

Método para análisis del ciclo Termodinámico de una termoeléctrica de ingenio azucarero

Fecha enviada: 12 febrero 2021

Fecha corregida: 10 abril 2021

Msc. Mario Roberto Muñoz¹

RESUMEN

En las termoeléctricas de los ingenios azucareros, ya sean plantas de contrapresión

o de condensación directa, se presentan intercambios de energía que se ajustan al ciclo de Rankine (Kohan, 2000). Este artículo presenta un método para realizar análisis de este ciclo termodinámico, de manera que sirva como herramienta para establecer los flujos de energía (trabajo y calor) que se generan, determinar pérdidas de energía y encontrar oportunidades de mejora con la recuperación de calor y el aumento de la eficiencia.

Palabras claves: Termodinámica, bagazo, calderas, eficiencia, ingenios, energía, ciclos.

ABSTRACT

In sugar mills power plants, of backpressure or condensation, are energy exchanges that fit the Rankine cycle (Kohan, 2000). This paper presents a method for analyzing the thermodynamic cycle, in order to serve as a tool to establish the flow of energy (work and heat) generated, determine energy losses and find opportunities for improvement with heat recovery and increased efficiency.

Keywords: Thermodynamics, bagasse, boiler efficiency, wits, energy cycles.

INTRODUCCIÓN

Por medio de la combustión del bagazo; se genera calor, este calor se transfiere a agua tratada y se produce vapor, los usos de este y su progresivo agotamiento energético en un ciclo de vaporización-condensación-vaporización, fue conceptualizado en el ciclo de Carnot, el cual opera en la región líquido - vapor, en este ciclo termodinámico se lleva a cabo el siguiente proceso:

- A una sustancia se añade calor a presión y temperatura constantes, el calor se transfiere a la sustancia (agua)
- a través de la combustión del bagazo dentro del horno de una caldera.
- La sustancia se expande dentro de una turbina, para extraerle trabajo a entropía constante.
- Se extrae calor a la sustancia en un intercambiador de calor, hasta que se condensa nuevamente (vapor-condensado).
- La sustancia se presuriza en un compresor, se condensa y vuelve al paso 1. Si se presuriza con una bomba se convierte en un ciclo de Rankine simple.

Ciclo termodinámico de un ingenio azucarero

Según (Kohan, 2000), en una planta de Generación de energía de un ingenio azucarero, las calderas trabajan dependientemente con turbinas, en ciclos de Rankine simples o de escape y en ciclos de Rankine con Recalentamiento o de condensación (Potter & Scott, 2004). Es importante analizar estos ciclos para establecer dónde se consume, se transforma, se aprovecha y se pierde la energía generada a partir de la combustión del bagazo. La energía del vapor sobrecalentado puede convertirse en trabajo y desarrollar potencia para mover turbinas o puede utilizarse el calor para evaporar otros fluidos. En estos casos, el vapor se utiliza con dos fines: Primero, para producir energía eléctrica a través de impulsar mecánicamente un eje de generador, que al girar inducirá una corriente eléctrica; el segundo, es utilizar la entalpía del vapor de escape de las turbinas para evaporar el agua contenida en el jugo de caña en los

¹Maestría en Energía Renovables, Investigador y profesional en eficiencia energética, Coordinador programa de investigación industrial en CENGICANA. Estudios en Guatemala. eficienciae@cengicana.org, Dominio www.imagenistas.blogspot.com.

Método para análisis del ciclo Termodinámico de una termoeléctrica de ingenio azucarero

Fecha enviada: 12 febrero 2021

Fecha corregida: 10 abril 2021

evaporadores y así concentrarlo para su posterior cocimiento. En la figura 1, se ilustra un ciclo de Rankine con vapor de escape, en el cual existe un sobrecalentamiento del vapor, una expansión isoentrópica del vapor sobrecalentado en la turbina, enfriamiento del vapor expandido que se da en los evaporadores de la fábrica de azúcar, en donde se condensa y luego regresa para ser comprimido en una bomba (se sustituye el compresor del ciclo de Carnot). Se demuestra que el vapor de escape aún contiene gran cantidad de entalpía, el 79 por ciento de la entalpía disponible en calderas, la cual es la energía disponible para evaporar el jugo en la fábrica. Luego de condensar el vapor, éste regresará a la caldera para iniciar nuevamente el ciclo.

