



Fecha de presentación: junio, 2020 Fecha de aceptación: agosto, 2020 Fecha de publicación: octubre, 2020

2

Metodología para balance energético de un Central azucarero. Estudio de caso: Central “Ciudad Caracas”

Methodology for energy balance of a Sugar Plant. Case study: Central “Ciudad Caracas”

Ing. Luis Angel Iturralde¹

luisiturralde97@gmail.com

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5595-9392>

MSc. Reinier Jiménez Borges²

rei89@nauta.cu

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6451-8499>

Dr.C. Nelson Arsenio Castro Perdomo³

ncastro@ucf.edu.cu

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6939-9473>

Dr.C. José Pedro Monteagudo Yanes⁴

jpmynes@ucf.edu.cu

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7234-7853>

Cita sugerida (APA, sexta edición)

Iturralde, L. A., Jiménez Borges, R., Castro Perdomo, N. A. & Monteagudo Yanes, J. P. (2020) Metodología para balance energético de un Central Azucarero. Estudio de caso: Central “Ciudad Caracas”. Revista Mapa, 2(21), 27- 47. Recuperado de <http://revistamapa.org/index.php/es>

¹ Carrera. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. (CEEMA) Facultad de Ingeniería. Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”

² Profesor Asistente, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. (CEEMA). Facultad de Ingeniería. Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”.

³ Profesor Titular, Doctor en Ciencias Técnicas. Centro de Estudios para la Transformación Agraria Sostenible. de Energía y Medio Ambiente. (CETAS) Facultad de Ciencias Agrícolas. Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”.

⁴ Profesor Titular y Consultante, Doctor en Ciencias Técnicas. Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. (CEEMA). Facultad de Ingeniería. Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”

RESUMEN

Hoy en día la industria azucarera ha tomado auge a nivel mundial y en Cuba, esto debido a que un subproducto del proceso, el bagazo, resulta un excelente combustible que le permite generar electricidad para el proceso de obtención de la azúcar y realizar la venta del excedente generado al Sistema Electroenergético Nacional. En este trabajo 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 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. Como principal resultado, se facilita el análisis y la comparación entre los parámetros reales de trabajo con los parámetros normados establecidos según las áreas en operación; a la vez que permite el cálculo del aporte económico por concepto de ventas de energía y los ahorros por generación del consumo propio del proceso productivo, facilitando la toma de decisiones.

Palabras claves: balance termo-energético; generación de electricidad; industria azucarera; metodología de balance energético

ABSTRACT

Today the sugar industry has boomed worldwide and in Cuba, this because a by-product of the process, bagasse, is an excellent fuel that allows it to generate electricity for the process of obtaining sugar and to sell the sugar surplus generated to the National Electroenergetic System. In this work, a general, easily operative methodology was developed to carry out energy balances and evaluate the energy efficiency of a sugar mill, supporting the development of calculations in the Excel program. For its verification, it was applied to a case study using the real data obtained at the "Ciudad Caracas" Sugar Mill in the province of Cienfuegos, corresponding to the 2018-2019 harvest, and as a fundamental method, the thermo-energy balance was used. As the main result, the analysis and comparison between the real working parameters is facilitated with the standard parameters established according to the areas in operation; at the same time that it allows the calculation of the economic contribution for energy sales and the savings by generation of the consumption of the production process, facilitating decision-making.

Keywords: thermo-energy balance; electricity generation; sugar industry; energy balance methodology

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum sp*) es un híbrido complejo de varias especies, derivadas principalmente del *Saccharum Officinarum* y otras especies de *Saccharum*, en la que a través de reacciones químicas propias del metabolismo de la planta, se forma la sacarosa (nombre químico del azúcar), aumentando su concentración durante su período de crecimiento, alcanzando su valor máximo aproximadamente entre el mes número doce y el trece, momento en el que tiene una composición aproximada de 71% de agua, 14% de fibra, 13% de sacarosa y 2% de sólidos solubles: glucosa, fructosa y otros no azúcares (Rein, 2012).

La masa de agua que acompaña a la caña, una vez entrada a fábrica, debe ser extraída en la mayor medida posible, según vaya pasando por las diferentes fases del proceso, sin dejar de tomar en cuenta, que en alguna de ellas, también se adiciona una proporción de agua que luego hay que extraer, como es el caso, de la etapa de extracción del jugo en los molinos, o también, la que lleva implícita la lechada de cal que luego se adiciona en el proceso de clarificación de los jugos, implicando un gasto energético.

