

Análisis termodinámico de una planta Termoeléctrica de vapor de 210 MW mediante un ciclo Rankine ideal simple

Thermodynamic analysis of a 210 MW Steam-Powered Thermoelectric plant using a simple ideal Rankine Cycle

Josephin G. Santillán Zavala ^a, Carlos A. Venta Gutiérrez ^b, Arturo Cruz Avilés ^c, Jorge Zuno Silva ^d, Martín Ortiz Domínguez ^e

Abstract:

The Rankine cycle constitutes the operating basis of most steam power plants used worldwide for electricity generation. Its study allows understanding the mechanisms involved in the conversion of thermal energy into mechanical and electrical energy. In this work, a thermodynamic analysis of a 210 MW steam power plant operating under an ideal simple Rankine cycle is developed. Steam enters the turbine at 10 MPa and 500 °C, while the condenser pressure is maintained at 10 kPa. The mathematical model is based on the First Law of Thermodynamics for steady-flow systems and on mass and energy conservation equations applied to each component of the cycle. Thermodynamic properties at every state, steam quality at turbine exit, thermal efficiency, and the required mass flow rate are determined. Additionally, the temperature-entropy (T-s) diagram is analyzed and the energetic behavior of each process is discussed. Results indicate a steam quality of 0.793 at turbine exit, a thermal efficiency of 40.2%, and a mass flow rate of approximately 165 kg/s, demonstrating the capability of the Rankine cycle to generate large amounts of electrical power through the efficient use of water vapor.

Keywords:

Rankine cycle, thermodynamics, steam power plant, thermal efficiency, steam turbine, power generation

Resumen:

El ciclo Rankine constituye la base de operación de la mayoría de las centrales termoeléctricas de vapor utilizadas para la generación de energía eléctrica a nivel mundial. Su estudio permite comprender los mecanismos de conversión de energía térmica en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica. En este trabajo se desarrolla el análisis termodinámico de una planta termoeléctrica de vapor con una potencia neta de 210 MW que opera bajo un ciclo Rankine ideal simple. El vapor ingresa a la turbina a una presión de 10 MPa y una temperatura de 500 °C, mientras que la presión de condensación es de 10 kPa. El modelo matemático se fundamenta en la Primera Ley de la Termodinámica aplicada a sistemas de flujo estacionario, así como en las relaciones de conservación de masa y energía para cada componente del ciclo. Se determinan las propiedades termodinámicas en cada estado, la calidad del vapor a la salida de la turbina, la eficiencia térmica y el flujo másico requerido para generar la potencia especificada. Adicionalmente, se presenta el diagrama temperatura-entropía (T-s) y se discute el comportamiento energético de cada proceso. Los resultados muestran una calidad de vapor de 0.793 a la salida de la turbina, una eficiencia térmica de 40.2 % y un flujo másico aproximado de 165 kg/s,

^a Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0006-0587-8754>, Email: sa428628@uaeh.edu.mx

^b Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0004-6851-251X>, Email: ve407003@uaeh.edu.mx

^c Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-0455-1646>, Email: arturo_cruz8085@uaeh.edu.mx

^d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-1997-5399>, Email: jorge_zuno@uaeh.edu.mx

^e Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-4475-9804>, Email: martin_ortiz@uaeh.edu.mx

evidenciando la capacidad del ciclo Rankine para producir grandes cantidades de potencia eléctrica mediante la utilización eficiente del vapor de agua.

Palabras Clave:

Ciclo Rankine, termodinámica, planta termoeléctrica, eficiencia térmica, turbina de vapor, generación de energía

