales o inconsistencias en los parámetros de entrada. Una vez completada la ejecución, se accedió a la hoja de cálculo interna de DWSIM para extraer las propiedades termodinámicas relevantes, tales como las potencias asociadas a las turbinas, la bomba y la caldera. Estos valores fueron fundamentales para llevar a cabo el análisis del rendimiento térmico y el cálculo de la eficiencia global del ciclo Rankine regenerativo. La Figura 8 muestra la transición desde el diagrama de flujo hacia la hoja de cálculo en la interfaz del simulador, visualizando los resultados detallados de cada unidad operativa.

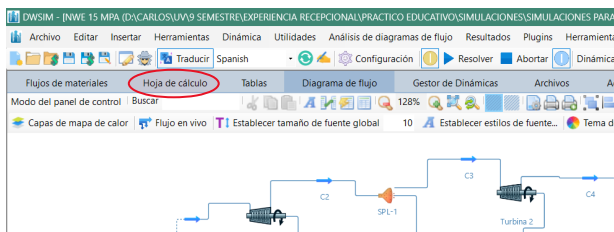


Figura 8. Cambio del diagrama de flujo a la Hoja de cálculo. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 9 muestra la selección de las propiedades termodinámicas necesarias de cada unidad operativa para el análisis energético, realizada mediante la función Import Flowsheet Object Property del simulador. Esta herramienta permite importar directamente los datos desde el diagrama de flujo, lo que facilita el acceso a parámetros clave sin necesidad de ingresar manualmente los valores.

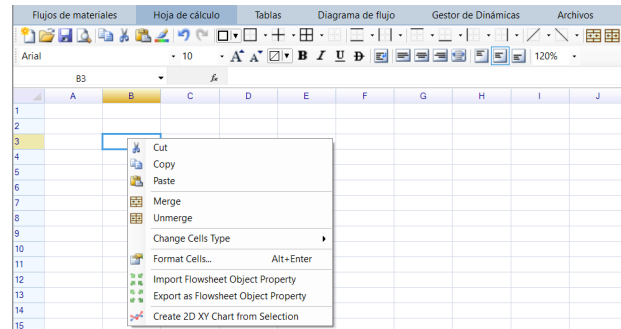


Figura 9. Hoja de cálculo del simulador DWSIM. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se procedió a calcular la eficiencia térmica del ciclo a partir de los datos energéticos obtenidos, considerando la energía suministrada por la caldera y la generada por las turbinas. Este análisis permitió cuantificar el rendimiento global del sistema simulado. La Figura 10 muestra el resultado final del cálculo de eficiencia, derivado directamente de los valores registrados durante la simulación.

CÁLCULO DE EFICIENCIA DEL CICLO			
OPERACION UNITARIA	WATTS	W NETO	
W _t TURBINA 1	706954.753274631	1265509.37945456	
W _t TURBINA 2	375026.930717121		NT
W _s BOMBA 1	929.909688319194		
W _s BOMBA 2	11342.4146699157		ECUACION 1.1
Q CALDERA	2810290.94028481		JT=PLNETO @ CALDERA

Figura 10. Cálculo de la eficiencia del ciclo. Fuente: Elaboración propia.

Simulación del Ciclo Regenerativo en COCO Simulator Para llevar a cabo la simulación del ciclo Rankine regenerativo, se construyó un diagrama de flujo (flowsheet) que integra los principales equipos involucrados: turbinas, bombas, condensador y caldera. Esta configuración inicial permitió establecer las condiciones de referencia del sistema. Pevio a la ejecución de la simulación, se verificaron estos parámetros, los cuales sirvieron como base para definir las propiedades de entrada y salida en cada una de las etapas del ciclo termodinámico. La Tabla 2 presenta los valores empleados como referencia durante la configuración del modelo.

Tabla 2. Condiciones de operación. Fuente: Elaboración propia.

