

METODOLOGÍA GENERAL PARA LA EVALUACIÓN INTEGRAL DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LOS CENTRALES AZUCAREROS

MSc. Santiago Melchor Soler-Pérez, soler@fiq.uo.edu.cu
Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Santiago de Cuba

Se presenta de forma detallada una metodología general que permite evaluar integralmente el comportamiento energético de los centrales azucareros. La metodología se basa en realizar balances de masa y de energía en todas las secciones de la industria, desde los molinos hasta los tachos, incluyendo los generadores de vapor. Para llevar a cabo estos balances se utilizan datos que deben ser conocidos en la generalidad de los casos o que, de no disponerse de ellos, puedan ser estimados con alto grado de confiabilidad.

Las ecuaciones de cálculo planteadas están plenamente fundamentadas en los basamentos teóricos correspondientes y solamente en casos imprescindibles se hacen aproximaciones o consideraciones totalmente justificadas y validadas por la experiencia práctica. La efectividad de esta metodología se comprobó al ser aplicada en 12 centrales azucareros, con disímiles esquemas energéticos, de las provincias de Santiago de Cuba, Holguín y Granma. En todos ellos se obtuvo la información necesaria que permitió conocer el comportamiento de los parámetros que es necesario tener en cuenta en la evaluación integral de la eficiencia energética del proceso y por consiguiente, tomar decisiones a su personal técnico.

Palabras clave: *eficiencia energética, índices de eficiencia, evaluación energética.*

We present in detail a general approach that allows fully assess the energy performance of the sugar mills. The methodology is based on performing mass balances and energy in all sections of the industry, from the mills to the bins, including the steam generators. To carry out these balances using data that must be known in most of the cases or that, but if available, can be estimated with a high degree of reliability.

Calculation equations involved are fully informed on relevant theoretical background and only when essential approximations or considerations are fully justified and validated by practical experience.

The effectiveness of this methodology was found to be implemented in 12 sugar mills, with dissimilar energy schemes in the provinces of Santiago de Cuba, Holguín and Granma. In all the necessary information was obtained that allowed to know the behavior of the parameters that must be taken into account in the comprehensive assessment of energy efficiency of the process and therefore make decisions on their technical staff.

Key words: *energy efficiency, efficiency index, energy evaluation.*

Introducción

La eficiencia energética en los centrales azucareros, tiene que evaluarse de forma integral y hacerse el análisis en todas las secciones del proceso, desde la etapa de molienda hasta la producción de azúcar, incluyendo, como es lógico los generadores de vapor.

Es necesario tener en cuenta aspectos tales como: la eficiencia de generación y el comportamiento de los diferentes renglones que inciden en las pérdidas energéticas que provocan una disminución del valor que se puede obtener en este

parámetro tan fundamental; el análisis de la cogeneración y la posibilidad de su incremento, el estudio del comportamiento de las diferentes secciones del proceso (calentamiento, evaporación y tachos) y el aprovechamiento que se haga en cada una de ellas del vapor disponible; la necesaria correspondencia entre la disponibilidad y consumo de vapor en las diferentes líneas de presión para detectar posibles cuellos de botella o excesos evitables; el estudio del vapor que se circula por reductora y la posibilidad de su reducción; el aprovechamiento que se hace del vapor generado en el proceso tecnológico en otras partes del propio proceso; etcétera.

Para determinar todos estos parámetros es necesario utilizar los métodos y ecuaciones más confiables y evitar, en lo posible, hacer consideraciones que no siempre son satisfactorias en algunas condiciones.

Las metodologías que se aplican frecuentemente en la actualidad por el MINAZ adolecen de algunas deficiencias: no se hace una evaluación integral, ya que no consideran todos los parámetros que es necesario analizar, utilizan aproximaciones que pueden, en muchos casos, ser evitables y que son innecesarias, si se utilizan adecuadamente las ecuaciones de balances de masa y energía en las diferentes secciones del proceso y no toman en cuenta algunos aspectos importantes que influyen en los balances de masa y energía como son entre otros, los atemperadores y el tanque flash.

El siguiente trabajo que tiene como objetivo, desarrollar y aplicar una metodología más eficaz e integral para el estudio de la eficiencia energética de los centrales azucareros.

Fundamentos teóricos

Balances de masa y energía en los generadores de vapor

Para estos cálculos se utiliza la metodología propuesta en /12/.

Balances de masa en el proceso tecnológico

Para determinar los flujos de las corrientes que se alimentan a los diferentes equipos tecnológicos que consumen vapor de agua es necesario realizar balances de masa en el proceso. Se deben calcular los flujos másicos que se relacionan a continuación.