Introducción

La creciente demanda energética mundial ha impulsado el desarrollo de tecnologías capaces de transformar eficientemente diversas fuentes de energía en electricidad. Entre ellas, las centrales termoeléctricas basadas en vapor de agua continúan desempeñando un papel fundamental debido a su elevada capacidad de generación y confiabilidad operativa. El principio de funcionamiento de estas instalaciones se fundamenta en el ciclo Rankine, propuesto por William John Macquorn Rankine durante el siglo XIX y ampliamente utilizado en sistemas de potencia modernos. El ciclo Rankine ideal representa una aproximación teórica al comportamiento de una planta termoeléctrica y está compuesto por cuatro procesos fundamentales: compresión isentrópica en una bomba, adición de calor a presión constante en una caldera, expansión isentrópica en una turbina y rechazo de calor a presión constante en un condensador. Este ciclo constituye una herramienta fundamental para evaluar el desempeño energético de centrales eléctricas y establecer estrategias para incrementar su eficiencia térmica. La Figura 1, muestra el esquema general de funcionamiento de una planta termoeléctrica de vapor, en la cual la energía química contenida en un combustible es transformada en energía eléctrica mediante una serie de procesos termodinámicos. El sistema está constituido principalmente por una caldera, una turbina de vapor, un condensador, una bomba de alimentación y un generador

eléctrico. El proceso inicia con la combustión del combustible en la caldera, donde se libera energía térmica que es transferida al agua contenida en los tubos del generador de vapor. Como resultado, el agua se calienta hasta alcanzar condiciones de vapor sobrecalentado a alta presión y temperatura. Este vapor es conducido hacia la turbina, donde se expande y convierte parte de su energía térmica en energía mecánica de rotación.

La energía mecánica producida por la turbina acciona un generador eléctrico acoplado a su eje, permitiendo la conversión de energía mecánica en energía eléctrica, la cual posteriormente es enviada a la red de distribución mediante líneas de transmisión. Después de atravesar la turbina, el vapor pierde presión y temperatura, por lo que es dirigido hacia el condensador. En este equipo, el vapor cede calor al sistema de enfriamiento y se transforma nuevamente en agua líquida. El calor rechazado al ambiente es disipado a través de una torre de enfriamiento, donde el agua de refrigeración reduce su temperatura para ser reutilizada. Finalmente, el agua condensada es impulsada por una bomba de alimentación hacia la caldera, incrementando su presión y cerrando así el ciclo termodinámico. Este proceso continuo corresponde al ciclo Rankine, ampliamente utilizado en centrales termoeléctricas debido a su alta capacidad de generación y confiabilidad operativa.

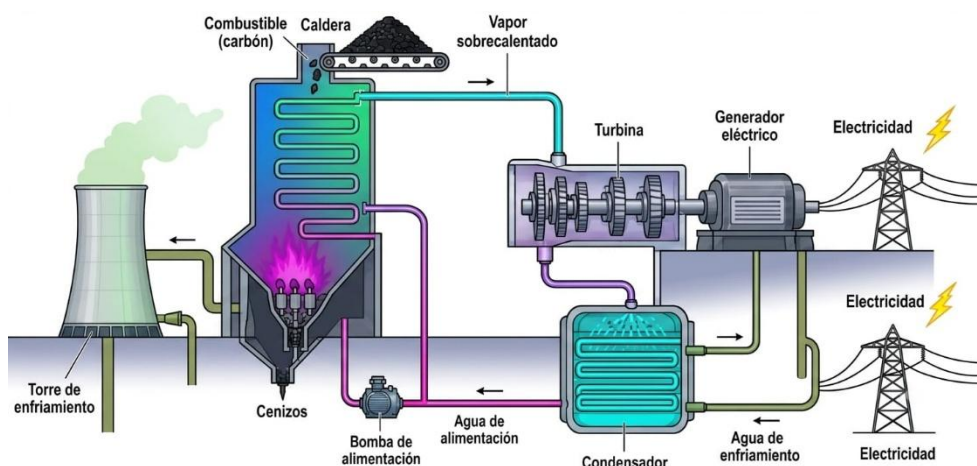


Figura 1. Esquema general de una planta termoeléctrica de vapor basada en el ciclo Rankine. El sistema está compuesto por una caldera, una turbina de vapor, un generador eléctrico, un condensador, una bomba de alimentación y una torre

de enfriamiento. El combustible suministra energía térmica a la caldera para producir vapor sobrecalentado, el cual se expande en la turbina generando trabajo mecánico que posteriormente es transformado en energía eléctrica mediante el generador. El vapor de escape es condensado y recirculado hacia la caldera por medio de la bomba de alimentación, completando así el ciclo termodinámico. Las flechas indican la dirección del flujo de trabajo y de las transferencias de calor q_{in} y q_{out} , correspondientes al calor suministrado y rechazado durante el proceso de generación de energía. Fuente: Elaboración propia.

