EVALUACIÓN DEL CICLO RANKINE REGENERATIVO CON COGENERACIÓN: ANÁLISIS PARAMÉTRICO

MEDIANTE SIMULACIÓN EN EES

José Santiago Rodríguez Leitón, Carlos Augusto Viteri Rodríguez.

Corporación Universitaria Autónoma de Nariño

San Juan de Pasto - Colombia

Santiagorodriguez2559@gmail.com

cviteri08@gmail.com

Resumen

Este trabajo ofrece un análisis paramétrico del ciclo rankine regenerativo con cogeneración mediante simulaciones en EES, evaluando cómo parámetros como presión, temperatura, flujo másico y eficiencia de equipos influyen en la eficiencia energética. El estudio se contextualiza en Pasto, Colombia, considerando sus condiciones geográficas y climáticas. Con una metodología cuantitativa y de modelado computacional, se identifican configuraciones óptimas que mejoran el rendimiento térmico, aportando herramientas técnicas para el diseño y operación de plantas de cogeneración, con potencial de aplicación en la industria colombiana.

Palabras claves

Ciclo Rankine, cogeneración, eficiencia energética, simulación numérica, EES.

I. INTRODUCCIÓN

Los ciclos rankine regenerativos con cogeneración son esenciales para optimizar el uso de los recursos energéticos, ya que permiten la generación simultánea de electricidad y calor. Este estudio se centra en analizar los procesos de generación de energía en turbinas de vapor y la transferencia de calor en estos sistemas, utilizando el software EES (Engineering Equation Solver), una herramienta que facilita la simulación de procesos termodinámicos complejos.

El estudio aborda la cuestión de cómo mejorar la eficiencia en un ciclo rankine regenerativo con cogeneración mediante la optimización de la generación de potencia y la transferencia de calor, con un énfasis particular en el manejo de vapor.

El objetivo principal es calcular la potencia generada por las turbinas y analizar la tasa de transferencia de calor en la caldera.

II. METODOLOGIA

Tipo de investigación: El estudio es de carácter cuantitativo y experimental. Se fundamenta en el análisis numérico de datos termodinámicos y en simulaciones computacionales para evaluar distintas configuraciones del ciclo Rankine regenerativo con cogeneración.

Enfoque: La investigación sigue un enfoque analítico-experimental, ya que se modela el sistema mediante ecuaciones termodinámicas y se analizan sus resultados a través de simulaciones computacionales.

III. DESARROLLO DE CONTENIDO

A. Marco teórico

Termodinámica: La termodinámica es la rama de la física que estudia las interacciones de la energía en sus diversas formas, especialmente las conversiones entre calor y trabajo. Es fundamental en el análisis de procesos en los cuales hay cambios en la energía interna de los sistemas. Se basa en leyes fundamentales que rigen cómo se conserva y transforma la energía en los sistemas termodinámicos. Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015)

Sistemas termodinámicos: S Un sistema es una región del espacio seleccionada para estudiar, donde se analizan los intercambios de energía y materia. Todo sistema tiene límites, llamados fronteras, que separan el sistema de su entorno (Cengel, 2019). Estas fronteras pueden ser fijas o móviles, dependiendo de si el sistema está en condiciones de movimiento o no.

Sistema cerrado o masa de control: Este tipo de sistema tiene una cantidad de masa fija y un volumen constante. Es decir, no hay intercambio de materia con el entorno, pero sí puede intercambiar energía (calor o trabajo) a través de su frontera.

Sistema abierto o volumen de control: En este caso, el sistema intercambia tanto energía como masa con su entorno. La cantidad de masa dentro del sistema puede variar, ya que entra y sale continuamente.

Propiedades de un Sistema Termodinámico

Las propiedades de un sistema pueden clasificarse en dos tipos:

Propiedades intensivas: Son aquellas que no dependen del tamaño o cantidad de materia del sistema. Son iguales en todo el sistema, como la presión, la temperatura y la densidad.

(Ignacio et al., 2019)

Propiedades extensivas: Estas sí dependen del tamaño o la masa del sistema. Algunas de ellas son:

Entropía: Es la medida del desorden en un sistema y determina la parte de la energía que no puede ser utilizada para generar trabajo.

Entalpía: Representa la cantidad de calor que un sistema puede absorber o liberar.

Volumen: Es el espacio que ocupa el sistema.

Masa: La cantidad de materia dentro del sistema.

Energía interna: Es la energía total asociada a las partículas dentro del sistema.

