

# Metodología para balance energético de centrales azucareros

## Methodology for sugar energy balance of power stations

DOI: 10.17981/ladee.02.02.2021.1

Fecha de recibido 11/05/2021. Fecha de aceptado 24/06/2021

**Luis Angel Iturralde Carrera** 

Universidad de Cienfuegos. Cienfuegos (Cuba)  
luisiturralde97@gmail.com

**Eduardo Bambi Valuca** 

Universidad de Cienfuegos. Cienfuegos (Cuba)  
valucaeduardo@gmail.com

**Alfredo Rafael Espinosa Palenque** 

Universidad de Cienfuegos. Cienfuegos (Cuba)  
aespinosa@ucf.edu.cu

Para citar este artículo:

L. A. Iturralde, E. B. Valuca & A. R. Espinosa, “Metodología para balance energético de centrales azucareros”, *LADEE*, vol. 2, no. 2, pp. 1–15, 2021. <https://doi.org/10.17981/ladee.02.02.2021.1>

*Resumen*— En este trabajo se desarrolló una metodología general, de fácil empleo para realizar balances energéticos y evaluar la eficiencia energética de centrales azucareros, con la consecuente valoración de los flujos másicos, la generación y consumo de vapor por las diferentes actividades del proceso productivo. Para su realización se empleó como método el análisis documental a partir de un grupo de metodologías estudiadas, enfocadas al balance energético de un central azucarero en Cuba y en el mundo, se hicieron críticas constructivas a las mismas, lo que sirvió de base a la hora de elaborar una de menor complejidad. Como resultado se describió una metodología que agrupa todas las etapas del proceso y permite determinar los indicadores termo-energético, comprobar el comportamiento del generador de vapor y su eficiencia, tanto interna como respecto al vapor enviado a la producción de azúcar y generación de energía eléctrica. Esto último fue identificado como una debilidad de las metodologías analizadas.

*Palabras clave*— Metodología; balance energético; termo-energético; generación de electricidad; central azucarero

*Abstract*— In this work a general methodology was developed, of easy employment to carry out energy balances and to evaluate the sugar energy efficiency of power stations, with the consequent valuation of the flows mass, the generation and consumption of vapor for the different activities of the productive process. For their realization it was used as method the documental analysis starting from a group of studied methodologies, focused to the energy balance of a sugar power station in Cuba and in the world, they became critical constructive to the same ones, what served as base when elaborating one of smaller complexity. As a result a methodology was described that it contains all the stages of the process and it allows to determine the water heater-energy indicators, to check the behavior of the steam generator and its efficiency, so much internal as regarding the vapor sent to the production of sugar and electric power generation. This last it was identified as a weakness of the analyzed methodologies.

*Keywords*— Methodology; energy balance; water heater-energy; electricity generation; sugar power station

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el rápido crecimiento industrial y el incremento de las demandas de la sociedad moderna, han dado como resultado un repentino aumento en los consumos energéticos. Los suministros mundiales de energía están basados fundamentalmente en los combustibles fósiles, lo cual es producto de su agotamiento y las proyecciones de las perspectivas internacionales de energía a nivel mundial [1]. La tendencia de hoy en día a nivel internacional y en Cuba, es la de llevar la industria azucarera a altos niveles de producción y eficiencia, con el objetivo de generar una mayor cantidad de energía eléctrica desde fuentes renovables, diversificando así su matriz energética y, por ende, haciéndola más sostenible, al ser menos dependiente de los combustibles fósiles en franca extinción [2].

Esta industria permaneció sin muchos cambios apreciables hasta que los problemas energéticos le obligaron a su reordenamiento en busca de soluciones que promovieran la reducción de los costos de producción, todo ello, mediante la aplicación de tecnologías modernas [3]. Para llegar a conocer las condiciones actuales de los esquemas de las fábricas de azúcar es necesario la aplicación de un balance termo-energético integral, pues este puede señalar las dificultades existentes y conducir economías, evitándose el consumo de combustible adicional, o en caso de sobrante estudiar las formas económicamente ventajosas de su utilización [4].

Según la UCLV y la EAC [5], la realización de un balance termo-energético en una fábrica de azúcar es una tarea compleja, por el gran número de variables y equipos consumidores de vapor que intervienen en el proceso de elaboración. Los análisis de cambio tecnológico se deben centrar en la valoración de los esquemas energéticos más difundidos en la actualidad, para los centrales azucareros [6]. Por eso surge la necesidad de una metodología de balance termo-energético de fácil empleo que permita obtener los resultados rápidos y precisos, para que el operario en momento determinado pueda saber el comportamiento del central y mejorar la eficiencia del mismo. Con el propósito de proponer mejoras tecnológicas que permitan un mayor aprovechamiento de los recursos en la industria azucarera, el presente trabajo tiene el objetivo de elaborar una metodología de balance energético productivo para facilitar el control operacional de la industria.

## II. METODOLOGÍA

Se empleó como método, el análisis documental para la constatación de las diferentes metodologías reportadas, enfocadas al balance energético de un central azucarero, en Cuba y en el mundo, para poder desarrollar la nueva metodología propuesta. Además se desarrolló todo el balance de energía, con la consecuente valoración de los flujos másicos, la generación y consumo de vapor por las diferentes actividades del proceso productivo, a partir de la características y tiempo de trabajo de los diferentes equipos tecnológicos.

Para el análisis se tomaron como referentes en el trabajo las metodologías desarrolladas por diferentes investigaciones:

### A. Metodología utilizada en la provincia de Cienfuegos (2016)

Se realizó por la UCF [7]. En el mismo se encuentra la descripción detallada del proceso, se determina el consumo de vapor en cada etapa, pero no se tiene en consideración la producción de vapor en los generadores de vapor y los cálculos de eficiencia del mismo.

