Análisis De Desempeño De Un Ciclo Termodinámico Rankine Con Recalentamiento en EES.

David Esteban Jacome Cuasapud – Richard Andres Santacruz

Universidad autónoma de nariño
Pasto, Colombia
David1010010842@gmail.com
romor1156@gmail.com

Resumen

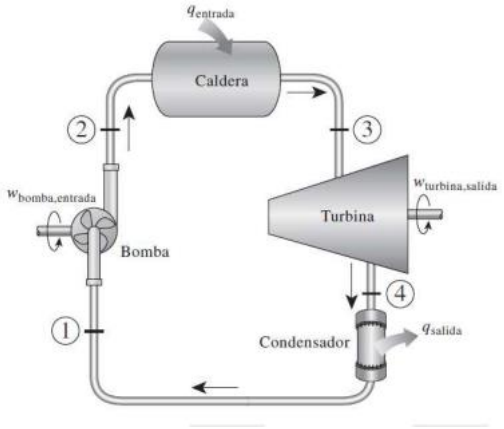
El ciclo Rankine es la base de la generación termoeléctrica en plantas convencionales, nucleares y de cogeneración. Sin embargo, presenta irreversibilidades significativas que reducen su eficiencia, especialmente en la turbina y el condensador. Este trabajo analiza el desempeño de un ciclo Rankine con recalentamiento y regeneración, aplicando un enfoque cuantitativo mediante simulación computacional en EES (Engineering Equation Solver).

Se desarrolló un modelo matemático detallado del ciclo con parámetros reales de equipos (caldera, turbinas, condensador y bombas) y se evaluaron diferentes escenarios operativos, enfocándose en la variación de la temperatura de recalentamiento y la implementación de regeneración. El análisis exergético permitió cuantificar las pérdidas irreversibles y localizar los componentes con mayor destrucción de exergía.

Los resultados muestran que el recalentamiento mejora la eficiencia térmica y reduce la humedad del vapor en la turbina**,** mientras que la regeneración disminuye la demanda de calor en la caldera, aumentando el rendimiento global. No obstante, se identificó un compromiso técnico y económico en la elección de la temperatura de recalentamiento, ya que un valor excesivo puede reducir la vida útil de los materiales de la turbina.

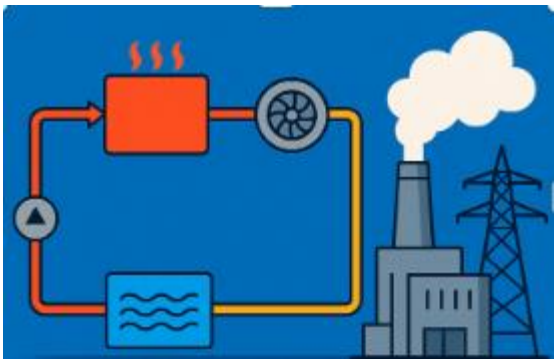
Pregunta problema

¿Cuál es el impacto de la temperatura de recalentamiento en la eficiencia energética de un ciclo de Rankine supercrítico, y cómo se pueden minimizar las pérdidas de exergía en los componentes principales del ciclo?



Justificación

La optimización del ciclo Rankine es esencial para aumentar la eficiencia energética y reducir emisiones. El recalentamiento mejora el desempeño del ciclo, y el análisis exergético permite identificar las pérdidas y proponer estrategias de optimización.