Esta industria permaneció sin muchos cambios apreciables hasta que los problemas energéticos y la presencia en el mercado de diferentes tipos de edulcorantes, naturales o sintéticos, le obligaran a su reordenamiento, en busca de soluciones que promovieran la reducción de los costos de producción, básicamente, a partir de la elevación del rendimiento agrícola y la eficiencia industrial, así como, la generación de excedentes de bagazo y electricidad para la venta a la red pública, demandando tanto de la inclusión de la modificación de los esquemas de proceso y el incremento del rendimiento agrícola, todo ello, mediante la aplicación de tecnologías modernas que permitieran reducir los costos (Bastida, 2016).

Como parte de estas transformaciones tecnológica, aparece a su vez, un nuevo enfoque, dirigido a ver la Cogeneración como una fuente de ingreso para la industria, a partir de la producción de un excedente de energía eléctrica a entregar al Sistema Electroenergético Nacional (SEN), lo que dependerá de la capacidad de generación instalada, al respecto, (Morales, 2017) apunta que la mayoría de las fábricas de azúcar, que no se ocupan de maximizar su generación de electricidad para exportar, tienen sus capacidades de generación justas para lograr dos objetivos básicos: (I) Satisfacer la demanda de vapor y (II) Satisfacer la electricidad para el proceso de la caña de azúcar, limitándolos de la participación para sus ingresos de nuevos rubros comercializables, por demás, sostenibles ambientalmente.

Esta situación tiene para Cuba, un comportamiento muy particular, pues si bien, motivado por el proceso de redimensionamiento del sector, la capacidad instalada se redujo a 247,5 MWh con relación a 1991, el índice de generación en las últimas zafas, se ha duplicado hasta 38 kWh por tonelada de caña molida, resultado de los esfuerzos dirigidos a mejorar el balance energético en las fábricas. La potencia instalada al cierre de 2010 era de 497,50 MWh, con un consumo anual del sector, incluyendo su propia generación, de 830 GWh, del cual se aportan al SEN 310 GWh (Bastida, 2016).

Un elemento a tener en cuenta es lo planteado por (Morales, 2017) cuanto advierte sobre el incremento de los costos por inversión que se produce al buscar un incremento de la eficiencia de los ciclos termodinámicos, pues se requiere de un incremento de la presión y la temperatura en el vapor que generan las calderas, para su posterior empleo en las turbinas que producen la electricidad, para lograr con ello, un incremento de la cantidad de electricidad generada por toneladas de caña molidas (kWh/tc).

Los análisis de cambio tecnológico se debe centrar en la valoración de los esquemas energéticos más difundidos en la actualidad en los centrales azucareros: el de ciclo a vapor con turbina de contrapresión; el de ciclo de vapor con turbina de extracción-condensación con altos parámetros de vapor de 40-80 bar, tecnología comercial, moderna y eficiente; el ciclo combinado con gasificación del bagazo y ciclo combinado con turbina de gas y turbina de vapor, considerada una tecnología de avanzada que aún está en etapa de demostración. (Arocha, 2016).

Actualmente, la mirada a nivel internacional está centrada en la búsqueda de Bioenergéticas que funciones con fuentes de biomasa seguras y relativamente baratas, el bagazo es una de ellas. Según (Arocha, 2016) el costo de una instalación de ese tipo se estima en 1,8 millones de dólares por megavatio instalado,

básicamente, por la necesaria adquisición de equipos en las cinco áreas básicas que las integran: plantas eléctricas (turbogeneradores); planta de generación de vapor (calderas); planta de tratamiento de agua para alimentar las calderas; almacén de biomasa y enlace con el Sistema Electroenergético Nacional (SEN), sin contar las obras de construcción y montaje. Esto demuestra, la necesidad de buscar esquemas energéticos que aseguren un éxodo de biomasa, para lograr sinergia con lo antes planteado y disponer de herramientas adecuadas para realizar los balances energéticos en tiempo real y conducir desde ellos, la toma de decisiones, resulta fundamental.

MATERIALES Y MÉTODOS

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 y además, se desarrolló todo el balance de energía, con la consecuente valoración de los flujos másicos y la generación y consumos de vapor por las diferentes actividades del proceso productivo, a partir de la características y tiempo de trabajo de los diferentes equipos tecnológicos.