Procesos y Ciclos: Un proceso es un cambio de un estado de equilibrio a otro. Un ciclo involucra varios procesos que devuelven el sistema a su estado original.

Postulado de Estado: Si se conocen dos propiedades de un sistema, se puede determinar el resto de las propiedades necesarias (Cengel, 2019)

Procesos Termodinámicos

El proceso isotérmico mantiene constante la temperatura del sistema.

En un proceso isocórico, el volumen permanece constante.

Un proceso adiabático no implica intercambio de calor.

B. Ciclo Rankine

Ciclo Rankine: El ciclo Rankine es un ciclo termodinámico utilizado para convertir calor en trabajo en sistemas como las plantas de energía. Está compuesto por cuatro etapas principales: compresión, adición de calor, expansión y rechazo de calor. Este ciclo es la base de funcionamiento de las turbinas de vapor en muchas plantas de generación de energía.

C. Instrumentos y técnicas

EES (Engineering Equation Solver):

El software EES fue utilizado para realizar los cálculos termodinámicos necesarios para analizar la eficiencia térmica y la potencia generada en el sistema. Este software permite resolver ecuaciones complejas de manera rápida y precisa, siendo útil para modelar el comportamiento termodinámico de un ciclo rankine regenerativo con cogeneración. Con EES, se obtuvieron las entalpías, presiones y flujos másicos en distintos estados del sistema, permitiendo así realizar un análisis detallado del ciclo.

IV. DESARROLLO DEL PROYECTO

A. Resultados del objetivo específico 1. Seleccionar equipos térmicos y mecánicos adecuados para implementar el ciclo Rankine regenerativo con cogeneración, considerando su eficiencia y aplicabilidad industrial.

Los criterios que se tuvieron en cuenta para realizar una correcta selección de equipos fueron: requerimiento energético (10MW), posibilidad de operación y factibilidad económica.

Una vez aclarado los aspectos claves que se necesitan para la selección, los equipos son los siguientes:

Turbina: Línea TM/TME (Contrapresión-extracción).

Caldera: BOSCH UT-HZ

Bombas.

Bomba 1: Aiguapres multietapas horizontal, serie MLH, modelo MLH-R-40-A/13

Bomba 2: Aiguapres multietapas horizontal, serie MLH, modelo MLH-R-65-A/13

B. Resultados del objetivo específico 2. Analizar energéticamente el ciclo, evaluando consumos y eficiencias térmicas y de cogeneración bajo diversas condiciones operativas.

El análisis energético de un ciclo Rankine regenerativo con cogeneración es importante para evaluar el desempeño del sistema, identificar las oportunidades de mejora y garantizar que se maximice el aprovechamiento de la energía disponible.

Cálculo de flujo másico: Se hace uso de la potencia de la turbina (20MW) y las entalpías de entrada y salida de ella.

$$Wt = \dot{m} * (hetrada - hsalida)$$

$$\dot{m} = 38{,}89\ [kg/s]$$

Con este dato, se realiza un análisis de masas en las dos salidas de la turbina, determinando que el 60% del vapor se extrae de la turbina y el 40% restante se expande.

Cálculo de flujo másico en el punto a

$$\dot{m}a = 0{,}6 * \dot{m}$$

Cálculo de flujo másico en el punto b

$$\dot{m}b = 0{,}4 * \dot{m}$$

Fig. 1 Cálculo de flujos másicos

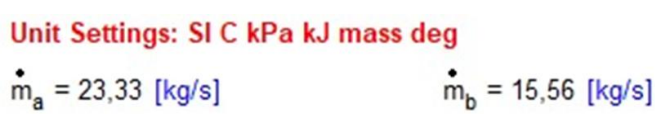


Fig. 2 Cálculo de flujo másico a través del calentador

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$\dot{m}_{cal}$ = 4,527E-19 [kg/s] $\dot{m}_{proceso}$ = 23,33 [kg/s]

Cálculo de trabajo en las bombas: Para obtener el trabajo de las bombas, usaremos las entalpías de entrada y salida de cada bomba y el flujo másico de la siguiente manera:

$$\dot{W}bomb1 = \dot{m}.(h2 - h1)$$

$$\dot{W}bomb2 = \dot{m}.(h5 - h4)$$

Fig. 3 Trabajo de las bombas

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$\dot{W}_{bomb1}$ = 54,8 [kW] $\dot{W}_{bomb2}$ = 108,6 [kW]

Cálculo del trabajo neto: En este caso, se utilizará los trabajos de los equipos anteriormente encontrados para determinar el trabajo neto que arroja el ciclo.

$$\dot{W}neto = \dot{W}turbina - (\dot{W}bomb1 + \dot{W}bomb2)$$

Fig. 4 Trabajo neto

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$\dot{W}_{neto}$ = 19837 [kW]

Cálculo de eficiencia térmica: El cálculo de la eficiencia térmica permite cuantificar qué porcentaje de la energía térmica generada en el sistema se convierte en trabajo útil, así como también permite identificar las oportunidades para mejorar el rendimiento mediante la optimización de condiciones operativas.

