

Model of an ideal Rankine cycle with reheating in E.E.S.

Modelamiento de un ciclo Rankine ideal con recalentamiento en E.E.S.

D. A. Narváez-Meza.  

DOI: <https://doi.org/10.22517/23447214.25773>

Scientific and technological research paper

Abstract— In the present study, a comprehensive analysis is carried out on an ideal regenerative Rankine cycle, based on the use of ICT tools for digital transformation in engineering education. The gap addressed in this work relates to the application of technologies to streamline the thermodynamic analysis of complex cycles, which have been rigorously modeled using the Engineering Equation Solver (E.E.S.) software a high-fidelity computational tool widely recognized for its accuracy in solving nonlinear, multivariable thermodynamic systems. The methodological approach adopted involves a detailed evaluation of the isentropic efficiencies of the main cycle components turbines, pump, and heat exchangers enabling a precise determination of the net power output, the rates of thermal energy transfer to and from the heat exchangers, as well as the quantification of the mass flow rates of extracted steam at specific points in the system for regenerative purposes. Additionally, the computational generation of temperature–entropy (T–s) diagrams is integrated, which serve as fundamental tools for the visualization and validation of the thermodynamic processes involved, allowing for the clear identification of each state in the cycle. Based on this graphical representation and the numerical results derived from the model, key thermodynamic properties are determined, such as specific volume at pump suction, entropy at turbine inlet, and enthalpies associated with each energy transformation, in order to quantitatively establish the isentropic efficiency of the devices and their influence on the overall efficiency of the regenerative cycle. This approach enables not only a comprehensive understanding of system behavior but also the identification of improvement opportunities for the energy optimization of advanced thermoelectric cycles.

Index Terms— Isentropic, efficiency, Rankine cycle, regeneration, reheating, turbina.

Resumen— En el presente estudio se desarrolla un análisis exhaustivo de un ciclo Rankine regenerativo ideal basado en el uso de herramientas TIC para la transformación digital en la enseñanza de la ingeniería, la brecha que se pretende abordar se enmarca en el uso de las tecnologías para agilizar los análisis termodinámicos de ciclos complejos, los cuales han sido rigurosamente modelado mediante el uso del software Engineering Equation Solver (E.E.S.), una herramienta computacional de alta fidelidad ampliamente reconocida por su precisión en la resolución de sistemas termodinámicos no lineales y multivariable. El enfoque metodológico adoptado contempla la evaluación minuciosa de las eficiencias isoentrópicas de los principales componentes del ciclo, turbinas, bomba e intercambiadores de calor, lo cual permite una determinación precisa de la potencia neta generada, las tasas de transferencia de energía térmica hacia y desde los intercambiadores, así como la cuantificación de los flujos máscicos de vapor extraído en puntos específicos del sistema para efectos regenerativos. Asimismo, se integra la generación computacional de diagramas temperatura –entropía (T–s), los cuales constituyen herramientas fundamentales para la visualización y validación de los procesos termodinámicos involucrados, permitiendo la identificación clara de cada uno de los estados del ciclo. A partir de esta representación gráfica y de los resultados numéricos derivados del modelo, se determinan propiedades termodinámicas clave.

Índice de términos— Isentrópico, eficiencia, ciclo de Rankine, regeneración, recalentamiento, turbina.

I. INTRODUCCIÓN

EL ciclo Rankine ideal con recalentamiento y regeneración, es un proceso utilizado en centrales eléctricas de vapor que se logra por la extracción del vapor o también denominado drenaje del mismo de la turbina de alta presión, el vapor extraído en la región de vapor sobrecalentado que en el ciclo Rankine ideal simple no produce trabajo, se pasa nuevamente por la caldera para elevar su temperatura bajo la misma línea de presión de extracción, incrementando la entropía del vapor realizando una expansión isoentrópica hasta la salida de la turbina de baja presión.

Este artículo de investigación fue sometido a revisión el 31 de enero de 2025, aceptado el 7 de julio de 2025 y publicado el 30 de junio de 2025. Fue financiado en el marco del proyecto CIP de sistemas avanzados aplicados a modelos termodinámicos de la Corporación Universitaria Autónoma de Nariño, la Universidad Mariana de Colombia y el grupo de investigación CEDMATEC. El estudio se llevó a cabo como un capítulo preliminar del libro doctoral sobre energía eólica del candidato a doctorado Favio Nicolás Rosero y tiene como objetivo analizar las fuentes de energía que pueden aplicarse en el departamento de Nariño, explorando la capacidad de energía eólica y geotérmica del departamento, con base en el estudio energético del profesor Diego Alejandro Narváez (dienarvaez125@umariana.edu.co, diego.narvaez@aunar.edu.c



Es importante recalcar que existen algunas recomendaciones para incrementar la eficiencia isoentrópica además de algunas limitaciones en el estudio de variables termodinámicas que se pueden abordar aplicando herramientas de transformación digital.

La propuesta del presente artículo se basa en el objetivo general el cual pretende aplicar las herramientas TIC del curso CIP de sistemas avanzados aplicados a modelos termodinámicos basados en el software EES como lo propone Fernández, *et al* (2020) en su investigación sobre TIC aplicadas en la enseñanza de la ingeniería mecánica [1], como herramienta computacional para el análisis de diferentes ciclos termodinámicos como los ciclos de vapor, ciclos de refrigeración y la posibilidad de la exploración de energía geotérmica en el volcán Cumbal en fuentes hiper entálpicas, además del análisis de ciclos de refrigeración en general.