Los datos usados pertenecen en tiempo real, al Central Azucarero “Ciudad Caracas” en una zafra estimada en 120 días, estimándose de igual modo, el tiempo perdido por limpiezas y paradas y, por tanto, el tiempo efectivo de molienda. Se consultaron datos de la bibliografía, los que se utilizaron como referentes en la discusión de los resultados, incluido el aporte económico.

Para el análisis se tomaron como referentes en el trabajo las metodologías desarrollada por (Motito-Legrá, 2016), implementada en el Central “Paquito Rosales”

de la provincia Santiago de Cuba; la de (Silvia, 2013) implementada en el Central azucarero “Urbano Noris”, de la provincia de Holguín; la desarrollada por (Carreño, 2016) implementada en la Empresa Azucarera “Antonio Sánchez”, Aguada de Pasajeros, provincia Cienfuegos y la desarrollada por (Morales, 2017) Morales implementada en el Central azucarero “Carlos Baliño” de la provincia Villa Clara.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este proceso, el consumo de potencia y de energía térmica depende de muchas variables, como son: la variedad de caña, porcentaje de fibra, tipo de cosecha de caña, contenido de materia extraña, limpieza de la caña, grado de imbibición (%), tipo de turbinas y motores eléctricos, presión y contrapresión de trabajo en turbogeneradores y turbinas de mando, tipo de equipos y esquema de evaporación-calentamiento, tipo de tachos y sistema de cocimientos, tipo de equipos y sistema de vacío usado, refinería, destilería y deshidratadores, utilización del tiempo hábil de molienda, tipos de calderas y de combustibles utilizados, fundamentalmente.

Los autores de esta investigación consideran que la preparación de la caña debe ser otro factor a considerar, por su incidencia en el tamaño con que saldrá el bagazo para alimentar los hornos, así como, la frescura de la caña entrada a fábrica, por la incidencia que tiene sobre la viscosidad de los jugos y la formación de oligómeros y polímeros que retardan a su vez la velocidad de cristalización, aumentando los tiempos de proceso y por ende, el consumo; como también, y no menos importante, la disciplinas tecnológica, muy pocas veces considerada en los análisis, pero en la práctica, uno de los principales elementos de consumo energético, sobre todo, en el proceso de evaporación y cocción.

En proceder sistemático dentro del proceso de producción, cualquier ahorro de vapor que se realice, conducirá a una disminución de la extracción de vapor en la turbina y por lo tanto contribuirá a que ésta opere con mayor eficiencia en la generación de energía eléctrica (Alderetes, 2016).

El balance fue realizado utilizando datos reales del Central Azucarera “Ciudad Caracas” como ya se ha dicho, programado en hojas de Excel, en una de las hojas del Excel se encuentra todos los datos y las fórmulas y en la otra el esquema de interconexión de equipos del central azucarero.

Resultados del balance:

Para una mejor comprensión de los resultados se hace necesario, antes de mostrar los mismos, declarar que la variable de demanda, según la metodología implementada, está representa en el Excel por las letras D o G, respectivamente y el flujo que se elimina por la letra (\dot{m}).

Balances de masas

Según los datos primarios utilizados para el balance, los resultados de los cálculos están dados en las tablas 2 y 3

Tabla 2. Resultado de cálculos de balance de masa 1.

Cálculo de la cantidad de bagazo

Masa de bagazo (kg/h)	58 759,20
-----------------------	-----------

Cálculo de la cantidad de Jugo en molinos

Masa de jugo en molinos (kg/h) 145 478,50

Cálculo del agua de imbibición

Agua de imbibición (t/d) 1 218,75

Cálculo de la cantidad de jugo de filtros

Jugo de filtros (t/d) 523,72

Cálculo de Jugo mezclado

Jugo Mezclado (t/d) 4 015,21

Jugo Mezclado (kg/h) 167 300,28

Fuente: datos de la investigación

Elaborado por: autoría propia 2020(Excel)

Tabla 3. Resultado de cálculos de balance de masa 2.

