

# FUNCIONAMIENTO DEL CICLO COMBINADO EN CENTRALES GENERADORAS TERMOELÉCTRICAS

## 1. INTRODUCCIÓN

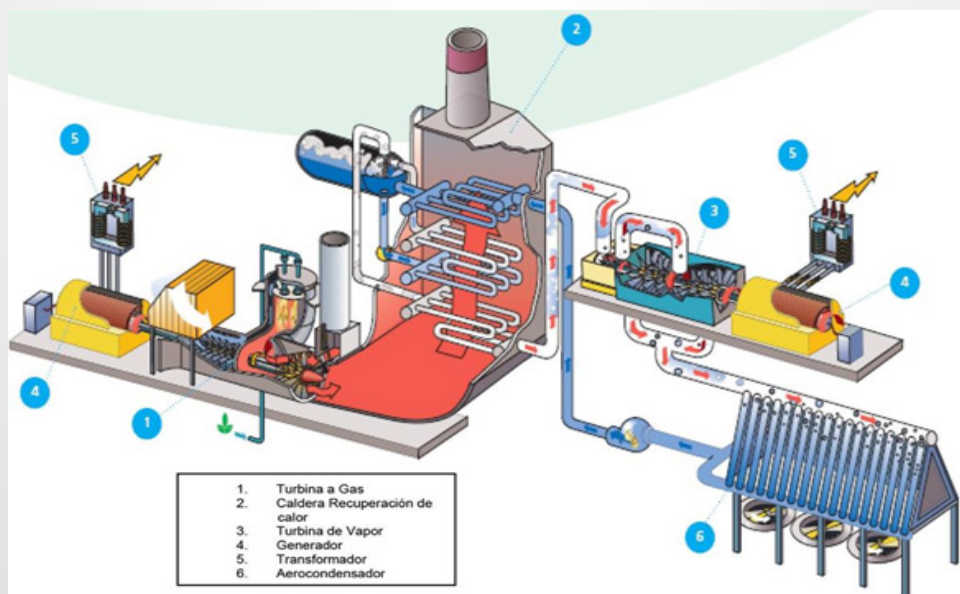
Las centrales generadoras termoeléctricas con ciclos combinados de gas natural representan el mejor modelo energético, ya que permite un rendimiento de más del 57%, muy superior a las centrales convencionales.

Asimismo, las centrales termoeléctricas reducen el impacto medioambiental, ya que, según estudios de Impactos Ambientales de la Producción Eléctrica, publicado por el estudio para la Diversificación y Ahorro de Energía (IDEA), la generación de electricidad con gas natural tiene menor impacto sobre el medio ambiente que los sistemas fotovoltaicos, nuclear y los sistemas de generación con carbón, petróleo y lignito.

Estas centrales destacan por contener un 60% menos de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y óxido de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), prácticamente nulas de dióxido de azufre y partículas. Además, los generadores eléctricos de ciclos combinados consumen solamente un tercio del agua de refrigeración que requiere una central convencional de la misma potencia, y la instalación ocupa menos espacio que una central convencional.

**Figura 1**

Diagrama de operación básica de la central térmica ChilcaUno.



Nota. Adaptado de Central Termoeléctrica ChilcaUno Perú (p. 28), por F. Quiñones, 2016, Zofnass Program for sustainable infrastructure.

## 2. ANTECEDENTES

La generación de energía eléctrica en el Perú, en un principio, era aportada principalmente por las centrales hidroeléctricas; sin embargo, en pro diversificación de las fuentes de generación eléctrica, se lograron instalar centrales termoeléctricas, en el marco de una nueva matriz energética. Siendo la más importante la central generadora termoeléctrica de ciclos combinados de Ventanilla, la Dirección General de Electricidad (2006) afirma lo siguiente:

A partir de Octubre 2006, la Central Termoeléctrica de Ventanilla convirtió su planta generadora a gas natural ciclo simple a ciclo combinado, con un incremento de su capacidad instalada de 315 MW a 524 MW, y cuya producción será mayor en un 50% empleando la misma cantidad de gas natural proveniente de Camisea. (p. 1)

Como se observa, la central termoeléctrica de Ventanilla cuenta con la mayor capacidad instalada y eficiencia de las centrales generadoras de energía térmica, ubicado en el departamento de Callao – Perú. Aporta una capacidad de generación bruta (en operación) de 485 MW en el sistema interconectado nacional (SEIN), la central generadora fue la primera en utilizar el ciclo combinado en el Perú, además utilizó el gas natural provenientes de los yacimientos de Camisea. Esta aportación al Perú de implementar la primera central termoeléctrica de ciclo combinado, permitió que se consiga nuevos proyectos de generación termoeléctrica.

