

Metodología de cálculo de un sistema de cogeneración topping en planta textil con generador de vapor de 18 TM y turbina de contrapresión de 20 MW

Fecha enviada: 2 septiembre 2025

Fecha corregida: 29 septiembre 2025

Mario Santizo Calderón¹

RESUMEN

En este artículo se presenta las variables más importantes para dimensionar y definir la eficiencia de los sistemas de cogeneración. Las variables más importantes a tomar en cuenta en un sistema de cogeneración son: El factor de cogeneración, el rendimiento eléctrico equivalente y la relación calor electricidad. Estos parámetros se analizan a diferentes eficiencias de la turbina a contrapresión para visualizar los efectos de estas variables con el cambio de eficiencia térmica que es una herramienta poderosa para cuantificar y evaluar estos sistemas

ABSTRACT

This article presents the most important variables for sizing and defining the efficiency of cogeneration systems. The most important variables to consider in a cogeneration system are: the cogeneration factor, the equivalent electrical output (EEE), and the heat-electricity ratio (HEER). These parameters are analyzed at different backpressure turbine efficiencies to visualize the effects of these variables on the change in thermal efficiency, which is a powerful tool for quantifying and evaluating these systems.

Como objetivo determinante se evaluó el comportamiento de las turbinas de contrapresión a diferentes eficiencias, el factor de cogeneración (FC), el rendimiento eléctrico equivalente (REE) y la relación calor electricidad (RCE). Es un estudio de casos de acuerdo con mediciones en la textilería y se concluye con la tendencia del factor de cogeneración, relación calor/electricidad y el rendimiento eléctrico equivalente a diferentes eficiencias de turbina.

Palabras clave: termodinámica, cogeneración, energía, caldera, eficiencia, textiles, ciclos

As a key objective, the performance of backpressure turbines was evaluated at different efficiencies, including the cogeneration factor, the equivalent electrical output (EEE), and the heat-electricity ratio (HEER). This is a case study based on measurements in the textile industry and concludes with trends in the cogeneration factor, heat-electricity ratio, and equivalent electrical output at different turbine efficiencies.

Keywords: thermodynamics, cogeneration, energy, boiler, efficiency, textiles, cycles

PhD en eficiencia Energética, Master en Energía Renovable y Eficiencia Energética y en Ingeniería del Azúcar, egresado de la Universidad de San Carlos de Guatemala como Ingeniero Químico, Código 472 del Registro Nacional de Investigadores (RNI), Ha dictado seminarios sobre energía y procesos a gerentes de producción a nivel de Centroamérica y Panamá, dirigido industrias de cemento, aceites y grasas, jabones y detergentes, extractoras de minerales metálicos y director de la División de Servicios Técnicos Industriales del Instituto Centroamericano de Investigación y Tecnología Industrial ICAITI). Dirigió el programa regional (Centroamérica y Panamá) CURECA sobre eficiencia energética en la industria y en el sector vehicular de la Comisión Europea. Ha realizado 135 estudios de energía a nivel de Centroamérica, Panamá y Brasil, profesor en varias universidades nacionales e internacionales y ha impartido 32 cursos diferentes correspondiente al área profesional de Ingeniería Química y energía en Licenciaturas, Maestrías y Doctorados en el área de eficiencia energética y sostenibilidad ambiental. Ha sido Decano de la Facultad de Ingeniería y Director de Ingeniería Química en la Universidad Rafael Landívar durante 10 años. Es autor del libro: Balance de materia y energía para equipos de proceso y de potencia con ISBN 99922-2.335-9. Aparece en la revista Who is Who in the World of United Nations Framework Convention on Climate Change . proenergia.com@gmail.com

Metodología de cálculo de un sistema de cogeneración topping en planta textil con generador de vapor de 18 TM y turbina de contrapresión de 20 MW

Fecha enviada: 2 septiembre 2025

Fecha corregida: 29 septiembre 2025

INTRODUCCIÓN

El análisis del sistema Topping de cogeneración considerado en la textilera, opera con vapor de agua que entra a la turbina a 8 MPa y 500 °C [1]. Después de la caldera, se deriva el 25% del vapor a la fábrica de textiles [7] y luego, 15% más del vapor de la caldera [8], colocándose en ambos casos un reductor de presión. De la extracción de la turbina se extrae el 10% del vapor a 500 kPa para utilizarse en la fábrica de textiles [9], mientras el restante continúa su expansión hasta 5 kPa [2], condensándose a presión constante. Después, el fluido se bombea al tanque de retorno de condensados [3] al cual ingresa también el líquido saturado proveniente de la fábrica de textiles [10] y el agua fresca. Luego del tanque de retorno de condensados [5], el fluido se bombea hacia la caldera a 8 MPa [6]. El vapor ingresa al proceso textil en tres diferentes puntos y sale como líquido saturado a 500 kPa. El flujo másico de vapor es de 56,000 kg/h y se pierde por purga en masa el 3.5%, aunque el jefe de proyectos calculó un 3.00% en el diseño. La

eficiencia de caldera es del 90%. El combustible es búnker, los datos corresponden a mediciones realizadas durante 15 días de acuerdo al procedimiento que se presenta en el apéndice. El 10% de la potencia eléctrica producida se utiliza para iluminación, bombeo, ventiladores y automatización del sistema de cogeneración. El objetivo es relacionar las variables de operación con la eficiencia de la turbina de contrapresión.