Cálculo de la cantidad de jugo alcalizado	
m (Jugo alcalizado) t/d	4 067,84
m (Jugo a calentadores 2,3,4) kg/h	169 493,45
Balance total en el clarificador	
m (jugo que entra al clarificador) t/d	4 067,86
Balance total en el filtro	
Lodo (t/d)	662,52
Cálculo de la masa de jugo clarificado	
m (Jugo claro) kg/h	141 889,11
m(jugo al calentador 1)	141 889,11
Balance Parcial en el 1 Pre-Evaporador	
Jugo a la salida (kg/h)	111 120,76
Balance Parcial en el 2 Pre-Evaporador	

Jugo a la salida (kg/h)

84 140,83

Fuente: datos de la investigación

Elaborado por: autoría propia 2020(Excel)

Cálculos del consumo de vapor

Según la información resultante de los cálculos anteriores, se procedió a calcular el consumo de vapor en los calentadores, los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Resultado de cálculos de consumo de vapor en calentadores.

Cálculo de consumo de vapor en calentadores	
G (Cal 1) kg/h	1 500,36
G (Cal 2) (Agua condensada) kg/h	18 305,10
G (Cal 3) kg/h	4 892,57
G (Cal 4) kg/h	6 895,70
G (total de calentadores) kg/h	13 288,63

Fuente: datos de la investigación

Elaborado por: autoría propia 2020(Excel)

Tabla 5. Resultado de cálculos de consumo de vapor en Pre-Evaporadores.

Balance Total en los Pre-Evaporadores	
Vapor Producido = Ext (kg/h)	57 748,28
Calculo del consumo de vapor en el Pre	
Cp (jc)	0,92
G (pre-evap) kg/h	59 067,73
Calculo del consumo de vapor en el 1er vaso	

Cp (j entrada)	0,86
Evaporación total (Vt)	52 332,77
G=S (1er vaso) kg/h	13 492,35
Economía	3,88

Fuente: datos de la investigación

Elaborado por: autoría propia 2020(Excel)

Tabla 6A. Resultado de cálculos de consumo de vapor en los tachos.

Cálculo de consumo de vapor de los Tachos

Tacho # 1

P (inic) kg	19 183,50
W (inic) kg	526,20
P (final) kg	51 083,50
P (mat) kg	45 196,23
W (mat) kg	13 822,43
G (tacho1) kg/h	9 864,69

Tacho # 2

P (inic) kg	17487
W (inic) kg	686,06
P (final) kg	56 666
P (mat) kg	58 161,05
W (mat) kg	19 668,11
G (tacho2) kg/h	9 770

Tacho # 3

P (inic) kg	24 635,50
W (inic) kg	868,12
P (final) kg	86 159

P (mat) kg	87 831,40
W (mat) kg	27 176,0267
G (tacho3) kg/h	15 424,27968
Tacho # 4	
P (inic) kg	14 543,50
W (inic) kg	314,45
P (final) kg	44 558,50
P (mat) kg	41 500,01
W (mat) kg	11 799,46
G (tacho4) kg/h	7 874,06

Fuente: datos de la investigación

Elaborado por: autoría propia 2020(Excel)

Tabla 6B. Resultado de cálculos de consumo de vapor en los tachos.

Tacho # 5

P (inic) kg	17 487
W (inic) kg	507,17
P (final) kg	52 519
P (mat) kg	49 816,09
W (mat) kg	15 291,26
G (tacho5) kg/h	10 861,42

Tacho # 6

P (inic) kg	18 603,50
W (inic) kg	640,83
P (final) kg	52 562,50
P (mat) kg	48 215,72
W (mat) kg	14 897,55

G (tacho6) kg/h	4 039,99
G (total de tachos) kg/h	57 834,41

Fuente: datos de la investigación

Elaborado por: autoría propia 2020(Excel)

Tabla 7. Resultado de cálculos de consumo de vapor en los turbogeneradores.

Cálculo de consumo de vapor en los turbogeneradores

G (Turbogenerador 1) kg/h	45 028,76
G (Turbogenerador 2) kg/h	28 442,37
G (Total de Turbogeneradores) =G(mp) kg/h	73 471,13

Fuente: datos de la investigación

Elaborado por: autoría propia 2020(Excel)

Tabla 8. Resultado de cálculos de consumo de vapor en necesidades tecnológicas.

Consumo de vapor de necesidades tecnológicas

G (NT) kg/h	67 463,79
-------------	-----------

Consumo de vapor por válvula reductora

G (VR) kg/h	18 471,04
%G (VR)	17,02

Fuente: datos de la investigación

Elaborado por: autoría propia 2020(Excel)

Resultados de los cálculos pertinentes al generador de vapor.

Tabla 9. Resultado de cálculos de vapor generado en la caldera.