### B. Metodología utilizada en la provincia de Villa Clara (2017)

Esta metodología presenta algunas dificultades en cuanto al cálculo de consumo de vapor en el área de la producción azucarera, pues considera para el cálculo la entalpia de todos los compuestos, igual que para el agua. En el área de la caldera y los turbogeneradores realiza el cálculo de algunas pérdidas en la caldera que puede ser complejo y de poco uso y, además, se pudo observar que esta metodología está inconclusa y realiza operaciones que, para el propósito de la presente investigación, son innecesarias [8].

### C. Metodología utilizada en la provincia de Matanzas (2017)

La metodología desarrollada por la UMCC [9] describe el proceso de producción completamente, desde la entrada de la caña, hasta la salida del azúcar. Se analizan variables que inciden en la calidad del azúcar como producto final y su influencia en el proceso; se realizan balances de masa y energía en todas las etapas del proceso utilizando herramientas estadísticas indispensables para los balances de masa y de energía en la evaluación de la eficiencia de un central azucarero. Como metodología es muy completa, pero realiza algunos cálculos innecesarios en el ámbito de la producción que complejizan el trabajo con la misma, sobre todo, en la práctica.

### D. Metodología utilizada en la provincia de Cienfuegos (2020)

Se desarrolló una metodología general, de fácil operatividad para realizar balances energéticos y evaluar la eficiencia energética de un central azucarero, estando sustentado el desarrollo de los cálculos en el programa Microsoft Excel. Para su verificación se aplicó a un estudio de caso haciendo uso de los datos reales obtenidos en el Central Azucarero “Ciudad Caracas” de la provincia de Cienfuegos, correspondientes a la zafra 2018-2019, y como método fundamental, se empleó el balance termo-energético [2]. Esta metodología es la más adecuada y sirve de guía, porque permite un análisis detallado de los principales indicadores de un central azucarero.

## III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las principales metodologías consultadas y tomando en consideración los softwares más utilizados y las condiciones reales de los centrales azucareros en el país, se propone la metodología de cálculo para el balance termo-energético para los centrales propuesto por la UCF [2]. Para su implementación y comprensión, será desarrollada en una hoja de cálculo de Microsoft Excel para lograr mayor interactividad y facilitar la presentación de los resultados.

En la metodología de cálculo se realizan, primeramente, los balances de masas pertinentes en la industria y luego se realizan los cálculos energéticos. Incluye el balance de vapor de condensado y de calor en los equipos del proceso. Se realizó en orden inverso, a partir de los equipos consumidores de vapor de escape, los motores primarios, válvulas reductoras y finalmente, las calderas.

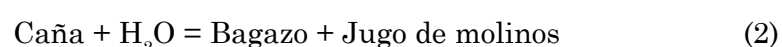
En la metodología es utilizada la unidad kcal para la energía por ser usado este término por el personal técnico de la industria azucarera<sup>1</sup>.

### A. Balances de masa

Los balances de masa se realizan por etapa, con el objetivo de determinar las pérdidas de sacarosa en el proceso. Además, se determinaron los flujos de las corrientes intermedias y la eficiencia de cada una de las etapas. Los flujos se calcularon en kilogramos por hora (1).

$$\frac{t}{d} = \frac{1000kg}{24h} \quad (1)$$

La caña preparada pasa desde el primer hasta el último tándem (2), como se ve en el siguiente balance de masa en los molinos (Fig. 1):



<sup>1</sup> Nota: La unidad de energía en el SI es el Joule, no la kcal que corresponde al sistema técnico o MKS.

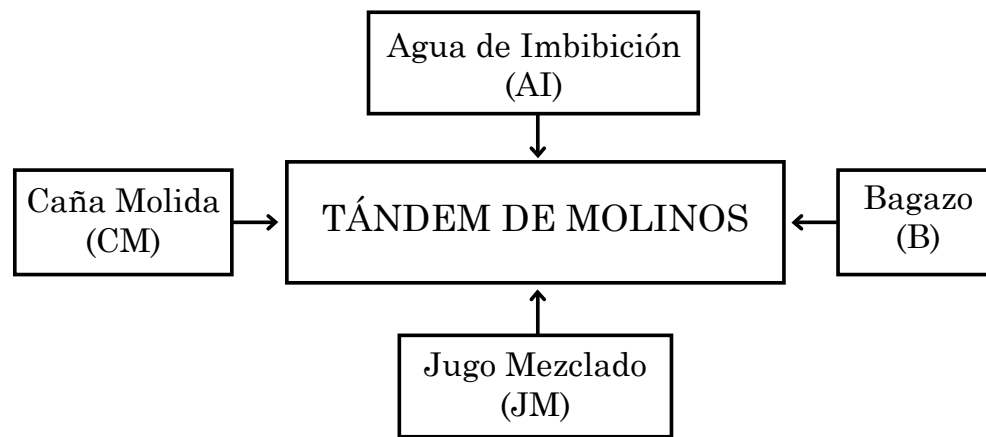


Fig. 1. Esquema general del Tándem de molinos.  
Fuente: Elaboración propia.

El cálculo de la cantidad de bagazo que se envía a una zona de almacenaje o a la alimentación directa a los hornos de las calderas es dada por (3):

$$\dot{m}_b = \frac{b_{\%c} * \dot{m}_c}{100} * \frac{1000}{24} \quad (kg/h) \quad (3)$$

$$\text{Donde: } b_{\%c} = \frac{\dot{m}_b}{\dot{m}_c} * 100$$

El porcentaje de jugo en caña extraída por los molinos se determina por (4):

$$\dot{m}_{jm} = \frac{j_{\%c} * \dot{m}_c}{100} * \frac{1000}{24} \quad (kg/h) \quad (4)$$

$$\text{Donde: } j_{\%c} = \frac{\dot{m}_j}{\dot{m}_c} * 100$$

El agua de imbibición es dada por (5):

