



## **Title: Análisis termodinámico de un ciclo combinado gas – vapor sin y con Postcombustión**

**Authors: CASADOS-LÓPEZ, Edzel Jair, CASADOS-SÁNCHEZ, Alvaro, ESCAMILLA-RODRÍGUEZ, Frumencio and CORTÉZ-DOMÍNGUEZ, Cristóbal**

**Editorial label ECORFAN: 607-8695**

**BCIERMMI Control Number: 2021-01**

**BCIERMMI Classification (2021): 271021-0001**

**Pages: 16**

**RNA: 03-2010-032610115700-14**

### **ECORFAN-México, S.C.**

143 – 50 Itzopan Street

La Florida, Ecatepec Municipality

Mexico State, 55120 Zipcode

Phone: +52 1 55 6159 2296

Skype: ecorfan-mexico.s.c.

E-mail: [contacto@ecorfan.org](mailto:contacto@ecorfan.org)

Facebook: ECORFAN-México S. C.

Twitter: [@EcorfanC](https://twitter.com/EcorfanC)

**[www.ecorfan.org](http://www.ecorfan.org)**

### **Holdings**

Mexico	Colombia	Guatemala
Bolivia	Cameroon	Democratic
Spain	El Salvador	Republic
Ecuador	Taiwan	of Congo
Peru	Paraguay	Nicaragua

# Introducción

El hombre tiene una tendencia natural de hacer pruebas para mejorar las eficiencias de los dispositivos que transforman la energía térmica en trabajo mecánico. Además el elevado costo de los combustibles fósiles y las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera es un estímulo para realizar este tipo de investigación.



El propósito de este artículo es analizar las plantas de ciclo combinado donde se considera añadir el combustible en la caldera (Postcombustión) y con esto aumentar la producción de vapor o para mejorar la calidad del vapor producido.

# Ciclo Combinado simple

Se puede definir un ciclo combinado como el acoplamiento de dos ciclos termodinámicos individuales, Brayton y Rankine, que trabajan con fluidos diferentes: gas y agua-vapor.

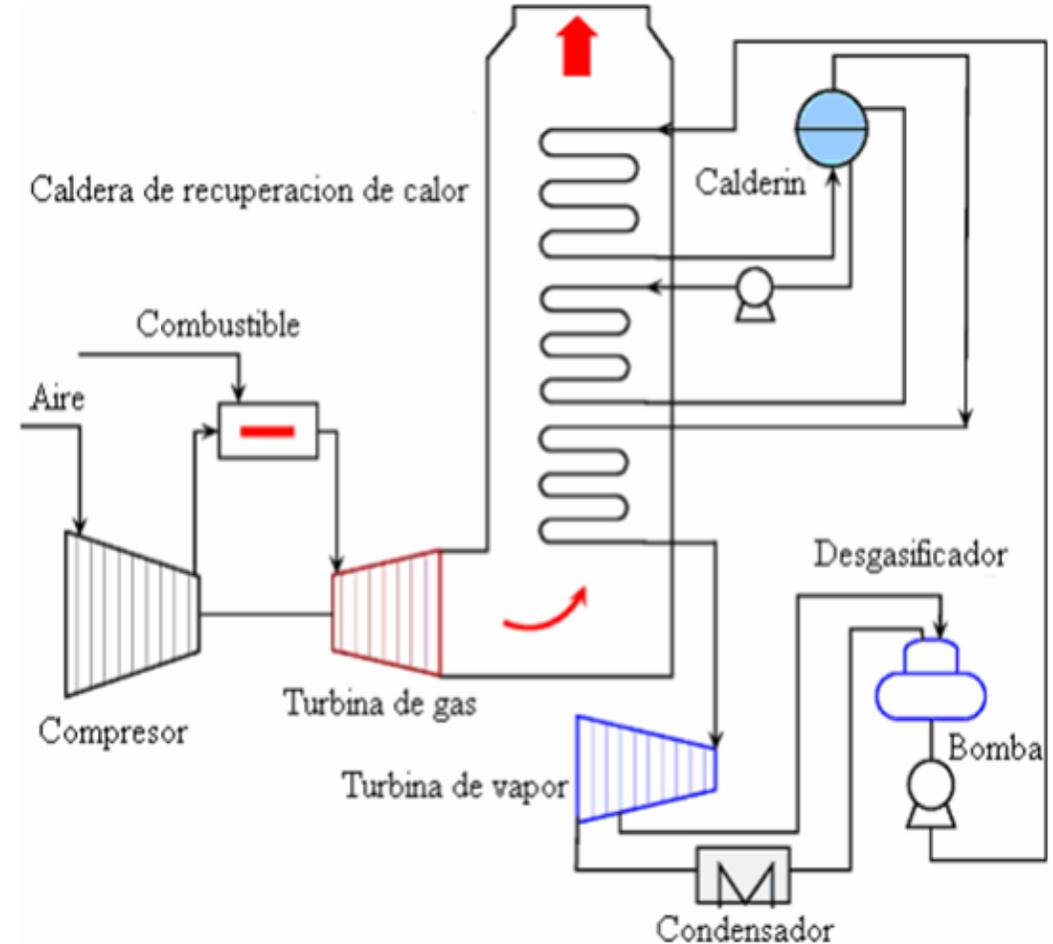
El calor residual de los gases de escape de la turbina de gas, se aprovechan en su mayor parte en un intercambiador de calor para producir trabajo en un ciclo termodinámico de baja temperatura.