Etapa	Equipo	Presión	Temperatura
1	Bomba I	1.2 MPa	N/A
2	Calentador	1.2 MPa	N/A
3	Bomba II	15 MPa	N/A
4	Caldera	15 MPa	N/A
5	Turbina I	1.2MPa	600°C
6	Salida de turbina al calentador	1.2 MPa	N/A

Con base en los datos de referencia, se generó un nuevo proyecto en COCO Simulator, en el cual se configuró el diagrama de flujo (flowsheet) y se seleccionó el paquete termodinámico apropiado para representar con precisión las propiedades del agua en sus distintas fases. La Figura 11 muestra la configuración del modelo termodinámico implementado, así como la interfaz utilizada para la construcción del diagrama de flujo dentro del entorno de simulación.

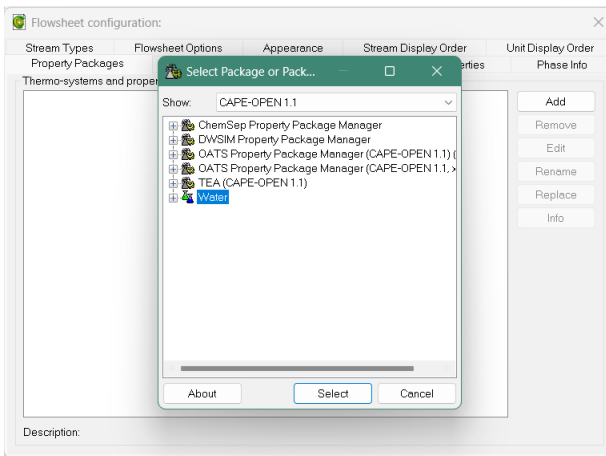


Figura 11. Configuración del paquete termodinámico. Fuente: Elaboración propia.

Una vez configurado el entorno de simulación, se procedió a construir el diagrama de flujo del sistema térmico, integrando los principales equipos: turbinas, bombas, condensador, caldera, separador, mezclador y las unidades de medida correspondientes. Cada componente fue conectado mediante corrientes de proceso que representan el flujo de vapor y líquido a lo largo de las distintas etapas del ciclo. La Figura 12 ilustra la configuración de una de las corrientes principales definidas en el modelo.

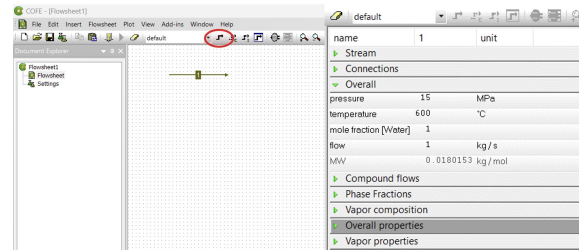


Figura 12. Corriente 1 y su configuración. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se incorporaron los primeros equipos correspondientes a las etapas de expansión y separación. El vapor fue conducido inicialmente a través de una turbina de alta presión y, posteriormente, a un separador, donde se dividió en dos fracciones: una destinada a alimentar una segunda etapa de expansión y otra utilizada para la regeneración térmica del ciclo. La Figura 13 muestra la configuración de la segunda turbina, la cual operó con una presión de salida de 10 kPa y una eficiencia del 100%, condiciones que permiten simular una expansión ideal en el sistema.

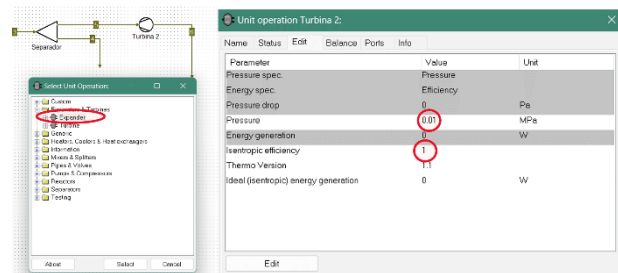


Figura 13. Segunda turbina instalada en el flowsheet. Fuente: Elaboración propia.

Tras la segunda etapa de expansión, el vapor fue dirigido hacia un condensador, donde se facilitó la transición de fase hasta alcanzar una fracción de vapor igual a cero. Esta etapa resulta fundamental, ya que permite el posterior bombeo del fluido en estado líquido hacia presiones más elevadas dentro del ciclo. La Figura 14 muestra la configuración del condensador conectado a la salida de la segunda turbina, operando bajo condiciones de baja presión.