Diversos estudios han demostrado que el incremento de la temperatura y presión del vapor sobrecalentado mejora significativamente la eficiencia del ciclo debido al aumento del trabajo específico generado en la turbina. Asimismo, la reducción de la presión de condensación contribuye a incrementar la producción neta de trabajo al ampliar la expansión del vapor. Por estas razones, el análisis detallado de los estados termodinámicos resulta indispensable para optimizar el diseño y operación de plantas de generación eléctrica. El objetivo de este trabajo consiste en desarrollar el análisis termodinámico completo de una planta termoeléctrica de 210 MW que opera mediante un ciclo Rankine ideal simple, determinando las propiedades termodinámicas de cada estado, la calidad del vapor a la salida de la turbina, la eficiencia térmica del sistema y el flujo másico requerido para satisfacer la potencia especificada.

Modelo Matemático

Descripción del ciclo

La Figura 2, muestra una representación esquemática del ciclo Rankine ideal, el cual constituye el principio termodinámico fundamental utilizado en las centrales termoeléctricas para la generación de energía eléctrica. El ciclo está integrado por cuatro componentes principales: una bomba, una caldera, una turbina y un condensador, conectados mediante un circuito cerrado por el que circula agua y vapor de agua como fluido de trabajo. El proceso inicia en el estado 1, donde el fluido se encuentra en forma líquida saturada a baja presión a la salida del condensador. Posteriormente, el agua es impulsada hacia la bomba, donde experimenta un incremento de presión mediante un proceso idealmente isentrópico. Como resultado, el fluido alcanza el estado 2, caracterizado por una elevada presión y un ligero aumento de temperatura.

A continuación, el agua presurizada ingresa a la caldera, donde recibe una transferencia de calor $\dot{q}_{in}$ proveniente de la combustión de un combustible o de cualquier otra fuente térmica. Durante este proceso, el fluido experimenta calentamiento, evaporación y, en muchos casos, sobrecalentamiento, hasta alcanzar el estado 3, correspondiente a vapor de alta temperatura y presión. El

vapor generado es conducido hacia la turbina, donde se expande de manera aproximadamente isentrópica, transformando parte de su energía térmica en energía mecánica. Esta energía mecánica se utiliza para accionar un generador eléctrico acoplado al eje de la turbina. Como consecuencia de la expansión, la presión y temperatura del vapor disminuyen hasta alcanzar el estado 4. Finalmente, el vapor de escape ingresa al condensador, donde rechaza calor al medio ambiente en forma de $\dot{q}_{out}$. Durante este proceso, el vapor se condensa y regresa al estado líquido saturado, completando el ciclo y retornando nuevamente al estado 1 para reiniciar el proceso.

En términos energéticos, la caldera representa el componente donde se suministra energía al sistema, mientras que la turbina constituye el dispositivo productor de trabajo útil. Por su parte, el condensador permite la extracción del calor residual y la bomba garantiza la recirculación continua del fluido de trabajo. La combinación de estos cuatro procesos permite convertir energía térmica en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica con alta eficiencia, razón por la cual el ciclo Rankine continúa siendo la base de operación de la mayoría de las centrales termoeléctricas modernas.