II. METODOLOGÍA APLICADA

Desde una perspectiva metodológica de tipo exploratoria, este estudio parte de la necesidad de indagar cómo la implementación del software *Engineering Equation Solver* (E.E.S.) puede facilitar la comprensión y resolución de ciclos de vapor Rankine con recalentamiento en el contexto de la formación en ingeniería generando en los estudiantes competencias tecnológicas dentro de la mecánica aplicada, en el análisis termodinámico aplicado a la docencia, se plantea como hipótesis exploratoria que el uso del E.E.S como se evidencia en los estudios de Medina et al. (2024) el cual permite un análisis detallado y una comprensión más profunda de los temas tratados acorde a la literatura actual, la interpretación teórica, el enfoque pedagógico y un análisis de elementos previos de hipótesis planteada [2], permite no solo modelar con mayor precisión los procesos involucrados en un ciclo Rankine con recalentamiento, sino también fomentar en los estudiantes una comprensión más profunda de las relaciones entre eficiencia, condiciones de operación y transformaciones energéticas clave.

III. MARCO TEÓRICO.

A) Aprendizaje basado en herramientas tecnológicas

Acorde a los estudios previos sobre herramientas tecnológicas aplicadas a la educación, se propone una estrategia que le permita al estudiante desarrollar habilidades tecnológicas dentro de la mecánica computacional, propendiendo por la calidad en el ejercicio docente, estas herramientas tecnológicas permiten la reducción de brechas generando en el docente didácticas en el aula que permitan una apropiación del conocimiento mediado por las TIC, es así que Mosquera (2021) en su estudio denominado “Factores asociados al uso de tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en los procesos de aprendizaje de estudiantes de ingeniería”, en el cual

se evidencia la importancia del uso de las TIC en estudiantes universitarios cuyas experiencias son significativas mejorando el perfil del egresado, mejorando las competencias digitales transversales bajo los constructos del modelo propuesto [3]. Por este motivo es importante entender que el uso de herramientas tecnológicas además de desarrollar habilidades digitales, reduce las brechas educativas en el contexto regional, el aprendizaje mediado por soluciones tecnológicas especializadas contribuye a los procesos de cualificación profesional, pues esta se orienta a mejorar las dinámicas sociales y educativas del entorno.

B). Métodos de Reducción de presión en el sumidero:

El fluido de trabajo existe dentro del sumidero como un vapor húmedo a la temperatura de saturación de la salida de la turbina de baja presión, la reducción de la presión de operación del condensador disminuye la temperatura del vapor, la reducción de la presión incrementa la eficiencia del ciclo Rankine como se puede observar en la figura. Según Hernández, Zumalacárregui & Pérez (2020) permite disminuir en mayor medida la presión de trabajo en el condensador lo que permite incrementar la eficiencia térmica del ciclo Rankine, tal como se puede apreciar en la Fig. 1. Del diagrama T vs s del ciclo [4].

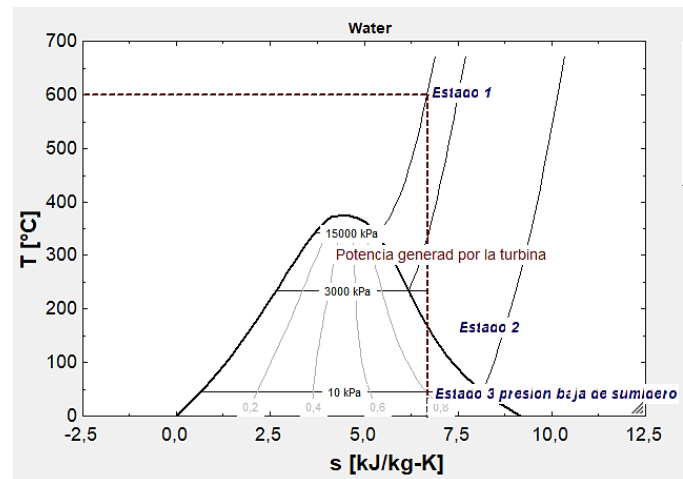


Fig. 1. Reducción de presión del sumidero, fuente: Esta investigación, parametrización en E.E.S.

El proceso de expansión de un gas, representa un proceso adiabático reversible también denominado isoentrópico, para los parámetros establecidos la entropía del sistema es de $6,67 \frac{kJ.k}{kg}$, de acuerdo a los parámetros establecidos en el software E.E.S como se observa en los resultados de la Fig. 2.

	1	2	3
Sort			
	P_i [kPa]		s_i
[1]	15000		6,677
[2]	3000		
[3]	10		

Fig. 2. Entropía específica calculada mediante EES pasados en las presiones 15000 kPa, 3000 kPa y 10 kPa. Fuente: Esta investigación, parametrización en E.E.S.

Basados en los procesos de entropía constante se realiza el análisis isoentrópico de la turbina teniendo en cuenta que el cálculo se realiza desde el punto de vista ideal, donde no se tiene en cuenta las irreversibilidades de un proceso.

C). Recalentamiento del vapor de extracción:

Después de la extracción de vapor de la turbina de alta presión pasa nuevamente por la caldera, incrementando la temperatura del fluido de trabajo, la presión se mantiene constante desde la extracción del vapor sobrecalentado, hasta el ingreso a la turbina de baja presión, el vapor se calienta nuevamente generando expansión en la misma incrementando la potencia producida por la turbina, como se muestra en la siguiente ecuación de balance de energías y su desarrollo. De acuerdo a lo planteado por Vásquez & Carbajal (2020) se evidencia resultados satisfactorios con respecto a la influencia en el incremento de temperatura a las entradas de la turbina, es por esta razón que aplicando un recalentamiento se aprovecha la energía del fluido para incrementar la salida de potencia neta de la turbina e incrementar la eficiencia térmica del ciclo [5]. El balance de energías de primera ley tal como se puede apreciar en (1) acorde al texto Çengel & Boles (2021) donde se evidencia las variaciones de energía de un sistema [6].