Si se considera a ambos ciclos (Brayton y Rankine) por separado, las eficiencias particulares se obtendrán de la siguiente manera: Para el proceso del ciclo de gas (Brayton):

$$\eta_{TG} = \frac{W_{TG}}{Q_{TG}}$$

Para el proceso del ciclo de vapor (Rankine):

$$\eta_{TV} = \frac{W_{TV}}{Q_{TV}}$$



# Ciclo Combinado con Postcombustión

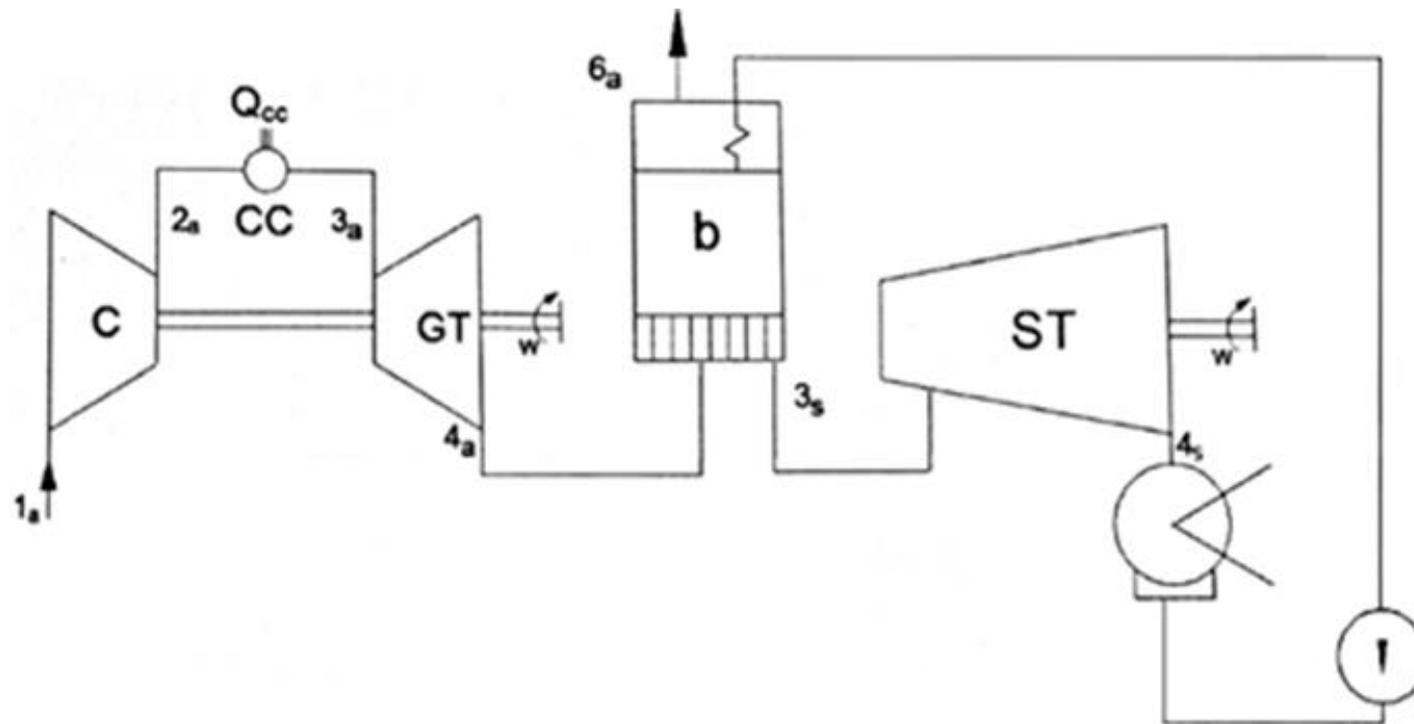
Los gases descargados por la turbina de gas se prestan a sufrir un posterior proceso de combustión, si acaso se considera necesario, el cual es conveniente efectuar al ingreso de la caldera de recuperación, mediante una serie de quemadores ubicados antes de la sección de intercambio térmico de la caldera como se observa en la figura.