## 3. DESARROLLO

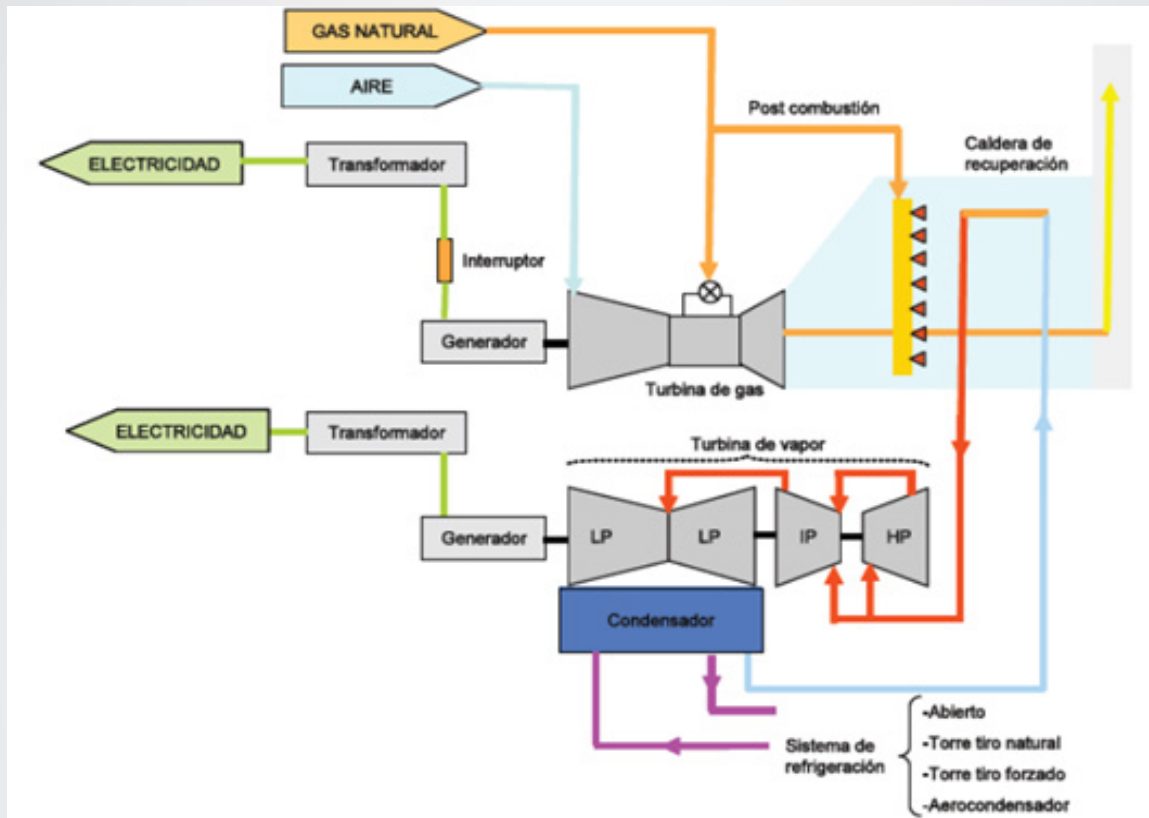
### Ciclo Combinado

El Ciclo Combinado combina dos ciclos termodinámicos conocidos para el aprovechamiento de energía térmica: Ciclo de Brayton (Ciclo de Aire-Gas) y Ciclo de Rankine (Ciclo de Agua-Vapor). Este ciclo termodinámico utiliza la combustión del gas natural para generar electricidad; además, los gases de escape calientes salientes del ciclo de Brayton son aprovechados para producir vapor de agua de alta calidad, el cual entrega trabajo a la turbina de vapor, generando electricidad.

Las turbinas de gas y vapor se complementan, lo que permite un mejor rendimiento energético a la central generadora termoeléctrica, cercana al 60%, ya que se obtiene electricidad en dos etapas utilizando una única fuente de energía. A continuación, se explicará el funcionamiento de cada una de las partes fundamentales del ciclo combinado.