Metodología

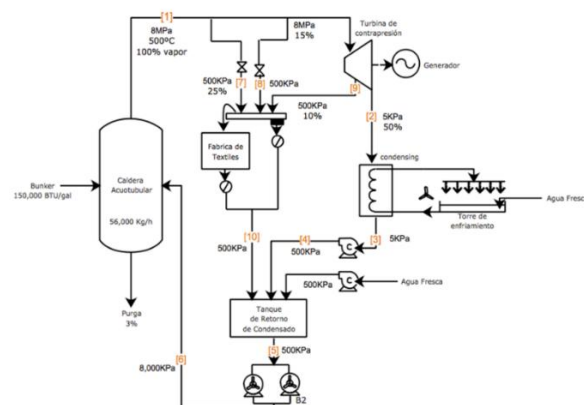
Para evaluar el impacto de la eficiencia de la turbina, se utilizaron una serie de resultados calculados a diferentes niveles de eficiencia de la turbina. Aunque los datos presentados son el resultado de cálculos (o simulaciones) y no de mediciones experimentales directas en un sistema real, ofrecen una base sólida para el análisis de tendencias y relaciones. Las variables clave de operación se definen de la siguiente manera:

- **Factor de cogeneración:** Mide la proporción de la energía útil total producida (eléctrica y térmica) en relación con la energía del combustible consumido. Un factor más alto indica una mayor eficiencia global del sistema.
- **Rendimiento eléctrico equivalente:** Representa la eficiencia con la que el sistema convierte la energía del combustible en electricidad útil, considerando el calor recuperado. Permite comparar la eficiencia eléctrica de un sistema de cogeneración con la de una planta de generación eléctrica convencional.
- **Relación calor-electricidad:** Indica la proporción de calor útil generado por unidad de electricidad producida. Esta relación es crucial para adecuar el sistema a las demandas de calor y electricidad de una aplicación específica.

Los datos analizados corresponden a los siguientes puntos de eficiencia de turbina: 100%, 90%, 75% y 60%. Para cada uno de estos puntos, se obtuvieron los valores correspondientes para el factor de cogeneración, el rendimiento eléctrico equivalente y la relación calor-electricidad.

A continuación, durante todo el artículo se presenta el cálculo de las variables:

Figura 1. Ciclo de cogeneración en fábrica de textiles



Metodología de cálculo de un sistema de cogeneración topping en planta textil con generador de vapor de 18 TM y turbina de contrapresión de 20 MW

Fecha enviada: 2 septiembre 2025

Fecha corregida: 29 septiembre 2025

CÁLCULO DE LAS VARIABLES DE OPERACIÓN

Según: (Boyce, 2010), (Horlock, 2002), (Goswani & Kreith, 2008), (Santizo Calderón, 2007), (Capehart, Turner, & Kennedy, 2008) determinación del factor de cogeneración, REE y RCE para eficiencia de turbina generando vapor a 8 MPa y 500°C (Capehart, Turner, & Kennedy, 2008). Con base en la Figura 1, se determina el balance de masa.

$$\text{Vapor producido : } \dot{m}_1 = 56,000 \frac{\text{kg}}{\text{h}} = 15.556 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Balance de masa :

$$\begin{aligned} \dot{m}_1 &= \dot{m}_7 + \dot{m}_8 + \dot{m}_9 + \dot{m}_2 \quad \dot{m}_7 = (0.25) \left(15.556 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) \\ &= 3.889 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \end{aligned}$$

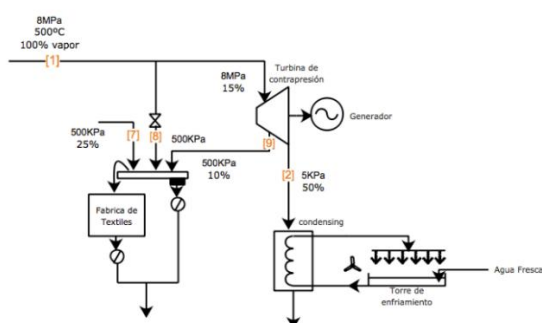
$$\dot{m}_8 = (0.15) \left(15.556 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) = 2.3334 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$= (0.10) \left(15.556 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) = 1.5556 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_4 = (0.5) \left(15.556 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) = 7.778 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_{10} = \dot{m}_7 + \dot{m}_8 + \dot{m}_9 = 7.778 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Figura 2. Sección de la Figura 1 utilizada para el cálculo de entalpías



$$\left[\begin{array}{l} \text{Estado 1} \quad \text{Entrada Turbina} \\ P_1 = 8 \text{ MPa} \\ T_1 = 500^\circ \text{C} \end{array} \right]$$

$$\Rightarrow \left[\begin{array}{l} \text{Vapor sobrecalentado De tabla A - 6} \\ h_1 = 3,399.50 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ s_1 = 6.7266 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \end{array} \right]$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{Estado 3} \quad \text{Entrada Bomba 1} \\ P_3 = 5 \text{ kPa} \\ h_3 = 137.75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{array} \right]$$

$$\Rightarrow \left[\begin{array}{l} \text{De tabla A - 5} \\ v_3 = 0.001005 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \end{array} \right]$$

