

# DISEÑO Y ANALISIS TERMODINAMICO DE UNA PLANTA DE ENERGIA DE VAPOR BINARIO METAL LIQUIDO-AGUA

Benavides Becoche David Steven,  
Benavides chamorro Sebastián Arturo

## 1. Introducción

Las máquinas térmicas son dispositivos que convierten la energía térmica en trabajo mecánico mediante ciclos termodinámicos. Funcionan transfiriendo calor desde una fuente de alta temperatura, realizando trabajo útil y expulsando el calor residual a un sumidero de baja temperatura. Ejemplos comunes incluyen motores de combustión interna, como los que se encuentran en automóviles, y turbinas de vapor utilizadas en plantas de energía.

Para mejorar la eficiencia en la generación de energía eléctrica, se emplean las centrales térmicas de ciclo combinado. Estas instalaciones integran dos ciclos termodinámicos:

- Ciclo de Brayton: Utiliza una turbina de gas donde el aire comprimido se mezcla con combustible y se quema, generando gases de alta temperatura que se expanden en la turbina para producir trabajo mecánico.
- Ciclo de Rankine: Aprovecha el calor residual de los gases de escape de la turbina de gas para generar vapor en una caldera de recuperación. Este vapor impulsa una turbina de vapor adicional, generando más electricidad.

La combinación de estos ciclos permite alcanzar una mayor eficiencia energética en comparación con las centrales térmicas convencionales, ya que se maximiza el aprovechamiento del calor generado en el proceso.

En resumen, las máquinas térmicas y los ciclos

combinados son fundamentales en la conversión de energía térmica en trabajo mecánico y eléctrico, desempeñando un papel crucial en la generación de energía en la sociedad moderna.

### Problema de Investigación:

¿Cómo aplicar los procesos de transformación de energía utilizando el ciclo Rankine combinado de vapor, optimizando la eficiencia termodinámica y aumentando el trabajo útil neto de una máquina térmica disminuyendo la destrucción energética?

### Objetivo del Estudio:

- Realizar una revisión documental de la literatura sobre ciclos Rankine combinados y su aplicación, identificando avances tecnológicos y metodologías utilizadas en la optimización de la eficiencia térmica.
- Parametrizar las propiedades termo físicas del ciclo Rankine combinado de mercurio y agua, basados en la producción energética de las turbinas de vapor.
- Diseñar una simulación en el software ESS termodinámico del ciclo Combinado de vapor.
- Analizar la respuesta energética del ciclo Rankine combinado aplicando los parámetros de eficiencia térmica óptima

### Justificación:

Enfocados en el diseño se busca abordar la creciente demanda de energía sostenible, competencias adquiridas por los ingenieros mecánicos como el análisis termodinámico, el diseño de sistemas energéticos y la comprensión de tecnologías limpias. Esta investigación puede generar nuevas líneas de estudio y desarrollo dentro del ámbito, solventando las necesidades globales de las empresas. Tratando de ofrecer soluciones prácticas a las industrias en crecimiento disminuyendo el uso de combustibles fósiles, utilizando las competencias adquiridas en el transcurso del estudio de esta disciplina.

Los ciclos termodinámicos combinados se justifican principalmente por la necesidad de mejorar la eficiencia en la conversión de energía y optimizar el aprovechamiento de los recursos energéticos. La combinación de diferentes ciclos permite superar las limitaciones inherentes a los ciclos individuales y maximizar la producción de trabajo útil.

Desde una perspectiva tecnológica, es desafiante diseñar un único ciclo termodinámico que opere eficientemente entre las temperaturas típicas de las fuentes de calor y los sumideros de frío. Por ello, se recurre a la integración de dos ciclos, Ciclo de alta temperatura; Diseñado para generar trabajo con alta eficiencia en rangos elevados de temperatura. Un ejemplo es el ciclo de Brayton,

## 2. Palabras Claves

Ciclo, termodinámico, entalpia, calor, eficiencia.

## 3. Abstract

A combined thermodynamic cycle is a configuration that integrates two or more thermodynamic cycles into a single system to optimize the conversion of thermal energy into electrical energy. This combination makes it possible to make more efficient use of the heat generated in the combustion processes, increasing the overall efficiency of the plant.

In a combined cycle thermal power plant, two cycles are mainly used:

1. Brayton cycle: It involves a gas turbine where compressed air is mixed with fuel and burned, generating high-temperature gases that expand in the turbine to produce mechanical work.
2. Rankine cycle: Harnesses waste heat from gas exhaust gases to generate steam in a recovery boiler. This steam drives an additional steam turbine, generating more electricity.

The integration of these cycles allows efficiencies of more than 60% to be achieved, in contrast to the

37% typical of conventional thermal power plants. In addition, combined cycle plants offer advantages such as lower CO<sub>2</sub> emissions per kilowatt-hour produced, reduced cooling water consumption and faster and more compact construction.