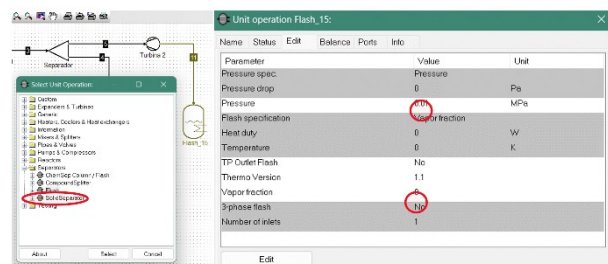


Figura 14. Condensador en la etapa posterior a la segunda turbina. Fuente: Elaboración propia.

Una vez completada la condensación, el fluido en estado líquido fue impulsado por una bomba que elevó su presión hasta 1.2MPa. Esta corriente presurizada se mezcló con la corriente regenerativa proveniente del separador, proceso que se llevó a cabo en un mezclador. Esta unidad permitió incorporar energía térmica adicional mediante regeneración interna, contribuyendo a mejorar la eficiencia global del ciclo. La Figura 15 ilustra la configuración del mezclador dentro del sistema simulado.

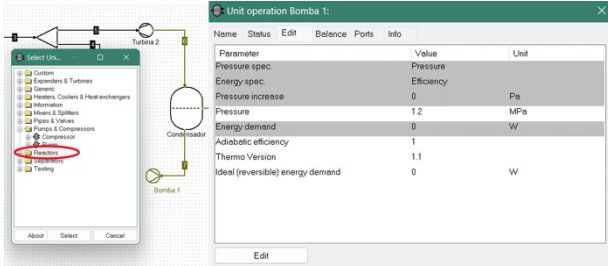


Figura 15. Bomba 1 que eleva la presión del condensado. Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, el fluido fue dirigido a un segundo condensador, cuya función fue garantizar una fracción de vapor nula antes de su ingreso a la etapa de precalentamiento final. Esta operación fue seguida por una segunda bomba, encargada de elevar la presión del fluido hasta 15MPa, simulando así las condiciones de entrada a la caldera. La Figura 16 muestra la configuración del segundo condensador, ubicado inmediatamente antes del sistema de calentamiento.

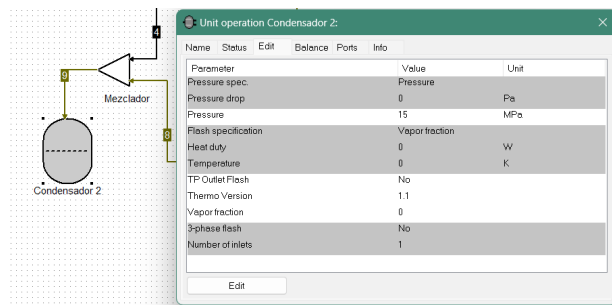


Figura 16. Segundo condensador que antecede a la bomba 2. Fuente: Elaboración propia.

Una vez alcanzadas las condiciones de presión y fase requeridas, el fluido fue conducido hacia la caldera, donde fue recalentado hasta una temperatura de 600°C. Esta etapa representa la incorporación de energía térmica al sistema, condición fundamental para cerrar el ciclo termodinámico y reiniciar el proceso de generación de energía. La Figura 17 muestra la configuración de la caldera, establecida con una temperatura de salida de 600°C, lista para alimentar nuevamente la turbina de alta presión.

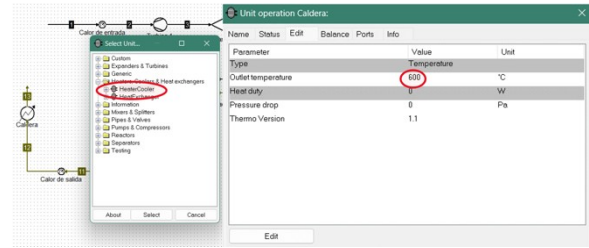


Figura 17. Caldera configurada para el recalentamiento del fluido. Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se incorporó una herramienta de cálculo al diagrama de flujo con el propósito de cuantificar la eficiencia térmica del ciclo. Esta funcionalidad permitió comparar la energía útil generada por las turbinas con la cantidad de calor suministrado al sistema, facilitando así el análisis del desempeño global. La Figura 18 muestra la configuración de la calculadora utilizada para determinar la eficiencia del ciclo.