$$\dot{a}_i = \dot{m}_b + \dot{m}_{jm} - \dot{m}_c \quad (kg/h) \quad (5)$$

#### B. Balance de masa en el área de purificación

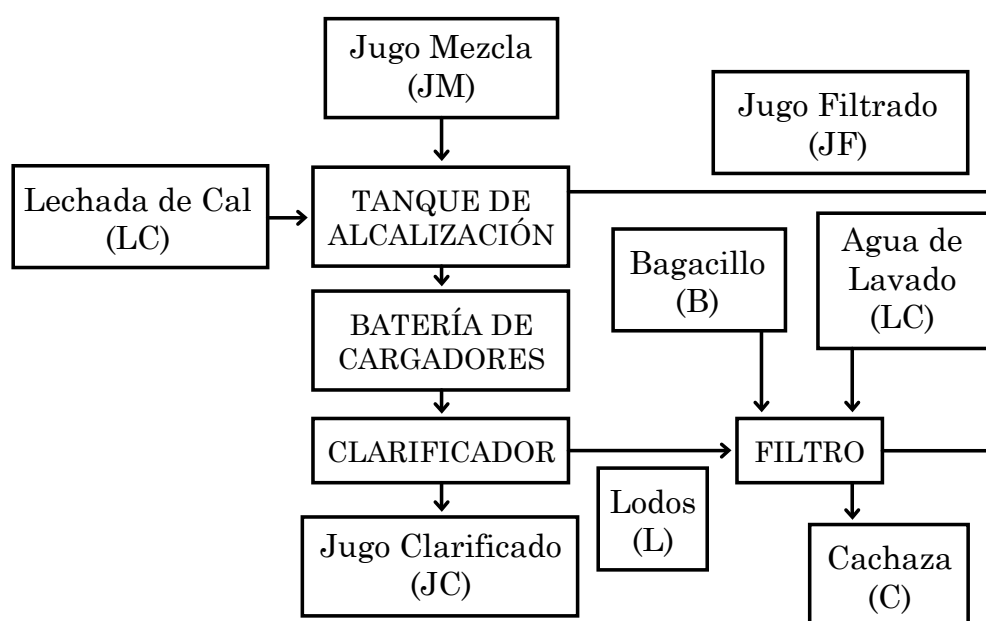


Fig. 2. Esquema general del área de purificación.  
Fuente: Elaboración propia.

En la expresión (6) se determina la cantidad de jugo de filtro. 15(%) es el valor que tiene en cuenta la recirculación del jugo de los filtros que está alrededor del 15% del jugo clarificado.

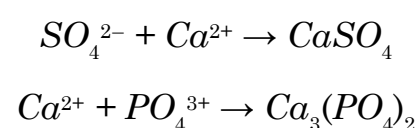
$$\dot{m}_{jf} = 15 (\%) * \dot{m}_{jm} \left( \frac{kg}{h} \right) \quad (6)$$

Al final del proceso, se obtiene llamado jugo mezclado que es el que continúa a las etapas posteriores y se determina por (7):

$$\dot{m}_{mez} = \dot{m}_{jm} + \dot{m}_{jf} \quad (7)$$

### C. Masa de lechada de cal (Base de tiempo: 1 día)

En el proceso de purificación del jugo mezclado, para lograr el denominado jugo claro, se adiciona una lecha de cal (Óxido de calcio hidratado, cuya concentración puede oscilar entre 10 y 20 °Baumet, unidad en que se expresa el % de sólidos solubles). Esta solución se aplica en una relación de 0.5 Kg de Óxido de calcio (CaO) por tonelada de caña molida, con el objetivo de aumentar el pH en un rango de 6.5 a 7.3 y, además, de separar las impurezas que acompañan al jugo mezclado, sucediendo dos tipos de reacciones fundamentales [10], [11]:



Tanto los iones  $SO_4^{2-}$  como los  $(PO_4)^{3-}$  están presentes en el propio jugo, en dependencia, al tipo de suelo donde se halla plantado de caña de azúcar y, además, a la variedad, cepa y edad de la plantación. Los  $SO_4^{2-}$  resultan muy perjudiciales como potenciales incrustaciones en los equipos de transferencia térmica, mientras que los  $(PO_4)^{3-}$  son los de mayor acción floculante, razón por la cual, cuando su concentración en los jugos no es la más adecuada, se producen las llamadas revolturas, haciéndose necesaria la adición de pequeñas cantidades de  $H_3PO_4$  (Ácido fosfórico) siempre tomando en cuenta, el pH del jugo claro.

También se pueden adicionar en muy pequeñas concentraciones, sustancias denominadas floculantes, generalmente de naturaleza compleja y de una estructura polimérica, que pueden actuar por flotación o por decantación, dependiendo en muchos casos, de la concentración en que se apliquen. Todo ello encarece los costos y complejiza el proceso, de aquí la necesidad de tomar en cuenta, todos los factores antes mencionadas, de una manera integral en el proceso de producción cañero-azucarero. El balance energético no puede estar ajeno a esta realidad práctica en un proceso de producción dado, si se quiere lograr una verdadera expresión del consumo y los efectos económicos colaterales.

$$m(CaO) = \left( \frac{500g/t * m_c}{1} \right) * 0.001 \text{ (kg)} \quad (8)$$

Donde:  $4^\circ Be \rightarrow \rho(CaO) = 1.029 \text{ kg/L}$

$$36 \frac{g}{l} \left( \frac{CaO}{lechada} \right)$$

$$500 \frac{g}{t} \left( \frac{CaO}{caña} \right)$$

$$V(CaOH) = m(CaO) * \frac{1000}{36g/l} \text{ (L)} \quad (9)$$

$$m(CaOH) = \rho(CaOH) * V(CaOH) \text{ (kg)} \quad (10)$$

En la expresión (11) se hace el Cálculo del jugo alcalinizado:

$$\dot{m}_{ja} = \left( \dot{m}_{jmez} \left( \frac{t}{d} \right) + \dot{m}(CaOH) \left( \frac{t}{d} \right) \right) \left( \frac{1000}{24} \right) \left( \frac{kg}{h} \right) \quad (11)$$