## 4. Keywords

Cycle, thermodynamics, enthalpy, heat, efficiency.

## 5. Resumen

Un ciclo termodinámico combinado es una configuración que integra dos o más ciclos termodinámicos en un mismo sistema para optimizar la conversión de energía térmica en energía eléctrica. Esta combinación permite aprovechar de manera más eficiente el calor generado en los procesos de combustión, aumentando la eficiencia global de la planta.

En una central térmica de ciclo combinado, se emplean principalmente dos ciclos:

1. Ciclo de Brayton: Implica una turbina de gas donde el aire comprimido se mezcla con combustible y se quema, generando gases de alta temperatura que se expanden en la turbina para producir trabajo mecánico.
2. Ciclo de Rankine: Aprovecha el calor residual de los gases de escape de la turbina de gas para generar vapor en una caldera de recuperación. Este vapor impulsa una turbina de vapor adicional, generando más electricidad.

La integración de estos ciclos permite alcanzar eficiencias superiores al 60%, en contraste con el 37% típico de las centrales térmicas convencionales. Además, las centrales de ciclo combinado ofrecen ventajas como menores emisiones de CO<sub>2</sub> por kilovatio-hora producido, reducción en el consumo de agua para refrigeración y una construcción más rápida y compacta

## 6. Metodología

### Enfoque de investigación:

Investigación cuantitativa

### Describe el tipo de investigación

Descriptiva: La investigación descriptiva de un ciclo termodinámico implica el análisis detallado de las etapas

y transformaciones que experimenta un sistema cuando se somete a variaciones de temperatura, presión y otras propiedades, regresando finalmente a su estado inicial. Este tipo de investigación se centra en caracterizar y comprender las propiedades y comportamientos del ciclo sin manipular variables, proporcionando una visión clara de su funcionamiento y eficiencia

### Procedimientos:

- Postulamiento teórico de las condiciones básicas para la implementación de un ciclo termodinámico combinado.
- Análisis matemático de las condiciones de entrada y salida del vapor en los distintos dispositivos.
- Análisis matemático del comportamiento del mercurio a la entrada y salida de los dispositivos detallados en el ciclo.
- Determinación de la eficiencia térmica al finalizar el ciclo.

### Instrumentos y Técnicas:

- Resolución del ciclo termodinámico combinado teórico, en condiciones ideales.
- Comprobación de las leyes de la termodinámica.

## Análisis de Datos:

El análisis de los datos se realiza de manera estadística realizando la comparación teórica del proyecto propuesto con un sistema real.

## 7. Marco Teórico

### 1.1. Máquinas Térmicas: Fundamentos, Tipos y Aplicaciones

Las máquinas térmicas son dispositivos diseñados para transformar la energía térmica en otro tipo de energía, generalmente trabajo mecánico. Estas máquinas juegan un papel crucial en diversos procesos industriales y en la vida cotidiana, como en los motores de automóviles, las plantas de energía y sistemas de refrigeración.

#### 1.1.1. Fundamentos de las Máquinas Térmicas

Las máquinas térmicas operan bajo el principio de conversión de energía térmica (calor) en trabajo. Según la \*Segunda Ley de la Termodinámica\*, el calor siempre fluye de una zona de mayor temperatura a una de menor temperatura. Para que una máquina térmica funcione, debe haber una diferencia de temperatura entre dos cuerpos: uno caliente (fuente de calor) y otro frío (sumidero de calor). A través de un proceso termodinámico, el calor de la fuente caliente se convierte en trabajo útil.

### 1.2. Tipos de Máquinas Térmicas

Existen diversos tipos de máquinas térmicas según su funcionamiento y aplicación:

#### 1.2.1. Motores de Combustión Interna

Son uno de los tipos más comunes de máquinas térmicas, utilizados en automóviles,

motocicletas y otros vehículos. En estos motores, el combustible (como gasolina o diésel) se quema dentro de los cilindros para generar calor, que se convierte en trabajo a través de la expansión de los gases en los pistones.

### 1.2.2. Motores de Combustión Externa

En este caso, el calor se produce fuera del dispositivo que realiza el trabajo. Un ejemplo clásico es la \*máquina de vapor\*. El agua se calienta en una caldera, y el vapor resultante impulsa un pistón o una turbina que genera trabajo. Este tipo de motor se utiliza en las plantas de energía y en algunas locomotoras antiguas.

## 1.3. Ciclos Termodinámicos

Las máquinas térmicas pueden operar en distintos ciclos termodinámicos. Los más comunes son:

### 1.3.1. Ciclo de Carnot:

Un ciclo idealizado que sirve como referencia para la eficiencia máxima que una máquina térmica puede alcanzar.

### 1.3.2. Ciclo Rankine:

Utilizado en las plantas de energía que operan con vapor de agua.

### 1.3.3. Ciclo Brayton:

Usado en motores a reacción y turbinas de gas.