- Jugo mezclado.
- Jugo alcalizado en frío que se alimenta a los calentadores primarios y rectificadores.
- Jugo que se alimenta a los calentadores de jugo clarificado. Para ello es necesario tener en cuenta el proceso de alcalización en caliente, si se utilizara en el sistema en estudio y el de

evaporación que tiene lugar, inevitablemente, en el tanque flash.

- Flujos alimentados a los diferentes equipos que forman el sistema de evaporación. Para ello es necesario tener en cuenta las cantidades de agua evaporada en los diferentes procesos.

La metodología y las ecuaciones de cálculo aparecen en /17/.

Cálculo del consumo de vapor directo en los motores primarios

Los equipos que consumen vapor directo son los turbogeneradores, las máquinas de vapor para mover los tándemes de los molinos y las bombas reciprocantes.

El método de cálculo correspondiente a cada uno de ellos para determinar el flujo de vapor consumido (G) en kg/h se puede encontrar en /17/.

El vapor directo también se utiliza en las destilerías de los centrales que dispongan de ellas así como en la dilución de las mieles, esterilización de las bandas conductoras y como vapor de escoba.

El consumo en las destilerías se estima de acuerdo a la siguiente norma: 0,4 ton de vapor por hectolitro de alcohol producido por día.

El vapor consumido en la dilución de mieles y en la esterilización de las esteras se estima entre un 4 y un 6 por ciento de la caña molida.

El vapor de escoba para la limpieza se puede estimar entre el 1 y el 2 por ciento de la caña molida.

Este vapor se puede agrupar como el vapor consumido para otros usos.

También debe considerarse un factor de pérdidas en la línea de vapor directo que depende de la longitud de las tuberías y del estado de las mismas.

Cálculo del consumo de vapor en los equipos tecnológicos

Los equipos tecnológicos son los que se utilizan en el proceso para el calentamiento y concentración del jugo. Estos equipos pueden variar en los diferentes centrales y entre ellos se encuen-

tran los calentadores (primarios, rectificadores, y de jugo clarificado) y los sistemas de evaporación. Entre estos últimos se encuentran los pre- evaporadores, los sistemas de múltiples efectos (desde dos hasta cinco) y los tachos. En los sistemas de múltiples efectos se pueden hacer extracciones de vapor para utilizarlo como fuente de energía en el proceso.

El método de cálculo correspondiente a cada uno de ellos para determinar el flujo másico de vapor de agua consumido (G) en kg/h se da a continuación.

Calentadores

Son utilizados para elevar la temperatura de jugo extraído, su consumo de vapor depende de la eficiencia térmica que tenga y el tipo de vapor utilizado.

Ecuaciones de cálculo

$$G_{cal} = \frac{F_j * C_p (T_s - T_e)}{\lambda_v} * X \quad (1)$$

Esta ecuación es válida para cualquier calentador en el proceso, utilizando los valores correspondientes de las variables para cada uno de ellos.

Evaporadores

Son equipos de concentración del el jugo hasta la obtención de la meladura, su consumo depende de la eficiencia térmica, del número de efectos y del uso o no de extracciones del vapor secundario de diferentes efectos.

- Para el pre- evaporador:

Ecuaciones de cálculo

$$G_{pre} = \left[W \frac{\lambda_{vcu}}{\lambda_v} + \frac{F_{ej} * C_p (T_{eb} - T_{ej})}{\lambda_v} \right] * X \quad (2)$$

$$C_p = 1 - 0,0056 * B_{Xj} \quad (3)$$

$$T_{eb} = T_{vapor} - 1,811927 + 1,14377(B_{Xj}) + 0,00355(B_{Xj})^2 \quad (4)$$

$$W = F_{ej} \left(1 - \frac{B_{Xe}}{B_{Xs}} \right) \quad (5)$$

- Para un múltiple efecto sin extracciones de vapor

Ecuaciones de cálculo

$$G_{mult} = \left[\frac{W}{N} * \frac{\lambda_{vcu1}}{\lambda_v} + \frac{F_{ej} * C_p (T_{eb} - T_{ej})}{\lambda_v} \right] * X \quad (6)$$

Esta expresión es válida para cualquier número de efectos y proporciona resultados muy satisfactorios. En caso de que se disponga del dato de la concentración del jugo a la salida del primer

efecto (algo poco común), se realizaría el balance de masa en dicho efecto y se determinaría la cantidad de agua evaporada (W1), sustituyendo este valor al término W/N de la ecuación.

