

# **COSTO DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA OBTENIDA POR COGENERACIÓN EN CENTRALES AZUCAREROS. PARTE I. METODOLOGÍA.**

## **COST OF THE ELECTRICAL ENERGY OBTAINED BY COGENERATION IN THE SUGAR CANE MILLS. PART I. METHODOLOGY.**

### **Autores (Authors):**

Dr. Juan José Sánchez Jiménez, ([cheosj@yahoo.com](mailto:cheosj@yahoo.com)), República de Panamá 173, CP 44570, Tlaquepaque, Jal., México, Tel. (33) 36399231; Dr. Alexis Martínez del Sol; Mtro. José Salvador Beltrán León; Dr. Mariano David Zerquera Izquierdo; Universidad de Guadalajara.

### **Resumen.**

En todos los centrales azucareros existen los consumidores de vapor los cuales trabajan a una presión, por lo general muy pequeña, en comparación con la presión obtenida a la salida de las calderas, la que se incrementa aún más si existen sobrecalentadores. El vapor se hace pasar por una válvula reductora cuya función es bajar la presión a la de utilización. Si éste se hace pasar por una turbina de contrapresión y se genera energía eléctrica, se aprovecha la energía que de otra forma se perdería en la válvula reductora constituyendo esto una fuente más de ahorro de energía.

**Palabras claves:** cogeneración, vapor, costo de la energía, proceso.

### **Abstract.**

In most of the sugar cane mills there are the consumers of steam (process). They work to a very small pressure in comparison with the obtained one in the steam boilers which is increased even more if there is over heaters. To obtaining this pressure required one by process it become necessary to pass through a reducing valve to down pressure.

If this steam goes by against pressure turbine and generating electric power, it takes advantage energy that would get lost in the reducing valve another way, constituting a source of energy saving.

**Key words:** cogeneration, steam, energy cost, process.

### **Introducción.**

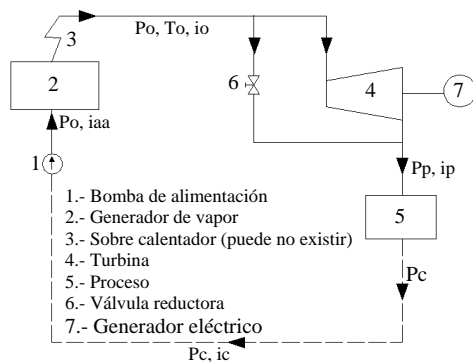
Una de las medidas de ahorro de energía en las industrias que utilizan vapor en el proceso lo constituye la cogeneración, a partir de la cual se obtiene energía eléctrica a un costo muy bajo en comparación con el de la empresa de suministro, el que se abarata aún más en los centrales (ingenios) azucareros, ya que los mismos utilizan como combustible un subproducto de su producción principal (azúcar), el bagazo para, a partir del mismo, generar el vapor utilizado en este proceso industrial.

El objetivo del presente trabajo consiste en presentar una metodología para el cálculo de la energía eléctrica generada utilizando el bagazo como combustible, la que puede ser aplicada también a otras industrias que utilicen vapor en su proceso, aunque el

mismo sea obtenido de la combustión de otro portador energético que no sea el bagazo.

### Desarrollo.

En los centrales azucareros, así como en cualquier otro tipo de industria que utilice vapor en su proceso, paralelamente con los consumidores de energía eléctrica, existen los consumidores de calor (proceso). En el generador de vapor éste se produce a una presión elevada y se dirige a la turbina, donde sufre una expansión solo hasta la presión necesaria para el proceso, en el cual se realiza la entrega de calor necesaria y, en



**Fig. 1 Proceso de cogeneración.**

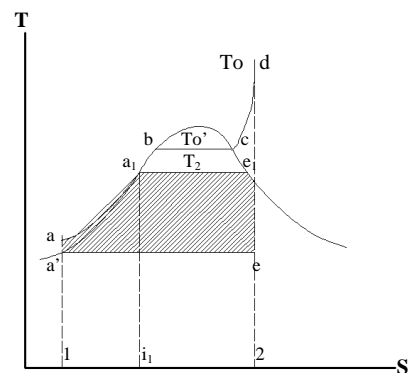
En el generador de vapor el agua se calienta a presión constante hasta la temperatura de ebullición (línea “ab” en el diagrama *TS*) y se evapora (línea “bc”). Luego, el vapor pasa al sobrecalentador (3) en el caso de existir el mismo, donde la temperatura se eleva a  $T_o$ .