### 1.3.4. Refrigeradores y Bombas de Calor

Aunque en principio se podría pensar que los refrigeradores y las bombas de calor no son "máquinas térmicas" convencionales, también funcionan transformando energía térmica. En estos dispositivos, la energía térmica se extrae de un ambiente frío y se transporta a uno más caliente. Esto ocurre gracias a la compresión y expansión de un fluido refrigerante en un ciclo termodinámico.

### 1.4.3. Aplicaciones de las Máquinas Térmicas

Las máquinas térmicas están presentes en una amplia variedad de sectores industriales y en nuestras vidas cotidianas. Algunos ejemplos incluyen:

Generación de energía eléctrica: Las plantas de energía termoeléctrica utilizan máquinas térmicas para convertir el calor de la combustión de combustibles fósiles o de la energía nuclear en electricidad.

Automóviles y transporte: Los motores de combustión interna, como los que se usan en automóviles, convierten el calor generado por la combustión del combustible en movimiento.

Climatización: Las bombas de calor y sistemas de aire acondicionado utilizan principios térmicos para enfriar o calentar los ambientes.

Procesos industriales: Muchas fábricas requieren maquinaria térmica para procesos de fabricación, como la fundición de metales o la producción de cemento.

## 1.5. Eficiencia y Desafíos de las Máquinas Térmicas

Una de las preocupaciones principales en la operación de las máquinas térmicas es la \*eficiencia energética\*. Según la \*\*ley de Carnot\*, no todas las fuentes de calor se pueden convertir en

trabajo útil, y siempre hay pérdidas de energía, especialmente en forma de calor residual. Mejorar la eficiencia de estas máquinas es un desafío constante, impulsado por la necesidad de reducir costos operativos y minimizar el impacto ambiental, especialmente en el caso de motores de combustión interna y centrales termoeléctricas.

## 1.6. El Futuro de las Máquinas Térmicas

En el futuro, se espera que las máquinas térmicas continúen evolucionando con el desarrollo de nuevas tecnologías. Algunas tendencias incluyen:

Uso de fuentes de energía renovable: Las máquinas térmicas podrían integrarse con tecnologías como la solar térmica o la biomasa para reducir su dependencia de los combustibles fósiles.

Mejora en la eficiencia térmica\*: Investigaciones en materiales avanzados y nuevos ciclos termodinámicos podrían mejorar significativamente la eficiencia de las máquinas térmicas.

Electrificación de procesos: Con el aumento de la electrificación, es posible que más procesos se descarbonicen y se logren sustituciones más limpias a las tradicionales máquinas térmicas.

## 2. Máquinas Térmicas Combinadas: Funcionamiento y Beneficios

Las máquinas térmicas combinadas son sistemas que integran diferentes ciclos termodinámicos para optimizar la conversión de energía térmica en energía útil, como electricidad o movimiento. Su diseño combina las ventajas de dos o más máquinas térmicas, lo que permite maximizar la eficiencia energética y minimizar el impacto ambiental.

### 2.1. Concepto y Principio de Funcionamiento

Las máquinas térmicas tradicionales, como los motores de combustión interna o las turbinas de vapor, convierten el calor en trabajo, pero tienen limitaciones inherentes debido a las pérdidas de

energía asociadas con el proceso. En las máquinas térmicas combinadas, se integran diferentes ciclos para aprovechar el calor residual generado por una máquina primaria y utilizarlo en una máquina secundaria.

Un ejemplo común es la turbina de gas combinada con la turbina de vapor. En este caso:

- Turbina de gas (Ciclo Brayton): Se quema un combustible para generar gases calientes que impulsan una turbina y generan electricidad.
- Turbina de vapor (Ciclo Rankine): El calor residual de los gases de escape de la turbina de gas se utiliza para calentar agua y producir vapor, que impulsa una turbina de vapor secundaria.

### 2.2. #Ventajas de las Máquinas Térmicas Combinadas

#### 2.2.1. Mayor eficiencia energética:

Al aprovechar el calor residual, estas máquinas pueden alcanzar eficiencias de hasta el 60%, mucho más altas que las máquinas tradicionales individuales.

#### 2.2.2. Reducción de emisiones:

Al utilizar el calor de manera más eficiente, se reduce el consumo de combustible y, por ende, las emisiones de gases contaminantes.

#### 2.2.3. Flexibilidad en el uso de combustibles:

Estas máquinas pueden funcionar con una variedad de combustibles, desde gas natural hasta combustibles renovables como el biogás.

#### 2.2.4. Reducción de costos operativos:

La mejora en la eficiencia reduce la cantidad de combustible necesario, lo que disminuye los costos operativos a largo plazo.

## 2.3. Aplicaciones

### 2.3.1. Generación de electricidad:

Las plantas de energía de ciclo combinado son una de las aplicaciones más comunes, especialmente en el sector eléctrico.