La combustión así efectuada es conocida como "postcombustión", con el fin de aumentar la potencia a costo de un fuerte aumento del consumo de combustible.

En el ámbito del ciclo combinado puede ser interesante efectuar la postcombustión para aumentar la producción de vapor en la caldera por recuperación y consiguientemente la potencia de la turbina de vapor.

## Planta del Ciclo Combinado, sin considerar Postcombustión

A continuación, se presenta el diagrama esquemático de la planta de ciclo combinado gas-vapor simple



En seguida, se presentan los cálculos termodinámicos del ciclo combinado simple cuya referencia fue tomada del: Cerri, G., (1987) Parametric analysis of combined gas – steam cycles. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, vol. 109, pag. 46 – 54.

# Análisis del Ciclo combinado sin postcombustión.

## Ciclo de gas

**El trabajo de expansión en la turbina de gas**

$$W_{gt} = \left(1 + \frac{1}{\alpha_{gt}}\right) C_{pa3-4} (T_3 - T_{4a}) \eta_{mgt}$$

$$W_{gt} = \left(1 + \frac{1}{54}\right) 1.2136 (1536 - 899) 0.98$$

$$W_{gt} = \mathbf{770.88 \text{ KJ/Kg}}$$

**Calor Suministrado**

$$Q_s = \frac{\Gamma \eta_{bgt}}{\alpha_{gt}}$$

$$Q_s = \frac{(48490)(0.98)}{54.0}$$

$$Q_s = \mathbf{880 \text{ KJ/Kg}}$$

**El trabajo absorbido por el compresor es:**

$$W_c = \frac{C_{pa1-2}}{\eta_{mc}} (T_{2a} - T_1)(1 + \gamma)$$

$$W_c = \frac{1.005}{0.98} (738.91 - 305)(1 + 0.06315)$$

$$W_c = \mathbf{473.08 \text{ KJ/Kg}}$$

**Rendimiento térmico de la turbina de gas**

$$\eta_{gt} = \frac{W_{tg} - W_c}{Q_s}$$

$$\eta_{gt} = \frac{770.88 - 473.08}{880} = 0.3384 = \mathbf{33.84 \%}$$

# Análisis del Ciclo combinado sin postcombustión.

## Ciclo de Vapor

La **entropía** del vapor a la entrada de la turbina es:

$$s_{3s} = s(T_{3s}, p_{2s})$$

$$s_{3s} = 6.8149 \text{ KJ Kg / K}$$

La **calidad** a la salida de la turbina:

$$x = \frac{6.8149 - 0.61515}{7.5821} = 0.8176$$

$$H_{cs} = H_f + x H_{fg} \quad H_{cs} = 2143.88 \text{ KJ/Kg}$$

**Trabajo de la turbina de vapor:**

$$W_{st} = s (H_{3s} - h_{4s}) \eta_{ast} \eta_{mst}$$

$$W_{st} = 212.09 \text{ KJ/Kg}$$

**Calor suministrado:**

$$Q_s = s (H_{3s} - h_c)$$

$$Q_s = 615.12 \text{ KJ/Kg}$$

**Rendimiento térmico de la turbina de vapor:**

$$\eta_{st} = \frac{W_{st}}{Q_s}$$

$$\eta_{st} = 0.3448 = 34.48 \%$$

# Análisis del Ciclo combinado sin postcombustión.

**Rendimiento térmico del ciclo combinado sin Postcombustión:**

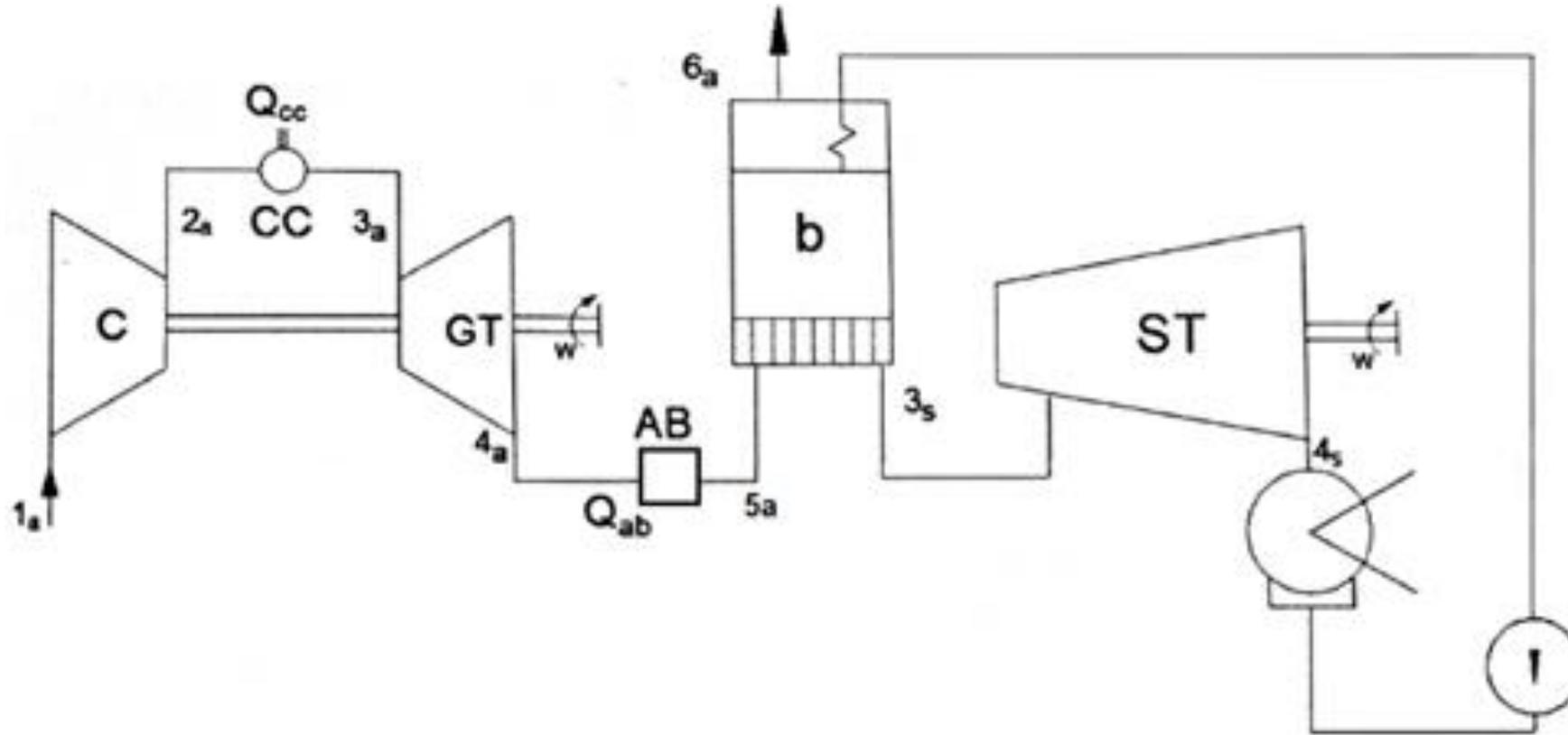
$$\eta_{cc} = (\eta_{tg} + \eta_{ts}) - \eta_{tg} \eta_{ts}$$