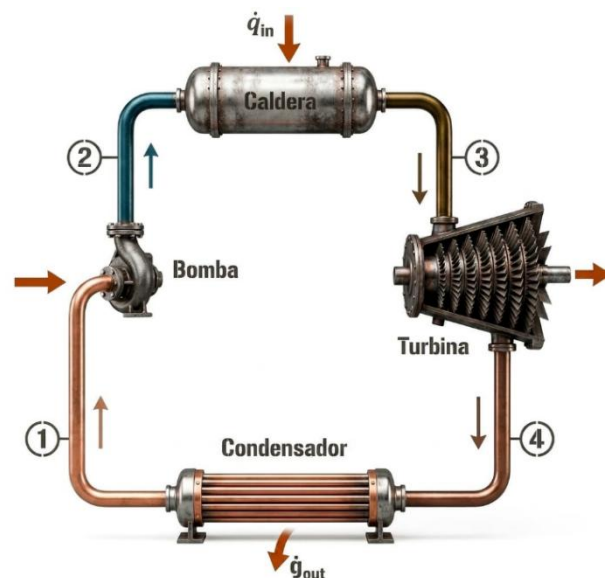


Figura 2. Representación esquemática del ciclo Rankine ideal utilizado en centrales termoeléctricas de vapor. El ciclo está constituido por una bomba, una caldera, una

turbina y un condensador. El agua líquida es comprimida desde el estado 1 al estado 2 mediante la bomba; posteriormente recibe calor $\dot{q}_{in}$ en la caldera, transformándose en vapor de alta presión y temperatura (estado 3). El vapor se expande en la turbina produciendo trabajo útil y alcanzando el estado 4. Finalmente, el vapor cede calor $\dot{q}_{out}$ en el condensador, donde se licúa y retorna al estado inicial para completar el ciclo termodinámico. Las flechas indican la dirección del flujo del fluido de trabajo y las interacciones energéticas asociadas a cada proceso. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3, muestra el diagrama temperatura-entropía (T-S) del ciclo Rankine ideal, utilizado para representar el funcionamiento termodinámico de una central termoeléctrica de vapor. En el eje vertical se encuentra la temperatura (T) y en el eje horizontal la entropía específica (S). La campana de saturación delimita las regiones de líquido comprimido, mezcla líquido-vapor y vapor sobrecalentado, indicando además la ubicación del punto crítico del agua. El proceso 1-2 corresponde al bombeo del agua líquida desde la presión del condensador (10 kPa) hasta la presión de la caldera (10 MPa). Debido a que el agua es prácticamente incompresible, este proceso requiere una pequeña cantidad de trabajo y se aproxima como una compresión isentrópica.

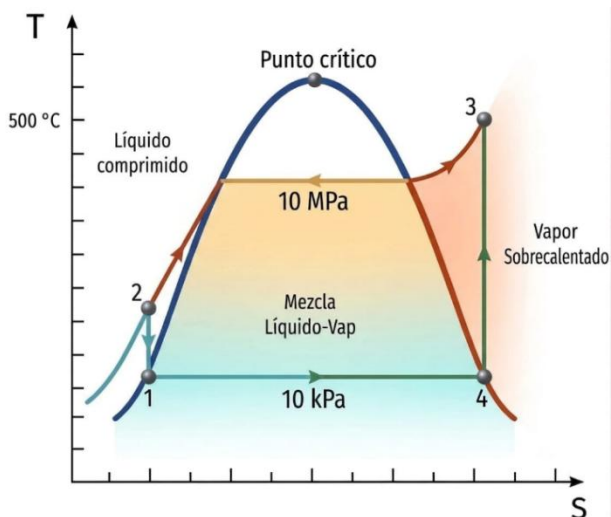


Figura 3. Diagrama temperatura-entropía (T-S) del ciclo Rankine ideal operando entre una presión de caldera de 10 MPa y una presión de condensador de 10 kPa. Los procesos representados corresponden a la compresión isentrópica en la bomba (1-2), la adición de calor a presión constante en la caldera (2-3), la expansión isentrópica en la turbina (3-4) y el rechazo de calor a presión constante en el condensador (4-1). Fuente: Elaboración propia.