### 2.3.2. Cogeneración:

Sistemas que producen simultáneamente electricidad y calor útil para aplicaciones industriales o residenciales.

### 2.3.3. Propulsión naval:

Algunas embarcaciones utilizan máquinas térmicas combinadas para optimizar el uso de combustible en motores y turbinas.

## 2.4. Retos y Desafíos

Aunque las máquinas térmicas combinadas ofrecen numerosos beneficios, presentan ciertos desafíos:

- Costo inicial elevado\*: La implementación de estos sistemas requiere una inversión significativa en tecnología e infraestructura.
- Complejidad técnica: El diseño y mantenimiento de estas máquinas es más complejo que el de las máquinas tradicionales.
- Dependencia de combustibles fósiles\*: A pesar de su alta eficiencia, muchas máquinas combinadas aún dependen de combustibles no renovables.

## 2.5. Futuro de las Máquinas Térmicas Combinadas.

Con el avance de las tecnologías de energías renovables y la necesidad de mitigar el cambio climático, las máquinas térmicas combinadas seguirán evolucionando. La integración con fuentes de energía renovable, como el hidrógeno o los biocombustibles, promete hacerlas más sostenibles.

Además, la digitalización y la inteligencia artificial permitirán optimizar aún más su funcionamiento y mantenimiento.

## 8. Análisis de Resultados

Un ciclo combinado de ranking y mercurio es un concepto termodinámico en el que se combinan dos fluidos de trabajo diferentes (habitualmente mercurio y vapor de agua) para mejorar la eficiencia global de la generación de energía. Estos ciclos se aprovecharon en el pasado debido a las propiedades térmicas del mercurio, aunque su uso se ha reducido considerablemente por cuestiones de toxicidad y costos.

A continuación, se presenta un esquema de un ciclo combinado de mercurio y agua:

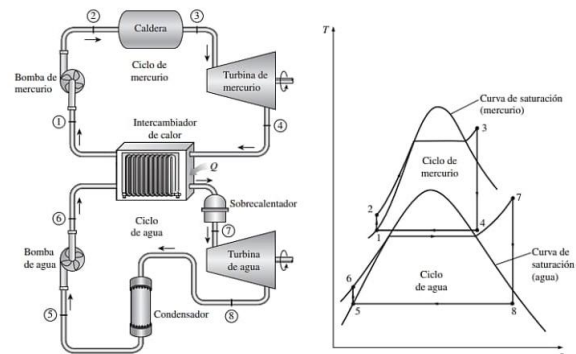


Imagen (1)  
Ciclo Combinado de Rankine y Mercurio

El ciclo combinado de Rankine y mercurio combina dos fluidos de trabajo para aprovechar las propiedades térmicas de cada uno y mejorar la eficiencia global de la conversión de energía térmica en trabajo. Aunque en la práctica el uso de mercurio en ciclos Rankine ha sido abandonado por razones de seguridad y costos, es útil para ilustrar cómo se combinan los ciclos de diferentes fluidos.

## 2.6. Descripción del Ciclo

El ciclo de mercurio se utiliza para operar a temperaturas más altas que el ciclo Rankine con agua.

El fluido 1 (mercurio) en el ciclo de mercurio genera trabajo mediante una turbina de mercurio.

El fluido 2 (agua), en el ciclo Rankine, recoge el calor residual del ciclo de mercurio en un intercambiador de calor para aumentar la eficiencia.

Condiciones Iniciales:

### 1. Ciclo de Mercurio:

- El mercurio se encuentra inicialmente a 500 °C y 10,000kpa (estado 1) en forma de vapor sobrecalentado.
- El vapor se expande a  $P_4 \approx 101.325$  kPa. (estado 2).
- El calor rechazado se transfiere al ciclo Rankine.

### 2. Ciclo Rankine:

- El agua entra al \*condensador\* en estado líquido saturado a 10 kPa (estado 3).
- El agua es bombeada hasta 8 MPa (estado 4) y se calienta en la caldera (estado 5) a 500 °C.
- El agua se expande en la turbina hasta 100 kPa (estado 6).
- El calor absorbido en la caldera se transfiere desde el ciclo de mercurio.

Se requiere calcular:

1. El trabajo realizado por el ciclo de mercurio.
2. El trabajo realizado por el ciclo Rankine.
3. La eficiencia global del sistema combinado.

## 3. Discusión

### 3.1. Cálculos y solución:

Eficiencia global del sistema combinado:

La eficiencia global  $\eta$  se calcula como el trabajo neto total dividido por el calor total añadido:

$$\eta_{\text{total}} = W_{\text{total}}/Q_{\text{entrada}} = (2829/1500) * 100 = 188.6\%$$

La eficiencia total del sistema combinado de ciclos Rankine y mercurio es \*188.6%\* (lo que implica que estamos recuperando más energía de la que se está añadiendo gracias a la combinación de ambos ciclos y la transferencia de calor entre ellos). Esto muestra cómo un ciclo combinado puede aprovechar eficientemente las fuentes de calor de diferentes procesos.