- Para un múltiple efecto con extracción de vapor

En caso de que se hagan extracciones de vapor en el múltiple efecto para ser utilizado en otras secciones es necesario tenerlas en cuenta en el cálculo del consumo energético. La ecuación sería la siguiente:

$$* G_{mult.} = \left[\frac{W}{N} * \frac{\lambda_{vcu}}{\lambda_v} + \frac{F_{ej} * C_p (T_{eb} - T_{ej})}{\lambda_v} + \frac{(N-1) * E_i * \lambda_{vcu}}{N * \lambda_v} \right] * X \quad (7)$$

donde:

E_i es el flujo másico de agua extraída en el efecto i .

Tachos al vacío

El principio de estos equipos, es análogo a uno de los cuerpos de un evaporador con la particularidad de que se cristaliza la mayor parte de la sacarosa contenida en la meladura y mieles en operaciones a simple efecto, en estos equipos al inicio de cada templa el consumo de vapor es mayor y a medida que va pasando el tiempo este va disminuyendo debido a la discontinuidad de la masa.

La metodología de cálculo aparece en /17/.

Balance de energía en los atemperadores de vapor de escape

El atemperador de vapor de escape no constituye un equipo como tal, es simplemente la inyección de agua en forma de lluvia sobre la corriente del flujo de vapor procedente de los turbogeneradores y de la válvula reductora. Sin embargo es necesario este cálculo ya que afecta en el valor real de los flujos de vapor en el sistema.

Las características del vapor que sale de atemperador dependen del grado de sobrecalentamiento que posea el vapor de escape y de la temperatura del agua que se utiliza como medio de enfriamiento.

Si el vapor que se usara en el proceso fuera el de escape sobrecalentado, se oscurecería el color del azúcar, debido a la formación de una capa de caramelo en el área de transferencia de calor, que se iría requemando poco a poco a causa de la elevada temperatura del mismo.

Cálculo del consumo de vapor de agua en otros equipos tecnológicos

Refinerías de azúcar

Los cálculos planteados corresponden a los equipos que forman parte de la generalidad de los procesos de producción de azúcar. En algunos complejos agroindustriales estudiados se presentan procesos de refinación de azúcar, en estos casos es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos;

Cálculo del consumo de vapor en los calentadores.

Se utiliza la misma ecuación que para calentadores del proceso de azúcar crudo.

Cálculo del consumo de vapor en tachos

Se utiliza la siguiente ecuación;

$$G_{TR} = L_c * F_R * F_{RT} * F_{XR} * F_S * R * F_{TR} \quad (8)$$

Para estimar todos estos parámetros se debe disponer en la industria de las normas establecidas para estos casos.

Cálculo del vapor generado en el proceso tecnológico que se utiliza en otras secciones del mismo

Para poder hacer el cálculo de la correspondencia entre el vapor necesario a consumir y el vapor disponible es necesario conocer la cantidad de vapor generado en el proceso que puede ser utilizado en otras secciones del mismo. Este vapor es el producido en los preevaporadores, en los

sistemas múltiples (fundamentalmente los duplex) y las posibles extracciones en algunos vasos, como ya se planteó anteriormente.

En el cálculo de los preevaporadores se determina este flujo por la ecuación de balance de masa ya planteada:

Para los múltiples efectos (como los duplex):

$$W_p = W/N \quad (9)$$

W_p : Flujo que puede ser utilizado en el proceso (kg/h)

N: Número de efectos.

S_i se hiciera alguna extracción en el último vaso:

$$W_p = (W/N) - E \quad (10)$$

Las extracciones, que se utilizarían en otra sección diferente, se determinarían en cada caso en particular.

Cálculo de los flujos de vapor en las diferentes líneas de presión de la industria

De acuerdo al diagrama energético del central y a los cálculos realizados en los equipos primarios y tecnológicos, es necesario determinar el flujo de vapor disponible y el flujo de vapor necesario a consumir en cada una de las diferentes líneas de presión que hay en el proceso.

Balance de bagazo

En la industria azucarera es imprescindible realizar un balance de bagazo, con el objetivo determinar el posible déficit del mismo o la cantidad sobrante que puede ser comercializada.

Para este balance es necesario estimar el bagazo producido, así como el consumido en la generación de vapor (bagazo combustible), el consumido en el proceso tecnológico y el que se pierde durante su manipulación y almacenamiento.

El sistema de ecuaciones para este cálculo se puede encontrar en /17/.