Vapor generado en la caldera

G (Caldera) kg/h	108 515,45
VCN (Valor Calórico Neto) kcal/kg	1 819,67
Qp (calor sensible en los gases) kcal/kg bag	342,20
Qrecup kcal/kg bag	1 265,08
Qn (Calor necesario para obtener 1 kg de vapor)	634,36
IG (índice de generación) kgv/kg bag	1,99
VCS (Valor calórico superior) kcal/kg	2 294,94
η_{cal} (Eficiencia total de las calderas) %	55,13
Vpsm (vapor producido según la molida) kgv/h	117 181,38
Vpsm (vapor producido según la molida) t/h	117,18
Bq (bagazo quemado) kg/h	54 413,77
Bq (bagazo quemado) t/h	54,41
Bs (bagazo sobrante) kg/h	4 345,43
η_{cal} (Eficiencia en las calderas) %	69,52

Fuente: datos de la investigación

Elaborado por: autoría propia 2020(Excel)

Tabla 10. Resultado de cálculos de balance de condensado.

Balance de condensado

Ga (tec) kg/h	104 153,80
Ga (reposición) kg/h	4 361,65
% H ₂ O (reposición)	4,02

Fuente: datos de la investigación

Elaborado por: autoría propia 2020(Excel)

Tabla 11. Resultado de cálculos de balance de calor.

Balance de calor		
Q (caldera)	kJ/h	340 567 614,20
Q (caldera)	kJ/s = kW	94 602,12
Q NT	kJ/h	152 326 834,90
Q NT	kJ/s = kW	42 313,01
Q (Pot)	kJ/h	32 131 918,26
Q (Pot)	kJ/s = kW	8 925,53
Q (otros)	kJ/h	20 384 083,67
Q (otros)	kJ/s = kW	5 662,25
Q (cond)	kJ/h	42 766 590,65
Q (cond)	kJ/s = kW	11 879,61
Q (Pérd)	kJ/s = kW	25 821,72

Fuente: datos de la investigación**Elaborado por:** autoría propia 2020(Excel)

Tabla 12. Resultado de cálculos de pérdidas en %.

Pérdidas en %	
% Pérdidas generales	27,30
% Pérdidas en proceso	44,73
% Pérdidas de potencia	9,433
% Pérdidas de otros	5,99
% Pérdidas en condensados	12,56

Fuente: datos de la investigación**Elaborado por:** autoría propia 2020(Excel)

Tabla 13: Resultado de cálculos de eficiencia térmica general %.

Eficiencia térmica general %	72,71
------------------------------	-------

Fuente: datos de la investigación**Elaborado por:** autoría propia 2020(Excel)

RESULTADOS

Los resultados obtenidos del balance muestran que el bagazo sobrante alcanza un valor del 7,4%.

De acuerdo a los resultados presentados, en condiciones normales de operación del ingenio, es necesario disponer de cierta cantidad de bagazo sobrante para operar durante paradas que se producen habitualmente durante la molienda, las que pueden oscilar entre 2 y 3 horas de duración (en ocasiones mucho más, dependiendo de la causa). En Cuba el sobrante de bagazo se comporta en un intervalo del 15–30 % (Victoria, 2009), situándose este valor obtenido por debajo de los parámetros establecidos. Por otra parte, el consumo vapor de la fábrica debe oscilar entre 40 y 60 t de vapor/100 t de caña (Rein, 2006). Este depende fundamentalmente de la estabilidad en el consumo promedio de vapor de baja presión en los tachos y la potencia instalada de los turbogeneradores, pues los equipos de mayor potencia tienen menor consumo específico, expulsándose vapor a la atmósfera. (Rein, 2006; Victoria, 2009).

Por ninguna razón se debe permitir la expulsión de este vapor a la atmósfera, por representar una pérdida tanto de energía como de agua. Como estrategia de trabajo, para evitar las fluctuaciones en la estación de tachos, es recomendable pasar vapor



directo por la reductora de alta, pues es más ventajoso económicamente que compensar estas fluctuaciones de presión de vapor en los turbogeneradores. Sin embargo, ello no permite aprovechar al máximo la capacidad de los turbogeneradores para realizar trabajo. Como se puede apreciar, esta metodología facilita este tipo de análisis y, además, la comparación con los parámetros normados.

La metodología permite un análisis detallado de los principales indicadores de un central azucarero, evitando cálculos innecesarios. Los comportamientos de los equipos tecnológicos se pueden determinar con exactitud siempre que se haga una correcta selección de datos, según el área de trabajo.