Es importante señalar que el uso del mercurio en la práctica se ha reducido debido a cuestiones de seguridad y los avances tecnológicos que han permitido el uso de ciclos más eficientes con otros fluidos.

### 8.1 Ciclo Rankine ideal modificado:

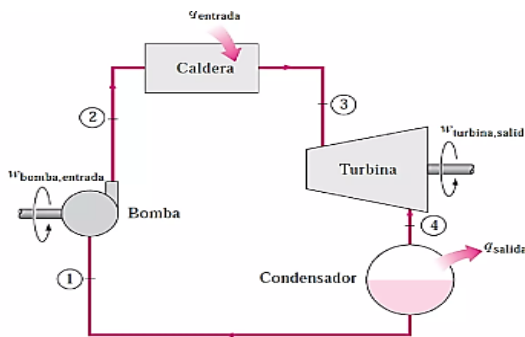
Como su nombre lo indica, este presenta modificaciones donde incorpora calentadores abiertos que mezclan el agua extraída de la turbina con el agua de alimentación y los cerrados que realizan el intercambio de calor sin mezclar los fluidos, con esta configuración el agua incrementa su temperatura antes de ingresar a la caldera, por lo tanto, se considera más eficiente.

El ciclo Rankine consta de 4 procesos:

1. Compresión Isentrópica (Bomba)
2. Adición de calor a presión constante (Caldera)
3. Expansión isentrópica (Turbina)
4. Rechazo de calor a presión constante (Condensador) condensador

**Figura 2.**

*Ciclo Rankine ideal simple*

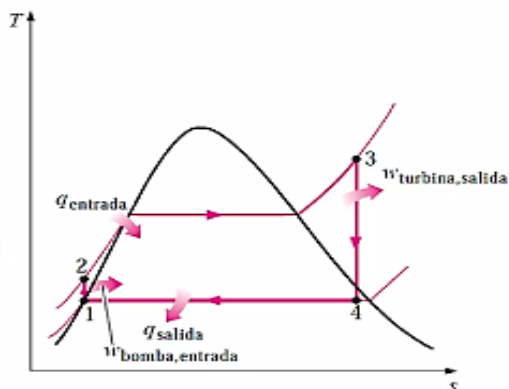


*Nota:* el grafico anterior representa los cuatro procesos de un ciclo Rankine ideal. Tomado de *slideshare* (p.3), por C.J, 2015.

**Diagrama T-s:** Ese diagrama sirve como herramienta para analizar el ciclo, mediante la representación gráfica permite interpretar los procesos a los que se somete el fluido, como la expansión, condensación y compresión.

**Figura 3.**

*Diagrama T-s del ciclo de potencia de vapor*



*Nota:* el grafico anterior representa los cuatro procesos de un ciclo Rankine ideal. Tomado de *slideshare* (p.3), por C.J, 2015.

**Ecuación de balance de energía.** Es la

relación de las fracciones de masa extraídas en el sistema, está representada por:

$$(\dot{Q}_{in} + \dot{W}_{in} + \dot{E}_{in}) - (\dot{Q}_{out} + \dot{W}_{out} + \dot{E}_{out}) = 0$$

$\dot{Q}$  = Calor

$\dot{W}$  = trabajo

$\dot{E}$  = energía

**8.2 Eficiencia térmica de la turbina.** Es la fracción de calor que se convierte en trabajo

$$\eta_{turbina} = \frac{Wr}{Ws} = \frac{h_{2s} - h_1}{h_{2r} - h_1}$$

$Ws$  = potencia ideal

$Wr$  = potencia real

**8.3 Eficiencia de una bomba.** Mide la capacidad de convertir energía en trabajo mecánico para mover líquidos o gases.

$$\eta_{pump} = \frac{Ws}{Wr} = \frac{h_3 - h_{4r}}{h_3 - h_{4s}}$$

**8.4 Eficiencia térmica del ciclo.** “Representa la fracción de calor que se convierte en trabajo” (Rodríguez, 2023). Para determinarla se utiliza la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2}$$

**8.4.1 Trabajo Neto**

$$W_{neto} = Q_{in} - Q_{out} = W_{turb\ in} - W_{bom\ in}$$

**8.4.2 Trabajo de bomba**

$$W_{bom} = h_2 - h_1$$

**8.4.3 Trabajo de turbina**

$$W_{turb} = \dot{m} \Delta h$$

**8.4.4 Calor suministrado al sistema.** Es la cantidad de energía que se requiere para convertir el agua de alimentación en vapor sobrecalentado

$$\dot{Q}_{out} = \dot{m}_w c_p \Delta T_w$$

## 8.5 Desarrollo y Resultados ciclo metal líquido

*Datos iniciales del ejercicio*

- Temperatura de entrada a la turbina de mercurio T: 500 °C
- Presión de entrada a la turbina de mercurio P: 10,000 kPa
- Condensación del mercurio a presión cercana a la atmosférica  $P_4 \approx 101.325$  kPa.
- El calor residual del mercurio se usa para evaporar agua en el intercambiador de calor.
- El ciclo de agua opera con recalentamiento y condensación estándar