*D. Balance total en el clarificador (masa de jugo en el clarificador)*

Calculo de flujo de floculante (12):

$$\dot{m}_f = \dot{m}_c * dosificación \left( \frac{kg}{d} \right) \quad (12)$$

La masa de jugo en el clarificador se calcula por (13):

$$\dot{m}_{jc} = \dot{m}_{ja} + \dot{m}_f \left( \frac{1}{1000} \right) \left( \frac{t}{d} \right) \quad (13)$$

*E. Balance total en el filtro (masa de lodo)*

Las cantidades de masas de lodo que se separan del jugo clarificado se calcula por (14):

$$\dot{m}_l = \dot{m}_{ca} + \dot{m}_{jf} \left( \frac{t}{d} \right) \quad (14)$$

*F. Balance de masa en el área de los equipos de calentamiento y evaporación*

La masa de jugo clarificado que pasa a los evaporadores (Calentador 1) se determina por (15):

$$\dot{m}_{jclaro} = (\dot{m}_{jc} - \dot{m}_l) \left( \frac{kg}{h} \right) \quad (15)$$

*G. Balance parcial de sólido en el pre-evaporador 1*

$$\dot{m}_{pv_1} = \frac{\dot{m}_{jclaro} * Bx_{jc}}{Bx_m} \left( \frac{kg}{h} \right) \quad (16)$$

*H. Balance parcial del pre-evaporador 2*

$$\dot{m}_{pv_2} = \frac{\dot{m}_{pv_1} * Bx_{pv_1}}{Bx_{pv_2}} \left( \frac{kg}{h} \right) \quad (17)$$

*I. Balance total en los pre-evaporadores*

$$\dot{m}_{pv} = Ext = \dot{m}_{jclaro} - \dot{m}_{pv_2} \left( \frac{kg}{h} \right) \quad (18)$$

*J. Balances de energía*

Los balances de energía se realizan con el objetivo de conocer las demandas de vapor de cada equipo, así como, el agua evaporada en la etapa de evaporación utilizada como vapor vegetal. Las demandas de vapor se afectan por el flujo de caña molida para su posterior análisis.

Junto con esto, los cálculos pertinentes al generador de vapor. Se recomienda la utilización de una hoja de cálculo para facilitar la obtención de los resultados.

#### K. Cálculo de consumo de vapor en los calentadores (general)

El vapor aquí es utilizado para elevar la temperatura del jugo extraído, su consumo depende de la eficiencia térmica que tengan y el tipo de vapor utilizado. Su valor es determinado por (19):

$$\dot{m}_{calentador} = \frac{\dot{m}_{entcal} * c_{pcalentador} * \Delta t}{\lambda_{calentador}} * x \quad (19)$$

#### L. Cálculo del calor específico

Esta ecuación (20) es válida para cualquier calentador en el proceso, utilizando los valores correspondientes de las variables para cada uno de ellos.

$$c_{pcalentador} = 1 - 0.0056 * Bx_{calentador} \left( \frac{kcal}{(kg^{\circ}C)} \right) \quad (20)$$

El consumo de vapor total de los calentadores es dado por (21):

$$\dot{m}_{calentador_t} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_{calentador_i} \quad (21)$$

Al pre-evaporador No. 1 se suministra el flujo de jugo clarificado proveniente del calentador rectificador y como agente de calentamiento, vapor de escape sobrecalentado. Al pre-evaporador No. 2 entra el flujo de jugo clarificado, menos el agua evaporada en el pre-evaporador No. 1 y como fuente de calor, vapor de escape. Expresión (22) consumo de vapor en los pre-evaporadores:

$$\dot{m}_{pe} = \left( \frac{\dot{m}_{jclaro} * c_{pjclaro} * (t_{eb} - t_{alimpe}) + \dot{m}_{pv} * \lambda_{cuerpo-pe}}{\lambda_{calandria}} \right) * x \left( \frac{kg}{h} \right) \quad (22)$$

Se conoce el calor específico del jugo a partir de (23):

$$c_{pjclaro} = 1 - 0.0056 * Bx_{jc} \left( \frac{kcal}{(kg^{\circ}C)} \right) \quad (23)$$

La utilización de pre-evaporadores combinada con extracciones de segundo vaso del cuádruple efecto, o con doble efecto entregando sus vapores a calentadores, permite reducir el consumo de vapor de escape en el proceso hasta el orden de 38% a 40% del peso de la caña procesada. El Consumo de vapor en el vaso 1 del cuádruple efecto se calcula por (24):

$$\dot{m}_{v_1} = \frac{\dot{m}_{ev_t}}{n} * \frac{\lambda_{cuerpo_{v_1}}}{\lambda_{cal}} \quad (24)$$

$$+ \left( \frac{\dot{m}_{pv_2} * c_{pjentrada_{v_1}} * (t_{b_{v_1}} - t_{alim_{v_1}})}{\lambda_{cal}} \right) \left( \frac{kg}{h} \right)$$

El calor específico del jugo a la entrada es dado por (25):

$$c_{pjentrada_{v_1}} = 1 - 0.0056 * Bx_{pv_2} \left( \frac{kcal}{(kg^{\circ}C)} \right) \quad (25)$$

Con la expresión (26) se puede conocer la Evaporación total en kg/h:

$$\dot{m}_{ev_t} = \dot{m}_{pv_2} * \left( 1 - \frac{Bx_{pv_2}}{Bx_m} \right) \left( \frac{kg}{h} \right) \quad (26)$$

La economía en cuádruple efecto se determina por (27):

$$e = \frac{\dot{m}_{evt}}{\dot{m}_{v_1}} \quad (27)$$

M. *Cálculo del consumo de vapor en el primer tacho al vacío (general)*

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. Masas cocidas: masa cocida A (MCA); masa cocida B (MCB) y masa cocida C (MCC). Para determinar la demanda de vapor de cada tacho al vacío, se emplea (28):

$$\dot{m}_t = \frac{(w_{ini} + w_{mat})}{t_{coccion}} \varphi \quad (28)$$

Cálculo de flujo de agua evaporada al material inicial (29):

$$w_{ini} = P_{ini} * \left(1 - \frac{Bx_{inicial}}{Bx_{final}}\right) \quad (29)$$