De la tabla

$$\left[\begin{array}{l} \text{Estado 2 Salida Turbina} \\ P_2 = 5 \text{ kPa} \\ s_2 = s_1 = 6.7266 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \end{array} \right]$$

$$\begin{aligned} S_2 &= S_f + x S_{fg} \Rightarrow \\ X_f &= \frac{S_2 - S_f}{S_{fg}} = \frac{6.7266 - 0.4762}{7.9176} = 0.7894 \\ \Rightarrow h_2 &= h_f + x_{fg} h_{fg} = 137.75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.7894 (2,423.00) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ h_2 &= 2,050.47 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

$$\left[\begin{array}{l} \text{Estado 9} \\ P_9 = 500 \text{ kPa} \\ s_2 = s_1 = 6.7266 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \end{array} \right]$$

$$\begin{aligned} S_2 &= S_f + x S_{fg} \Rightarrow \\ X_f &= \frac{S_2 - S_f}{S_{fg}} = \frac{6.7266 - 1.8604}{4.9603} = 0.9810 \\ \Rightarrow h_9 &= h_f + x_{fg} h_{fg} = 640.09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.9810 (2,108) \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ h_9 &= 2,708.04 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

Metodología de cálculo de un sistema de cogeneración topping en planta textil con generador de vapor de 18 TM y turbina de contrapresión de 20 MW

Fecha enviada: 2 septiembre 2025

Fecha corregida: 29 septiembre 2025

De la tabla

[Estado 4 Salida Bomba 1]

$P_2 = 500 \text{ kPa}$

$$\Rightarrow W_{B1} = v_3 (P_4 - P_3)$$

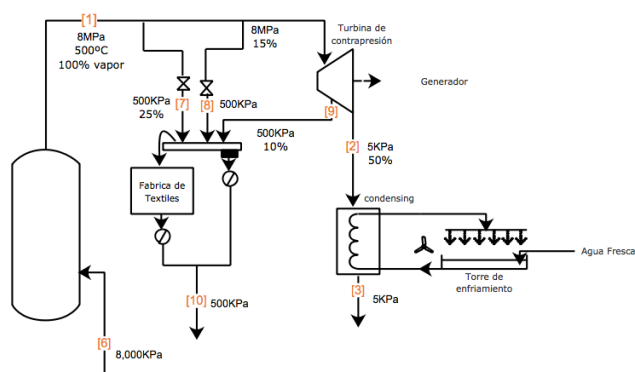
$$W_{B1} = 0.001005 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} (500 - 5) \text{ kPa} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kPa} \cdot \text{m}^3} \right)$$

$$W_{B1} = 0.497475 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_4 = h_3 + W_{B1} = 137.75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.497475 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$h_4 = 138.247 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Figura 3. Sección de la Figura 1 utilizada para el cálculo de la entalpía del proceso

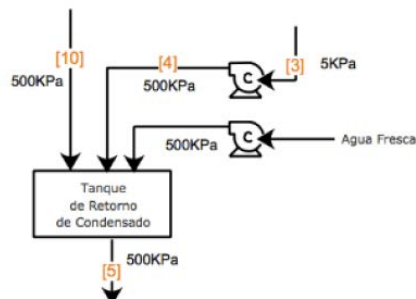


Análisis del proceso de textiles :

[Estado entrada
 $P_{\text{entrada}} = 500 \text{ kPa}$
 $h_{\text{proceso}} = 2,740.09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$]

[Estado 10 entrada tanque de retornados
 $P_a = 500 \text{ kPa}$
 $h_{10} = 640.09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$]

Figura 4. Sección de la Figura 1 para el análisis de la salida del tanque de retorno de condensados



Cálculo de entalpía entrando proceso :

$$\dot{m}_{\text{proceso}} h_{\text{proceso}} = \dot{m}_7 h_7 + \dot{m}_8 h_8 + \dot{m}_9 h_9$$

$$\dot{m}_7 h_7 = 2,748.10 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \left(3.889 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) = 10,687.40 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_8 h_8 = 2,748.10 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \left(2.3334 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) = 6,412.42 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$\dot{m}_9 h_9 = 2,708.04 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \left(1.5556 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) = 4,212.63 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

$$h_{\text{proceso}} = \frac{10,687.40 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} + 6,412.42 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} + 4,212.63 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}}{7.778 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}$$

$$= 2,740.09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Calor consumido por el Proceso Térmico :

$$\dot{Q}_{\text{Proceso}} = \dot{m}_{\text{proceso}} (h_{\text{proceso}} - h_{10})$$

$$\dot{Q}_{\text{Proceso}} = 7.778 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left(2,740.09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 640.09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right)$$

$$\dot{Q}_{\text{Proceso}} = 16,333.80 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

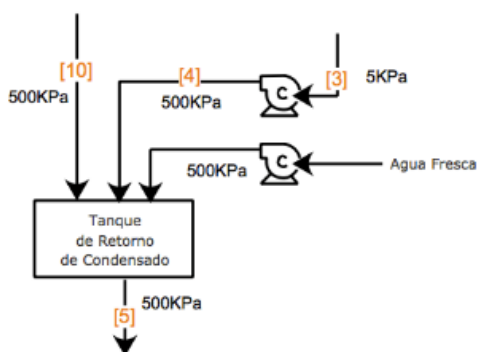
Agua Fresca : se asume que ingresa 3.5%
a 25°C y 300kPa

Metodología de cálculo de un sistema de cogeneración topping en planta textil con generador de vapor de 18 TM y turbina de contrapresión de 20 MW

Fecha enviada: 2 septiembre 2025

Fecha corregida: 29 septiembre 2025

Figura 4. Sección de la Figura 1 para el análisis de la salida del tanque de retorno de condensados



$$\left[\begin{array}{l} \text{Estado Agua fresca} \\ P_{\text{fresca}} = 300 \text{ kPa} \\ T = 25^\circ\text{C} \end{array} \right] \Rightarrow \left[\begin{array}{l} h_{\text{fresca}} = 104.83 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ v_{\text{fresca}} = 0.001003 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \end{array} \right]$$

$$\begin{aligned} W_2 &= v_{\text{fresca}} (P_5 - P_{\text{fresca}}) \\ &= 0.001003 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} (500 - 300) \text{ kPa} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kPa} \cdot \text{m}^3} \right) \\ &= 0.2006 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_{\text{fresca}} &= h_{\text{fresca}} + W_{B \text{ Fresca}} \\ &= 104.83 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 0.2006 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ &= 105.031 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