**Figura 2**

Esquema del Ciclo combinado multieje 1x1.

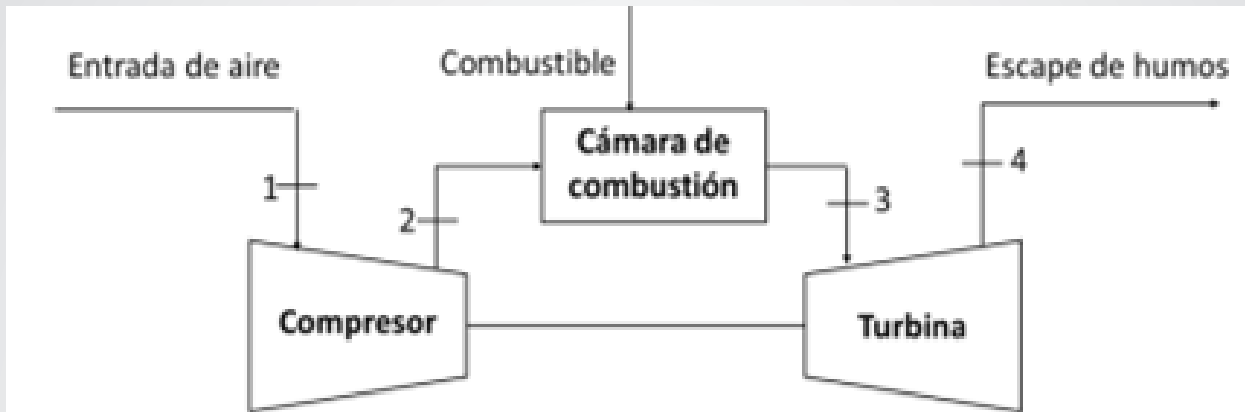


Nota. Adaptado de Centrales Térmicas: Apuntes de Central de Ciclo Combinado (p. 13), por J.A. Gonzáles, s.f., Universidad Nacional de Tucumán.

## Ciclo de Brayton

El Ciclo de Brayton de un ciclo combinado aprovecha la combustión del gas natural transmitiéndolos a la turbina de expansión. De esta manera, los gases de escape salientes de la turbina son entregados a la caldera recuperadora de calor comenzando el Ciclo de Rankine. La turbina de gas constituye todo el sistema del ciclo de Brayton, puesto que tiene como partes fundamentales: el sistema de admisión de aire, compresor de aire, cámara de combustión y turbina de expansión. El rendimiento energético del ciclo de Brayton abierto o cerrado en una central térmica consigue un valor medio del 37%.

**Figura 3**  
Ciclo de Brayton Simple abierto.



Nota. Adaptado de Estudio exergoambiental de una central térmica con un mejoramiento del sistema de enfriamiento del aire de admisión aprovechando los gases de salida de la turbina (p. 6), por S.G. Gómez y J.M. Hernández, 2019, Universidad Autónoma Bucaramanga.

### Sistema de Admisión de Aire

Admite el ingreso de aire hacia el compresor con una temperatura, presión y libre de partículas en las condiciones más adecuadas. En ese sentido, cuenta con la casa de filtros, elemento que sirve de soporte a los filtros, que se encargará del filtrado del aire de admisión que se introduce al compresor.

### Compresor de Aire

Una vez obtenido la masa de aire del sistema de admisión, el compresor se encargará de que la corriente de aire atraviese los álabes y, a medida que avanza la corriente de aire, va disminuyendo su sección transversal, aumentando la presión de escalón a escalón.

Esta compresión se realiza en varias etapas y consume el mayor trabajo realizado en el ciclo combinado, ya que debe empujar el aire a través de cada etapa de álabes por secciones cada vez menores. Los álabes están diseñados aerodinámicamente para elevar la presión del aire antes que entre en la cámara de combustión. Asimismo, el control de la entrada de aire para la cámara de combustión se puede realizar variando el ángulo de inclinación de las ruedas iniciales de álabes del compresor para una mayor cantidad de aire de entrada al compresor, a fin de mejorar el comportamiento a carga parcial de la turbina de gas.