Cálculo de peso del material inicial (30):

$$P_{ini} = \gamma * V_{ini} \quad (30)$$

Cálculo de flujo de agua evaporada al material alimentado (31):

$$w_{mat} = P_{mat} * \left(1 - \frac{Bx_{mat}}{Bx_{final}}\right) \quad (31)$$

Cálculo de peso del material alimentado (32) (33):

$$P_{mat} = \gamma * V_{fin} \quad (32)$$

$$P_{mat} = (P_{fin} - P_{ini} - W_{ini}) * \frac{Bx_{final}}{Bx_{mat}} \quad (33)$$

Consumo de vapor total de los tachos (34):

$$\dot{m}_{t_t} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_{t_i} \quad (34)$$

N. *Cálculo de consumo de vapor en el turbogenerador (general)*

El turbogenerador es el equipo donde el vapor directo producido por las calderas, sufre una expansión adiabática realizando trabajo mecánico, convirtiéndose en energía cinética a su paso por la tobera, la cual posteriormente, a través de un generador eléctrico, se transforma en energía eléctrica. De ellos sale el vapor de escape empleado posteriormente.

Para determinar el consumo de vapor de los turbogeneradores se utiliza (35):

$$\dot{m}_{turbo} = \frac{N * 860}{N_t * H_0 * N_{mec} * N_{elec} * N_{tubo}} \quad (35)$$

La eficiencia termodinámica de la turbina se determina por (36). Estos valores de las entalpías H1, H2, H2s se determinan en el “Diagrama de Mollier” [12], [13], [14], [15] con las condiciones de presión y temperatura del vapor a la entrada y salida del turbogenerador:

$$N_t = \frac{H_1 - H_2}{H_1 - H_{2s}} \quad (36)$$

El Consumo de vapor total de los turbogeneradores es dado por (37):

$$\dot{m}_{turbo_t} = \sum_{i=1}^n \dot{m}_{turbo_i} \quad (37)$$

El Consumo de vapor de necesidades tecnológicas es dado por (38):

$$\dot{m}_{nt} = \dot{m}_{calentador_4} + \dot{m}_{calentador_1} + \dot{m}_{pe} \quad (38)$$

La válvula reductora es la encargada de la extracción de vapor producida por el generador de vapor hacia el proceso de producción de azúcar según la demanda del mismo se determina su consumo por (39):

$$\dot{m}_{vr} = \dot{m}_{v_1} + \dot{m}_{t_t} + \dot{m}_{calentador_3} - \dot{m}_{pv} \quad (39)$$

El porcentaje de vapor extraído por la válvula reductora se da por (40):

$$\% \dot{m}_{vr} = \frac{\dot{m}_{vr}}{\dot{m}_{caldera}} * 100 \quad (40)$$

La caldera en la industria, es diseñada para generar vapor; este vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión constante, en la cual, el fluido originalmente en estado líquido, se calienta y cambia su fase a vapor saturado.

Una parte de este vapor es utilizado en el proceso de obtención del azúcar y la otra en la generación de energía eléctrica se determina por (41).

$$\dot{m}_{caldera} = \frac{(\dot{m}_{turbo_t} + \dot{m}_{vr}) * 1.1}{0.932} \quad (41)$$

El valor calórico neto se calcula por la expresión (42):

$$VCN = \left( 4250 - \left( 4850 * \frac{\text{humedad relativa}_{bagazo}}{100} \right) \right) \left( \frac{kcal}{kg} \right) \quad (42)$$

El calor sensible en los gases se determina por la expresión (43):

$$Q_p = t_{gases} * \left( 1 - \frac{\text{humedad relativa}_{bagazo}}{100} \right) * \left( 1.4 * RAE + \frac{0.5}{1 - \frac{\text{humedad relativa}_{bagazo}}{100}} - 0.12 \right) \left( \frac{kcal}{kg \text{ bag}} \right) \quad (43)$$

El calor recuperado de los gases se obtiene por (44), Los coeficientes ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$ ) toman en consideración efectos diferentes.

$$Q_{recup} = (VCN - Q_p) * \alpha * \beta * \delta \left( \frac{kcal}{kg \text{ bag}} \right) \quad (44)$$

Cálculo del calor necesario para obtener 1 kg de vapor (45):

$$Q_n = \lambda_v - \lambda \left( \frac{kcal}{kg \text{ bag}} \right) \quad (45)$$

El índice de generación se obtiene por (46):

$$IG = \frac{Q_{recup}}{Q_n} \left( \frac{kgv}{kg \text{ bag}} \right) \quad (46)$$

El valor calórico superior se da por (47):

$$VCS = 4600 * \left( 1 - \frac{\text{humedad relativa}_{\text{bagazo}}}{100} \right) \left( \frac{kcal}{kg} \right) \quad (47)$$

Para calcular la eficiencia total de las calderas se usa (48):

$$\eta_{cal_t} = \left( \frac{Q_{recup}}{VCS} \right) * 100 \quad (48)$$

La expresión (49) determina el vapor producido según la molienda:

$$V_{psm} = IG * \dot{m}_b \left( \frac{kgv}{h} \right) \quad (49)$$

Convección (50):

$$V_{psm} = \frac{V_{psm}}{1000} \left( \frac{t}{h} \right) \quad (50)$$

El bagazo quemado en se da por (51) :

$$B_q = \dot{m}_{caldera} * IG \left( \frac{kg}{h} \right) \quad (51)$$

El bagazo sobrante en se da por (52):

$$B_s = \dot{m}_b - B_q \left( \frac{kg}{h} \right) \quad (52)$$

Expresión (53) que determina la eficiencia en las calderas:

$$\eta_{cal} = \frac{\dot{m}_{caldera} * (\lambda_v - \lambda)}{B_q * VCN} * 100 \quad (53)$$