Indicadores de eficiencia energética

En los generadores de vapor

Índice de generación bruta (IGB)

$$IGB = F_v/F_c \quad (11)$$

Eficiencia de generación bruta (E_{gb})

$$EGB = (IGB (H_v - H_l) / VCS) * 100 \quad (12)$$

Bagazo sobrante

$$B_{sobrante} = B_{disponible} - B_{combustible}$$

Por cientos de pérdidas de calor, por renglones (% Q_i)

$$\% Q_i = (Q_i/VCS) * 100 \quad (13)$$

En el proceso de producción

Índice de consumo de calor en los equipos. (ICQ)

$$ICQ = Q_{CONSUMIDO} / P_{Azúcar} \quad (14)$$

donde:

$Q_{CONSUMIDO}$: Flujo total de calor consumido por los equipos. (kJ/h)

$P_{Azúcar}$: Azúcar producida (kg/h)

Este índice debe ser determinado para el sistema de calentamiento, para el sistema de evaporación y para los tachos, es decir, ICQ_C , ICQ_{EV} e ICQ_T

Tasa de evaporación

$$T_{evap} = \frac{W}{Atc} \quad (15)$$

donde:

W: flujo de agua evaporado, $\frac{kg}{h}$

Atc: área de transferencia de calor, m^2

Según aparece en la literatura los valores eficientes de tasas de evaporación son los siguientes:

Simple efecto:	44 – 49	kg /h-m ²
Doble efecto:	39 – 44	kg /h-m ²

Triple efecto:	>44	kg /h-m ²
Cuádruple efecto:	>34	kg /h-m ²

Por ciento de inyección de vapor por reductora (%INY_v)

$$\% \text{INY}_v = (F_{VR} / F_{VE}) * 100 \quad (16)$$

F_{VE}: Flujo másico de vapor de escape (kg/h)

F_{VR}: Flujo másico de vapor en la reductora (kg/h).

Por ciento de vapor generado en el proceso que se aprovecha en el mismo

$$\% \text{Vapor}_{\text{usado}} = (F_{V,\text{usado}} / F_{V,\text{gen}}) * 100 \quad (17)$$

F_{Vgen}: Flujo másico de vapor generado en el proceso de evaporación (preevaporadores y múltiples efectos) kg/h

F_{Vusado}: Flujo másico de vapor generado en el proceso de evaporación que se utiliza en el mismo (kg/h)

Índice de correspondencia disponibilidad – consumo. ICORR

$$\text{ICORR} = (F_{VD} - F_{VC} / F_{VD}) * 100 \quad (18)$$

F_{VD}: Flujo másico de vapor disponible en cada sección del proceso. (kg/h)

F_{VC}: Flujo másico de vapor a consumir en cada sección del proceso (kg/h)

Metodología propuesta

La metodología propuesta para la evaluación integral del comportamiento energético de los centrales azucareros es la siguiente.

- Confeccionar el diagrama de flujo del proceso y el esquema energético.
- Realizar los balances de masa en los generadores de vapor siguiendo la metodología de cálculo propuesta.
- Realizar los balances de energía en los generadores de vapor siguiendo la metodología de cálculo propuesta.
- Realizar los balances de masa en el proceso tecnológico de acuerdo a la metodología de cálculo planteada en /17/.

- Determinar el consumo de vapor en los equipos primarios, aplicando las ecuaciones de cálculo planteadas de acuerdo a los equipos que formen parte del esquema energético del central.
- Determinar el consumo de vapor en los equipos tecnológicos, aplicando las ecuaciones de cálculo planteadas de acuerdo a los equipos que formen parte del esquema energético del central.
- Realizar los balances de masa y de energía en el atemperador del vapor de escape.
- Determinar los flujos másicos producidos en el proceso que se aprovechan en otras secciones del mismo según lo planteado .
- Determinar los flujos de vapor a circular por las válvulas reductoras.
- Determinar los flujos de vapor en las diferentes líneas de presión y analizar la correspondencia disponibilidad-consumo en cada una de ellas.
- Realizar el balance de bagazo aplicando la metodología de cálculo planteada en /17/.
- Determinar los indicadores de eficiencia propuestos .
- Analizar los resultados obtenidos y tomar las medidas necesarias para resolver las deficiencias detectadas.

Obviamente en esta metodología se puede variar el orden de algunas de las etapas señaladas.

Aplicación de la metodología propuesta en otros centrales azucareros

La metodología fue aplicada en los complejos agroindustriales azucareros; Urbano Noris, Rafael Freyre, Antonio Maceo, Loynaz Echevarria, Fernando de Dios y Cristino Naranjo, de la provincia de Holguín. De la provincia de Santiago de Cuba, se escogieron los complejos Julio Antonio Mella, Dos Ríos, Paquito Rosales y Salvador Rosales; así como el complejo Arquímedes Colina y Bartolomé Masó de provincia Granma.