## Cámara de combustión

En este proceso, se realiza la reacción de combustión a presión constante del gas natural suministrado a la central termoeléctrica al entrar en contacto con el oxígeno aire proveniente del compresor, obteniendo calor en forma de gases calientes que tienen altas temperaturas. Debido a las altas temperaturas que alcanzan en la cámara, parte del aire suministrado sirve para reducir la temperatura de la llama y refrigerar las paredes de la cámara de combustión para mantener su temperatura en valores bajos. Posteriormente, los gases de combustión calientes circulan hacia el interior de los álabes de la turbina de expansión.

## Turbina de expansión

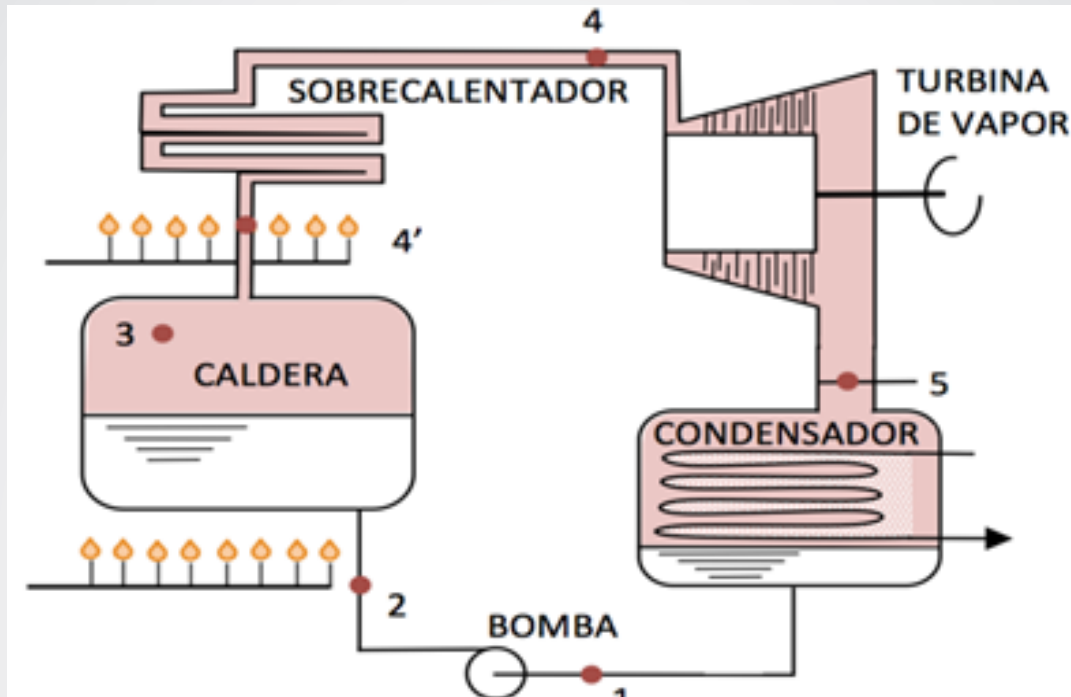
La potencia generada por la turbina de expansión, se obtiene cuando los gases calientes provenientes de la cámara de combustión inciden en los álabes móviles de turbina de expansión, provocando trabajo para realizar el movimiento mecánico de un generador eléctrico y producir electricidad. Una parte importante de la potencia mecánica es absorbida directamente por el compresor. En este proceso, los gases de combustión se expanden y salen en altas temperaturas hacia la caldera recuperadora de calor; no obstante, la temperatura es mucho menor con respecto a la temperatura de la cámara de combustión.

## Ciclo de Rankine

El ciclo de Rankine de un ciclo combinado aprovecha los gases de escape calientes salidos del ciclo de Brayton, para evaporar el agua y elevar su presión, en donde es llevado a una turbina de vapor produciendo electricidad, posteriormente se produce la condensación y el agua es llevada nuevamente a la caldera recuperadora de calor. El ciclo de Rankine consta como partes fundamentales la caldera recuperadora de calor, turbina de vapor, condensador y la bomba de alimentación de agua.



**Figura 4**  
Ciclo de Rankine con recalentador.



Nota. Adaptado de Análisis termodinámico de los ciclos de Rankine (p. 13), por S. F. Paredes, 2015, Universitat Politècnica de Catalunya Barcelonatech.