Marco teórico

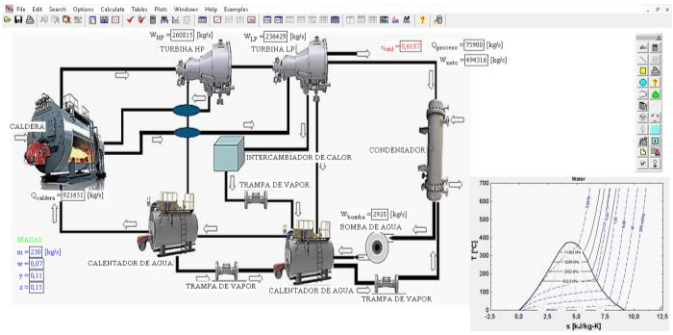
El ciclo Rankine es un proceso termodinámico fundamental para la conversión de calor en trabajo, ampliamente utilizado en plantas termoeléctricas convencionales, nucleares y de cogeneración. Su importancia radica en su capacidad de transformar energía térmica en electricidad de manera continua y a gran escala.

Una de las principales limitaciones del ciclo son las **irreversibilidades** presentes en los distintos componentes, especialmente en la **turbina** y el **condensador**, lo que reduce la eficiencia global. Para superar estas limitaciones, se han desarrollado estrategias de mejora como el **recalentamiento** —que incrementa la temperatura promedio de adición de calor y disminuye la humedad del vapor— y la **regeneración**, que aprovecha parte del vapor extraído para precalentar el agua de alimentación, reduciendo la carga térmica de la caldera.

El **análisis exergético** resulta esencial, ya que no solo evalúa la eficiencia térmica, sino que permite **localizar y cuantificar las pérdidas de calidad de energía** en cada componente del ciclo. Este enfoque es clave para la optimización energética y la sostenibilidad.

Finalmente, el uso de herramientas de simulación como **EES (Engineering Equation Solver)** permite modelar de forma precisa el ciclo, analizar variables de operación y comparar diferentes escenarios, sin incurrir en riesgos técnicos ni costos experimentales.

Ciclo térmico analizado



Desarrollo de objetivos

Objetivo número 1

Establecer parámetros del ciclo Rankine regenerativo para cuantificar las perdidas energéticas.

Datos	Valores
Presión de la salida de la caldera	12 MPa
Temperatura de salida de la caldera/recalentador	540° C
Eficiencias isoentrópicas en la turbina HP	85%
Eficiencias isoentrópicas en la turbina LP	88%
Eficiencias isoentrópicas en la bomba	75%
Flujo masico de vapor	230 kg/s
Fracciones de extracción de vapor	y = 0.11, z = 0.15, w = 0.07

Objetivo número 2

Analizar el efecto de la temperatura de recalentamiento en la eficiencia térmica y en las pérdidas de exergía del ciclo.

Escenario	Temperatura de recalentamiento	Eficiencia esperada	recomendaciones
Punto 1	480°C	53.1%	Menor eficiencia, mayor presencia de humedad.
Punto 2 (actual)	540°C	61.8%	Eficiencia dentro de los parámetros seguros.
Punto 3	580°C	63.2%	Leve mejoría, con riesgo de fatiga térmica.

Desarrollo del objetivo número 3

Optimizar el ciclo generando estrategias adecuadas para minimizar las pérdidas energéticas

- Optimizar turbinas de baja y alta presión de 88% y 85% respectivamente a un 92% y 90% respectivamente.
- Mejorar eficiencia de la bomba del 75% a un 82%.
- Reajustar la extracción de vapor que se tiene como base de un 0.11, 0.15 aumentarla al 0.18.
- Considerar adicionar un tercer calentador teniendo en cuenta los respectivos cálculos que este va a tener y las repercusiones que este pueda tener dentro de cada uno de los equipos y dentro del ciclo como tal.