Ciclo termodinámico de vapor de escape

Según (Cengel, Turner, & Cimbala, 2008) para ahorrar combustible (bagazo) en la vaporización del agua, el condensado que regresa comprimido a la caldera puede ser calentado en su recorrido, para ello se suelen utilizar dos fuentes de calor: las extracciones o sangrías de vapor que se realizan a la turbina, y aportan calor en calentadores de condensado, también es común utilizar el calor de los gases de combustión del bagazo para precalentar el agua antes de entrar a la caldera, este intercambio de calor suele hacerse en equipos llamados economizadores.

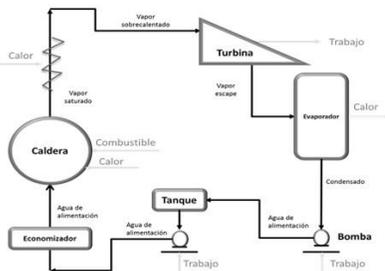


Figura 1. Ciclo Rankine simple (de escape), (Cengel, Turner, & Cimbala, 2008)

Ciclo Rankine con recalentamiento de condensación

En algunas plantas de generación se utiliza el Ciclo de Rankine con condensador, generalmente el vapor se expande a presiones menores o iguales que la atmosférica lo que permite bajar la temperatura del vapor de escape, esto permite un mayor aprovechamiento de la energía en la turbina y en las extracciones, en este ciclo se necesita un condensador para extraer el calor remanente en el vapor (menor que en el ciclo de contrapresión) y así condensarlo por enfriamiento.

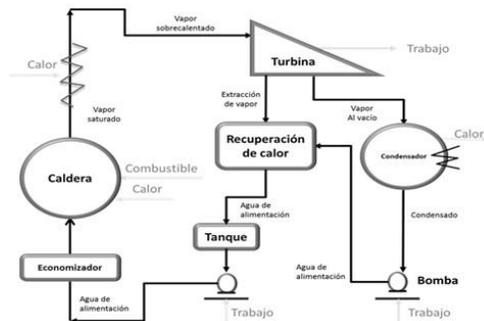


Figura 2: Ciclo termodinámico de condensación por enfriamiento, (Cengel, Turner, & Cimbala, 2008)

Cálculos para desarrollar el análisis del ciclo termodinámico

Trabajo desarrollado por la turbina

El trabajo térmico desarrollado en una turbina de vapor viene dado por la expresión:

$$W_t = h_{vs} - h_e \quad (1)$$

Donde:

W_t = Trabajo termodinámico de la turbina

h_{vs} = Entalpía del vapor sobrecalentado

h_e = Entalpía del vapor de escape

En este caso la entalpía (energía) del vapor es antes y después de la turbina. Según (Severns, Degler, & Miles, 1974), dicho trabajo es isoentrópico, es decir, que se desarrolla a entropía constante. Para cálculos, la entalpía

Método para análisis del ciclo Termodinámico de una termoeléctrica de ingenio azucarero

Fecha enviada: 12 febrero 2021

Fecha corregida: 10 abril 2021

del vapor sobrecalentado se encuentra en tablas de vapor sobrecalentado, mientras que la entalpía del vapor de escape corresponde a la fase de vapor saturado (mezcla), se utiliza la fórmula siguiente:

$$h_e = h_v - ((1-x)(h_{i+v})) \quad (2)$$

Donde se utilizan las entalpías de la fase vapor h_v y de la mezcla vapor+líquido h_{i+v} , además de la calidad de la mezcla a la entropía del vapor sobrecalentado. La expresión $(1-X)$ corresponde a la humedad del vapor a la salida de la turbina. Según (Severns, Degler, & Miles, 1974), cuando se hacen extracciones o sangrías de vapor a lo largo de la turbina, con el fin de recuperar calor utilizarlo para calentar el agua de alimentación de la caldera, la expresión para el trabajo de la turbina queda de la siguiente manera:

$$W_t = (h_{ve} - h_e) + (h_{vs} - h_e) \quad (3)$$

Donde h_{ve} es la entalpía del vapor de la extracción.

Calor cedido en la condensación (Evaporación)

La extracción de calor del vapor de escape puede hacerse de dos maneras, con condensación directa con condensación en evaporadores, en este caso los evaporadores de la fábrica de azúcar. Para los dos casos el calor extraído para la condensación se calcula así:

$$Q_c = (h_c - h_e) \quad (4)$$

El calor cedido Q_c al jugo de caña para su evaporación, está dado por la diferencia de entalpías del condensado h_c que sale de los evaporadores de escape y el vapor de escape que entra a los mimos.