Tanque de Retorno de Condensados :

Salida tanque condensados

$$\dot{m}_5 h_5 = \dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{\text{fresca}} h_{\text{fresca}}$$

En donde :

$$\begin{aligned} \dot{m}_{4=2} h_4 &= 138.247 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \left(7.778 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) \\ &= 1,075.29 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Calor consumido por el Proceso Térmico :

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{\text{Proceso}} &= \dot{m}_{\text{proceso}} (h_{\text{proceso}} - h_{10}) \\ \dot{Q}_{\text{Proceso}} &= 7.778 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \left(2,740.09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 640.09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \\ \dot{Q}_{\text{Proceso}} &= 16,333.80 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \end{aligned}$$

Agua Fresca : se asume que ingresa 3.5% a 25°C y 300kPa

$$\begin{aligned} \dot{m}_{10} h_{10} &= 640.09 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \left(7.778 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) \\ &= 4,978.62 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{\text{fresca}} h_{\text{fresca}} &= 105.031 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \left(\underbrace{0.54446 \frac{\text{kg}}{\text{s}}}_{3.5\%} \right) \\ &= 57.1852 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h_5 &= \frac{\dot{m}_4 h_4 + \dot{m}_{10} h_{10} + \dot{m}_{\text{fresca}} h_{\text{fresca}}}{\dot{m}_5} \\ &= \frac{\left(1,075.29 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} + 4,978.62 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} + 57.1852 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right)}{\dot{m}_4 + \dot{m}_{10} + \dot{m}_{\text{fresca}}} \\ &= \frac{\left| 1,075.29 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} + 4,978.62 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} + 57.1852 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \right|}{\left(7.778 \frac{\text{kg}}{\text{s}} + 7.778 \frac{\text{kg}}{\text{s}} + 0.54446 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right)} \\ &= 379.560 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

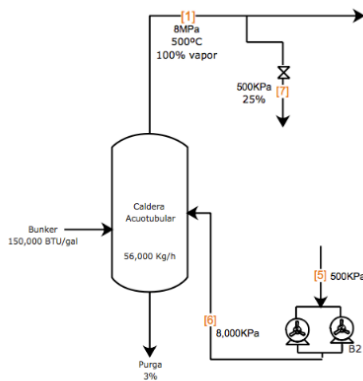
$$\begin{aligned} \left[\begin{array}{l} \text{Estado 5} \\ P_5 = 500 \text{ kPa} \end{array} \right] &\Rightarrow \left[v_{500 \text{ kPa}} = 0.001093 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] \\ W_{B2} &= v_5 (P_6 - P_5) \\ &= 0.001093 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} (8,000 - 500) \text{ kPa} \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kPa} \cdot \text{m}^3} \right) \\ &= 8.1975 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ h_6 &= h_5 + W_{B2} = 379.560 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + 8.1975 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \\ &= 387.75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

Metodología de cálculo de un sistema de cogeneración topping en planta textil con generador de vapor de 18 TM y turbina de contrapresión de 20 MW

Fecha enviada: 2 septiembre 2025

Fecha corregida: 29 septiembre 2025

Figura 5. Sección de la Figura 1 utilizada para determinar la energía aportada por el combustible



Energía aportada por combustible (calor Neto de Caldera) :

$$\dot{Q}_{\text{Entrada}} = \dot{m}_1 h_1 - \dot{m}_6 h_6$$

$$\dot{Q}_{\text{Entrada}} = \left(15.556 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) 3,399.50 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$+ \left[\left(0.5642 \right) \left(1,317.10 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) - \left(0.5642 \right) \left(1,317.10 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \right]$$

$$\left(16.1005 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) 387.75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{Q}_{\text{Entrada}} = 46,639.70 \frac{\text{kJ}}{\text{s}} \left(\frac{1 \text{ kW}}{1 \text{ kJ/s}} \right)$$

$$= 46,639.70 \text{ kW}$$

Determinar el factor de cogeneración.

Rendimiento eléctrico equivalente (REE) y Relación calor/electricidad (RCE) para eficiencia de turbina del 100% (Rayaprolu, Boilers for Power and Process, 2009)

TRABAJO TURBINA 100% EFICIENCIA :

Trabajo realizado turbina :

$$\begin{aligned} W_{\text{Turbina}} &= (h_1 - h_9) + (1 - 0.1645)(h_9 - h_2) \\ &= (3,399.50 - 2,708.04) + (1 - 0.1645)(2,708.04 - 2,050.47) \\ &= 1,240.86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

$$\dot{W}_{\text{Turbina}} = (W_{\text{Turbina}})(\dot{m}_9 + \dot{m}_2)$$

$$\dot{W}_{\text{Turbina}} = \left(1,240.86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \left(1.5556 \frac{\text{kg}}{\text{s}} + 7.778 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) \left(\frac{1 \text{ kW}}{1 \text{ kJ/s}} \right)$$

$$= 11,581.7 \text{ kW} \equiv 11.582 \text{ MW}$$

Factor de Corgeneración :