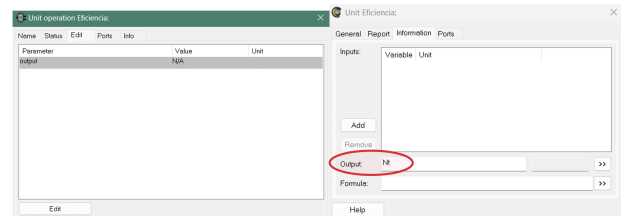


Figura 18. Cálculo final de la eficiencia del ciclo utilizando la herramienta de cálculo. Fuente: Elaboración propia.

Una vez validados todos los parámetros del modelo, la simulación se ejecutó de forma satisfactoria. El simulador confirmó la convergencia energética y la correcta conexión entre los equipos y corrientes, lo que indicó la coherencia del modelo termodinámico implementado. La Figura 19 presenta el diagrama de flujo completo del ciclo Rankine regenerativo, con cada componente validado y en operación estable.

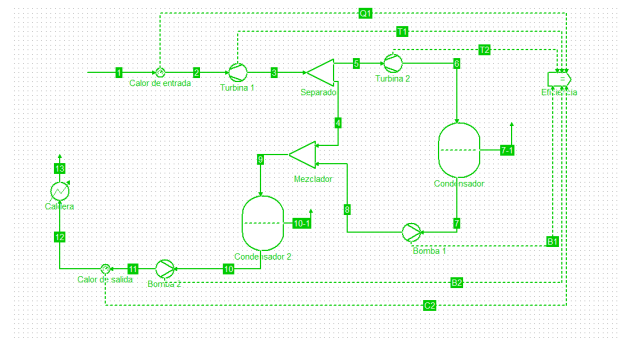


Figura 19. Representación final del ciclo Rankine regenerativo en COCO Simulator. Fuente: Elaboración propia.

Con el propósito de ampliar el análisis comparativo, se replicó el procedimiento de simulación en DWSIM y COCO Simulator utilizando un nuevo conjunto de condiciones operativas correspondientes a un ciclo Rankine regenerativo ideal, en el cual el vapor ingresa a la turbina a 6 MPa y 550 °C, y se condensa posteriormente en el condensador a una presión de 20 kPa. Durante este proceso, una fracción del vapor se extrae a 0.4 MPa y se dirige a un calentador abierto de agua de alimentación, donde transfiere energía térmica al fluido antes de reincorporarse al sistema (Çengel & Boles, 2019). El agua resultante de esta etapa se encuentra en estado de líquido saturado, condición necesaria para continuar con la siguiente fase del ciclo.

El proceso de simulación requiere una configuración rigurosa y una validación continua para garantizar la coherencia de los resultados. La verificación de los balances de masa y energía en cada etapa, junto con la revisión sistemática de las conexiones y parámetros del modelo, asegura la confiabilidad de las predicciones numéricas. Finalmente, la comparación de los resultados obtenidos frente a valores de referencia consolida la validez del modelo y respalda su aplicabilidad tanto en entornos académicos como en la ingeniería de procesos.

III. RESULTADOS

Tras implementar las simulaciones del ciclo Rankine regenerativo en DWSIM y COCO Simulator bajo condiciones iniciales definidas, se obtuvo una caracterización preliminar del comportamiento térmico del sistema. Con el fin de profundizar en el análisis y evaluar la sensibilidad del ciclo ante variaciones operativas, se desarrolló una segunda simulación utilizando un conjunto distinto de parámetros de entrada. Esta aproximación permitió comparar el desempeño del sistema bajo diferentes escenarios y analizar el efecto de la eficiencia de los equipos principales (turbinas y bombas) sobre la eficiencia térmica global. La presente sección expone los resultados obtenidos en ambos entornos de simulación, destacando las tendencias observadas, las diferencias entre plataformas y su implicación para el diseño técnico.