$$\eta_{cc} = (0.3384 + 0.3448) - (0.3384)(0.3448)$$

$$\eta_{cc} = 0.5665 = \mathbf{56.65 \%}$$

# Planta del Ciclo Combinado, considerando Postcombustión

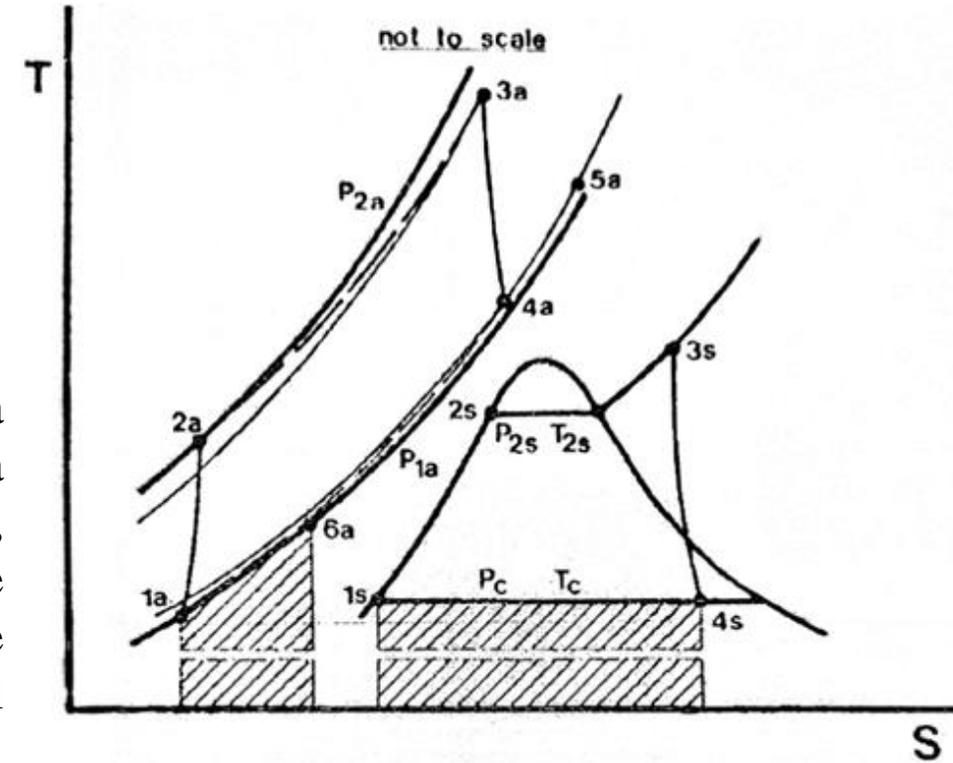
A continuación, se presenta el diagrama esquemático del ciclo combinado gas-vapor con Postcombustión.



## Ciclo combinado gas-vapor con Postcombustión.

El diagrama T-S del ciclo combinado gas – vapor con postcombustión, inicia con el accionamiento del compresor al admitir aire a las condiciones atmosféricas (1a), aumenta la presión y temperatura hasta (2a), este aire es suministrado a la cámara de combustión, en la cual se inyecta también el combustible.

Se realiza la combustión obteniéndose gases de combustión a alta temperatura (3a). Después de la combustión, los gases van hacia la turbina donde se efectúa la transformación de energía térmica a energía mecánica, saliendo en las condiciones (4a), se continua hacia la cámara de postcombustión donde se incrementa la energía térmica saliendo en (5a), se continua hacia el recuperador de calor donde los gases transfieren calor a el agua, siendo estos descargados a la atmosfera (6a).



El líquido que se suministra a el recuperador de calor sale como vapor sobrecalentado para entrar a la turbina de vapor (3s), después de llevarse la transformación este sale como un vapor con calidad (4s), en el condensador se realiza la condensación de este vapor (1s), finalmente este liquido es impulsado hacia el recuperador de calor para iniciar nuevamente el ciclo.