Considerando que se utiliza el 10% del trabajo de la turbina en el porceso

$$\varepsilon_u = \frac{\dot{W}_{\text{neto}} + \dot{Q}_{\text{Proceso}}}{\dot{Q}_{\text{Entrada}}}$$

$$= \frac{\dot{W}_{\text{neto}}}{\dot{Q}_{\text{Entrada}}} = \frac{0.9(\dot{W}_{\text{Turbina}}) + 16,333.80 \text{ kW}}{46,639.70 \text{ kW}}$$

$$\varepsilon_{u\%} = \left(\frac{(0.9)(11,581.7 \text{ kW}) + 16,333.80 \text{ kW}}{46,639.70 \text{ kW}} \right) (100)$$

$$= 57.37\%$$

Metodología de cálculo de un sistema de cogeneración topping en planta textil con generador de vapor de 18 TM y turbina de contrapresión de 20 MW

Fecha enviada: 2 septiembre 2025

Fecha corregida: 29 septiembre 2025

Relación Calor Electricidad (RCE) :

$$\begin{aligned} RCE &= \frac{\dot{Q}_{\text{Proceso}}}{\dot{W}_{\text{Neto}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Proceso}}}{0.9(\dot{W}_{\text{Turbina}})} \\ &= \frac{16,333.80 \text{ kW}}{0.9(11,581.7 \text{ kW})} \\ &= \boxed{1.567} \end{aligned}$$

Rendimiento Eléctrico Equivalente :

$$\begin{aligned} REE &= \frac{\dot{W}[\text{kWh}]}{\left(\frac{\text{combustible}}{h}\right)(\text{HHV})[\text{kWh}] - \left(\frac{\dot{Q}_{\text{Proceso}}}{\eta}\right)} \\ &= \frac{11,581.7 \text{ kW}}{46,639.70 \text{ kW} - \left(\frac{16,333.80 \text{ kW}}{0.9}\right)} \\ &= \frac{11,581.7 \text{ kW}}{(46,639.70 \text{ kW} - 18,148.67 \text{ kW})} (100) \\ &= \left(\frac{11,581.7 \text{ kW}}{28,491.0 \text{ kW}}\right) (100) \\ &= \boxed{40.65\%} \end{aligned}$$

Determinar el factor de cogeneración.

Rendimiento eléctrico equivalente (REE) y Relación calor/electricidad (RCE) para eficiencia de turbina del 90% (Rayaprolu, Boilers for Power and Process, 2009)

$$\begin{aligned} W_{\text{Turbina}} &= (h_1 - h_9) + (1 - 0.1645)(h_9 - h_2) \\ &= (3,399.50 - 2,708.04) + (1 - 0.1645)(2,708.04 - 2,050.47) \\ &= 1,240.86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \end{aligned}$$

$$\dot{W}_{\text{Turbina}} = (W_{\text{Turbina}})(\dot{m}_9 + \dot{m}_2)$$

Para eficiencia dada

$$\dot{W}_{\text{Turbina}} = (\eta_{\text{Térmica}})$$

$$\Rightarrow \dot{W}_s = 0.90 \left(1,240.86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \left(1.5556 \frac{\text{kg}}{\text{s}} + 7.778 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) \left(\frac{1 \text{ kW}}{1 \text{ kJ/s}} \right)$$

$$= 10,423.53 \text{ kW} \approx 10.424 \text{ MW}$$

Factor de Corgeneración :

Considerando que se utiliza el 10% del trabajo de la turbina en el porceso

$$\begin{aligned} \epsilon_u &= \frac{\dot{W}_{\text{neto}} + \dot{Q}_{\text{Proceso}}}{\dot{Q}_{\text{Entrada}}} = \frac{\overbrace{0.9(\dot{W}_{\text{Turbina}})}^{\dot{W}_{\text{neto}}} + 16,333.80 \text{ kW}}{47,382.80 \text{ kW}} \\ \epsilon_{u\%} &= \left(\frac{(0.9)(10,423.53 \text{ kW}) + 16,333.80 \text{ kW}}{46,639.70 \text{ kW}} \right) (100) \\ &= \boxed{55.14\%} \end{aligned}$$

Relación Calor Electricidad (RCE) :

$$\begin{aligned} RCE &= \frac{\dot{Q}_{\text{Proceso}}}{\dot{W}_{\text{Neto}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Proceso}}}{0.9(\dot{W}_{\text{Turbina}})} \\ &= \frac{16,333.80 \text{ kW}}{0.9(10,423.53 \text{ kW})} \\ &= \boxed{1.741} \end{aligned}$$

Rendimiento Eléctrico Equivalente :

$$\begin{aligned} REE &= \frac{\dot{W}[\text{kWh}]}{\left(\frac{\text{combustible}}{h}\right)(\text{HHV})[\text{kWh}] - \left(\frac{\dot{Q}_{\text{Proceso}}}{\eta}\right)} \\ &= \frac{10,423.53 \text{ kW}}{46,639.70 \text{ kW} - \left(\frac{16,333.80 \text{ kW}}{0.9}\right)} \\ &= \frac{10,423.53 \text{ kW}}{(46,639.70 \text{ kW} - 18,148.67 \text{ kW})} (100) \\ &= \left(\frac{10,423.53 \text{ kW}}{28,491.0 \text{ kW}}\right) (100) \\ &= \boxed{36.59\%} \end{aligned}$$

Metodología de cálculo de un sistema de cogeneración topping en planta textil con generador de vapor de 18 TM y turbina de contrapresión de 20 MW

Fecha enviada: 2 septiembre 2025

Fecha corregida: 29 septiembre 2025

Determinar el factor de cogeneración, Rendimiento eléctrico equivalente (REE) y Relación calor/electricidad (RCE) para eficiencia de turbina del 75% (Vanek & Albright, 2008)