## Caldera recuperadora de calor

La caldera recuperadora de calor aprovecha el calor procedente de la turbina de gas para la generación de vapor de alta calidad en distintas presiones (alta, media y baja). Para entender mejor su funcionamiento, se mencionan algunos conceptos básicos:

- **Economizadores:** Encargado de precalentar el agua de alimentación con el calor residual de los gases de escape.
- **Evaporadores:** Encargado de evaporar el agua a la presión del circuito.
- **Sobrecalentador y recalentador:** Encargado de sobrecalentar el vapor de agua con el calor de ingreso de los gases de escape, el vapor se convierte en vapor de alta calidad.
- **Calderín:** Domo donde se lleva a cabo el cambio de estado de líquido a vapor, asimismo, genera vapor de alta calidad que ingresa a la turbina de vapor.

## Funcionamiento de la caldera recuperadora de calor de 03 presiones:

- **Circuito de baja presión:**

El agua del condensador a baja presión se precalienta en el economizador de baja presión, luego el agua calentada ingresa al calderín de baja presión. En este domo, se produce la evaporación de agua por acción de los evaporadores de baja presión, obteniendo vapor de agua que pasan por las arpas del sobrecalentador de baja presión generando vapor de alta calidad. Finalmente, el vapor de alta calidad se dirige a la turbina de baja presión.

- **Circuito de media presión:**

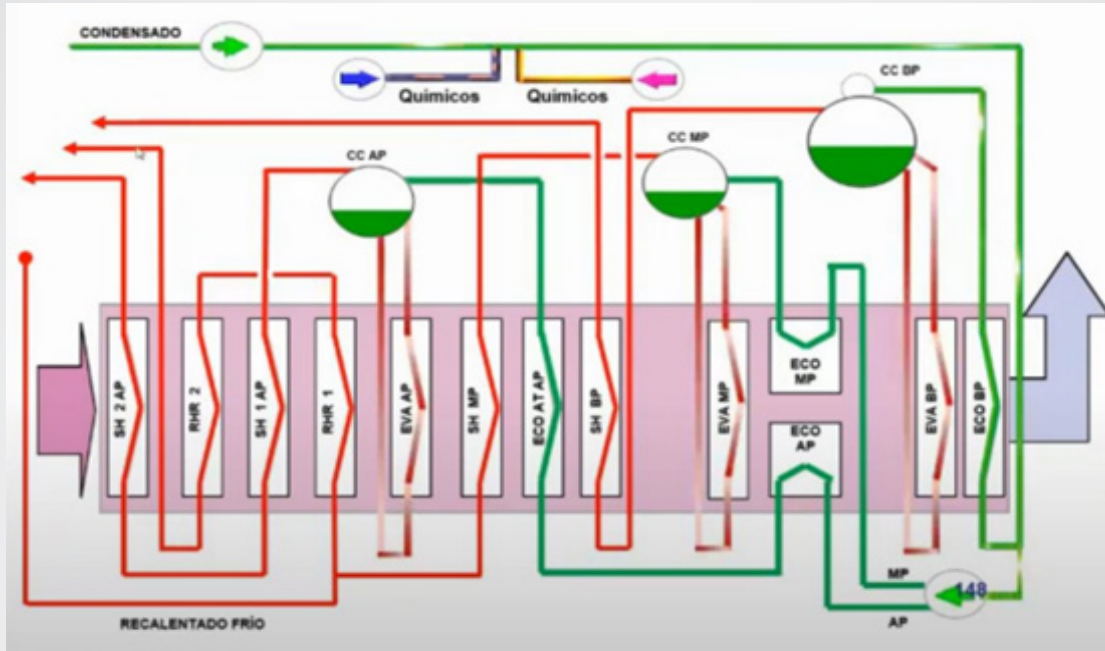
El agua del condensador a baja presión ingresa por la bomba de alimentación de agua de media presión, convirtiéndolo en agua de media presión. Posteriormente, se precalienta en el economizador de media presión, luego ingresa al calderín de media presión. En este domo se produce la evaporación de agua por acción de los evaporadores de media presión, obteniendo vapor de agua que pasan por las arpas del sobrecalentador de media presión para después pasar por los recalentadores generando vapor de alta calidad. Finalmente, el vapor de alta calidad se dirige a la turbina de media presión.