Caso I en DWSIM

La Tabla 3 presenta los resultados obtenidos mediante DWSIM al simular el ciclo Rankine regenerativo, donde se aplican distintos valores de eficiencia isentrópica asignados a la bomba y la turbina. Se observa una disminución significativa en la eficiencia térmica del ciclo, que alcanza un valor máximo de 45.03% cuando los equipos operan con una eficiencia del 100%, y desciende hasta 24.52% cuando la eficiencia de estos componentes se reduce al 50%. Esta tendencia evidencia el impacto directo de las irreversibilidades mecánicas en el desempeño del sistema, reflejándose también en la disminución del trabajo neto generado. Aunque el calor

suministrado por la caldera decrece ligeramente con menores eficiencias, su variación no compensa la pérdida de trabajo, lo que provoca una caída sostenida en el rendimiento del ciclo (véase Figura 20).

Tabla 3. Resultados en DWSIM-Caso I. Fuente: Elaboración propia.

η_t Bomba	η_t del ciclo	W_{neto} (W)	$Q_{Caldera}$ (W)
100 %	45.03%	1265509.38	2810290.84
75 %	35.37%	977931.74	2764473.02
60 %	29.05%	794532.49	2734849.65
50 %	24.52%	665286.76	2713257.37

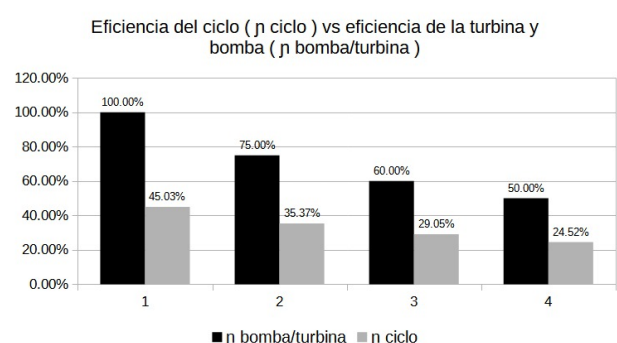


Figura 20. Diagrama Eficiencia de ciclo vs Eficiencia turbina/bomba en DWSIM-Caso I. Fuente: Elaboración propia.

Caso I en COCO Simulator

La Tabla 4 presenta los resultados obtenidos al simular el ciclo Rankine regenerativo en COCO Simulator, donde se aplican diferentes niveles de eficiencia isentrópica en bomba y turbina. La eficiencia térmica del ciclo muestra una disminución progresiva, alcanzando un valor de 55.53% con eficiencia ideal del 100%, y descendiendo hasta 29.72% cuando la eficiencia de los equipos se reduce al 50%. Esta tendencia confirma el efecto directo de las irreversibilidades internas sobre el rendimiento del sistema, particularmente en las etapas de expansión y compresión (véase Figura 21). Asimismo, se observa una disminución sostenida en el trabajo neto generado conforme se reduce la eficiencia de los componentes, lo que pone de manifiesto la importancia de estos parámetros en la conversión de energía térmica en trabajo útil.

Tabla 4. Resultados en COCO Simulator-Caso I.
Fuente: Elaboración propia.

η_t Bomba/ T	η_t del ciclo	W_{neto} (W)	$Q_{Caldera}$ (W)
100 %	55.53%	1095621.96	1973155.8
75 %	42.99%	848297.56	1973155.8
60 %	35.14%	693400.76	1973155.8
50 %	29.72%	586514.00	1973155.8

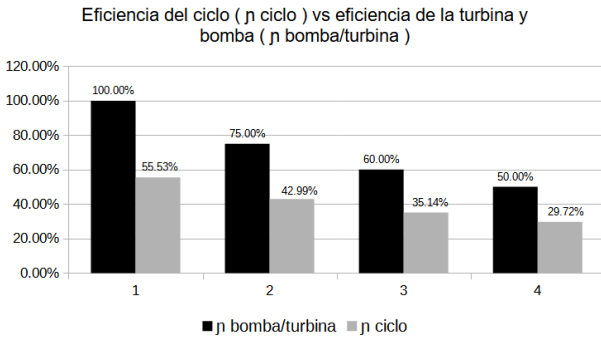


Figura 21. Eficiencia del ciclo vs Eficiencia turbina/bomba en COCO-Caso I. Fuente: Elaboración propia.