Desarrollo del objetivo número 4

Cuadro comparativo de las mejoras aplicadas y la mejora de cada optimización

Opción de mejoramiento	Eficiencia antes de mejora	Eficiencia después de mejora	Mejora estimada
Turbinas	61.8%	63.8%	+2.0%

optimizadas (90% y 92%)			
Extracción ajustada (z=0.18)	61.8%	64.3%	+2.5%
Tercer calentador adicional	61.8%	65.3%	+3.5%
Combinación de las mejoras	61.8%	66.8%	+5.0%

Recomendaciones

Para futuras investigaciones tener en cuenta los siguientes puntos con los cuales se podrá mejorar la eficiencia total del ciclo térmico

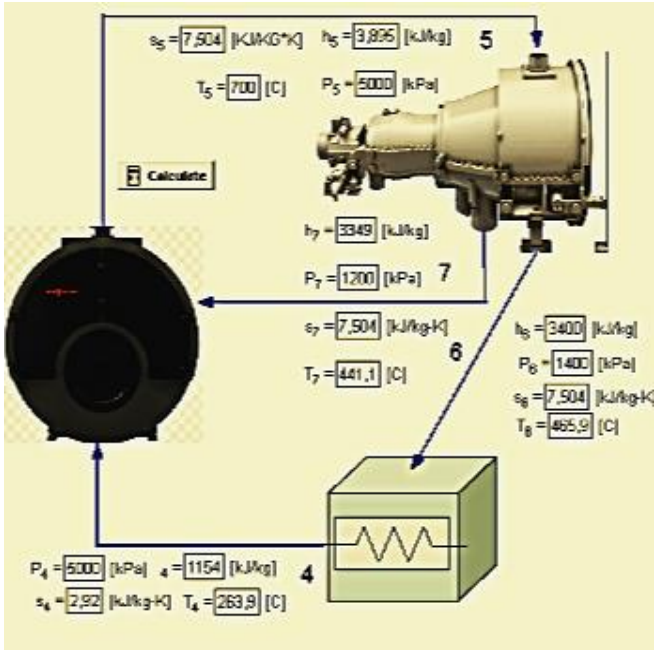
- Optimizar la eficiencia de los equipos principales
- Optimizar el proceso de recalentamiento
- Reajustar las fracciones de extracción de vapor
- Considerar la adición de calentadores
- Incorporar los sistemas de control automatizados
- Realizar monitoreos constantes

Conclusión

Esta investigación abordó de manera integral la problemática de la eficiencia en los ciclos Rankine, proponiendo y evaluando estrategias efectivas para minimizar las pérdidas de exergía. Mediante el modelado detallado en el software EES y un riguroso análisis termodinámico, se lograron identificar los componentes críticos del ciclo y se cuantificó el impacto directo de la temperatura de recalentamiento en su eficiencia.

Referencias

- Bejan, A., Almahmoud, H., Gunes, U., Fakhari, H. E., & Mardanpour, P. (2024). Evolution and irreversibility: Two distinct phenomena and their distinct laws of nature. Physics
- Bar-Yam, Y. (2019). Making things work: Solving complex problems in a complex world. Knowledge Press.
- ¿Cerney S.A.U. (2020). Diferencias entre caldera pirotubular y acuotubular.
- International Energy Agency (IEA). (2020). Cogeneration and its Benefits.
- Imre, A. R., Ahmed, A. M., & Kustán, R. (2023). Effect of the working fluid's critical
- International Journal of Thermofluids, 20, 100417.
- Lee, K. (2020). Optimización del ciclo de Rankine con regeneración.
- Rad, E. A., Mohammadi, S., & Tayyeban, E. (2020). Simultaneous optimization of working fluid and boiler pressure in an organic Rankine cycle for different heat source temperatures. ScienceDirect, 194(116856).
- Universidad Politécnica de Cataluña. (s.f.). ANÁLISIS TERMODINÁMICO DE LOS CICLOS DE RANKINE - UPCommons.
- Yang, F., Yang, F., Liu, Q., Chu, Q., Yang, Z., & Duan, Y. (2022). Thermodynamic analysis of working fluids: What is the highest performance of the sub- and trans-critical organic Rankine cycles? Energy, 241, 122512.

Anexos

divulgación pública de la ciencia revista tecnocience artículo de investigación: Análisis térmico con recalentamiento proyecto # 8.Este reposa en la base de datos de la biblioteca publica nacional