#### O. Balance de condensado

$$G_{a_{tec}} = \dot{m}_{pe} + \dot{m}_{calentador_t} + \dot{m}_{v_1} \left( \frac{kg}{h} \right) \quad (54)$$

$$G_{a_{rep}} = \dot{m}_{caldera} - G_{a_{tec}} \left( \frac{kg}{h} \right) \quad (55)$$

$$\%H_2O = \frac{G_{a_{rep}}}{\dot{m}_{caldera}} * 100 \quad (56)$$

P. Las expresiones abajo son las que determinan el Balance de calor

$$Q_{caldera} = \dot{m}_{caldera} * \lambda_v \left( \frac{kJ}{kg} \right) \left( \frac{kJ}{h} \right) \quad (57)$$

$$\lambda_v \left( \frac{kJ}{kg} \right) = 4.1868 * \lambda_v \quad (58)$$

$$\text{Donde: } \frac{Q_{caldera}}{3600} = (kW)$$

$$Q_{NT} = \dot{m}_{nt} * \frac{\lambda_{v_{esc}} * 4.1868 - \lambda_{H_2O_{sat}}}{3600} \quad (59)$$

$$Q_{Pot} = \dot{m}_{turbo_t} * \frac{\lambda_e - \lambda_s}{3600} \quad (60)$$

$$Q_{Otros} = \frac{\dot{m}_{caldera} * 0.07}{\lambda_{v_{otros}} * 3600} \quad (61)$$

$$Q_{Con} = G_{atec} * \frac{\lambda_{H_2O_{sat}}}{3600} \quad (62)$$

$$Q_{Perd} = Q_{caldera} - Q_{NT} - Q_{Pot} - Q_{Otros} - Q_{Con} \quad (63)$$

Q. Pérdidas en por ciento

$$\%PG = \frac{Q_{Perd}}{Q_{caldera}} * 100 \quad (64)$$

$$\%PP = \frac{Q_{NT}}{Q_{caldera}} * 100 \quad (65)$$

$$\%PPot = \frac{Q_{Pot}}{Q_{caldera}} * 100 \quad (66)$$

$$\%PO = \frac{Q_{Otros}}{Q_{caldera}} * 100 \quad (67)$$

$$\%PC = \frac{Q_{Con}}{Q_{caldera}} * 100 \quad (68)$$

R. Eficiencia térmica general

$$\eta_{tg} = \frac{Q_{caldera} - Q_{Perd}}{Q_{caldera}} * 100 \quad (69)$$

#### IV. CONCLUSIONES

La investigación sobre el desarrollo de una metodología de balance energético en un central azucarero resulta estratégica y de gran provecho porque permite un análisis detallado de los principales indicadores de centrales azucareros, evitando cálculos innecesarios.

Esta metodología permitirá conocer el comportamiento del generador de vapor y su eficiencia, tanto interna como respecto al vapor enviado a la producción de azúcar y generación de energía eléctrica. Siendo esto último, identificado como una debilidad de las metodologías que se analizaron.

Resulta de fácil operatividad, sin exigir un alto grado de especialización del técnico y, además, permite una adecuada exactitud en los cálculos, así como, una mayor facilidad de trabajo y rapidez en la obtención de los resultados.

## REFERENCIAS

- [1] R. C. Faife, “Evaluación del desempeño energético de la UEB Central azucarero «Heriberto Duquesne», relativo a los requisitos de la NC ISO 50001”, *Tesis grado*, FIMI, UCLV, Santa Clara, Cu, 2018. Disponible en <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/10322>
- [2] L. A. Iturralde, R. Borges, N. A. Perdomo y J. P. Yanes, “Metodología para balance energético de un Central azucarero. Estudio de caso: Central «Ciudad Caracas»”, *Rev MAPA*, vol. 4, no. 21, pp. 31–45, Oct. 2020. Disponible en <http://revistamapa.org/index.php/es/article/view/228/309>
- [3] F. E. Bastida, “Potencialidades de mejoras de los esquemas térmicos de la provincia de Cienfuegos. Caso de estudio Ciudad Caracas”, *Tesis grado*, UCF, Cienfuegos, Cu, 2016.
- [4] M. Cortés, Y. Cornes, I. Alomá y E. González, “Evaluación del sistema energético en el central azucarero Quintín Bandera”, *Rev Cen Az*, vol. 46, no. 3, pp. 66–78, 2019. Disponible en [http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro\\_azucar/article/view/26](http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/26)
- [5] M. González, H. Abreu, O. Rico, M. Zamora, y R. Espinosa, “Evaluación de esquemas de cogeneración de energía a partir de bagazo de caña de azúcar”, *Rev Cen Az*, vol. 43, no. 1, pp. 87–98, 2016. Disponible en [http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro\\_azucar/article/view/133](http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/133)
- [6] L. A. Arocha, “Evaluación y propuestas de mejoras del esquema termoenergético de la Unidad Empresarial de Base «Carlos Baliño»”, *Tesis grado*, FIMI, UCLV, Santa Clara, Cu, 2016. Recuperado de <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/6581/Arocha%20Morfa%2c%20Luis%20Alberto.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [7] D. D. Carreño, “Potencialidades de mejoras en los esquemas térmicos de los centrales azucareros de la provincia de Cienfuegos. Caso de estudio central Antonio Sánchez”, *Tesis grado*, UCF, Cienfuegos, Cu, 2016.
- [8] L. F. Morales, “Evaluación energética y de la seguridad tecnológica ambiental en el central azucarero «Carlos Baliño»”, *Trabajo diploma*, FQF, UCLV, Santa Clara, Cu, 2017. Recuperado de <https://1library.co/document/zvwwk51q-evaluacion-energetica-seguridad-tecnologica-ambiental-central-azucarero-balino.html>
- [9] J. A. Dueñas, “Herramientas útiles para la evaluación de la eficiencia del proceso de producción de azúcar de un central azucarero”, *Tesis de grado*, UMCC, Matanzas, Cu, 2017.
- [10] N. Castro, “Utilización de la masa lechada de cal (Base de tiempo: 1 día)”, 2021.
- [11] E. Hugot, *Handbok of the cane sugar Engineering*, 3 ed., vol. 7. Amsterdam, Holanda: Elsevier Science Publishers, 1986.
- [12] L. A. Iturralde, “Metodología para balance energético de centrales azucareros. Estudio de caso”, *Tesis grado*, UCF, Ci, Cu, 2020.
- [13] P. Rein, *Ingeniería de la caña de azúcar*. Berlín, DE: Bartens, 2012.
- [14] J. Keennan y F. Keyes, *Steam Tables*. Ma, EU: MIT, 1988.
- [15] Y. A. Cengel y M. A. Boles, *Termodinámica*, 7 ed. NY., EU: McGraw-Hill, 2012.