El proceso de entrega de calor en el sobrecalentador está representado por la línea “cd”. La generación del vapor, incluyendo el sobrecalentador, se efectúa a presión constante  $P_o$  de modo que la cantidad de calor  $q_i$  es transmitida al agua y

forma de condensado, regresará por completo o en parte al generador de vapor.

El esquema principal elemental de esta instalación está representado en las *figuras 1 y 2* y, el mismo, se aproxima al ciclo *Rankine*.

En la *figura 1* se muestra como la bomba de alimentación (1) eleva la presión del agua hasta  $P_o$  y la introduce en el generador de vapor (2). El proceso de compresión isotrópica del agua realizado por la bomba a escala exagerada está representado en el diagrama *TS* por la línea “aa” de la *figura 2*.



**Fig. 2 Ciclo térmico ideal (ciclo Rankine).**

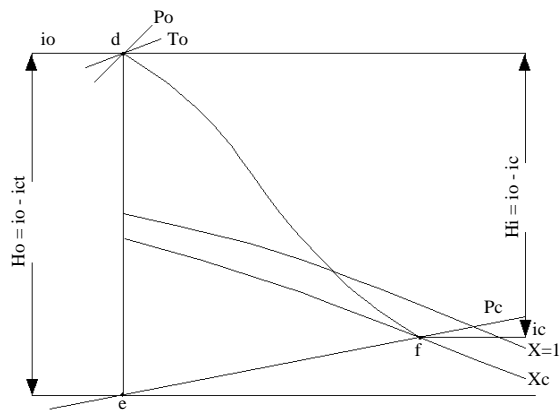
se utiliza por completo en aumentar la entalpía del vapor. Esto puede ser representado para 1 kg de vapor que participa en el proceso como:

$$q_i = i_o - i_{aa} \quad (1)$$

donde:

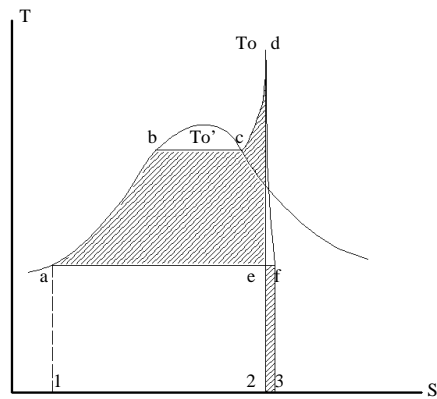
$i_o$ : es la entalpía del vapor que ha salido del sobrecalentador (*en caso de existir*) o de la caldera (*en caso de no existir el primero*).

$i_{aa}$ : es la entalpía del agua de alimentación al entrar en el generador de vapor.



**Fig. 3 Proceso de expansión del vapor en la turbina.**

El calor del vapor a la salida del sobrecalentador está representado en el diagrama  $TS$  por el agua 1, a, b, c, d, 2, 1. Este calor con entalpía  $io$  se dirige hacia la turbina (4) y allí sufre una expansión. Para la turbina ideal que funciona sin pérdidas ni intercambio de calor con el medio ambiente, el proceso de expansión es isotrópico y está representado en el diagrama  $TS$  por la línea “de”. El proceso verdadero está representado por la línea “df” de la *figura 3*. En el caso de la industria azucarera la mayoría de las turbinas utilizadas son de contrapresión, por lo que la presión del vapor a la salida de la misma supera la presión atmosférica y sale a la presión exigida por el proceso. El calor que puede transformarse en trabajo en la turbina está representado por el área  $i_1, a_1, e_1, 2, i_1$  el que se puede utilizar en un grado considerable. En el proceso se considera que el vapor de escape una vez utilizado en el proceso y parte del condensado más el agua de reposición son bombeados (*figura 1*) al generador de vapor, lo que cierra el ciclo termodinámico. En la *figura 4* se muestra el



**Fig. 4 Ciclo térmico real del proceso.**

ciclo real en el diagrama  $TS$  a escala exagerada. De lo antes expuesto, se deduce que, para la determinación del costo de la energía eléctrica en este tipo de industrias es necesario basarse en datos del balance energético, entre los que figuran: presión y temperatura a la entrada y salida de la turbina, valor calórico del combustible, eficiencia de los equipos, etc. [4]

#### **Ecuaciones utilizadas en la determinación del costo de la energía eléctrica.** [2, 3, 4]

Los gastos anuales que intervienen en la generación de energía eléctrica, se dividieron en las siguientes partidas:

1. Gastos de combustible
2. Gastos de amortización [1]
3. Gastos de salarios (*incluye el seguro social*)
4. Gastos de reparación
5. Gastos indirectos (*solo se aplican en aquellas industrias que venden energía eléctrica*).