$$E_{in} - E_{out} = \Delta E \text{ sistema (1)}$$

Donde:

1. E_{in} = Energía de entrada
2. E_{out} = Energía de salida
3. $\Delta E \text{ sistema}$ = Cambios de energía del sistema

Los cambios de energía del sistema se presentan cuando el régimen estudiado es transitorio; sin embargo, dentro de las consideraciones las propiedades tanto a la entrada como a la salida se mantienen constantes, de esta manera se determina el régimen estacionario de los equipos, las energías presentes se reemplazan en (1) acorde a las formas de entrada y salida de las mismas y las variaciones del sistema.

$$(Q_{in} + W_{in} + E_{in}) - (Q_{out} + W_{out} + E_{out}) = \Delta E \text{ sistema}$$

Donde:

1. Q_{in} = Calor de entrada
2. Q_{out} = Calor de salida
3. W_{in} = Trabajo de entrada
4. W_{out} = Trabajo de salida

Reemplazando el análisis de primera ley (1) para cada uno de los estados

$$\dot{m}.(h_1 - h_2) + \dot{m}.(h_3 - h_4) = W \text{ neto}$$

Donde

1. \dot{m} = Flujo másico $[\frac{kg}{s}]$
2. h_1, h_2, h_3 y h_4 = Entalpia específica $[\frac{kJ}{kg}]$

Con el recalentamiento se incrementa la eficiencia neta de la turbina, el vapor recalentado se utiliza para producir potencia en la segunda etapa de la turbina de alta presión como se muestra en la figura 4, de esta manera se aumenta la potencia total de la turbina sumando la primera etapa de alta presión y la segunda etapa de baja presión aprovechando la alta entalpia de la extracción y pasando este vapor nuevamente por la caldera. El análisis del Ciclo Rankine con recalentamiento en el programa EES (Engineering Equation Solver) representa una herramienta fundamental en la enseñanza de la Termodinámica, ya que permite a los estudiantes modelar sistemas térmicos reales con mayor precisión y comprender el impacto de los diferentes componentes del ciclo sobre su eficiencia.

Este tipo de ciclo, utilizado comúnmente en centrales termoeléctricas, incorpora una etapa adicional de calentamiento del vapor después de su expansión parcial, lo que contribuye a mejorar la eficiencia térmica del sistema y a reducir la humedad al final de la expansión en la turbina. Mediante el uso de EES, los estudiantes pueden visualizar los cambios de estado del fluido de trabajo en los diagramas T-s y h-s, calcular propiedades termodinámicas con gran exactitud y realizar balances de energía en cada componente.

Además, el entorno de programación de EES fomenta el pensamiento crítico y el análisis comparativo, ya que permite modificar parámetros como presiones, temperaturas y niveles de recalentamiento para observar su efecto directo sobre la eficiencia del ciclo.

Esta experiencia práctica no solo fortalece el aprendizaje conceptual de la Termodinámica, sino que también prepara a los futuros ingenieros para enfrentar desafíos reales en el diseño y optimización de sistemas energéticos. Los valores de la presión de sumidero corresponden a 10 kPa a la salida de la turbina en su segunda etapa de recalentamiento como se puede evidenciar en la Fig. 3.

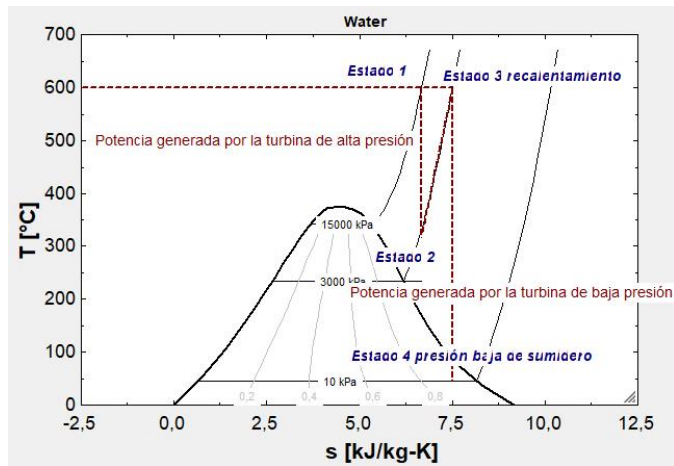


Fig. 3. Recalentamiento de los estados 3 y 4, Fuente: Yunes A. Cengel Termodinámica, capítulo 10. Efecto que produce incrementar la presión de la caldera en el ciclo Rankine ideal y bajar la presión de sumidero línea roja punteada. Fuente: El autor, ciclo programado en E.E.S.

D) Expansión isoentrópica de la turbina de alta presión.

Mediante la presión de la turbina de alta al ingreso del fluido de trabajo, se determina la entropía y entalpía del estado 1 antes de la expansión del vapor, al ser un análisis ideal de la turbina de alta presión se supone que el elemento es diabático reversible por lo tanto corresponde a un proceso isoentrópico. Donde la entropía específica al ingreso y después de la expansión del gas es igual en un proceso adiabático reversible tal como se muestra en la Fig. 4 para los estados 1 y 2.

```

EES Equations Window
P[1]=15000[kPa]
T[1]=600[C]
s[1]=Entropy(Water;T=T[1];P=P[1])
h[1]=Enthalpy(Water;T=T[1];P=P[1])

"Propiedades del estado 2"
P[2]=3000[kPa]
h[2]=Enthalpy(Water;s=s[1];P=P[2])

P[3]=10[kPa]
    
```

Fig. 4. Programación en EES de las propiedades termo físicas para los estados 1 y 2. Fuente: Esta investigación, software E.E.S.