- **Circuito de alta presión:**

El agua del condensador a baja presión ingresa por la bomba de alimentación de agua de alta presión, convirtiéndolo en agua de alta presión. Posteriormente, se precalienta dos (02) veces en los dos (02) economizadores de alta presión, luego ingresa al calderín de alta presión. En este domo, se produce la evaporación de agua por acción de los evaporadores de alta presión, obteniendo vapor de agua que pasan por las arpas de dos (02) sobrecalentadores generando vapor de alta calidad. Finalmente, el vapor de alta calidad se dirige a la turbina de alta presión.

**Figura 4**

Funcionamiento de la Caldera recuperadora de calor de 3 presiones en SCADA.



Nota. Adaptado de Centrales Eléctricas II – video de clase 4, 2022, Universidad Nacional del Callao.

## Turbina de Vapor

La turbina de vapor recibe el vapor de alta calidad en alta presión, media presión y baja presión, en condiciones de temperatura adecuadas para cada sistema. La potencia generada por la turbina de vapor, se obtiene cuando el vapor de alta calidad provenientes de la caldera recuperadora de calor inciden en los alabes móviles de la turbina de vapor, provocando trabajo para realizar el movimiento mecánico de un generador eléctrico y producir electricidad.

## Condensador

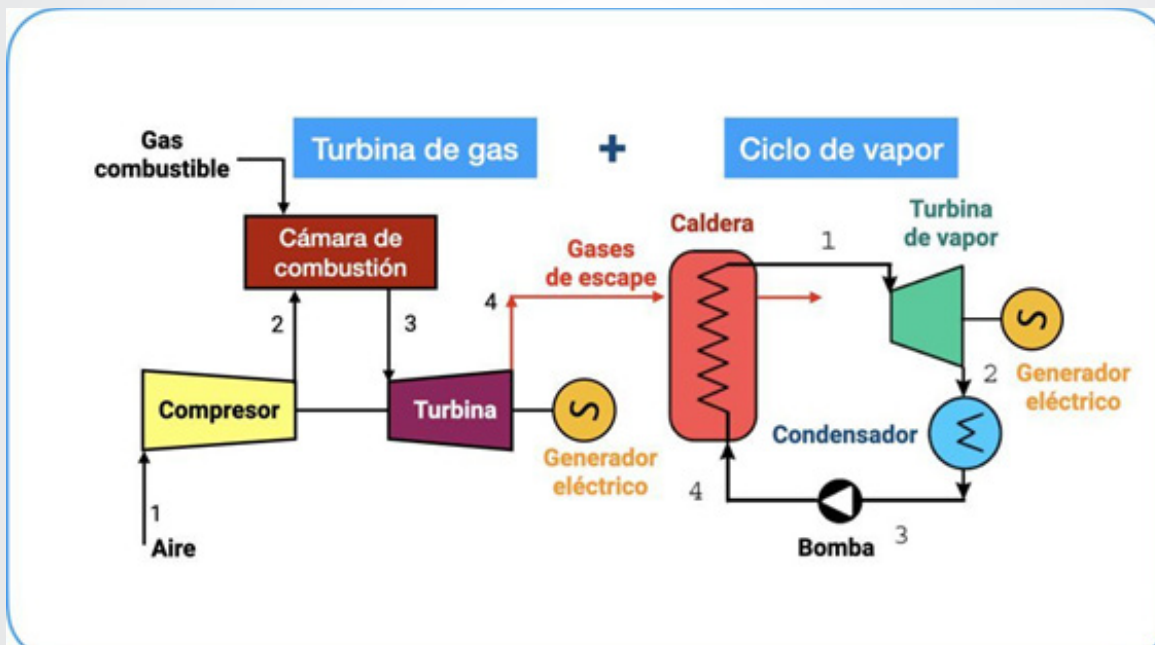
El vapor de agua proveniente de la turbina de vapor circula alrededor de una serie de tuberías, cuyo interior circula agua de refrigeración proveniente de las torres de refrigeración. En este contacto del vapor caliente y los tubos de refrigeración, se produce la condensación, absorbiendo el calor latente del vapor de agua. El agua circulante lleva este calor latente y lo entrega a la atmósfera en las torres de refrigeración o mar, posteriormente regresa de nuevo la bomba y así puede ser reutilizado.



## Bomba de agua de alimentación

La bomba de alimentación de agua está encargada de transportar el agua proveniente del desgasificador, encargado de eliminar los gases del agua de alimentación, y elevar la presión correspondiente en el circuito de agua-vapor (baja, media y alta presión) hasta la entrada de la caldera. La presión transportada en el circuito de agua-vapor es ligeramente superior a la del calderín.