# Análisis del Ciclo Combinado con postcombustión.

## Ciclo de gas

**El trabajo de expansión en la turbina de gas**

$$W_{gt} = \left(1 + \frac{1}{\alpha_{gt}}\right) C_{pa3-4} (T_3 - T_{4a}) \eta_{mgt}$$

$$W_{gt} = \left(1 + \frac{1}{54}\right) 1.2136 (1536 - 899) 0.98$$

$$W_{gt} = \mathbf{770.88 \text{ KJ/Kg}}$$

**Calor Suministrado**

$$Q_s = \frac{\Gamma \eta_{bgt}}{\alpha_{gt}}$$

$$Q_s = \frac{(48490)(0.98)}{54.0}$$

$$Q_s = \mathbf{880 \text{ KJ/Kg}}$$

**El trabajo absorbido por el compresor es:**

$$W_c = \frac{C_{pa1-2}}{\eta_{mc}} (T_{2a} - T_1)(1 + \gamma)$$

$$W_c = \frac{1.005}{0.98} (738.91 - 305)(1 + 0.06315)$$

$$W_c = \mathbf{473.08 \text{ KJ/Kg}}$$

**Rendimiento térmico de la turbina de gas**

$$\eta_{gt} = \frac{W_{tg} - W_c}{Q_s}$$

$$\eta_{gt} = \frac{770.88 - 473.08}{880} = 0.3384 = \mathbf{33.84 \%}$$

# Análisis del Ciclo combinado con postcombustión.

## Ciclo de Vapor

**Trabajo de la turbina de vapor**

$$W_{st} = S (H_{3s} - h_{4s})\eta_{ast}\eta_{mst}$$

$$W_{st} = 0.3854 (3457.87 - 2227.32)(0.9312)(0.98)$$

$$W_{st} = 432.79 \text{ KJ/Kg}$$

**Calor suministrado**

$$Q_s = S (H_{3s} - h_c)$$

$$Q_s = 0.3854 (3257.87 - 182.46)$$

$$Q_s = 1262.34 \text{ KJ/Kg}$$

**Rendimiento térmico de la turbina de Vapor:**

$$\eta_{st} = \frac{W_{st}}{Q_s}$$

$$\eta_{st} = \frac{432.79}{1262.34}$$

$$\eta_{st} = 0.3428 = \mathbf{34.28 \%}$$

# Análisis del Ciclo combinado con postcombustión.

## **Rendimiento térmico del ciclo combinado con Postcombustión:**

$$\eta_{cc} = (\eta_{tg} + \eta_{ts}) - \eta_{tg} \eta_{ts}$$

$$\eta_{cc} = (0.3384 + 0.3428) - (0.3384)(0.3428)$$

$$\eta_{cc} = 0.5652 = \mathbf{56.52 \%}$$

# Resultados

Estos resultados nos indican que al utilizar postcombustión en un ciclo combinado gas – vapor como el de este caso de estudio, la única variación que existe es en la turbina de vapor debido a la diferencia de las relaciones masa de vapor – aire.

Ciclo Combinado	$W_c$	$W_{gt}$	$W_{st}$	$W_{CC}$	$\eta_{CC}$
Sin Post combustión KJ/Kg	473.08	770.88	212.09	509.89	56.65 %
Con Post combustión KJ/Kg	473.08	770.88	435.25	773.05	56.52 %

$W_{CC}$  = Trabajo neto del ciclo combinado

$\eta_{CC}$  = Rendimiento térmico del ciclo combinado

# Conclusión y Resultados

En este trabajo de investigación se llevó a cabo la comparación de un ciclo combinado gas - vapor sin y con postcombustión, donde se consiguió conocer la ventaja de adicionar un sistema de combustión complementaria antes del recuperador de calor, obteniéndose los siguientes resultados:

Para el caso del ciclo combinado **sin** postcombustión:

$$W_c = 473.08 \text{ KJ/Kg}$$

$$W_{gt} = 770.88 \text{ KJ/Kg}$$

$$W_{st} = 212.09 \text{ KJ/Kg}$$

$$W_{CC} = 509.89 \text{ KJ/Kg}$$

$$\eta_{CC} = 0.5665 = 56.65 \%$$

Para el caso del ciclo combinado **con** postcombustión:

$$W_c = 473.08 \text{ KJ/Kg}$$

$$W_{gt} = 770.88 \text{ KJ/Kg}$$

$$W_{st} = 435.25 \text{ KJ/Kg}$$

$$W_{CC} = 773.05 \text{ KJ/Kg}$$

$$\eta_{CC} = 0.5652 = 56.52 \%$$

# Referencias

- Aschener, F. S. (1972). The Optimal Choice of Heat Engines for Power Plants of 10 MW to 250 MW Electric Output. Israel Journal of Technology, Vol. 10, No. 4, pp. 223 – 231.
- Carmona Contrera, S.A. (2008). Estudio de controladores de ciclo combinado para el mejoramiento de la respuesta dinámica de la unidad. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago de Chile. Tesis Maestría.
- Cerri, G., (2015). “Parametric Analysis of Combined Gas Steam Cycles”, ASME Paper No. 82-GT-95.
- Fraize, W. E., and Kinney, C., (1979). Effects of Steam Injection on the Performance of Gas Turbine Power Cycles. “ASME Journal of Engineering for Power, Vol. 101, pp. 217-227.
- Jassim, R. K., Zaki, G.M., Alhazmy, M.M., (2010). Thermo – Economic analysis of a gas turbine power plant with cooled air intake, Yanbu Journal of Engineering and Science.
- Kakaras, E, Doukelis, A., Preliceanu, A., Karellas, S., (2006). Inlet air cooling Methods for gas turbine based power plants, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 128,312-317.
- Kehlhofer R (1997). Combined cycle Gas and steam Turbine power Plant pennwell publishing company ISBN-0-87814-736-5.
- L. J. Nayak, D. Mahto. (2014). Parametric Analysis of Combined Cycle Power Plant Using Inlet Vapour Compression Cycle. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering.
- Mendoza Nalvarte, J. (2002). Análisis del diseño termodinámico de centrales eléctricas de ciclo combinado. Repositorio Institucional de la Universidad de Piura. Tesis de Licenciatura.
- Nag P.K. (2009). Power Plant Engineering. Tata McGraw-Hill Publishing company limited. New Delhi ISBN-13: 978-0-07-064815- 9.

- Olguin Mejia, A. (2010). Optimización de la planta de ciclo combinado Tula: Sustitución de las calderas de recuperación de calor. Repositorio Institucional UNAM. México. Tesis de Maestría.
- Ondryas, I.S., Wilson, D. A., Kawamoto, M., Haub G.L., (1991). Option in gas Turbine power augmentation using inlet air chilling, engineering gas turbine and power, ASME 113 203-2012.
- Pfenninger, H., (1982). "Combined steam and gas turbine power stations, Brown Boveri, Paper No. CH-T 040013E.
- Quiñones Gutierrez, E. M., & Saldaña Castillo, E. A. (2020). Diseño de una central termoeléctrica de cogeneración de 5 MW para la planta Backus-Motupe.
- Sanjay (2013), Energy and exergy analysis of combined cycle systems with different bottoming cycle configurations, Int J.Energy Res. 37: 899-912.
- Sanjay, Onkar Singh, B N Prasad, (2008). Influence of different means of Turbine blade cooling on thermodynamic performance of combined cycle, Applied thermal Engineering 28 2315-2326.
- Sonneuschain, H., (1982). A Modular Optimizing Calculation Method of Power Station Energy Balance and Plant Efficiency. "ASME Journal of Engineering of Power, Vol. 104, pp. 225 – 259.
- Subugal Garcia, S., & Gomez Moñux, F. (2006). Centrales Térmicas de Ciclo combinado: Teoría y Proyecto. Fernández: Díaz de Santos.
- Tomlinson, L. O. and George, R. L., (1981). Scelta di una turbina a gas e di un ciclo a vapore per il Massimo rendimento di un ciclo combinato. Nuovo pignone, Energia totale dalle Turbine a Gas, Firenze. pp. 1-9.
- Wunsch A. (1978). Centrales combinees a turbines a gaz et a vapeur. Situation actuelle et développements futurs, "Rev. Brown Boveri, Vol. 65, No. 10, Oct, pp. 646-655.
- Yadav R (2004) steam and gas turbine and Power plant Engineering. Central publishing House, Allahabad.



**ECORFAN®**

© ECORFAN-Mexico, S.C.

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162,163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169,209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. BCIERMMI is part of the media of ECORFAN-Mexico, S.C., E: 94-443.F: 008- ([www.ecorfan.org/booklets](http://www.ecorfan.org/booklets))