TRABAJO TURBINA 75% EFICIENCIA:

Trabajo realizado turbina:

$$W_{\text{Turbina}} = (h_1 - h_9) + (1 - 0.1645)(h_9 - h_2)$$

$$= (3,399.50 - 2,708.04) + (1 - 0.1645)(2,708.04 - 2,050.47)$$

$$= 1,240.86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{W}_{\text{Turbina}} = (W_{\text{Turbina}})(\dot{m}_9 + \dot{m}_2)$$

Para eficiencia dada

$$\dot{W}_{\text{Turbina}} = (\eta_{\text{Térmica}})$$

$$\Rightarrow \dot{W}_s = 0.75 \left(1,240.86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \left(1.5556 \frac{\text{kg}}{\text{s}} + 7.778 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) \left(\frac{1 \text{ kW}}{1 \text{ kJ/s}} \right)$$

$$= 8,686.27 \text{ kW} \equiv 8.686 \text{ MW}$$

Factor de Corgeneración:

Considerando que se utiliza el 10% del trabajo de la turbina en el proceso

$$\varepsilon_u = \frac{\dot{W}_{\text{neto}} + \dot{Q}_{\text{Proceso}}}{\dot{Q}_{\text{Entrada}}} = \frac{0.9(\dot{W}_{\text{Turbina}}) + 16,333.80 \text{ kW}}{46,639.70 \text{ kW}}$$

$$\varepsilon_{u\%} = \left(\frac{(0.9)(8,686.27 \text{ kW}) + 16,333.80 \text{ kW}}{46,639.70 \text{ kW}} \right) (100)$$

$$= \boxed{51.78\%}$$

Relación Calor Electricidad (RCE):

$$\text{RCE} = \frac{\dot{Q}_{\text{Proceso}}}{\dot{W}_{\text{Neto}}} = \frac{\dot{Q}_{\text{Proceso}}}{0.9(\dot{W}_{\text{Turbina}})}$$

$$= \frac{16,333.80 \text{ kW}}{0.9(8,686.27 \text{ kW})}$$

$$= \boxed{2.089}$$

Rendimiento Eléctrico Equivalente:

$$\text{REE} = \frac{\dot{W}[\text{kWh}]}{\left(\frac{\text{combustible}}{h} \right) (\text{HHV})[\text{kWh}] - \left(\frac{\dot{Q}_{\text{Proceso}}}{\eta} \right)}$$

$$= \frac{8,686.27 \text{ kW}}{46,639.70 \text{ kW} - \left(\frac{16,333.80 \text{ kW}}{0.9} \right)}$$

$$= \frac{8,686.27 \text{ kW}}{(46,639.70 \text{ kW} - 18,148.67 \text{ kW})} (100)$$

$$= \left(\frac{8,686.27 \text{ kW}}{28,491.0 \text{ kW}} \right) (100)$$

$$= \boxed{30.49\%}$$

Determinar el factor de cogeneración, Rendimiento eléctrico equivalente (REE) y Relación calor-electricidad (RCE) para eficiencia de turbina del 60% (Boyce, 2010)

TRABAJO TURBINA 60% EFICIENCIA:

Trabajo realizado turbina:

$$W_{\text{Turbina}} = (h_1 - h_9) + (1 - 0.1645)(h_9 - h_2)$$

$$= (3,399.50 - 2,708.04) + (1 - 0.1645)(2,708.04 - 2,050.47)$$

$$= 1,240.86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$\dot{W}_{\text{Turbina}} = (W_{\text{Turbina}})(\dot{m}_9 + \dot{m}_2)$$

Para eficiencia dada

$$\dot{W}_{\text{Turbina}} = (\eta_{\text{Térmica}}) \Rightarrow$$

$$\dot{W}_s = 0.60 \left(1,240.86 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \left(1.5556 \frac{\text{kg}}{\text{s}} + 7.778 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right) \left(\frac{1 \text{ kW}}{1 \text{ kJ/s}} \right)$$

$$= 6,949.01 \text{ kW} \equiv 6.949 \text{ MW}$$

Factor de Corgeneración:

Considerando que se utiliza el 10% del trabajo de la turbina en el proceso

$$\varepsilon_u = \frac{\dot{W}_{\text{neto}} + \dot{Q}_{\text{Proceso}}}{\dot{Q}_{\text{Entrada}}} = \frac{0.9(\dot{W}_{\text{Turbina}}) + 16,333.80 \text{ kW}}{46,639.70 \text{ kW}}$$

$$\varepsilon_{u\%} = \left(\frac{(0.9)(6,949.01 \text{ kW}) + 16,333.80 \text{ kW}}{46,639.70 \text{ kW}} \right) (100)$$

$$= \boxed{48.43\%}$$

Metodología de cálculo de un sistema de cogeneración topping en planta textil con generador de vapor de 18 TM y turbina de contrapresión de 20 MW

Fecha enviada: 2 septiembre 2025

Fecha corregida: 29 septiembre 2025

Relación Calor Electricidad (RCE) :

$$RCE = \frac{\dot{Q}_{Pr oceso}}{\dot{W}_{Neto}} = \frac{\dot{Q}_{Pr oceso}}{0.9(\dot{W}_{Turbina})}$$

$$= \frac{16,333.80 \text{ kW}}{0.9(6,949.01 \text{ kW})}$$

$$= \boxed{2.612}$$

Rendimiento Eléctrico Equivalente :

$$REE = \frac{\dot{W}[\text{kWh}]}{\left(\frac{\text{combustible}}{h}\right)(HHV)[\text{kWh}] - \left(\frac{\dot{Q}_{Pr oceso}}{\eta}\right)}$$

$$= \frac{6,949.01 \text{ kW}}{46,639.70 \text{ kW} - \left(\frac{16,333.80 \text{ kW}}{0.9}\right)}$$

$$= \frac{6,949.01 \text{ kW}}{(46,639.70 \text{ kW} - 18,148.67 \text{ kW})}(100)$$

$$= \left(\frac{6,949.01 \text{ kW}}{28,491.0 \text{ kW}}\right)(100)$$

$$= \boxed{24.39 \%}$$

Determinación del costo del vapor producido

Determinación del costo del vapor producido
(Boyce, 2010)