El proceso 2-3 representa la adición de calor en la caldera a presión constante de 10 MPa. Durante esta etapa, el agua pasa de líquido comprimido a vapor saturado y posteriormente a vapor sobrecalentado, incrementando significativamente su temperatura y contenido energético. La expansión 3-4 ocurre en la turbina y se considera un proceso isentrópico ideal. En esta etapa, el vapor sobrecalentado realiza trabajo mecánico al expandirse desde la presión de la caldera hasta la presión del condensador (10 kPa), disminuyendo su temperatura mientras aumenta la fracción de humedad. Finalmente, el proceso 4-1 corresponde al rechazo de calor en el condensador a presión constante de 10 kPa, donde el vapor húmedo se transforma nuevamente en líquido saturado, completando el ciclo termodinámico. Este ciclo constituye el modelo fundamental para el análisis de plantas termoeléctricas de vapor y permite evaluar parámetros importantes como la eficiencia térmica, el trabajo neto producido y las transferencias de calor en cada uno de los componentes principales del sistema.

Compresión isentrópica en la bomba (Estado 1 → Estado 2)

En la Tabla 1 presenta las propiedades termodinámicas del agua saturada a una presión de 10 kPa, obtenidas de las tablas de vapor. Estas propiedades corresponden al estado del fluido a la salida del condensador (estado 1) en el ciclo Rankine ideal y constituyen la base para el cálculo del trabajo de la bomba, la transferencia de calor en la caldera y el análisis de la expansión en la turbina. Entre las propiedades reportadas se encuentran la temperatura de saturación (T_{sat}), el volumen específico del líquido saturado (v_f), la energía interna específica (u_f), la entalpía específica del líquido saturado (h_f), la entropía específica (s_f), así como los cambios de entalpía (h_{fg}) y entropía (s_{fg}) asociados al proceso de vaporización. Estos parámetros permiten determinar el comportamiento energético del fluido de trabajo durante las diferentes etapas del ciclo termodinámico y son indispensables para la evaluación de la eficiencia térmica de la planta termoeléctrica.

Tabla 1. Propiedades termodinámicas del agua saturada a una presión de 10 kPa utilizadas para la determinación de las condiciones del estado 1 en el ciclo Rankine ideal. Los valores incluyen la temperatura de saturación, volumen específico, energía interna, entalpía, entropía y las propiedades asociadas al cambio de fase líquido-vapor obtenidas de las tablas de vapor de agua. Fuente: Elaboración propia.

Propiedad	Valor
T_{sat}	45.81 °C
v_f	0.001010 m ³ /kg
u_f	191.80 kJ/kg
h_f	191.81 kJ/kg
s_f	0.6492 kJ/(kg·K)
h_{fg}	2392.8 kJ/kg
s_{fg}	7.4996 kJ/(kg·K)

Por lo tanto:

$$h_1 = h_f = 191.81 \text{ kJ / kg}, \quad (1)$$

$$v_1 = v_f = 0.001010 \text{ m}^3 / \text{kg}, \quad (2)$$

Porque el estado 1 se encuentra exactamente sobre la línea de líquido saturado.

$$P_1 = 10 \text{ kPa}, \quad (3)$$

Debido a que el agua líquida es prácticamente incompresible, el trabajo específico requerido por la bomba puede determinarse mediante:

$$w_b = v_1(P_2 - P_1), \quad (4)$$

donde:

- v_1 es el volumen específico del líquido a la entrada de la bomba,
- P_2 es la presión de salida de la bomba,
- P_1 es la presión de entrada.

La presión de salida corresponde a la presión de operación de la caldera:

$$P_2 = 10 \text{ MPa} = 10000 \text{ kPa}. \quad (5)$$

Sustituyendo las Ecuaciones (2), (3) y (5) en la Ecuación (4), obtenemos:

$$w_b = 10.09 \text{ kJ / kg}. \quad (6)$$

Este resultado representa la energía mecánica suministrada por la bomba para elevar la presión del agua antes de ingresar a la caldera. Aplicando la primera ley de la Termodinámica para un dispositivo de flujo estacionario:

$$h_2 = h_1 + w_b, \quad (7)$$

Sustituyendo las Ecuaciones (6) y (1) en la Ecuación (7), por consiguiente, la entalpía específica del agua a la salida de la bomba es:

$$h_2 = 201.90 \text{ kJ / kg}. \quad (8)$$

Adición de calor en la caldera (Estado 2 → Estado 3)

Una vez comprimida, el agua ingresa a la caldera donde recibe calor a presión constante de 10 MPa. Durante este proceso el fluido atraviesa las etapas de calentamiento sensible, vaporización y sobrecalentamiento hasta alcanzar una temperatura de 500 °C. Las propiedades del vapor sobrecalentado a la salida de la caldera obtenidas de la Tabla 2 termodinámicas son:

Tabla 2. Propiedades del vapor sobrecalentado a 10 MPa utilizadas para determinar las condiciones del estado 3 del ciclo Rankine ideal. Los valores de entalpía y entropía fueron obtenidos de las tablas de vapor sobrecalentado. Fuente: Elaboración propia.