Trabajo desarrollado por las bombas

Según (Çengel & Boles, 2009), el trabajo necesario para la compresión del condensado en bombas W_b casi siempre se desprecia (por

su magnitud), generalmente se calcula con la diferencia de presión entre la descarga P_d y succión de la bomba P_s , se multiplica por el volumen específico del agua a la presión del tanque de condensados V_c , es de signo negativo porque el trabajo debe ser desarrollado por una fuente de potencia externa tal como un motor eléctrico el cual moverá la bomba.

$$W_b = v_c (P_d - P_s) \quad (5)$$

Calor recuperado en el economizador

El economizador es un equipo colocado antes del domo de las calderas, es un intercambiador de calor que aprovecha el calor de los gases calientes que se dirigen a la chimenea para transferirlo al agua de alimentación, esta elevación de temperatura del agua se realiza transfiriendo calor a través del contacto fluido - metal - fluido.

$$Q_e = (h_{ae} - h_{de}) \quad (6)$$

El calor aprovechado en el economizador Q_e se calcula restando las entalpías del agua antes h_{ae} y después del mismo h_{de} . Una caldera con economizador recibirá agua "más caliente", lo que reduce la necesidad de calor y se quema menos bagazo, debido a que más rápidamente se puede llevar al agua a su punto de vaporización (Entalpía de vaporización).

Calor consumido en la generación de vapor sobrecalentado

Finalmente, el agua de alimentación que llega al domo de la caldera inicia su vaporización y luego el vapor recibe un sobrecalentamiento a través de la transferencia del calor generado por la combustión del bagazo, la expresión de cálculo es la siguiente:

$$Q_{cb} = h_{vs} (h_{de} - h_b) \quad (7)$$

Según (Burghardt, 1982), el calor de combustión Q_{cb} representa la energía que debe aportar el bagazo para evaporar un flujo de agua determinado, si ese calor se divide entre

Método para análisis del ciclo Termodinámico de una termoeléctrica de ingenio azucarero

Fecha enviada: 12 febrero 2021

Fecha corregida: 10 abril 2021

el poder calorífico del bagazo, se tiene el consumo de bagazo teórico.

Eficiencia del ciclo

Según (Huang, 1987), la eficiencia del ciclo es aquella que se obtiene al calcular qué tanta energía (entalpía) de la que se genera con el calor del bagazo, es utilizada en generar un trabajo y desarrollar potencia:

$$\eta_{\text{ciclo}} = \frac{(W_t - W_b)}{Q_{cb}} \quad (8)$$

Eficiencia de turbina

Según (Cengel, Turner, & Cimbala, 2008), la energía aprovechada en la turbina con respecto a la energía contenida en el vapor sobrecalentado:

$$\eta_{\text{turbina}} = \left(\frac{W_t}{h_{vs}} \right) (100) \quad (9)$$

Eficiencia de evaporación

Según (Potter & Scott, 2004), es la razón que nos indica cuanta energía se destina a la evaporación de jugo con respecto a la contenida en el vapor que viene de la caldera (sobrecalentado):

$$\eta_{\text{evaporación}} = \left(\frac{Q_c}{h_{vs}} \right) (100) \quad (10)$$

Eficiencia de combustión

Es la razón que nos indica el aporte que hace la combustión del bagazo a la energía total disponible en el vapor sobrecalentado:

$$\eta_{\text{combustión}} = \left(\frac{Q_{cb}}{h_{vs}} \right) (100) \quad (11)$$

Procedimiento para realizar un análisis termodinámico

Según (Potter & Scott, 2004), los pasos necesarios para realizar un análisis termodinámico de los ciclos de una termoeléctrica de ingenios, ya sea de condensación o de contrapresión (escape) son:

1. El primer paso consiste en tomar mediciones de temperaturas y presiones de agua, condensado y vapor a lo largo del ciclo, antes y después de cada equipo.
2. Verificar que tengan valores congruentes y normales, los datos dudosos deberán compararse con los instrumentos análogos (datos en pantallas versus mediciones en sitio).
3. De acuerdo con las mediciones observadas, obtener de las tablas de vapor sobrecalentado, vapor saturado y líquido comprimido, las entalpías y entropías de los fluidos.
4. Calcular la energía consumida y entregada por el ciclo, para esto será necesario utilizar las fórmulas de la (1) a la (11) que aparecen en la sección del marco teórico.
5. Realizar comparativos con los ciclos de otras plantas para determinar oportunidades de mejora.