Con los valores de la entropía específica del estado 2 y la presión de 3000 kPa encontramos la entalpía específica y la temperatura a la salida de la turbina de alta presión en los estados 1 y 2 tal como se observa en la Fig. 5.

	1	2	3	4
Sort	P _i [kPa]	s _i	T _i [C]	h _i
[1]	15000	6,677	600	3581
[2]	3000	6,677	333,2	3075
[3]	10			

Fig. 5. Tabla de valores termodinámicos de los estados 1 y 2. Fuente: Esta investigación, software E.E.S.

Basados en la tabla generada por el E.E.S. definimos las curvas paramétricas en el eje x como entropía específica y en el eje y temperatura, como se muestra en la figura 6.

E) Diagrama T-s expansión isoentrópica de la turbina de alta presión

Como es de esperarse las entropías a la entrada y salida de la turbina son iguales, con estas propiedades en el software E.E.S. se puede determinar las temperaturas de salida de la turbina y la entalpía específica, como se puede observar en la Fig. 6.

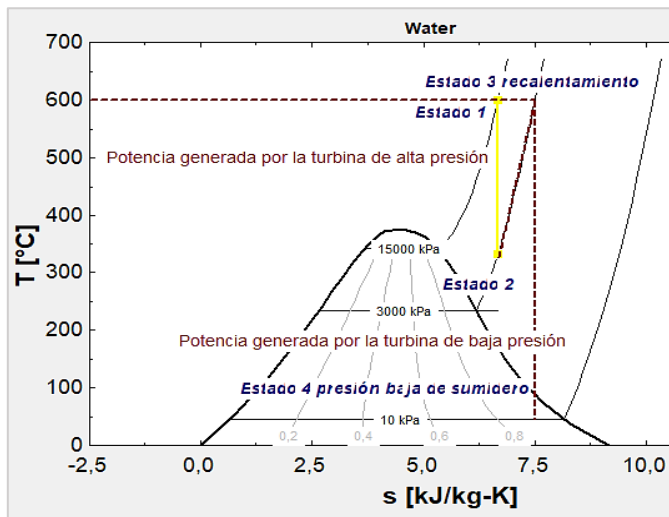


Fig. 6. Parametrización propiedades termo-físicas en E.E.S. para los ejes x, y respectivamente sobre el diagrama T-s. Fuente: Esta investigación, software E.E.S.

F) Expansión isoentrópica de la turbina de baja presión

Las propiedades termodinámicas se parametrizan bajo el código de programación en EES, se determina presión, entropía específica y temperatura como se aprecia en la Fig. 7. Este paso es necesario ya que se van a trabajar valores de temperatura entropía, caso contrario se debe parametrizar los valores de temperatura en cada uno de los estados o cambiar el modelo gráfico con las propiedades existentes en tabla.

Sort	P_i [kPa]	s_i [kJ/kg-K]	T_i [C]	h_i [kJ/kg]
[1]	15000	6,677	600	3581
[2]	3000	6,677	333,2	3075
[3]	3000	7,508	600	3682
[4]	10	7,508	45,82	2380

Fig. 7. Propiedades termodinámicas de los estados 1 al 4 del ciclo Rankine con recalentamiento. Fuente: Esta investigación

G) Eficiencia del ciclo Rankine ideal con recalentamiento

Uno de los principales objetivos del recalentamiento con respecto al incremento de la eficiencia térmica de los ciclos de vapor, está basada en aprovechar la mayor cantidad de potencia suministrada por la turbina, reducir la presión del sumidero y volver el ciclo eficiente a diferencia del ciclo Rankine simple. Ortega (2024) afirma que adicionalmente el trabajar con fluidos orgánicos incluyen la eficiencia de recuperación de calor de los

desechos térmicos además de la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero [7]. Por lo tanto, aportan significativamente a la sostenibilidad ambiental, a diferencia de los ciclos convencionales. A continuación, se evidencia el cálculo de la eficiencia térmica del ciclo Rankine ideal con recalentamiento y el diagrama T-s para los 6 estados correspondientes Fig. 6. Es así que Smith y Brown (2020) en su investigación infieren en los diferentes métodos de recalentamiento y como afecta la eficiencia térmica de un ciclo termodinámico [8].

IV. ANALISIS DE RESULTADOS

De acuerdo a los resultados obtenidos para los 6 procesos termodinámicos y el recalentamiento que se propone para mejorar la eficiencia térmica, se evidencian los siguientes aspectos respecto a cada uno de los estados.

Estado 1-2: Expansión isoentrópica Del vapor sobrecalentado.

Estado 2-3: Recalentamiento del vapor a presión constante (Isobárico)

Estado 3-4: Expansión isoentrópica del vapor sobrecalentado a zona de mezcla.

Estado 4-5: Saturación de la mezcla a estado líquido.

Estado 5-6: Incremento de la presión, paso por la bomba.

Estado 6-1: Adición de calor a presión constante, entrada de la caldera.

A) Descripción del Ciclo Rankine con Recalentamiento

El ciclo Rankine con recalentamiento de diferentes etapas que se describen de manera detallada, existe una expansión isoentrópica en la turbina de alta presión, además se realiza en la extracción un recalentamiento para aprovechar la entalpía existente, de esta manera el vapor en estado sobrecalentado se regresa a la caldera, con el objetivo de incrementar el potencial energético del fluido con el fin de producir trabajo en una segunda etapa como se puede observar en la figura 8.

El recalentamiento en un ciclo Rankine es un proceso termodinámico que consiste en aumentar la temperatura del vapor después de una primera expansión parcial en la turbina, con el fin de mejorar la eficiencia del ciclo y reducir la humedad del vapor en las etapas finales de expansión. En el contexto de un ciclo Rankine con recalentamiento, este proceso ocurre típicamente entre dos niveles de presión: alta presión y baja presión.