P (MPa)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg·K)
10	400	3065.3	6.213
10	450	3213.6	6.414
10	500	3375.1	6.5995
10	550	3546.3	6.767

Los valores de h_3 y s_3 se obtienen directamente de la Tabla 2 de vapor sobrecalentado, porque el estado 3 se encuentra a $P_3 = 10 \text{ MPa}$ y $T_3 = 500^\circ\text{C}$. Observa que a una presión de 10 MPa la temperatura de saturación es aproximadamente $T_{sat} \approx 311^\circ\text{C}$ y como: $500^\circ\text{C} > 311^\circ\text{C}$, el agua ya no está en la región de saturación, sino en la región de vapor sobrecalentado, por lo que de acuerdo con la Tabla 2, que se refiere al vapor sobrecalentado, se tiene que:

$$h_3 = 3375.1 \text{ kJ / kg}, \quad (9)$$

$$s_3 = 6.5995 \text{ kJ / (kg} \cdot \text{K)}. \quad (10)$$

El calor específico suministrado en la caldera se calcula mediante:

$$q_{in} = h_3 - h_2. \quad (11)$$

Sustituyendo las Ecuaciones (8) y (9) en la Ecuación (11), por lo tanto, la energía térmica aportada al fluido de trabajo es:

$$q_{in} = 3173.2 \text{ kJ / kg.} \quad (12)$$

Este valor constituye la principal entrada energética del ciclo.

Expansión isentrópica en la turbina (Estado 3 → Estado 4)

En una turbina ideal se supone que la expansión ocurre de manera adiabática y reversible, es decir, como un proceso isentrópico (Tabla 2):

$$s_4 = s_3 = 6.5995 \text{ kJ / (kg} \cdot \text{K)}. \quad (13)$$

La presión del condensador (ver Figura 3):

$$P_4 = 10 \text{ kPa.} \quad (14)$$

De acuerdo con la Tabla 1, las propiedades de saturación corresponden a:

$$s_f = 0.6492 \text{ kJ / (kg} \cdot \text{K)}, \quad (15)$$

$$s_{fg} = 7.4996 \text{ kJ / (kg} \cdot \text{K)}. \quad (16)$$

Debido a que:

$$s_f < s_4 < s_g. \quad (17)$$

El estado 4 se localiza dentro de la región bifásica, por lo que es necesario calcular la calidad del vapor. La calidad se determina mediante:

$$x_4 = \frac{s_4 - s_f}{s_{fg}}. \quad (18)$$

Sustituyendo las Ecuaciones (13), (15) y (16) en la Ecuación (18) se tiene:

$$x_4 = 0.793. \quad (19)$$

Esto indica que aproximadamente el 79.3 % de la masa permanece en fase vapor mientras que el resto corresponde a líquido suspendido. Para determinar la entalpía en el estado 4:

$$h_4 = h_f + x_4 h_{fg}. \quad (20)$$

De la Tabla 1, se tiene:

$$h_f = 191.81 \text{ kJ / kg,} \quad (21)$$

$$h_{fg} = 2392.8 \text{ kJ / kg.} \quad (22)$$

Sustituyendo las Ecuaciones (21), (22) y (19) en la Ecuación (20):

$$h_4 = 2089.3 \text{ kJ / kg.} \quad (23)$$

Trabajo específico de la turbina

El trabajo producido por la turbina corresponde a la disminución de entalpía del vapor durante la expansión:

$$w_f = h_3 - h_4. \quad (24)$$

Sustituyendo las Ecuaciones (9) y (23) en la Ecuación (24) obtenemos el trabajo de la turbina:

$$w_t = 1285.8 \text{ kJ / kg.} \quad (25)$$

Trabajo neto del ciclo

El trabajo neto es la diferencia entre el trabajo producido por la turbina y el trabajo consumido por la bomba:

$$w_{net} = w_t - w_b. \quad (26)$$

Sustituyendo las Ecuaciones (6) y (25) en la Ecuación (26):

$$w_{net} = 1275.7 \text{ kJ / kg.} \quad (27)$$

Eficiencia térmica del ciclo Rankine

La eficiencia térmica representa la fracción del calor suministrado que se transforma en trabajo útil:

$$\eta = \frac{w_{net}}{q_{in}}. \quad (28)$$

Sustituyendo las Ecuaciones (27) y (12) en la Ecuación (28):

$$\eta_{th} = 0.402. \quad (29)$$

Expresando en porcentaje a la Ecuación (29):

$$\eta_{th} = 40.2\% \quad (30)$$

Este resultado indica que aproximadamente el 40 % de la energía térmica suministrada en la caldera se convierte en trabajo mecánico útil.

Flujo másico requerido

La planta desarrolla una potencia neta de:

$$\dot{W}_{net} = 210000 \text{ kJ / s.} \quad (31)$$

El flujo másico necesario para producir dicha potencia se calcula mediante:

$$\dot{m} = \frac{\dot{W}_{net}}{w_{net}}. \quad (32)$$

Sustituyendo las Ecuaciones (27) y (31) en la Ecuación (32):

$$\dot{m} = 164.6 \text{ kg / s.} \quad (33)$$

Lo anterior significa que la central termoeléctrica requiere aproximadamente 165 kg de vapor por segundo para generar una potencia neta de 210 MW bajo las condiciones ideales consideradas en el presente análisis.

Resultados y Discusión

Los resultados muestran que el vapor abandona la turbina con una calidad de 0.793, indicando que aproximadamente el 79.3 % de la mezcla permanece en fase vapor mientras que el resto se encuentra en forma líquida. Este fenómeno es común en ciclos Rankine simples y constituye una limitación práctica debido a que la presencia de humedad puede provocar erosión en los álabes de la turbina. La eficiencia térmica obtenida de 40.2 % es representativa de centrales termoeléctricas modernas que operan con vapor sobrecalentado a altas presiones. Este valor indica que aproximadamente el 40 % del calor suministrado en la caldera es transformado en trabajo útil, mientras que el resto es rechazado principalmente en el condensador.

El trabajo específico generado por la turbina es considerablemente mayor que el consumido por la bomba, lo que demuestra que el principal aporte energético del ciclo proviene de la expansión del vapor. Además, el flujo másico calculado de 165 kg/s evidencia

la gran cantidad de vapor requerida para producir una potencia eléctrica de 210 MW.

Simulación del Ciclo Rankine

La simulación del ciclo puede implementarse mediante software especializado como MATLAB®, EES®, Aspen HYSYS® o Simulink®, utilizando las ecuaciones termodinámicas desarrolladas en este trabajo. El diagrama T-s permite visualizar claramente la compresión isentrópica, el calentamiento a presión constante, la expansión isentrópica y el rechazo de calor. Los resultados obtenidos mediante simulación reproducen adecuadamente el comportamiento teórico del ciclo Rankine ideal, verificando la consistencia de las propiedades termodinámicas calculadas y confirmando los valores de calidad del vapor, eficiencia térmica y flujo másico requeridos para la generación eléctrica.

Conclusiones

El análisis termodinámico realizado permitió caracterizar completamente el comportamiento de una planta termoeléctrica de vapor de 210 MW operando bajo un ciclo Rankine ideal simple. Los resultados muestran que la calidad del vapor a la salida de la turbina es de 0.793, lo que indica la presencia de humedad durante la expansión y pone de manifiesto la necesidad de emplear estrategias de sobrecalentamiento o recalentamiento para mejorar las condiciones de operación. La eficiencia térmica obtenida fue de 40.2 %, valor que refleja un aprovechamiento energético adecuado del calor suministrado en la caldera. Asimismo, se determinó que el flujo másico necesario para generar la potencia especificada es aproximadamente 165 kg/s.