## NOMENCLATURA

- $m_b$  : Cantidad de bagazo kg/h.  
 $m_c$  : Flujo de caña molida kg/h.  
 $b_{\%c}$  : Porcentaje de bagazo en caña kg/h.  
 $m_{jm}$  : Flujo de jugo proveniente de los molinos kg/h.  
 $j_{\%c}$  : Porcentaje de jugo en caña extraída por los molinos kg/h.  
 $a_i$  : Flujo de agua de imbibición kg/h.  
 $m_b$  : Cantidad de bagazo kg/h.  
 $m_{jm}$  : Flujo de jugo proveniente de los molinos kg/h.  
 $m_c$  : Flujo de caña molida kg/h.  
 $m_{jf}$  : Jugo filtrado kg/h.  
 $m_{jm}$  : Flujo de jugo proveniente de los molinos kg/h.  
 $m_{jmez}$  : Jugo mezclado kg/h.  
 $m_{jf}$  : Jugo filtrado kg/h.  
 $m_{jm}$  : Flujo de jugo proveniente de los molinos kg/h.  
 $m_{jmez}$  : Jugo mezclado kg/h.

- $m_{ja}$  : Jugo alcalizado t/d.
- $m(\text{CaOH})$  : Flujo de hidróxido de calcio t/d.
- $m_f$  : Flujo de floculante kg/d.
- $m_{pv}$  : Flujo de vapor producido en los pre-evaporadores (1 y 2) kg/h.
- $m_{jclaro}$  : Flujo de jugo clarificado kg/h .  $m_{pv2}$ : Jugo a la salida del pre-evaporador2 kg/h.
- $Bx_{calentador}$  : Brix de jugo a la entrada del calentador.
- $m_{calentador}$  : Demanda de vapor de calentador en kg/h.
- $m_{jc}$  : Jugo a la entrada del clarificador t/d.
- $m_{ja}$  : Jugo alcalizado t/d.
- $m_f$  : Flujo de floculante kg/d.
- $m_1$  : Flujo de lodo t/d.
- $m_{ca}$  : Flujo de cachaza t/d.
- $m_{jf}$  : Jugo filtrado t/d.
- $m_{jclaro}$  : Flujo de jugo clarificado kg/h.
- $m_{jc}$  : Jugo a la entrada del clarificador kg/h.
- $m_1$  : Flujo de lodo kg/h.
- $m_{pv1}$  : Jugo a la salida del pre-evaporador1 kg/h.
- $m_{jclaro}$  : Flujo de jugo clarificado kg/h.
- $Bx_{jc}$  : Brix de jugo clarificado.
- $Bx_m$  : Brix a la salida del pre-evaporador1.
- $m_{pv2}$  : Jugo a la salida del pre-evaporador2 kg/h.
- $m_{pv1}$  : Jugo a la salida del pre-evaporador1 kg/h.
- $Bx_{pv1}$  : Brix a la salida del pre-evaporador1.
- $Bx_{pv2}$  : Brix a la salida del pre-evaporador2.
- $c_{pcalentador}$  : Calor específico del jugo en kcal/kg.
- $m_{entcal}$  : Flujo de jugo a la entrada del calentador kg/h.
- $\Delta t$  : Diferencia entre la temperatura de salida y de entrada del calentador en °C.
- $x$  : Factor que incluye un 4% de pérdidas de energía.
- $\lambda_{calentador}$  : Calor de cambio de fase del vapor saturado que intercambia calor. (Tabla 2 del (Keenan y Keyes 1988) (kJ/kg).
- $m_{pe}$  : Demanda de vapor del pre-evaporador en kg/h.
- $m_{jclaro}$  : Flujo de jugo clarificado en kg/h.
- $c_{pjclaro}$  : Calor específico del jugo clarificado en kJ/kg0C.
- $(t_{eb} - t_{alimpe})$ : Diferencia entre las temperaturas de entrada y de salida del jugo teniendo en cuenta la elevación del punto de ebullición en 0C.
- $m_{pv}$  : Flujo de agua evaporada. Este es el vapor vegetal en kg/h.
- $\lambda_{cuerpo\_pe}$  : Calor de cambio de fase buscado a la presión del cuerpo del pre-evaporador en kJ/kg.
- $\lambda_{calandria}$  : Calor de cambio de fase del vapor de escape en kJ/kg.
- $X$  : Término para considerar un 4% de pérdidas de energía.
- $Bx_{jc}$  : Brix de jugo clarificado.
- $m_{v1}$  : Demanda de vapor del vaso en kg/h.