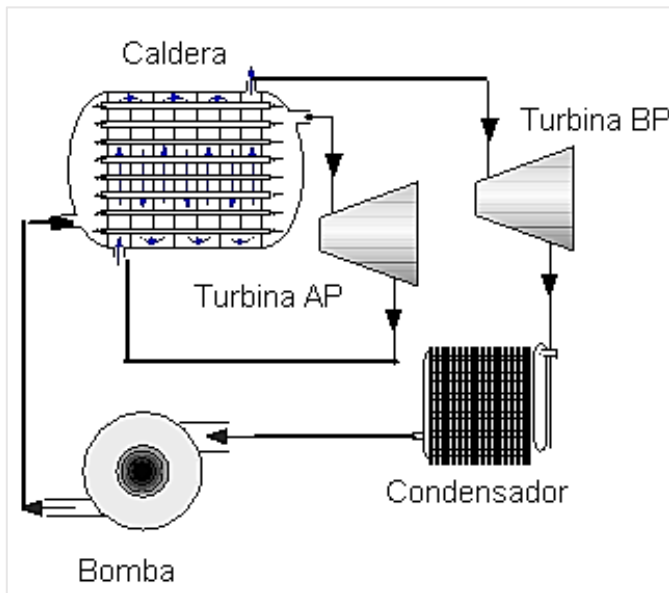


Fig. 8. Ciclo Rankine idea con recalentamiento, fuente: Esta investigación, diseño en EES.

1. Bomba de alimentación de la turbina de alta presión: El agua a alta presión es enviada a la caldera.

- Estado 5-6.

2. Caldera: El agua es convertida en vapor seco a alta presión, lleva el vapor a la región sobrecalentada en el domo.

- Estado 6 -1 primera etapa de calentamiento
- Estado 2-3 segunda etapa de calentamiento.

3. Turbina de alta presión (TAP): El vapor expandido entrega trabajo útil al eje de la turbina, es donde se produce la máxima potencia.

4. Recalentador: Después de la expansión inicial en la turbina de alta presión, el vapor es recalentado para aumentar su temperatura antes de ser enviado a la turbina de baja presión, con el fin de aprovechar la alta energía del vapor expandido dentro de la primera etapa.

5. Turbina de baja presión (TBP): El vapor recalentado se expande nuevamente, generando trabajo adicional.

6. Condensador: El vapor se condensa nuevamente en líquido, completando el ciclo para ser llevado a la bomba de alimentación.

Los estados mostrados se programan acorde a las variables termo físicas presentes en la Fig.9. con los valores de temperatura, presión, entropía del sistema.

```

EES Equations Window

"Propiedades del estado 4"
P[4]=10[kPa]
s[3]=s[4]
h[4]=Enthalpy(Water;P=P[4];s=s[4])
T[4]=T_sat(Water;P=P[4])

"trabajo específico de la turbina"

W_dot_neto=(h[1]-h[2])+(h[3]-h[4])

"Propiedades del estado 5"
x[5]=0
v[5]=Volume(Water;P=P[4];x=x[5])
h[5]=Enthalpy(Water;P=P[4];x=x[5])
s[5]=Entropy(Water;v=v[5];x=x[5])
T[5]=Temperature(Water;v=v[5];x=x[5])
"Potencia consumida por la bomba Wcons"
W_dot_cons=v[5]*(P[1]-P[4])

"Propiedades del estado 6"
h[6]=h[5]+W_dot_cons
T[6]=Temperature(Water;h=h[6];P=P[1])
s[6]=Entropy(Water;h=h[6];T=T[6])

"Eficiencia térmica del ciclo Rankine"
q_dot_in=(h[1]-h[6])+(h[3]-h[2])
q_dot_out=(h[4]-h[5])
ETHA_t=1-(q_dot_out/q_dot_in)

```

Fig. 9. programación del ciclo Rankine ideal con recalentamiento en EES fuente: esta investigación.

Para el análisis de un ciclo Rankine con recalentamiento se debe entender como una mejora del ciclo Rankine ideal simple, en el cual el vapor generado se expande parcialmente en una turbina, luego se vuelve a calentar a alta presión antes de continuar su expansión. Este proceso aumenta la eficiencia térmica del ciclo y reduce la humedad del vapor al final de la expansión.

Para la parametrización de un ciclo Rankine con recalentamiento, es fundamental comprenderlo como una evolución del ciclo Rankine ideal simple, diseñado específicamente para superar algunas de sus limitaciones térmicas y mecánicas. En este ciclo mejorado, el vapor inicialmente generado se expande en una turbina de alta presión hasta alcanzar una condición intermedia; luego, en lugar de continuar su expansión directamente, se dirige nuevamente a la caldera o generador de vapor, donde se somete a un proceso de recalentamiento a presión constante.

Este vapor recalentado, de mayor temperatura y energía, se introduce entonces en una segunda turbina de baja presión para completar su expansión hasta el condensador, de esta manera se aprovecha la potencia neta de la turbina en una segunda etapa, como se puede observar en la Fig. 10. Para el recalentamiento entre los estados 3 y 4 en la expansión isoentrópica del sistema.