Para ello, primero debemos saber el calor que ingresa a la caldera, por medio de la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}in = \dot{m}(h6 - h5)$$

Fig. 5 Calor que ingresa a la caldera

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$\dot{m}_{total}$ = 38,89 [kg/s] $\dot{Q}_{in}$ = 103045 [kW]

Una vez se conozca este dato, se calcula la eficiencia térmica.

$$\eta_{térmica} = \left(\frac{\dot{W}neto}{\dot{Q}in}\right).100$$

Fig. 6 Eficiencia térmica

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$\eta_{térmica}$ = 19,25 [%]

Cálculo de calor útil de cogeneración

$$\dot{Q}útil = \dot{m}cal.(h6 - h7)$$

Fig. 7 Calor útil

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$\dot{Q}_{útil}$ = 33257 [kW]

Cálculo de eficiencia de cogeneración: Por último, se calcula la eficiencia de cogeneración.

$$\eta_{cogeneración} = \left(\frac{\dot{W}neto + \dot{Q}útil}{\dot{Q}in}\right)$$

Fig. 8 Eficiencia de cogeneración

Unit Settings: SI C kPa kJ mass deg

$\eta_{cogeneración}$ = 51,53 [%]

Análisis energético del ciclo: El análisis energético del ciclo rankine regenerativo con cogeneración constituye una herramienta fundamental para la evaluación de los costos energéticos, en este caso se

hará en base al trabajo neto producido por el ciclo y el tiempo que va a estar encendido al mes.

Primero se hará el cálculo de las horas que va a estar encendido durante el mes, donde se mantendrá trabajando las 24 horas por día.

$$t = \frac{24h}{día} * 30\ días$$

$$t = 720h$$

Con este resultado, se procede a calcular el consumo mes a mes de energía eléctrica.

$$Emes = (19837[kW]) * 720h$$

$$Emes = 14282640[kWh]$$

Costo mensual en Colombia: Para la obtención del costo mensual se utilizará el consumo mes a mes de energía eléctrica y el costo para la región de Nariño donde se está desarrollando esta investigación, que en este caso es de 1008 COP para esta región del país.

$$Costomes = Emes * 1008\ COP/kWh$$

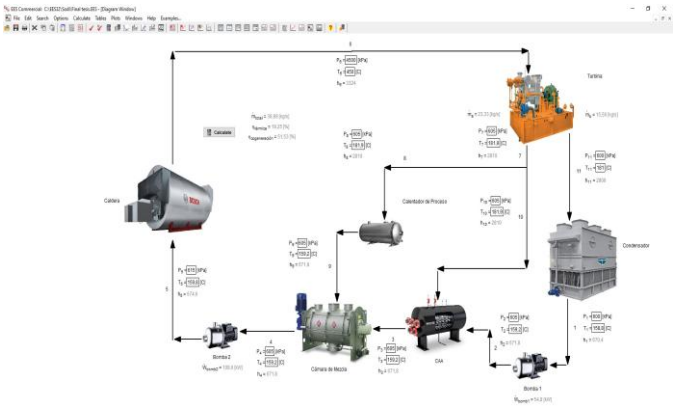
$$Costomes = 14396901{,}120\ COP$$

C. Resultados del objetivo específico 3. Recrear el ciclo Rankine regenerativo utilizando EES, evaluando escenarios para optimizar su rendimiento.

El ciclo rankine regenerativo con cogeneración es una evolución importante del ciclo rankine convencional, el cuál ha incorporado técnicas de recuperación de energía para que su eficiencia térmica aumente y se pueda diversificar sus productos energéticos como lo son la generación simultánea de electricidad y calor útil.

Ahora bien, se ha hecho uso del software EES para recrear y simular el ciclo anteriormente mencionado, donde se permite modelar los balances de energía y masa, optimizar los puntos de extracción de vapor, calcular las eficiencias térmicas del ciclo y analizar las condiciones de operación de cada uno de los componentes.