Caso II en DWSIM

La Tabla 5 resume los resultados obtenidos en DWSIM al simular el segundo conjunto de condiciones operativas para el ciclo Rankine regenerativo. Al igual que en el primer caso, se observa una disminución progresiva en la eficiencia térmica del sistema a medida que se reducen las eficiencias isentrópicas de la bomba y la turbina. En este escenario, el rendimiento del ciclo varió desde un máximo de 39.94% con eficiencia ideal, hasta 22.19% cuando la eficiencia isentrópica de la bomba y la turbina disminuyen al 50% (véase Figura 22).

Tabla 5. Resultados en DWSIM-Caso II. Fuente: Elaboración propia.

η_t Bomba/ T	η_t del ciclo	W_{neto} (W)	$Q_{Caldera}$ (W)
100 %	39.94%	1101177.02	2756868.78
75 %	31.48%	854153.92	2712972.68
60 %	26.05%	699718.02	2685786.15
50 %	22.19%	591756.35	2666954.41

Eficiencia del ciclo η Ciclo vs eficiencia de la turbina y bomba (η bomba/turbina)

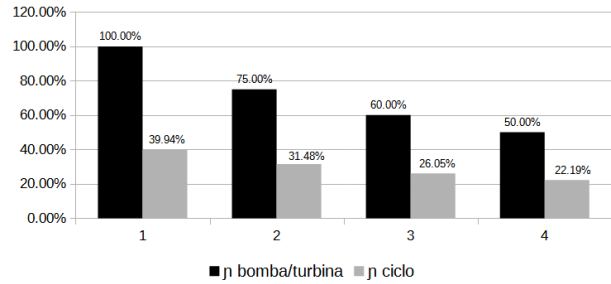


Figura 22. Eficiencia de ciclo vs Eficiencia turbina/bomba en DWSIM -Caso II. Fuente: Elaboración propia.

Caso II en COCO Simulator

La Tabla 6 presenta los resultados del segundo conjunto de condiciones simuladas en COCO Simulator, correspondiente a un ciclo Rankine regenerativo con calentador de alimentación abierto. La eficiencia térmica alcanzó un valor máximo de 42.31% con eficiencia ideal en bomba y turbina, y descendió a 22.64% cuando estas se redujeron al 50%. Esta tendencia refleja el impacto de las pérdidas internas sobre el rendimiento del ciclo, así como la contribución del calentador en la mejora del desempeño térmico bajo condiciones óptimas. La Figura 23 ilustra la variación observada en la eficiencia con respecto a los niveles de desempeño de los equipos.

Tabla 6. Resultados en COCO Simulator -Caso II. Fuente: Elaboración propia.

η_t Bomba/ T	η_t del ciclo	W_{neto} (W)	$Q_{Caldera}$ (W)
100%	42.31%	984922.26	2327460
75%	32.68%	760715.68	2327460
60%	26.73%	622218.10	2327460
50%	22.64%	526988.52	2327460

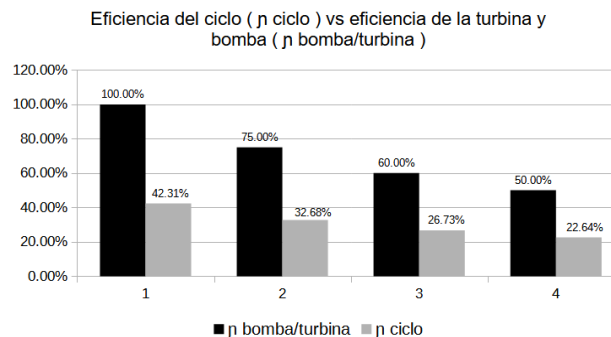


Figura 23. Diagrama Eficiencia de ciclo vs Eficiencia turbina/bomba en COCO -Caso II. Fuente: Elaboración propia.