#### **Gastos de combustible (G):** [4]

Para determinar los gastos de combustible se puede utilizar la ecuación

$$G = P \times \frac{E_{\text{el\u00e9ctrica}} \times 3.6}{N_m \times N_e \times N_c \times N_{\text{tub}} \times VCN} \quad (2)$$

donde.

$P$ : precio del combustible (*para los centrales azucareros el precio de tonelada de bagazo*) en pesos o miles de pesos

$E_{\text{el\u00e9ctrica}}$ : energ\u00eda el\u00e9ctrica entregada por el generador en kW-h

$N_e$ : eficiencia del generador que a plena carga puede calcularse como

$$N_e = 96 - \frac{2.5}{\sqrt{P_n/1000}} \quad (3)$$

donde:

$P_n$ : potencia nominal del generador en kW

$N_c$ : eficiencia de la caldera (*tabla I*)

$N_{\text{tub}}$ : eficiencia de la tuber\u00eda

$VCN$ : valor cal\u00f3rico neto (*para los centrales azucareros es la cantidad de Mega joules que tiene una tonelada de bagazo con un porcentaje de humedad determinada*).

Para encontrar este valor se puede utilizar la ecuaci\u00f3n

$$VCN = 4250 - 4850 w \quad (4)$$

donde:

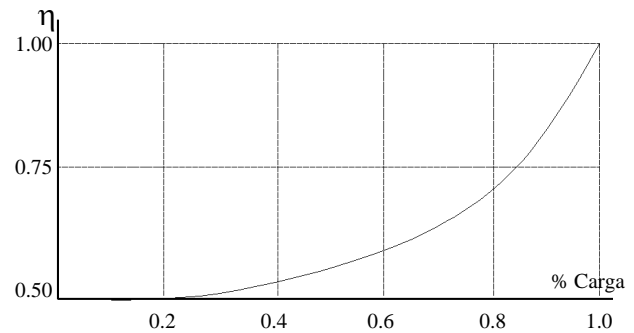
$w$ : humedad expresada en por unidad

$VCN$ : valor cal\u00f3rico neto en kcal/kg

Si se desea obtener el valor  $VCN$  en MJ/ton se divide la *ecuaci\u00f3n 4* entre  $4.1868 \times 10^{-3}$ .

Para determinar las p\u00e9rdidas de energ\u00eda de los generadores a un estado de carga dado, puede emplearse la curva que aparece en la *figura 5* para, a partir de ese dato y la potencia de

entrada, calcular la eficiencia al estado de carga dado.



**Fig. 5 P\u00e9rdidas en generadores en funci\u00f3n de la potencia.**

#### **Gastos de amortizaci\u00f3n:** [4]

Esta informaci\u00f3n aparece en el flujo de caja de las empresas cuando las mismas realizan sus an\u00e1lisis econ\u00f3micos.

#### **Gastos de salarios:**

Esta partida puede ser determinada tomando los datos de salarios totales de los operadores de tableros el\u00e9ctricos, turbinas, mec\u00e1nicos, etc., durante el per\u00edodo de zafra en el caso de los centrales azucareros o durante la etapa de generaci\u00f3n, mantenimiento, etc., para otro tipo de industria, es decir, en otras palabras, el salario del personal que labora directamente en este tipo de instalaciones incluyendo el por ciento de seguro social.

#### **Gastos de reparaciones:**

Se toma el salario del personal que labora en el desarme y reparaci\u00f3n de los equipos (*incluye tambi\u00e9n el porcentaje del seguro social*) y se le adiciona el costo de los

materiales y componentes utilizados durante este tipo de labor.