Fig. 9 Simulación del ciclo rankine regenerativo con cogeneración



A través de esta simulación, es posible calcular los diferentes datos de cada uno de los estados que se presentan en el ciclo, como lo son las presiones, temperaturas, entalpías, entropías, volúmenes específicos, entre otros.

Para entender mejor lo anteriormente dicho, se muestra la tabla de los diferentes valores encontrados dentro del software EES.

Fig. 10 Tabla de resultados de cada uno de los estados termodinámicos

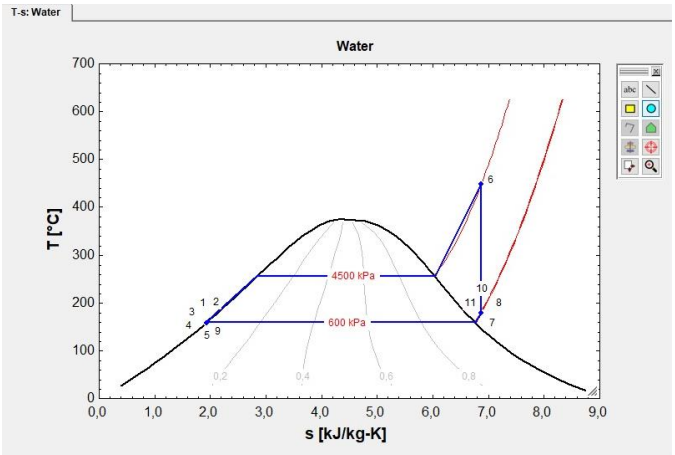
Arrays Table

Main

	1 T_i [C]	2 v_i [m3/kg]	3 x_i	4 h_i [kJ/kg]	5 P_i [kPa]	6 s_i [kJ/kg-K]
[1]	158,8	0,001101	0	670,4	600	1,931
[2]	159,2	0,001101	0	671,8	605	1,934
[3]	159,2	0,001101		671,8	605	1,934
[4]	159,2	0,001101		671,8	605	1,934
[5]	159,8	0,001102	0	674,6	615	1,941
[6]	450	0,07076		3324	4500	6,877
[7]	181,9	0,3335		2810	605	6,877
[8]	181,9	0,3335		2810	605	6,877
[9]	159,2	0,001101	0	671,8	605	1,934
[10]	181,9	0,3335		2810	605	6,877
[11]	181	0,3356		2808	600	6,877

Para terminar, se presenta el diagrama T-s de la simulación del ciclo.

Fig. 11 Diagrama T-s



D. Resultados del objetivo específico 4. Formular recomendaciones técnicas sobre operación y selección de equipos para mejorar la eficiencia del sistema en contextos industriales.

La implementación eficiente de un ciclo rankine regenerativo con cogeneración en aplicaciones industriales depende en gran medida de la correcta selección de equipos, el diseño del sistema y las condiciones de operación. Se busca que el sistema tenga un óptimo desempeño, un incremento en la eficiencia global, que se reduzcan las pérdidas energéticas y se prolongue la vida útil de los componentes.

En cuanto a la selección de equipos, se debe usar turbinas de múltiples etapas con extracción de vapor para regeneración, con el fin de aprovechar de una manera más eficiente el contenido entálpico del vapor.

Por otra parte, la caldera debe garantizar un buen intercambio térmico con superficies de calentamiento adecuadas y considerar la recuperación de calor de gases de escape maximizando el aprovechamiento de la energía térmica.

Para la selección de las bombas, se buscará equipos con materiales resistentes a la temperatura y presión de operación, utilizando variadores de velocidad se puede ajustar el flujo según la demanda y reduciendo así el consumo energético.

La eficiencia del ciclo puede incrementar significativamente si se presta especial atención a la correcta selección de equipos, el mantenimiento adecuado y la operación precisa bajo condiciones controladas. Las mejoras no solo deben centrarse en los componentes principales del ciclo sino también en los sistemas auxiliares, métodos de control y la integración energética general.

Cada decisión técnica debe considerar el equilibrio entre inversión, complejidad operativa y retorno energético, con el objetivo de lograr un sistema robusto, eficiente y económicamente viable en el contexto industrial.

V. CONCLUSIONES

El trabajo desarrollado en esta investigación facilitó una evaluación del impacto que diversos parámetros operativos ejercen sobre la eficiencia del ciclo Rankine regenerativo acoplado a un sistema de cogeneración. A través de una modelación numérica implementada en el entorno del software Engineering Equation Solver (EES), fue posible reconocer la relevancia que adquieren variables como la presión de entrada a la turbina, la temperatura del vapor sobrecalentado y la eficiencia térmica de los componentes en el comportamiento integral del ciclo.