Costo de 1,000 libras de vapor :

$$\text{Costo Vapor} = \frac{(CEA)(h_1 - h_6)}{1,000}$$

$$= \frac{\left(\frac{2.50 \frac{\$}{\text{gal}}}{\frac{0.15825 \text{ MJ}}{\text{gal}}(0.90)}\right) \left(3,399.50 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 387.75 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)}{(1,000)}$$

$$= \boxed{\frac{\$52.87}{1,000 \text{ kg vapor}}}$$

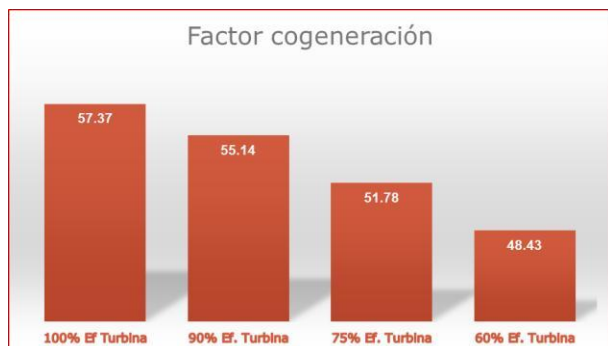
Metodología de cálculo de un sistema de cogeneración topping en planta textil con generador de vapor de 18 TM y turbina de contrapresión de 20 MW

Fecha enviada: 2 septiembre 2025

Fecha corregida: 29 septiembre 2025

RESULTADOS

Figura 1. Factor de cogeneración con diferentes eficiencias de turbina



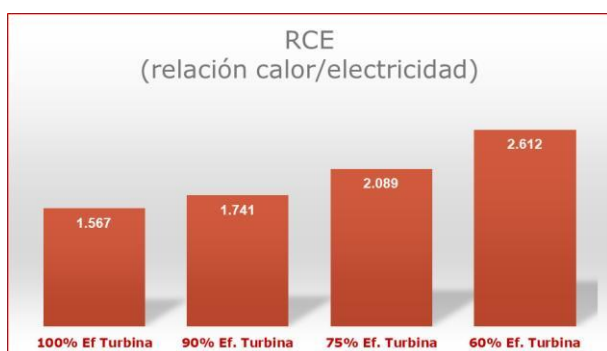
Fuente propia

Figura 2. Rendimiento Eléctrico Equivalente con diferentes eficiencias de turbina



Fuente propia

Figura 3. Relación calor/electricidad con diferentes eficiencias de turbina



Fuente propia

CONCLUSIONES

1. De acuerdo con la figura 1, el factor de cogeneración para cualquier configuración varía directamente proporcional a la eficiencia de la turbina de contrapresión
2. De acuerdo con la figura 2, el rendimiento eléctrico equivalente para cualquier configuración varía directamente proporcional a la eficiencia de la turbina de contrapresión.
3. De acuerdo con la figura 3, la relación calor/electricidad para cualquier

configuración, varía inversamente proporcional a la eficiencia de la turbina de contrapresión

4. Los resultados de este estudio demuestran un impacto directo y cuantificable de la eficiencia de la turbina en el rendimiento operativo de los sistemas de cogeneración. Se ha evidenciado una correlación positiva entre la eficiencia de la turbina y el factor de cogeneración, así como el rendimiento eléctrico equivalente. Por el contrario, se ha identificado una relación inversa con la relación calor-electricidad, indicando que una menor eficiencia de la turbina se traduce en una mayor proporción de calor

Metodología de cálculo de un sistema de cogeneración topping en planta textil con generador de vapor de 18 TM y turbina de contrapresión de 20 MW

Fecha enviada: 2 septiembre 2025

Fecha corregida: 29 septiembre 2025

generado en relación con la electricidad.

- Estos hallazgos reafirman el principio de la eficiencia de la turbina, no solo como una medida a nivel del componente, sino como un determinante fundamental del rendimiento termodinámico, económico y ambiental global de un sistema de cogeneración. Su aplicación se extiende al ahorro de energía primaria. Los costos operativos y el equilibrio óptimo entre la producción eléctrica y térmica.

APÉNDICE

A. Ecuaciones empleadas

Factor de cogeneración:

$$\varepsilon_u = \frac{\dot{W}_{\text{neto}} + \dot{Q}_{\text{proceso}}}{\dot{Q}_{\text{entrada}}}$$

ε_u = factor de cogeneración

$\dot{W}_{\text{neto}}$ = energía eléctrica para la venta

$\dot{Q}_{\text{proceso}}$ = energía para proceso térmico

$\dot{Q}_{\text{entrada}}$ = energía entrando al ciclo

Relación calor/electricidad

$$\text{RCE} = \frac{\dot{Q}_{\text{proceso}}}{\dot{W}_{\text{neto}}}$$

Rendimiento eléctrico equivalente

$$\text{REE} = \frac{\dot{W}_{\text{potencia eléctrica útil}}}{(\text{combustible}) - \left(\frac{\dot{Q}_{\text{proceso}}}{\eta_{\text{caldera}}} \right)}$$

Costo de vapor

$$\text{CV} = \frac{(\text{CEA})(\Delta h)}{1000}$$

CV = costo de 1,000 libras de vapor

Δh = energía entrando al ciclo

B. monitoreo experimental

Durante un período de 15 días, se realizó el monitoreo experimental de variables operativas cada tres horas, incluyendo presión, temperatura y caudal. Para el registro de dichas variables se emplearon instrumentos calibrados y adecuados a las condiciones del sistema: manómetros para presión, sensores de temperatura con termocupla tipo K, medidores de radiación y otros equipos complementarios.