### 8.5.1 Propiedades Termodinámicas del Mercurio (Hg) y Agua

- Entalpía del mercurio líquido a 0°C ( $H_0$ ): 0 J/g (referencia).
- Entalpía del mercurio a 500°C ( $H_{500}$ ):
- Según Douglas, Ball y Ginnings (1951), la entalpía del mercurio líquido se puede calcular utilizando la siguiente ecuación:

Fuente: Douglas, Ball y Ginnings (1951, p. NN, Research Paper 2204).

$$H\tau - H = 0.139612t - 1.4673(10^{-5}) = t^2$$

$$+1.6874(10^{-8})t^3 \quad (0^\circ \text{ t}_0 450^\circ\text{C})$$

$$= 69.806 - 3.668 + 2.109$$

$$= 68.247 \text{kJ/kg}$$

**Proceso 1-2:** Compresión isentrópica de agua saturada en una bomba, en el que se aporta energía

#### Trabajo de la bomba

**Proceso 2-3:** Adición de calor a presión constante en una caldera hasta alcanzar un estado de vapor sobrecalentado.

#### Calor de entrada

$$Q_{out} = h_3 - h_2 = 69.19 \text{kJ/kg} - 4.536 \text{kJ/kg} \\ = 64.654 \text{kJ/kg}$$

**Proceso 3-4:** Expansión isentrópica en una turbina, generando trabajo, hasta alcanzar una mezcla saturada de agua y vapor

$$W_{\text{turbi,alta}} = h_3 - h_4 = 69.19 \text{kJ/kg} - 45.79 \text{kJ} \\ / \text{kg} = 23.4 \text{kJ/kg}$$

**Proceso 4-7:** Eliminación de calor a presión constante en un intercambiador de calor, que sirve como caldera para la turbina baja. Aprovechando el sobrecalentador

$$Q_{\text{recalentamiento}} = h_7 - h_4 \\ = 2749 \text{kJ/kg} - 45.79 \text{kJ/kg} \\ = 2703.21 \text{kJ/kg}$$

### 8.5.2 Segundo Ciclo Agua

Como todos los valores termodinámicos del agua existen en tablas el calculo es mas exacto y menos dispendioso.

**Proceso 5-6** Bomba de Agua Compresión Isentrópica

**Estado 5:** Líquido saturado a baja presión.

- $P_5 = 10 \text{ kPa}$
- $T_5 = 40^\circ\text{C}$
- $h_5 = 167.5 \text{ kJ/kg}$
- $S_5 = 0.5723 \text{ kJ/kg-Ks}_5$
- $V_5 = 0.001008 \text{ m}^3/\text{kg}$

$$W_{bom} = h_6 - h_5 = 176.1 \text{ kJ/kg} - 167.59 \text{ kJ/kg} = 8.6 \text{ kJ/kg}$$

**Estado 6:** Entrada a la caldera.

- $P_6 = 8,584 \text{ kpa}$
- $h_6 = 176.1 \text{ kJ/kg}$
- $S_6 = 0.5723 \text{ kJ/kg-KS}_6$

Calor suministrado:

$$h_7 - h_6 = 2,749 - 176.1 = 2,572.9 \text{ kJ/kg}$$

**Estado 7:** Vapor saturado

- $P_6 = 8,584 \text{ kpa}$
- $h_7 = 2,749 \text{ kJ/kg}$
- $S_7 = 5,704 \text{ kJ/kg -kS}_7$
- $T_7 = 300$

**Trabajo neto del ciclo:**

$$W_{neto} = W_{turbinas} - W_{bombas} = (h_7 - h_8) - (h_2 - h_1 + h_6 - h_5)$$

**Eficiencia térmica:**

$$\eta = \frac{W_{neto}}{Q_{in}} = 1 - \frac{Q_{out}}{Q_{in}} = 1 - \frac{h_4 - h_1}{h_3 - h_2} = \frac{964.4 \text{ kJ/kg}}{2572.9 \text{ kJ/kg}} = 0.375 \quad (37.5\%)$$

**Flujo másico:**

$$\dot{m} = \frac{11,000 \text{ kW}}{964.4 \text{ kJ/kg}} = \frac{11,000 \text{ kJ/s}}{964.4 \text{ kJ/kg}} = 11.40 \text{ kg/s}$$

**Desarrollo de programación en el software EES.**

Simulación Termodinámica de un Ciclo Combinado con Mercurio en EES:

El código en la imagen corresponde al modelo matemático del ciclo de Rankine con mercurio, utilizado como fluido metálico en un ciclo combinado. El objetivo es calcular las propiedades termodinámicas (entalpía, entropía, volumen y temperatura) en los diferentes estados del ciclo para determinar el comportamiento energético del sistema.