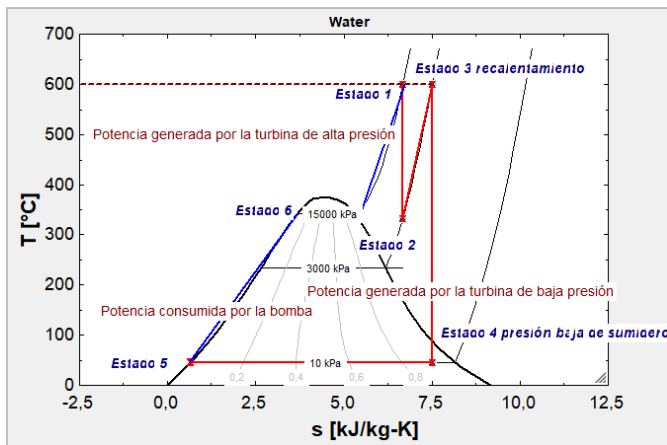


Fig. 10. Estados termodinámicos del ciclo Rankine ideal con recalentamiento, fuente: Esta investigación.

Se determina la eficiencia térmica con los valores del calor de salida del sumidero y el calor de entrada al ciclo de recalentamiento.

B) Potencia de una turbina

Para determinar la potencia de una turbina isoentrópica se toma las entalpías de entrada h_1 y salida h_2 aplicando la ecuación de la primera ley de la termodinámica para sistemas abiertos en estado estacionario, considerando el trabajo realizado por la turbina ver Fig.11. para el flujo de masa suministrado; sin embargo, se calculará la potencia por unidad de masa tomando las entalpías específicas de las tablas termodinámicas o los valores tomados del EES.

Se puede determinar que, al calcular la potencia de una turbina bajo condiciones isoentrópicas utilizando entalpías específicas obtenidas de tablas o del software E.E.S., se obtiene una estimación ideal del trabajo mecánico máximo aprovechable. Esta aproximación ignora las irreversibilidades internas propias del proceso real, como fricción y pérdidas térmicas; sin embargo, estas no fueron consideradas en el estudio.

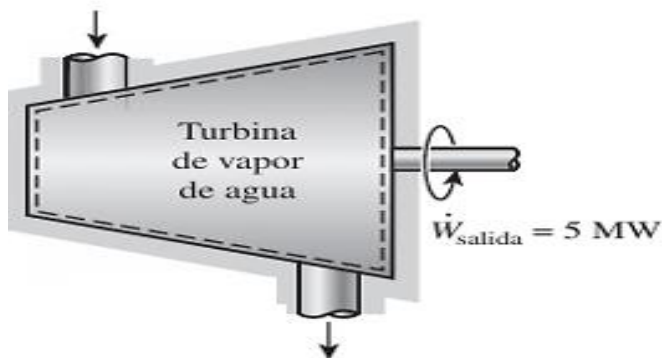


Fig. 11. Sistemas abiertos, turbina isoentrópica de 5 MW. Fuente: Çengel Termodinámica.

Análisis de primera ley para sistemas abiertos en estado estacionario, propiedades a la entrada de la turbina en una expansión isoentrópica del vapor sobrecalentado, tal como se puede apreciar en (2) acorde al texto Çengel & Boles (2021) correspondiente a un análisis de régimen estacionario en (2) [6].

$$\dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} = \frac{\Delta E, sistema}{dt} \quad (2)$$

Donde:

- W es la potencia de la turbina por unidad de masa en kJ/kg.
- h_1 es la entalpía específica de entrada (en kJ/kg).
- h_2 es la entalpía específica de salida (en kJ/kg).

$$\dot{W}_{Turbina} = h_1 - h_2 \quad (3)$$

$$\dot{W}_{Turbina} = 3581 \frac{kJ}{kg} - 3075 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{W}_{Turbina} = 506 \frac{kJ}{kg}$$

La salida de la turbina de alta presión aun contiene una energía alta por lo tanto se genera un recalentamiento pasando nuevamente la línea de vapor para pasarlo por una turbina de baja presión. La potencia de la turbina en su primera etapa se determina mediante el análisis de primera ley para un régimen estacionario el cual se puede apreciar en (3) acorde al texto Çengel & Boles (2021) análisis de primera ley para un equipo adiabático reversible para los estados 1 y 2 [6].

C) Potencia de la turbina de baja presión:
I.

La modelación del ciclo Rankine ideal con recalentamiento según Sánchez (2016) tiene como beneficio según frente a otros programas convencionales la incorporación de las tablas de propiedades de trabajo, ahorrar mucho tiempo en la resolución de problemas frente al método tradicional, de interpolación manual de las entalpías específicas, se puede emplear en realizar análisis de sensibilidad y ayudar a una mejor comprensión del principio de funcionamiento de los sistemas termodinámicos, equipos y la variación de las propiedades de los fluidos [9]. Acorde al texto Çengel & Boles (2021) en (4) y (5) para determinar la potencia en la segunda etapa de la turbina y la potencia neta total del sistema [6].

$$\dot{W}_{Turbina} = h3 - h4 \quad (4)$$

$$\dot{W}_{Turbina} = 3682 \frac{kJ}{kg} - 2380 \frac{kJ}{kg}$$

$$\dot{W}_{Turbina/baja} = 882 \frac{kJ}{kg}$$

Potencia neta:

$$\dot{W}_{neto-Turbina} = \sum W_{Turbina} \quad (5)$$

$$\dot{W}_{neto-Turbina} = 506 \frac{kJ}{kg} + 882 \frac{kJ}{kg}$$

La eficiencia térmica de un ciclo Rankine con recalentamiento se determina cuantificando los calores de entrada y salida del sistema, estos valores tienden a ser bajos debido a las diferentes irreversibilidades; sin embargo, se puede determinar mediante (5) acorde al texto Çengel & Boles (2021) para determinar la eficiencia de los diferentes ciclos de vapor basados en el ciclo Rankine simple y Rankine con recalentamiento [6].