Método para análisis del ciclo Termodinámico de una termoeléctrica de ingenio azucarero

Fecha enviada: 12 febrero 2021

Fecha corregida: 10 abril 2021

En las tablas siguientes de Excel se presentan los datos necesarios para calcular la energía en cada uno de los componentes del ciclo cubiertos anteriormente:

TRABAJO TERMODINÁMICO DESARROLLADO POR LA TURBINA				
	Entalpía h (kJ/kg)	Temperatura T (°F)	Entropía S (kJ/kg·K)	Presión P (bar)
Vapor Antes turbina				
Vapor Después turbina				
Trabajo de turbina (W)				
Vapor seco entrada				
Vapor seco salida				
Vapor húmedo				
Vapor seco salida				
Vapor húmedo salida				
Calidad de vapor				
De tablas de vapor sobrecalentado				
De tablas de vapor saturado				
Datos operación real				
Dato calculado				

CALOR CEDIDO EN LA CONDENSACIÓN				
	Entalpía h (kJ/kg)	Temperatura T (°F)	Entropía S (kJ/kg)	Presión P (bar)
Vapor antes de condensador				
Condensado				
Calor cedido al jugo (-Q)				
De tablas de agua y vapor saturado				
Datos operación real				
Dato calculado				

TRABAJO CONSUMIDO EN BOMBA DE CONDENSADO				
	Entalpía h (kJ/kg)	Temperatura T (°F)	Volumen v (dm ³ /kg)	Presión P (bar)
Condensado antes bomba				
Condensado después de bomba				
Condensado				
Trabajo consumido bomba (+W)				
De tablas de agua				
Datos operación real				
Dato calculado				

TRABAJO CONSUMIDO EN BOMBA DE ALIMENTACIÓN				
	Entalpía h (kJ/kg)	Temperatura T (°F)	Volumen v (dm ³ /kg)	Presión P (bar)
Condensado antes bomba				
Condensado después de la bomba				
Volumen esp. del condensado				
Trabajo consumido bomba (+W)				
De tablas de agua				
Datos operación real				
Dato calculado				

TRABAJO CEDIDO AL RECALENTAMIENTO				
	Entalpía h (kJ/kg)	Temperatura T (°F)	Volumen v (dm ³ /kg)	Presión P (bar)
Líquido hacia calentador 1				
Líquido hacia calentador 2				
Líquido hacia desaireador				
Líquido hacia calentador 4				
Condensado				
Trabajo cedido a calentadores				
De tablas de vapor sobrecalentado				
Datos operación real				
Dato calculado				

CALOR APROVECHADO EN RECALENTAMIENTO				
	Entalpía h (kJ/kg)	Temperatura T (°F)	Volumen v (dm ³ /kg)	Presión P (bar)
Trabajo consumido bomba (+W)				
Líquido antes recalentamiento				
Líquido después recalentamiento				
Calor tomado de las extracciones				
De tablas de líquido comprimido				
Datos operación real				
Dato calculado				

CALOR APROVECHADO EN EL ECONOMIZADOR				
	Entalpía h (kJ/kg)	Temperatura T (°F)	Volumen v (dm ³ /kg)	Presión P (bar)
Líquido antes economizador				
Líquido después economizador				
Calor tomado de los gases				
De tablas de líquido comprimido				
Datos operación real				
Dato calculado				

CALENTAMIENTO DE AGUA Y VAPOR (PRESIÓN CONSTANTE)				
	Entalpía h (kJ/kg)	Temperatura T (°F)	Volumen v (dm ³ /kg)	Presión P (bar)
Vapor antes del domo				
Vapor sobrecalentado				
Calor transferido en caldera				
Datos operación real				
Dato calculado				

Método para análisis del ciclo Termodinámico de una termoeléctrica de ingenio azucarero

Fecha enviada: 12 febrero 2021

Fecha corregida: 10 abril 2021

RESULTADOS

Los datos de energía (calor y trabajo) y eficiencias del ciclo, que se pueden obtener con el procedimiento anterior son:

- *Energía del vapor sobrecalentado*: Es el calor disponible en el vapor de la caldera habiendo ya pasado por los sobrecalentadores de radiación y convección, a mayor temperatura mayor energía.
- *Energía de turbina (trabajo aprovechado en la turbina)*: El calor cedido en la turbina está en función del agotamiento del vapor dentro de la misma, a menor presión de escape y mayor calidad del vapor (bajo contenido de humedad) a la descarga de la turbina más trabajo se obtiene.
- *Energía utilizada para calentamiento de agua de alimentación*: Esta energía representa ahorro de bagazo, a mayor temperatura del agua de alimentación menor consumo de bagazo. Está en función de los sistemas de recuperación de calor y calentamiento del agua.
- *Energía contenida en el vapor de Escape*: Energía que se envía a evaporadores de jugo, el aprovechamiento de esta es función del arreglo de los evaporadores (efectos) y su eficiencia.
- *Energía cedida en Condensación directa*: Pérdida de energía por transferencia de calor en el condensador hacia el agua de enfriamiento.
- *Energía en el Condensado*: Energía remanente en los condensados, ya sea producto de condensación en evaporadores o condensadores directos. A mayor temperatura menor consumo de bagazo.
- *Trabajo invertido en bombeo de agua de alimentación*: Energía necesaria para bombear el agua de alimentación de cada caldera, está en función de las presiones de succión y descarga, a

menor diferencia menor consumo de energía.

- *Energía contenida en el agua de alimentación*: Energía contenida en el agua después de su calentamiento, medida de la recuperación de calor en calentadores y aislamiento del sistema de agua. Esta energía representa ahorro de bagazo, a mayor temperatura del agua de alimentación menor consumo de bagazo.
- *Energía recuperada de los gases (economizador)*: Energía que se recupera de los gases de combustión, mejora la eficiencia del ciclo, es una medida del diseño del economizador y del calor perdido en los gases.
- *Energía del agua entrando al domo*: Energía inicial en el proceso de generación de vapor, a mayor valor menor consumo de bagazo.
- *Energía obtenida por la combustión del bagazo*: Energía que el bagazo está transfiriendo al vapor de agua durante la combustión. A mayor energía entregada mayor consumo de bagazo.
- *Eficiencia de turbina*: Medida de aprovechamiento de la energía en la turbina.
- *Eficiencia en evaporación*: Medida de aprovechamiento de la energía en los evaporadores de fábrica.
- *Eficiencia de combustión*: Medida del aprovechamiento de la energía de los combustibles.

CONCLUSIÓN

El análisis del ciclo termodinámico es una herramienta para determinar el consumo y producción de energía en los equipos de una termoeléctrica, calcular estos flujos de energía puede ayudar a establecer oportunidades de mejora en el uso del calor proveniente de la combustión del bagazo y en la recuperación de la energía que no es utilizada en la turbina o en los evaporadores de la fábrica.

Método para análisis del ciclo Termodinámico de una termoeléctrica de ingenio azucarero

Fecha enviada: 12 febrero 2021

Fecha corregida: 10 abril 2021

BIBLIOGRAFÍA

- Burghardt, D. (1982). *Engineering Thermodynamics with Applications* (2nd Edition ed.). Philadelphia: Harper & Row Publisher.
- Çengel, Y., & Boles, M. (2009). *Termodinámica* (6a. ed.). México: McGraw Hill.
- Cengel, Y., Turner, R., & Cimbala, J. (2008). *Fundamentals of Thermal Fluid Sciences*. New York: Mc Graw Hill.
- Faires, V., & Simmang, C. (2003). *Termodinámica*. México: Noriega Editores.
- Fundamentals of Engineering Thermodynamics*. (1996). United States of America: John Wiley.
- Huang, F. (1987). *Ingeniería Termodinámica. Fundamentos y aplicaciones*. México: CECSA.
- Jennings, B., & Samuel, L. (1970). *Aire acondicionado y Refrigeración*. México: CECSA.
- Kohan, A. (2000). *Manual de Calderas* (Vol. 1). España: McGraw Hill.
- Potter, M., & Scott, E. (2004). *Thermal Sciences*. United States of America: Thomson.
- Severns, W., Degler, H., & Miles, J. (1974). *Energía mediante aire, vapor o gas*. Barcelona: Reverté.