- $\dot{m}_{\text{evt}}$  : Evaporación total kg/h.  
 $n$  : Número de efectos.  
 $m_{\text{pv}2}$  : Flujo de jugo proveniente del pre-evaporador en kg/h.  
 $c_{\text{pjentrada}_{\text{v}1}}$  : Calor específico del jugo proveniente del pre-evaporador en kJ/kg0C.  
 $(t_{\text{bv}1} - t_{\text{alim}_{\text{v}1}})$ : Diferencia entre las temperaturas de entrada y de salida del jugo teniendo en cuenta la elevación del punto de ebullición en 0C.  
 $\lambda_{\text{cuerpo}_{\text{v}1}}$  : Calor de cambio de fase buscado a la presión del cuerpo del vaso en kJ/kg.  
 $\lambda_{\text{cal}}$  : Calor de cambio de fase del vapor de escape en kJ/kg.  
 $Bx_{\text{pv}2}$  : Brix de jugo proveniente del pre-evaporador.  
 $\dot{m}_{\text{evt}}$  : Evaporación total kg/h.  
 $\dot{m}_{\text{pv}2}$  : Flujo de jugo proveniente del preevaporador en kg/h.  
 $Bx_{\text{pv}2}$  : Brix de jugo proveniente del preevaporador.  
 $Bx_{\text{m}}$  : Brix de la meladura.  
 $\dot{m}_{\text{v}1}$  : Demanda de vapor del vaso en kg/h.  
 $m_{\text{evt}}$  : Evaporación total kg/h.  
 $\dot{m}_{\text{v}1}$  : Demanda de vapor del vaso en kg/h.  
 $m_{\text{evt}}$  : Evaporación total kg/h.  
 $P_{\text{ini}}$  : Peso del material inicial, que depende de la densidad y el volumen inicial (kg).  
 $Bx_{\text{inicial}}$  : Brix inicial.  
 $Bx_{\text{final}}$  : Brix final.  
 $V_{\text{ini}}$  : Peso del material inicial, que depende de la densidad y el volumen inicial (m<sup>3</sup>).  
 $\gamma$  : Volumen específico (kg/m<sup>3</sup>).  
 $w_{\text{mat}}$  : Flujo de agua evaporada al material alimentado kg/h.  
 $P_{\text{mat}}$  : Peso del material alimentado.  
 $Bx_{\text{mat}}$  : Brix de alimentación.  
 $Bx_{\text{final}}$  : Brix final.  
 $V_{\text{fin}}$  : Peso del material final, que depende de la densidad y el volumen inicial (m<sup>3</sup>).  
 $\gamma$  : Volumen específico (kg/m<sup>3</sup>).  
 $V_{\text{psm}}$  : Vapor producido según la molida.  
 $B_{\text{q}}$  : Bagazo quemado.  
 $B_{\text{s}}$  : Bagazo sobrante.  
 $\eta_{\text{cal}}$  : Eficiencia en las calderas (%).  
 $G_{\text{atec}}$  : Condensados tecnológicos.  
 $G_{\text{arep}}$  : Condensados tecnológicos.  
 $\%H_2O$  : % de agua de reposición.  
 $Q_{\text{caldera}}$  : Calor generado en la caldera (kW).  
 $Q_{\text{NT}}$  : Calor utilizado en necesidades tecnológicas(kW).  
 $Q_{\text{Pot}}$  : Calor utilizado en los turbogeneradores(kW).  
 $Q_{\text{Otros}}$  : Calor utilizado en otras funciones(kW).  
 $Q_{\text{Con}}$  : Calor de los condensados(kW).  
 $Q_{\text{Perd}}$  : Calor de pérdidas(kW).  
 $\%PG$  : % de Calor de pérdidas.  
 $\dot{m}_{\text{t}}$  : Consumo total de vapor de los tachos kg/h.

- $m_{\text{turbo}}$  : Demanda de vapor del turbogenerador.
- $N$  : Cantidad de Energía eléctrica producida por la turbina se realiza cada turbogenerador. [kW-h]
- $N_t$  : Eficiencia termodinámica de la turbina.
- $H_0$  : Diferencia de entalpía entre el vapor a la entrada de la turbina y después de la expansión adiabática ideal (salto ideal de entalpía).
- $N_{\text{mec}}$  : Eficiencia mecánica.
- $N_{\text{elec}}$  : Eficiencia eléctrica.
- $N_{\text{tubo}}$  : Eficiencia de los tubos.
- $H_1$  : Entalpía del vapor a la entrada de la turbina.
- $H_2$  : Entalpía del vapor a la salida de la turbina.
- $H_{2S}$  : Entalpía del vapor isentrópica.
- $m_{\text{turbo t}}$  : Consumo de vapor total de los turbogeneradores kg/h.
- $m_{\text{nt}}$  : Consumo de vapor de necesidades tecnológicas kg/h.
- $m_{\text{vr}}$  : Consumo de vapor por válvula reductora kg/h.
- $\%m_{\text{vr}}$  : % de vapor extraído por la válvula reductora.
- $m_{\text{caldera}}$  : Vapor que debe producir la caldera para satisfacer las necesidades kg/h.
- VCN : Valor Calórico Neto(kcal/kg).
- $Q_p$  : Calor sensible en los gases (kcal/kg bag).
- $t_{\text{gases}}$  : Temperatura de los gases (°C).
- RAE : Relación de aire empleado.
- $Q_{\text{recup}}$  : Calor recuperado.
- $\alpha$  : Coeficiente de pérdidas.
- $\beta$  : Coeficiente de pérdidas.
- $\delta$  : Coeficiente de pérdidas.
- $Q_n$  : Calor necesario para obtener 1 kg de vapor.
- $\lambda_v$  : agua sobrecalentada (kcal/kg).
- $\lambda$  : agua saturada (kcal/kg).
- IG : Índice de generación.
- VCS : Valor calórico superior.
- $\eta_{\text{cal t}}$  : Eficiencia total de las calderas (%).
- $\%PP$  : % de Calor utilizado en necesidades tecnológicas.
- $PPot$  : % de Calor utilizado en los turbogeneradores.
- $PO$  : % de Calor utilizado en otras funciones.
- $\%PC$  : % de Calor de los condensados.
- $\eta_{\text{tg}}$  : Eficiencia térmica general (%).