$$n(tÉrmica) = 1 - \frac{\dot{q}_{out}}{\dot{q}_{in}} \quad (5)$$

$$n(tÉrmica) = 1 - \frac{h4 - h5}{(h1 - h6) + (h3 - h2)}$$

$$n(tÉrmica) = 1 - \frac{2188 \text{ kJ/kg}}{3982 \text{ kJ/kg}}$$

$$n(tÉrmica) = 45\%$$

Se aprecia la eficiencia térmica en el software EES un valor de 45,06%, como se puede apreciar en la tabla 1. De acuerdo a lo anterior Johnson y Williams (2019) en su investigación infieren que el recalentamiento mejora la eficiencia térmica de un ciclo Rankine, aumentando la potencia suministrada por la turbina mejorando el sistema operativo real de una planta [10]. De acuerdo a los parámetros establecidos la eficiencia térmica del ciclo termodinámico mejora considerablemente; sin embargo, es importante recalcar que dicho calculo corresponde a la eficiencia isoentrópica del ciclo termodinámico por lo que su eficiencia real puede disminuir en el análisis.

Acorde a las investigaciones realizadas por Zobeiry, N., & Humfeld, K. D. (2021). En el cual se expone de forma integral los desafíos inherentes a la modelación y control térmico en procesos de manufactura, particularmente cuando se involucran fenómenos complejos gobernados por Ecuaciones en Derivadas Parciales (EDPs), Como la conducción y convección de calor [11]. Tradicionalmente, tales problemas se abordan mediante métodos numéricos como los Elementos Finitos (FE), que, si bien son rigurosos y físicamente fundamentados, presentan limitaciones en cuanto a la rapidez computacional, lo cual presenta limitaciones que pueden ser resueltas mediante herramientas específicas de solución como evidencia en la Fig. 12.

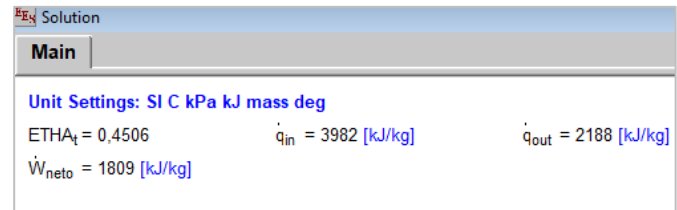


Fig. 12. Calculo de las eficiencias térmicas del ciclo Rankine con recalentamiento en EES. Fuente: Esta investigación EES.

La eficiencia térmica de un ciclo Rankine ideal no supera el 35% por lo que aplicar un recalentamiento puede incrementar la eficiencia hasta un 15%, llegando a un 45% con respecto al ciclo Rankine ideal simple aprovechando la potencia producida en la etapa de recalentamiento.

Acorde a los estudios realizados por Olivera Cosgalla & Sánchez (2021) aluden que siempre es importante poder medir y comparar los resultados obtenidos contra patrones establecidos, por lo que los métodos de análisis experimentales, es importante contrastar los elementos de la mecánica computacional y los fenómenos de la vida real; sin embargo, son buenas aproximaciones al análisis termodinámico [12].

VI. CONCLUSIONES

La simulación en EES del ciclo Rankine ideal con recalentamiento demostró un notable incremento en la eficiencia térmica del sistema, alcanzando un 45%. Este aumento significativo resalta la efectividad del recalentamiento como estrategia para mejorar el rendimiento de los ciclos de generación de energía.

Con respecto a la reducción de la presión del sumidero a 10 kPa contribuyó considerablemente a la mejora de la eficiencia del ciclo Rankine. La disminución de la presión del condensador permite un mayor aprovechamiento del trabajo útil en la turbina, optimizando así la conversión de energía térmica en energía mecánica. La implementación del recalentamiento en el ciclo Rankine no solo mejoró la eficiencia térmica, sino que también ayudó a reducir las tensiones térmicas en la turbina. Esto puede resultar en una mayor vida útil de los componentes y una operación más fiable del sistema de generación de energía.

Los valores tomados dentro de los rangos de presión de ingreso a la turbina, expansión isoentrópica y una segunda expansión para el recalentamiento, representa un incremento significativo en la eficiencia térmica de un ciclo, es importante tener en cuenta que el incremento de la potencia producida depende de factores como la diferencia de presión entre el sumidero y la salida en la segunda etapa.

Los resultados obtenidos del presente estudio modelado mediante el software *Engineering Equation Solver* (E.E.S.), permiten concluir que esta herramienta tecnológica representa un recurso valioso en la enseñanza y comprensión de sistemas termodinámicos complejos en ingeniería mediados por el uso de las TIC. Si bien el enfoque exploratorio de este estudio no permite una validación estadística formal, la experiencia de modelado y visualización de los procesos involucrados sugiere que el uso de E.E.S. favorece la comprensión de las variables termo físicas que influyen en la eficiencia del ciclo, así como una mayor claridad en la identificación de transformaciones energéticas críticas.

VII. RECOMENDACIONES

Dentro del estudio es importante tener en cuenta que el software es una aproximación matemática significativa, sin embargo para el caso no se tienen en cuenta las eficiencias de los equipos por lo que el rendimiento real del ciclo puede ser menor, adicionalmente tampoco se tienen en cuenta las pérdidas de presión por accesorios y cambios de sección lo que puede llevar a la disminución de la entalpía de los estados presentados, sin embargo la versatilidad del software permite realizar un correcto análisis de la mecánica de fluidos para tasar correctamente este tipo de pérdidas. La mecánica computacional utilizada corresponde a una herramienta pedagógica significativa que le permite al estudiante agilizar procesos matemáticos y realizar cálculos para la producción energética de manera más eficiente además de desarrollar competencias transversales en lenguajes de programación especializados y dedicados exclusivamente a los análisis termodinámicos energéticos.

1) Trabajos futuros y derivados del proyecto de investigación.