**Gastos indirectos:**

Esta partida solo se tiene en cuenta cuando se vende electricidad, o sea, cuando se comercializa y parte de la generación es un producto mercantil.

Sumando todas estas partidas y dividiéndolas entre la generación total se obtiene el costo del kW-h por cogeneración, el que en la mayoría de los casos oscila dentro del orden de unas décimas de centavos hasta unos pocos centavos.

En la Universidad Central de Las Villas, Cuba se desarrolló un método muy similar al anterior, el que puede ser utilizado en cualquier tipo de industria que necesite vapor en su proceso industrial el cual consiste en:

1. Determinar el consumo de vapor de las turbinas ( $D_{turbo}$ ) expresado en kg de vapor /tonelada de caña molida por horas (tc) mediante la expresión [4]

$$D_{turbo} = \frac{N \times 860}{Ho \times Ne \times Nm \times Ntub \times Nt} \quad (5)$$

donde:

$N$ : razón de generación promedio por hora, sobre la molida promedio por hora (kW-h/tc)

tc: tonelada de caña molidas por hora

$Ho$ : variación de la entalpía en la expansión ideal (kcal/kg)

$$Ho = i_1 - i_2 \quad (6)$$

donde:

$i_1$  e  $i_2$ : entalpía a la entrada y la ideal a la salida de la turbina (kcal/kg)

$Nt$ : eficiencia termodinámica

donde:

$$Nt = \frac{i_1 - i_2'}{i_1 - i_2} \quad (7)$$

$i_2'$ : entalpía real del vapor a la salida de la turbina kcal/kg

$Ntub$ : eficiencia de la tubería

$$Ntub = \frac{i_a - w}{i_a} \quad (8)$$

donde:

$i_a$ : entalpía de vapor a la salida de la caldera (kcal/kg)

$w$ : trabajo perdido (kcal/kg)

$$w = i_a - i_b - i_1 + i_2 \quad (9)$$

$i_b$ : entalpía de la expansión ideal, desde las condiciones de salida de la caldera, hasta las condiciones de salida de las turbinas (kcal/kg)

Todos los valores de las entalpías pueden ser obtenidos en tablas de vapor mediante la utilización del diagrama de *Mollier* a partir de los datos de presión, temperatura, humedad del vapor, etc.

2. Determinar el combustible necesario para generar el vapor que realiza trabajo en las turbinas ( $Bx$ ). En el caso centrales azucareros es kg de bagazo /hora.[4]

$$Bx = \frac{D_{turbo} \times M \times Wr}{VCN - Nc} \quad (10)$$

donde:

$M$ : molida promedio ( $tc/hora$ )

$Wr$ : trabajo real del vapor en la turbina  
(kcal/kg)

$$Wr = i_1 - i_1' \quad (11)$$

$VCN$ : valor calórico neto del combustible  
(kcal/kg de combustible)

$$VCN = 4250 - 4859 Hb$$

$Hb$ : humedad relativa del bagazo

Los demás pasos son similares a la metodología anterior.

### **Conclusiones.**

1. La metodología utilizada para la determinación del costo de la energía eléctrica generada con vapor, puede ser aplicada a cualquier tipo de industria independiente del tipo de calderas que la misma posea, para ello, basta con sustituir en la ecuación correspondiente el precio del combustible utilizado y su Valor Calórico Neto, obteniendo los resultados deseados
2. La diferencia entre las metodologías explicadas, radica en que, mientras la primera no considera la eficiencia termodinámica, la segunda si lo hace.

### **Recomendaciones.**

1. Utilizar cualquiera de los métodos explicados para determinar el costo de la energía generada por cogeneración.

### **Bibliografía.**

1. Sánchez Juan J. y otros. Diseño de instalaciones eléctricas industriales. Tomo I. Editorial Amate. México. 2006.
2. Sánchez Juan J. y otros. Diseño de instalaciones eléctricas industriales. Tomo II. Editorial Amate. México. 2006.
3. Sánchez Juan J. y otros. Diseño de instalaciones eléctricas industriales. Tomo III. Editorial Amate. México. 2006.
4. Sánchez Juan J. y otros. Cogeneración en la Industria Azucarera. Memorias Evento VIII Congreso Internacional sobre Azúcar y Derivados de la Caña de Azúcar. Diversificación'2004. 14 al 18 de Junio de 2004. Hotel Habana Libre Tryp. Cuba.