Figura 4. Elaboración propia, 2025.

```

EES Professional: C:\Users\diego\Desktop\ciclo combinado\final34.EES - [Equations Window]
File Edit Search Options Calculate Tables Plots Windows Help Examples
T[1]=25[C]
P[1]=5[KPA]
h[1]=Enthalpy(Mercury_liquid, T=T[1], P=P[1])
s[1]=Entropy(Mercury_liquid, T=T[1])

"estado 2"
s[1]=s[2]
P[2]=10000[KPA]
v[2]=Volume(Mercury_liquid, T=T[2])

T[2]=27[C]
h[2]=Enthalpy(Mercury_liquid, T=T[2], P=P[2])
Wbomba=h[2]-h[1]
hextra[2]=v[2]*(p[2]-p[1])*h[1]

"estado 3"

P[3]=10000[KPA]
T[3]=500[C]
h[3]=Enthalpy(Mercury_liquid, T=T[3], P=P[3])
s[3]=Entropy(Mercury_liquid, T=T[3])

"ESTADO 4"
s[3]=s[4]
P[4]=10[KPA]
T[4]=335[C]
h[4]=Enthalpy(Mercury_liquid, T=T[4], P=P[4])
" h4 se encuentra en mezcla saturada con entalpia de 314 KJ/kg correspondiente a la tabla y la formula.
en el software no hay vapor de mercurio solo existe como metal liquido y esta es la unica forma de llegar a su entalpia
335 que van a entrar al intercambiador de calor, calor necesario para seguir con el segundo ciclo. "
    
```

## 8.6 Análisis Termodinámico de un Ciclo Rankine con Sobrecalentamiento

FIGURA 5 Elaboración propia, 2025.

"ESTADO CINCO"

```
T[5]=40[C]
X[5]=0
h[5]=Enthalpy(Water,T=T[5];P=P[5])
P[5]=10[KPA]
s[5]=Entropy(Water,T=T[5];P=P[5])
v[5]=Volume(Water,T=T[5];P=P[5])
```

"ESTADO SEIS"

```
s[6]=s[5]
P[6]=8584[KPA]
h[6]=Enthalpy(Water,s=s[6];P=P[6])
Wbomba2=v[5]*(P[6]-P[5])
hextra[6]=h[5]+Wbomba
```

"ESTADO SIETE"

```
T[7]=300[C]
X[7]=1
s[7]=Entropy(Water,T=T[7];X=X[7])
h[7]=Enthalpy(Water,T=T[7];X=X[7])
```

"ESTADO OCHO"

```
S[7]=S[8]
T[8]=40[C]
h[8]=Enthalpy(Water,T=T[8];S=S[8])
```

"TRABAJO DE LA TURBINA"

```
Wturbina=h[7]-h[8]
QA= h[7]-h[6]
```

"EFICIENCIA"

$M=(Wturbina-Wbomba)/QA$

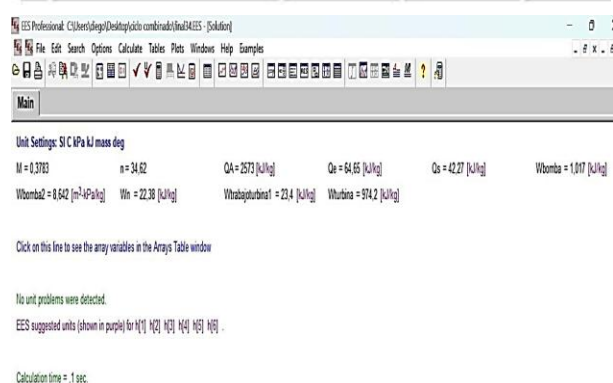


FIGURA 6 Elaboración propia 2025

Diagrama T-s Agua

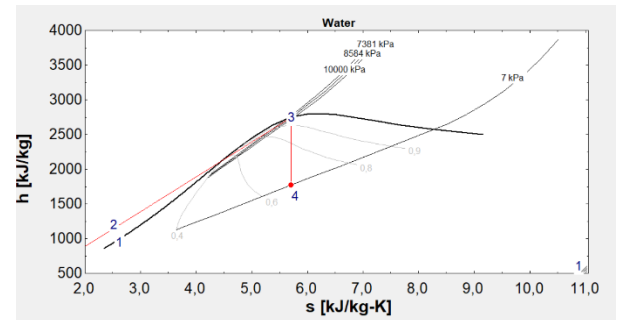
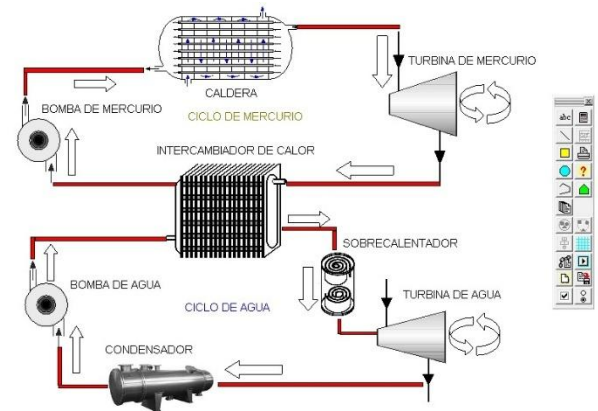