Durante todo el intervalo de evaluación, las variables se mantuvieron dentro de rangos operativos aceptables y poco variables, por lo que no fue necesario aplicar gráficos de control estadístico de procesos. Los valores utilizados en el análisis corresponden a los promedios aritméticos calculados con base en los registros tomados durante el período completo de monitoreo.

BIBLIOGRAFÍA

- Wong, R., & Whittingham, E. (2006). *A Comparison of Combustion Technologies for Electricity Generation* (2a. ed.). Canada: The Pembina Institute.
- Abadie, L., & Chamorro, J. (2006). Valuing flexibility: the case of an integrated gasification combined power plant. *Energy Economics*. Recuperado el enero de 2008, de <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2006.10.004>
- ACOGEN. (s.f.). *Cogeneración, ¿Qué es?* Obtenido de ACOGEN: <http://www.acogen.es/que-es.php>
- Bernard, F. (2010). *Small Scale Cogeneration Handbook* (4th. ed.).
- Boehm, R. (1997). *Developments in the Design of Thermal Systems. Handbook*. United Kingdom: Greenstream Publishing .
- Boyce, M. (2010). *Handbook of Cogeneration and Combined Cycle Power Plants* (2nd. ed.). ASME Press.

Metodología de cálculo de un sistema de cogeneración topping en planta textil con generador de vapor de 18 TM y turbina de contrapresión de 20 MW

Fecha enviada: 2 septiembre 2025

Fecha corregida: 29 septiembre 2025

- Canadian Electricity Association. (2006). *Power generation in Canada, a guide, 2006*. Recuperado el 22 de enero de 2008, de <http://www.canelect.ca/en/Pdfs/HanBook.pdf>
- Capehart, B., Turner, W., & Kennedy, W. (2008). *Guide to Energy Management* (Fifth edition ed.). United States of America: Fairmont Press, Inc.
- Cengel, Y., Turner, R., & Cimbala, J. (2008). *Fundamentals of Thermal Fluid Sciences*. New York: Mc Graw Hill.
- Chandra, R. (2005). *Carbon Dioxide Capture from Coal-Fired Power Plants: A Real Options Analysis*. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology.
- EcuRed. (s.f.). *Cogeneración*. Obtenido de EcuRed: <https://www.ecured.cu/Cogeneracion%20C3%B3n>
- El-Wakil, M. (2002). *Powerplant Technology*. New York: College Custom Series.
- García Borrás, T. (1983). *Boiler and Furnace Performance*. Houston: Gulf Publishing Company.
- García Garrido, S. (s.f.). *Turbinas de vapor*. Obtenido de Renovetec: <http://www.renovetec.com/articulo/s/turbinasdevapor.html>
- Goswami, Y., & Kreith, F. (2008). *Energy Conservation*. United States of America: CRC Press.
- Hoffman, E. (1996). *Power Cycles and Energy Efficiency*. New York: Editorial Academic Press.
- Horlock, J. (2002). *J.H. Horlock. Cogeneration: Combined Heat and Power*. Pergamon Press, 2002.
- Jutglar, L. (2001). *Cogeneración de Calor y Electricidad*. CEAC.
- Kanoglu, M., Cengel, Y., & Cimbala, J. (2019). *Fundamentals and Applications of Renewable Energy* (1a ed.). New York: Mc Graw Hill.
- Krarti, M. (2000). *Energy Audits of Building Systems*. United States of America: CRC Press.
- Kyle, B. (1999). *Chemical and Process Thermodynamics* (Third Edition ed.). New Jersey: Prentice Hall.
- Limaye, D. (1985). *Planning Cogeneration Systems*. Fairmont Press, Inc.
- Potter, M., & Scott, E. (2004). *Thermal Sciences*. United States of America: Thomson.
- Rajput, E. (2013). *Power Plant Engineering* (Fourth Edition ed.). New Delhi: Laxmi Publications.
- Rayaprolu, K. (2009). *Boilers for Power and Process*. Boca Raton, Florida: CRC Press Taylor & Francis Group.
- Rayaprolu, K. (2009). *Boilers Power and Process*. United States of America: CRC Press.
- Sandler, S. (1997). *Chemical and Engineering Thermodynamics* (Third Edition ed.). New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Santizo Calderón, M. (2007). *Balance de Materia y Energía para procesos y potencia*. Guatemala: Policolor.
- Santizo, M. (2008). *Planta ciclo combinado centroamérica de 15 MW*. Guatemala: Informe.
- Santizo, M. (2008). *Planta ciclo combinado Cristal 10 MW*. Guatemala: Informe.
- Thuman, A., & Dunning, S. (2008). *Guide to Energy Conservation* (Ninth Edition ed.). New York: Fairmont Press, Inc.
- Vanek, F., & Albright, L. (2008). *Energy Systems Engineering: Evaluation & Implementation*. New York: Mc Graw Hill.