IV. DISCUSIÓN

En conjunto, los resultados obtenidos en DWSIM y COCO Simulator muestran de forma consistente que la eficiencia térmica del ciclo Rankine regenerativo disminuye conforme se reducen las eficiencias isentrópicas de la bomba y la turbina, evidenciando la influencia directa de estos parámetros sobre el desempeño energético del sistema. La incorporación de un calentador abierto de agua de alimentación permitió mejorar el rendimiento térmico bajo condiciones ideales, efecto que también ha sido reportado en estudios previos donde este dispositivo incrementa la eficiencia del ciclo y reduce las pérdidas exergéticas calculadas mediante simulaciones (Arrieta et al., 2018). De manera similar, se ha demostrado que la regeneración mediante calentadores abiertos o cerrados constituye una estrategia efectiva para incrementar la eficiencia y disminuir las irreversibilidades del ciclo de vapor, dependiendo de las condiciones de operación y la configuración adoptada (Wong et al., 2024). En contraste, en este estudio las diferencias observadas entre DWSIM y COCO Simulator fueron mínimas y atribuibles, más que a divergencias en los algoritmos, a la implementación particular de los paquetes termodinámicos y los métodos numéricos internos de cada entorno, en concordancia con investigaciones que han verificado la consistencia y compatibilidad de ambos simuladores en procesos energéticos complejos (Giftunkuna et al., 2024). En conjunto, estos resultados confirman la validez del uso de plataformas de código abierto para el análisis termodinámico y fortalecen su aplicación tanto en contextos académicos como en escenarios industriales.

V. CONCLUSIONES

Las simulaciones del ciclo Rankine regenerativo realizadas en DWSIM y COCO Simulator permitieron caracterizar su comportamiento térmico bajo distintas condiciones operativas. Se confirmó que la eficiencia del ciclo depende de manera crítica de la eficiencia isentrópica de la turbina y la bomba, observándose una disminución progresiva del rendimiento conforme se reducen estos parámetros, lo que evidencia la influencia de las irreversibilidades mecánicas en la conversión de energía térmica en trabajo útil. La incorporación de un calentador abierto de agua de alimentación mejoró la eficiencia del ciclo, demostrando la efectividad de estrategias de regeneración de calor.

En la comparación de simuladores, DWSIM destacó por su menor tiempo de convergencia y capacidad para corregir automáticamente inconsistencias, mientras que COCO Simulator entregó resultados precisos, aunque requirió mayor intervención del usuario. No obstante,

ambos entornos mostraron resultados consistentes, validando su uso como herramientas de análisis termodinámico en contextos académicos e industriales.

Los hallazgos indican que la operación de los equipos a máxima eficiencia y la implementación de regeneración de calor son fundamentales para optimizar el desempeño del ciclo Rankine regenerativo. Como línea futura, se recomienda validar los resultados con datos experimentales de plantas industriales y ampliar el análisis a otros ciclos térmicos, como el ciclo Brayton o variantes del Rankine, a fin de fortalecer la evaluación comparativa de simuladores y estrategias de eficiencia energética. En conjunto, este estudio contribuye a una comprensión integral del ciclo y su potencial para mejorar la eficiencia de sistemas energéticos en aplicaciones reales.