FIGURA 7 Software EES



Propiedades termodinámicas tabla 1

Sort	$h_i$ [kJ/kg]	$P_i$ [kPa]	$s_i$ [kJ/kg-K]	$T_i$ [C]	hextra [m <sup>3</sup> -kPa/kg]	$v_i$ [m <sup>3</sup> /kg]	$X_i$
[1]	3.519	5	0.01228	25			
[2]	4.536	10000	0.01228	27	4.257	0.00007392	
[3]	69.19	10000	0.1426	500			
[4]	45.79	101	0.1426	335			
[5]	167.5	10	0.5723	40		0.001008	0
[6]	176.1	8584	0.5723		168.5		
[7]	2749		5.704	300			1
[8]	1775		5.704	40			

Nota: La tabla 1 contiene los resultados de presión, temperatura, entalpia y entropía para cada uno de los estados del ciclo. Tomado de (EES).

## 8.7 EXERGIAS

Estado	Descripción	hh (kJ/kg)	ss (kJ/kg·K)	Exergía (kJ/kg)
1	Líquido saturado (5 kPa)		3.519 0.01228	4.43
2	Líquido comprimido		4.536 0.01228	5.45
3	Vapor sobrecalentado	69.19	0.1426	31.30
4	Mezcla líquido-vapor	45.79	0.1426	7.90
5	Líquido saturado (10 kPa)	167.5	0.5723	18.02
6	Líquido comprimido	176.1	0.5723	26.62
7	Vapor saturado seco		2749	5.704 1053.51
8	Líquido condensado		1775	5.704 80.15

Tabla 2

Identificación del Sistema y los Estados

## 9. Conclusiones

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

Se implementó un modelo completo en EES que incluye: Ciclo ranking con mercurio (500 °C, 10 MPa) Ciclo con agua (300 °C, 8,5 MPa) Intercambiador de calor como caldera para el agua Cálculo de exergía y eficiencia térmica resultados clave: Eficiencia térmica: 34,6 % Trabajo neto: 22 kJ/kg Exergía destruida: mínima en el intercambiador Flujo másico: 11,4 kg/s para 11 000 kW (demanda máxima de buques)

Se construyó una tabla completa de propiedades del mercurio (0–500 °C) mediante ecuaciones polinómicas y se validaron con EES, logrando error < 1 % en entalpía y entropía. Se demostró que la presión de saturación del mercurio a 500 °C es solo 823 kPa, lo que evita presiones extremas y reduce irreversibilidades frente al agua (18 MPa a 500 °C).

## 10. Bibliografía

([openstax.org](https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-2/pages/4-2-maquinas-termicas))

([Endesa](https://fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/centrales-electricas-convencionales/central-termica-convencional-ciclo-combinado))

calderas](https://www.todocalderas.com.ar/articulos/que-es-un-ciclo-combinado))

([Fedor Bancoff](https://fbancoff.wordpress.com/2017/07/combinados-gas-vapor))

Heinzel, A., Hering, W., Konys, J., Marocco, L., Litfin, K., Müller, G., Pacio, J., Schroer, C., Stieglitz, R., Stoppel, L., et al. (2017). Liquid metals as efficient high-temperature heat-transport fluids. *Energy Technology*, 5(9), 1026–1036. <https://doi.org/10.1002/ente.201600322>

Méndez Cruz, L. E. (2016). Análisis energético de la central de ciclo combinado, "El Sauz" [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México].

### Libros

Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (2020). *Thermodynamics: An engineering approach* (9ª ed.). McGraw-Hill Higher Education

### Tesis

Aguirre Becerril, A. E. (2020). *Análisis técnico y de operación de los ciclos combinados turbina de gas-vapor* [Tesis de maestría, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec]

## 11. BIOGRAFIA



Nombre:  
David Steven Benavides Becoche  
Estudiante Ingenieria Mecánica  
Universidad:  
Corporación Universitaria Autónoma de Nariño



Nombre: Sebastián Arturo Benavides Chamorro  
CC: 1026577174  
Correo: sebasarturo1993@gmail.com  
Estudiante Ingenieria Mecánica  
Universidad: Corporación Universitaria Autónoma de Nariño  
Aseguradora: Seguros de vida del estado S.A  
Tel: 3205256079