**Figura 5**  
Ciclo Combinado



Nota. Adaptado de Centrales Térmicas de Ciclo combinado, por PumpsBombas, s.f., <https://pumpsbombas.com/curso/curso-bombas-en-centrales-de-ciclo-combinado/leccion/centrales-termicas-de-ciclo-combinado/>.

## 4. CONCLUSIONES

- La central termoeléctrica de gas obtiene un rendimiento alrededor de 37% con un suministro de gas natural; no obstante, la central puede incrementar capacidad instalada implementando un ciclo combinado obteniendo un rendimiento cercano al 60%, con el mismo suministro que empezó.
- El compresor realiza el mayor trabajo en las centrales termoeléctricas de ciclo combinado, puesto que el compresor tiene que elevar la temperatura y la presión de la masa de aire proveniente del sistema de admisión de aire.

## 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Gonzales, J. (s.f.). Centrales Térmicas: Apuntes de Centrales de Ciclo de Brayton. Universidad Nacional de Tucumán. <https://catedras.facet.unt.edu.ar/centraleselectricas/wp-content/uploads/sites/19/2014/10/Apunte-TG-1.pdf>
- [2] Gonzales, J. (s.f.). Centrales Térmicas: Apuntes de Centrales de Ciclo de Rankine. Universidad Nacional de Tucumán. <https://catedras.facet.unt.edu.ar/centraleselectricas/wp-content/uploads/sites/19/2014/10/Apunte-Central-TV-1.pdf>
- [3] Gonzales, J. (s.f.). Centrales Térmicas: Apuntes de Centrales de Ciclo Combinado. Universidad Nacional de Tucumán. <https://catedras.facet.unt.edu.ar/centraleselectricas/wp-content/uploads/sites/19/2014/10/Apunte-Central-CC-1.pdf>
- [4] Inmaculada, D. y Robles, A. (s.f.). Centrales de Generación de Energía Eléctrica. Unidad Didáctica 4: Centrales Térmicas. Universidad de Cantabria. <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/1160/course/section/1407/bloque-energia-IV.pdf>
- [5] Dirección General de Electricidad (DGE). Informativo DGE N° 10 octubre 2006. Noviembre de 2006 (Perú).
- [6] Paredes, S. (2015). Análisis termodinámico de los ciclos de Rankine. Universitat Politècnica de Catalunya Barcelonatech. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/25938/TFG%20Sergi%20Fuste.pdf>
- [7] Gómez Garnica, S. G. y Hernández Barajas, J M. (2019). Estudio exergoambiental de una central térmica con un mejoramiento del sistema de enfriamiento del aire de admisión aprovechando los gases de salida de la turbina. [Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar el título de ingeniero en energía, Universidad Autónoma de Bucaramanga]. [https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/7142/2019\\_Tesis\\_Saray\\_Gisella\\_Gomez\\_Garnica.pdf?sequence=1](https://repository.unab.edu.co/bitstream/handle/20.500.12749/7142/2019_Tesis_Saray_Gisella_Gomez_Garnica.pdf?sequence=1)
- [8] Quiñones, F. (2016). Central Termoeléctrica ChilcaUno Perú. [https://research.gsd.harvard.edu/zofnass/files/2016/08/03\\_ChilcaUno\\_SP\\_FinalDocument.pdf](https://research.gsd.harvard.edu/zofnass/files/2016/08/03_ChilcaUno_SP_FinalDocument.pdf)
- [9] PumpBombas Academy for Pumps. (s.f.). Centrales Térmicas de Ciclo Combinado. <https://pumpsbombas.com/curso/curso-bombas-en-centrales-de-ciclo-combinado/leccion/centrales-termicas-de-ciclo-combinado/>

Autor : Jonathan Pajuelo Valle - Auxiliar de Proyectos

Edición : Lic. Dara Carrion Contreras, Responsable de Marketing e Imagen Corporativa

### ¡Contáctanos!

**Celular** : 998368833

**Correo** : citeenergia@citeenergia.com.pe

**Dirección** : Mz. G Lote 2 y 3 Parque Industrial Ancón

**CITE energía**

Lima / Silicon Technology



PERÚ

Ministerio  
de la Producción