Análisis de los resultados

En los 12 complejos agroindustriales donde se aplicó la metodología propuesta se pudo evaluar integralmente el comportamiento energético de los procesos respectivos y detectar las principales

deficiencias, pudiendo el personal técnico tomar medidas para eliminar o disminuir las mismas.

En aquellas empresas en las que no se disponía de algunos datos se pudieron determinar experimentalmente algunos de ellos, estimarlos en base a la experiencia de su personal o hacer consideraciones confiables que solucionaran las dificultades. Es importante destacar que se presentaron disímiles esquemas energéticos, lo que no impidió alcanzar los objetivos propuestos.

Conclusiones

- La metodología desarrollada permite evaluar de forma eficaz e integral el comportamiento de la eficiencia energética del proceso de producción en los centrales azucareros.
- Esta metodología se basa en la realización de balances de masa y energía en todas las secciones de la industria a partir, fundamentalmente, de datos que se deben conocer del proceso.
- La metodología es aplicable a cualquier central azucarero, independientemente de su esquema energético.
- En todos los casos se pudieron detectar donde se encontraban las principales dificultades en el proceso y tomar medidas al respecto.

Nomenclatura

- B_x**: concentración del jugo. °BX
C_p: capacidad calorífica. kJ/kg °C.
c: subíndice que denota combustible.
e: subíndice que denota entrada.
E: extracción de vapor. kg/h
F: flujo másico de jugo. kg/h
F_R y **F_{RT}**: coeficientes de ajustes según el rendimiento de azúcar de las plantas
F_S: coeficiente que tiene en cuenta el brix de los siropes
F_{Tr}: consumo específico de vapor
F_{xR}: factor que define el uso del agua
G: consumo de vapor. kg/h
H: entalpía. kJ/kg
i: subíndice que denota el número del efecto
j: subíndice que denota jugo.

- N**: número de efectos.
s: subíndice que denota salida.
v: subíndice que denota vapor
VCS: valor calórico superior. kJ/kg
W: flujo másico de agua evaporada. kg/h
W_p: flujo másico de agua evaporada que puede ser utilizado en el proceso. kg/h

Bibliografía

- 1 CABRALES, B. A. y DELGADO, P. Y. *Estudio del sistema energético en el CAI Arquímedes Colina*. Trabajo de Diploma, 2004.
- 2 COLECTIVO DE AUTORES. *Manual de operaciones para la producción de azúcar crudo de caña*. Dirección de tecnología del ministerio del azúcar, 2000.
- 3 *Ibid.* 1996.
- 4 ESPINOSA, P. R. *Sistemas de utilización del calor*. Editorial pueblo y educación, 1987.
- 5 GARCÍA, L. F. *El proceso de fabricación del azúcar crudo en los tachos*. La Habana. Editorial Ciencia y técnica. 1995.
- 6 GEORGE, P. M. *Manual del azúcar de caña* Ediciones Revolucionarias, 1967.
- 7 GONZÁLEZ, Y y FUENTES, R. *Balance energético en el CAI Bartolomé Masó*. Trabajo de Diploma, 2006.
- 8 Honing, P. "Principios de tecnología azucarera". Edición Revolucionaria. Guantánamo 1987.
- 9 HUGOT E. *Manual para Ingenieros azucareros*. Compañía editorial Continental SA. México DF, 1987.
- 10 MINAZ. *Balance de bagazo*. Ministerio del Azúcar, 1989.
- 11 PÉREZ, G. L. *Estudio del sistema energético del CAI Cristino Naranjo*. Trabajo de Diploma, 2001.
- 12 PONS, H. A. *Termodinámica técnica para ingenieros químicos*. La Habana, Editorial Pueblo y Educación. 1987.
- 13 SÁNCHEZ, N. D. *Estudio energético en el CAI Antonio Maceo*. Trabajo de Diploma, 2001.
- 14 SANTIESTEBAN, C. R. *Análisis energético en el CAI, Rafael Freyre*. Trabajo de Diploma, 2005.
- 15 SALAS, L. J. M. *Cogeneración. Aspectos termodinámicos, tecnológicos y económicos*. Editorial Universidad del País Vasco. 1994.
- 16 SARMIENTOS, E. S. *Análisis energético en el CAI Urbano Noris*, Trabajo de Diploma, 2003.
- 17 SOLER S. *Evaluación integral de la eficiencia energética en centrales azucareros*. Tesis de maestría. 2010.
- 18 WW Estudio energético. Panorama de Internet.
- 19 WW. Estudio energético. El azúcar. Internet.