El estudio demuestra la importancia de los principios de la termodinámica para evaluar el desempeño de sistemas de generación eléctrica y proporciona una base sólida para el análisis de configuraciones más avanzadas, tales como ciclos Rankine con recalentamiento, regeneración o múltiples etapas de expansión.

Anexo A:

Este programa calcula automáticamente la calidad del vapor, el trabajo de la bomba, el trabajo de la turbina, la eficiencia térmica y el flujo másico requerido para generar 210 MW.

```
#
=====
# CICLO RANKINE IDEAL SIMPLE
# Planta termoeléctrica de 210 MW
#
=====

# Datos termodinámicos

# Estado 1 (agua saturada a 10 kPa)
h1 = 191.81      # kJ/kg
v1 = 0.00101    # m^3/kg

# Presiones
P1 = 10          # kPa
P2 = 10000       # kPa (10 MPa)

# Estado 3 (10 MPa, 500 °C)
h3 = 3375.1      # kJ/kg
s3 = 6.5995      # kJ/(kg·K)

# Propiedades de saturación a 10 kPa
sf = 0.6492
sfg = 7.4996

hf = 191.81      # kJ/kg
hfg = 2392.8     # kJ/kg

# Potencia de la planta
Potencia = 210000 # kW

#
=====
# Trabajo de la bomba
#
=====

wb = v1 * (P2 - P1)

h2 = h1 + wb

#
=====
# Calidad a la salida de la turbina
#
=====

x4 = (s3 - sf) / sfg

#
=====
# Entalpía a la salida de la turbina
```

```
#
=====

h4 = hf + x4 * hfg

#
=====
# Trabajo de la turbina
#
=====

wt = h3 - h4

#
=====
# Trabajo neto
#
=====

wnet = wt - wb

#
=====
# Calor suministrado
#
=====

qin = h3 - h2

#
=====
# Eficiencia térmica
#
=====

eta = wnet / qin

#
=====
# Flujo másico
#
=====

m_dot = Potencia / wnet

#
=====
# Resultados
#
=====

print("\nRESULTADOS DEL CICLO RANKINE\n")

print(f"Trabajo de la bomba = {wb:.2f} kJ/kg")
print(f"Entalpía estado 2 = {h2:.2f} kJ/kg")

print(f"Calidad del vapor x4 = {x4:.3f}")

print(f"Entalpía estado 4 = {h4:.2f} kJ/kg")
```



```
print(f"\nTrabajo de la turbina = {wt:.2f} kJ/kg")  
print(f"Trabajo neto = {wnet:.2f} kJ/kg")  
print(f"\nCalor suministrado = {qin:.2f} kJ/kg")  
print(f"\nEficiencia térmica = {eta*100:.2f} %")  
print(f"\nFlujo másico requerido = {m_dot:.2f} kg/s")
```

Resultados esperados del ciclo Rankine

Trabajo de la bomba = 10.09 kJ/kg
Entalpía estado 2 = 201.90 kJ/kg
Calidad del vapor x_4 = 0.793
Entalpía estado 4 = 2089.50 kJ/kg
Trabajo de la turbina = 1285.60 kJ/kg
Trabajo neto = 1275.50 kJ/kg
Calor suministrado = 3173.20 kJ/kg
Eficiencia térmica = 40.20 %
Flujo másico requerido = 164.64 kg/s

Referencias

- Borgnakke, C., & Sonntag, R. E. (2013). *Thermodynamics* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). *Thermodynamics: An engineering approach* (9th ed.). McGraw-Hill Education..
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2018). *Fundamentals of engineering thermodynamics* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Munson, B. R., & DeWitt, D. P. (2014). *Introduction to thermal systems engineering: Thermodynamics, fluid mechanics, and heat transfer*. John Wiley & Sons.
- Nag, P. K. (2017). *Power plant engineering* (4th ed.). McGraw-Hill Education.