REFERENCIAS

- Andreasen, A. (2022). Evaluation of an open-source chemical process simulator using a plant-wide oil and gas separation plant flowsheet model as basis. *Periodica Polytechnica Chemical Engineering*, 66(3), 503–511. <https://doi.org/10.3311/PPch.19678>
- Alqaheem, Y., & Alobaid, M. (2024). Development of a membrane process in CAPE-OPEN to CAPE-OPEN (COCO) simulator for carbon dioxide separation. *Results in Engineering*, 22, 102239. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102239>
- Arrieta Mondragón, L., Valencia Ochoa, G., & Acevedo Peñaloza, C. H. (2018). Exergetic Evaluation of a Rankine Cycle with Regeneration: Effect of Turbine Inlet Temperature and Source Temperature. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(12 (2018)), 10376-10380.
- Barde E. D., Oyegoke T., Aliyu A., Uzochukwu M. I., Odih C. (2024). Butane dehydrogenation: Thermodynamic modeling and performance analysis of selected process simulators. *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*, Vol. 11(1), pp. F12–F20. [https://doi.org/10.21272/jes.2024.11\(1\).f2](https://doi.org/10.21272/jes.2024.11(1).f2)
- Becerra, M., Díaz, V. J. A., González, J. B., Ramírez, F. S., & García, J. L. S. (2022). Ciclo de Rankine. TEPEXI Boletín Científico de la Escuela Superior Tepeji del Río, 9(17), 32–35.
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). *Thermodynamics: An engineering approach* (9th ed.). McGraw-Hill Education.
- Fouda, A., Khaliq, A., Elattar, H. F., Al-Zahrani, A.,

- Almohammadi, B. A., & Refaey, H. A. (2024). Evaluation of a concentrated solar power-driven system designed for combined production of cooling and hydrogen. *Case Studies in Thermal Engineering*, 59, 104567.
- Giftnkuna, S., Olwal, T. O., Chowdhury, S. D., & Ndambuki, J. M. (2024, October). Extraction of heat and electric energy from wastewater sludge through a gasification process: DWSIM and COCO simulator approach. In *2024 IEEE PES/IAS PowerAfrica* (pp. 01-05). IEEE.10.1109/PowerAfrica61624.2024.10759463
- Krzywanski, J., Sosnowski, M., Grabowska, K., Zylka, A., Lasek, L., & Kijo-Kleczkowska, A. (2024). Advanced computational methods for modeling, prediction and optimization—a review. *Materials*, 17(14), 3521. <https://doi.org/10.3390/ma17143521>
- Marzouk, O. A. (2025). Condenser pressure influence on ideal steam Rankine power vapor cycle using the Python extension package Cantera for thermodynamics [Preprint]. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.00180>
- Palomar, J., Lemus, J., Navarro, P., Moya, C., Santiago, R., Hospital-Benito, D., & Hernandez, E. (2024). Process simulation and optimization on ionic liquids. *Chemical Reviews*, 124(4), 1649-1737. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.3c00512>
- Psakis, G., Griffin, S., Dimopoulou, M., Angelis-Dimakis, A., & Lorenzo, J. M. (2024). Greening the way: Emerging green technologies in process intensification. *Frontiers in Chemistry*, 12, 1487667. <https://doi.org/10.3389/fchem.2024.1487667>
- Salimi, M., Amidpour, M., Moradi, M. A., Hajivand, M., Siahkamari, E., & Shams, M. (2023). Technical-Economic Analysis of Energy Efficiency Solutions for the Industrial Steam System of a Natural Gas Processing Plant. *Sustainability*, 15(20), 14995.
- Suthar, K. J., Mehta, A., Panda, S. R., Panchal, H., & Sinha, R. (2024). Practical exercises of computer-aided process synthesis for chemical engineering undergraduates. *Education for Chemical Engineers*, 48, 31-43. <https://doi.org/10.1016/j.ece.2024.04.002>
- Tahmasbi, M., Siavashi, M., & Ahmadi, R. (2025). A comprehensive review of hydrogen production and storage methods: fundamentals, advances, and SWOT analysis. *Energy Conversion and Management: X*, 101005.
- Tangsriwong, K., Lapchit, P., Kittijungjit, T., Klamrassamee, T., Sukjai, Y., & Laonual, Y. (2020). Modeling of chemical processes using commercial and open-source software: A comparison between Aspen Plus and DWSIM. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 463(1), 012057. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/463/1/012057>
- Varandas, B., Oliveira, M., & Borges, A. (2024). Analytical and numerical thermodynamic equilibrium simulations of steam methane reforming: A comparison study. *Reactions*, 5(1), 246–259. <https://doi.org/10.3390/reactions5010011>
- Wong, S. Y., Chew, Y. E., Andiappan, V., Lakshmanan, S., & Foo, D. C. (2024). Techno-economic and carbon footprint analyses of steam Rankine cycle. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 19(5), e3118.