El análisis de los flujos másicos demostró la necesidad de un control en la distribución del vapor entre los procesos térmicos y la etapa de expansión, ya que esto incide en el rendimiento del sistema de cogeneración. La simulación en EES demostró que una distribución de 60 % del vapor hacia usos térmicos y 40 % hacia generación eléctrica ofrece un compromiso técnico favorable entre ambos fines, maximizando el rendimiento global.

Además, se llevó a cabo un estudio de las pérdidas por fricción en el sistema, en el que se identificó el papel que juegan factores como la textura interna de

las tuberías, los elementos accesorios del sistema y el régimen del flujo. Estas pérdidas, en ciertos segmentos del ciclo, alcanzaron valores superiores a los 600 kPa, lo que plantea la necesidad de integrar medidas de diseño que minimicen estos efectos perjudiciales.

Desde una perspectiva energética y geográfica, se evidenció que la implementación del ciclo Rankine regenerativo en lugares como Pasto, exige una adecuación específica de los parámetros operativos. Las condiciones climáticas locales, caracterizadas por temperaturas relativamente bajas, hacen necesario un ajuste térmico cuidadoso que evite penalizaciones en el rendimiento del sistema, reforzando la importancia de realizar simulaciones adaptadas al entorno particular.

Los resultados obtenidos constituyen una base técnica sólida para orientar decisiones en proyectos industriales que busquen implementar esquemas de cogeneración. Se evidencia así la viabilidad técnica y económica de integrar regeneración térmica con aprovechamiento energético, contribuyendo a una reducción significativa del consumo de recursos y mejorando el retorno de inversión en entornos que priorizan la eficiencia energética.

A partir del análisis realizado, se concluye que el ciclo presenta una eficiencia limitada, evidenciando pérdidas considerables de energía en sus distintos procesos. La sensibilidad del sistema frente a cambios en presión y temperatura no logra compensar las deficiencias inherentes al diseño y operación del ciclo, lo que se traduce en un bajo aprovechamiento del calor disponible y, por ende, en un desempeño general poco eficiente. Estos resultados sugieren la necesidad de implementar mejoras sustanciales en los componentes principales o considerar alternativas tecnológicas que optimicen el uso de la energía térmica generada.

REFERENCIAS

[1] Amell Arrieta, A. A., & Cadavid, F. J. (2019). Combustión sin llama como una alternativa para mejorar la eficiencia de sistemas térmicos: Revisión del estado del arte. Tecnológicas, 22 (46), 115–154. https://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=s0123-77992019000300204&script=sci_arttext

[2] Carcedo Haya, J. (2023). Cogeneración: Mejora de la eficiencia en sistemas de combustión [Material didáctico]. Universidad de Cantabria.

https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2504/course/section/2589/i01%20cogeneracio%cc%81n.pdf

[3] Elwardany, M. (2024). Enhancing steam boiler efficiency through comprehensive energy and exergy analysis: A review. Process Safety and Environmental Protection, 184, 1222–1250. ESSS. (2021). Métodos numéricos para simulación en la ingeniería. ESSS Blog.

https://www.esss.com/es/blog/metodos-numericos-para-simulacion-en-la-ingenieria/

[4] Mariñes Delgado, L. M., & Mendocilla Ulloa, J. J. (2023). Evaluación técnico-económica de un ciclo Rankine orgánico utilizando calor residual para generación eléctrica en Agroindustrias San Jacinto S.A.A. [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional del Santa].

http://repositorio.uns.edu.pe/handle/uns/4571

[5] Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2020). Fundamentals of engineering thermodynamics (9th ed.). Wiley.

[6] Olaya, Y. M. (2021). Fundamentos teóricos de la eficiencia energética: Ciclos térmicos, cogeneración y medio ambiente [Material académico, Universidad Nacional de Colombia].

https://www.bdigital.unal.edu.co/11111/

[7] Rojas, D. F., & Sánchez, M. (2023). Evaluación técnica y económica de un sistema de cogeneración para una planta procesadora de alimentos en Colombia [Tesis de maestría, Universidad de los Andes].

https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/65000

[8] U.S. Department of Energy. (2020). Combined heat and power basics.

https://www.energy.gov/eere/amo/combined-heat-and-power-basics

[9] Zárate, M. T., & Romero, L. (2020). Diseño de un ciclo Rankine regenerativo para una planta de energía a partir de biomasa. Energía y Desarrollo, 24(2), 45–60.

https://revistas.energydesarrollo.com/index.php/eyd/article/view/249