Este artículo deriva de la propuesta del CIP de sistemas termodinámicos avanzados aplicados en los diferentes ciclos y sistemas de refrigeración, los resultados de investigación derivaron en diferentes proyectos enfocados a la producción energética y a la conciencia ambiental incrementando tanto la eficiencia térmica de los ciclos termodinámicos como los coeficientes de operación de los ciclos de refrigeración, esto con el objetivo de parametrizar de manera adecuada los diseños de ingeniería, apoyados con herramientas tecnológicas, el estudio energético también sentó un precedente en el análisis de diferentes energías alternativas en el departamento de Nariño como la energía geotérmica en fuentes hiper entálpicas del volcán Cumbal además de un

estudio de la energía del viento como capítulo del libro del candidato a doctor Favio Nicolas Rosero, donde se analizan las diferentes condiciones del viento como fuente de producción sostenible en materia de energía.

REFERENCIAS

- [1] Y. O. Fernández, L. A. V. Fernández, E. G. Suarez, D. A. Villegas, J. N. Gamboa, y T. I. L. Echevarria, "Gestión del conocimiento y tecnologías de la información y comunicación (TICs) en estudiantes de ingeniería mecánica," *Apuntes Universitarios*, vol. 10, no. 1, pp. 77–88, 2020. Available: DOI: 10.17162/au.v10i1.419
- [2] V. H. Medina-Matute, L. E. Solorzano-Villegas, C. A. Medina-Jiménez, y D. G. V. P. Dimas, "Innovación Educativa para la Enseñanza de la Matemática en Ingeniería," *Rev. Cient. Arbitrada Investig. Comun., Mkt. y Empresa REICOMUNICAR*, vol. 7, no. 13 Ed. esp., pp. 2–12, 2024. Available: <https://reicomunicar.org/index.php/reicomunicar/articulo/view/219>
- [3] D. Mosquera-González, A. Valencia-Arias, M. Benjumea-Arias, y L. Palacios-Moya, "Factores asociados al uso de tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en los procesos de aprendizaje de estudiantes de ingeniería," *Formación Universitaria*, vol. 14, no. 2, pp. 121–132, 2021. Available: DOI: 10.4067/S0718-50062021000200121.
- [4] N. J. Hernández-Fernández, L. Zumalacárregui-de Cárdenas, y O. Pérez-Ones, "Simulación de condiciones de operación y fluidos de trabajo para ciclos Rankine orgánicos," **Rev. Investig. Desarro. Innov.**, vol. 10, no. 2, pp. 349–358, 2020. Available: <https://doi.org/10.19053/20278306.v10.n2.2020.10213>.
- [5] S. A. Vásquez, A. P. Barturén, y F. M. Carbajal, "Aplicación del simulador Aspen HYSYS en la resolución de problemas del ciclo Rankine regenerativo con recalentamiento intermedio," **Inf. Tecnol.**, vol. 31, no. 3, pp. 199–208, 2020. Available: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000300199>.
- [6] Y. A. Çengel y M. A. Boles, **Thermodynamics: An Engineering Approach**, 9th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2021.
- [7] M. A. Ortega Sarceda, **Optimización de la eficiencia de una planta de potencia solar con ciclo Rankine orgánico**, 2022. Available: <http://hdl.handle.net/2183/31764>
- [8] J. Smith y A. Brown, "Enhancing the efficiency of Rankine cycle with reheat: A review," **Int. J. Energy Res.**, vol. 44, no. 3, pp. 1234–1250, 2020.
- [9] R. C. Olivera, J. J. M. Cosgalla, y F. D. Sánchez, "Los métodos experimentales y su importancia en la enseñanza de la ingeniería mecánica como complemento al diseño asistido por computadora," 2021.
- [10] L. Johnson y T. Williams, "Impact of reheat on the performance of Rankine cycle: A case study," **Appl. Therm. Eng.**, vol. 150, pp. 250–260, 2019.
- [11] N. Zobeiry y K. D. Humfeld, "A physics-informed machine learning approach for solving heat transfer equation in

advanced manufacturing and engineering applications,"
Eng. Appl. Artif. Intell., vol. 101, Art. no. 104232, 2021.
Available: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104232>

- [12] J. D. Sánchez Más, *Modelización con el software Engineering Equation Solver (EES) para la optimización de una central térmica de un ciclo real de turbina de vapor utilizado en la central nuclear de Cofrentes*, 2016.



Diego Alejandro Narváez

Meza: Mechanical Engineer graduated from the Technological University of Pereira, with a Master's degree in University Teaching from the University of Nariño. He is a tenured professor in the Faculty of Engineering at the Universidad Autónoma de Nariño, teaching in both the

Mechanical Engineering and Electronic Engineering programs. He is a member of the Latin American Network of Research Seedbeds, project director, and coordinator of the CIP for advanced systems applied to the thermo-physical model. He also serves as a consultant for the development of qualified registrations for engineering programs, is a member of the undergraduate project evaluation committee, and a technical advisor focused on research areas such as machine design, industrial equipment—where he has supervised technological development projects including prototypes of agro-industrial machines, materials engineering research with a patent in process, and thermodynamic analyses of steam and refrigeration cycles for cogeneration—and the capacity for science, technology, and innovation in endogenous territorial development. He previously worked as a full-time teacher in the area of natural sciences, teaching physics at the Colegio del Sagrado Corazón de Jesús Bethlemitas in Pasto, where he also served as coordinator of the Natural Sciences and Environmental Education department. He is currently a full-time professor in the Faculty of Engineering at the Universidad Mariana, in the Systems Engineering program, where he supervises undergraduate projects as an advisor. He is also an honorary member of the academic-scientific committee of *Tecno Science* journal, serving as an external reviewer.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9236-6450>