Con respecto a las demás metodologías, la elaborada en esta investigación, permite saber 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.

Como factor adicional a favor de la metodología propuesta, está el hecho de que, al estar estructurada operativamente sobre un Excel, 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 resultados.

Desarrollo de la evaluación económica de los resultados obtenidos

Hoy en día, un central azucarero no se considera económica y tecnológicamente factible, si no genera suficiente vapor y energía eléctrica para sí mismo y para comercializar, siendo esta última una potencial fuente de ingreso para estas industrias, lo que sumado a su autonomía energética y la contribución que hacen a una producción renovable y más limpia de la energía, las hace mucho más atractivas; las

bioenergéticas como tecnología están abriendo es este sentido, nuevos caminos por lo que Cuba está empezando a transitar.

Desde el anterior posicionamiento y tomado como base los resultados anteriormente obtenidos, se realizará un análisis de la factibilidad económica del central azucarero en la generación de electricidad. El principal objetivo de este análisis se enfocará al efecto económico de la venta de energía eléctrica al Sistema Electro Energético Nacional (SEN), sin tomar en cuenta en este análisis, los ingresos por el azúcar y el alimento animal vendidos.

El central azucarero vende la energía eléctrica a $0.24 \frac{\$}{\text{kWh}}$ rigiéndose por la Resolución (Minas, 2019).

Generación de electricidad de las turbinas

Trabajo realizado por una turbina es dado en la ecuación 1.

$$W = H_1 - H_2 \quad (1)$$

Donde:

W : Trabajo de la turbina

H_1 : Entalpía del vapor a la entrada de la turbina. (kJ/kg)

H_2 : Entalpía del vapor a la salida de la turbina. (kJ/kg)

Nota: los valores de H_1 y H_2 se determinaron mediante el Diagrama de Mollier, bajo las condiciones de presión y temperatura del vapor a la entrada y salida del turbogenerador.

Turbina # 1:

$$W = 3\,120.84 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} - 2\,739.80 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 381.04 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Turbina # 2:

$$W = 3\,120.84 \frac{kJ}{kg} - 2\,739.80 \frac{kJ}{kg} = 381.04 \frac{kJ}{kg}$$

Energía eléctrica producida por el turbogenerador. Ecuación 2.

$$E_{turbo} = W_{turbo} * \dot{m}_{turbo} * N_t * N_{mec} * N_{elec} * N_{tubo} \quad (2)$$

Energía eléctrica producida por el turbogenerador 1:

$$E_{turbo_1} = W_{turbo_t} * \dot{m}_{turbo_t} = 381.04 \frac{kJ}{kg} * 12.51 \frac{kg}{s} = 4\,766.81 \frac{kJ}{s} = 4\,766.81 \text{ kW}$$

$$E_{SIGE1} = E_{turbo_1} * N_t * N_{mec} * N_{elec} * N_{tubo} = 4\,766.81 \text{ Kw} * 0.59 = 2\,812.42 \text{ kW}$$

Energía eléctrica producida por el turbogenerador 2:

$$E_{turbo_2} = W_{turbo_t} * \dot{m}_{turbo_t} = 381.04 \frac{kJ}{kg} * 7.90 \frac{kg}{s} = 3\,010.22 \frac{kJ}{s} = 3\,010.22 \text{ kW}$$

$$E_{SIGE2} = E_{turbo_2} * N_t * N_{mec} * N_{elec} * N_{tubo} = 3\,010.22 \text{ Kw} * 0.59 = 1\,776.03 \text{ kW}$$

Energía eléctrica producida por los turbogeneradores:

Se asume que las zafras están programadas para una duración de 120 días y cada 11 día se debe realizar una parada de 1 día de mantenimiento, a lo que se adiciona un 5% de paradas de emergencia. Dado que los equipos analizados trabajan 24 horas en régimen continuo ello da un total de 2 472 h de trabajo efectivo/zafra.

$$E_{total\,producida} = (E_{SIGE1} + E_{SIGE2}) * \text{horas de trabajo}(2\,472) = 4\,588.45 \text{ kW} * 2472 \text{ h} = 11\,356\,413.8 \text{ kWh} \quad (3)$$

Energía eléctrica consumida en la producción de azúcar

En Cuba la norma de molida día se expresa en arrobas/día (@/día). Considerando que una tonelada es equivalente a 88 @, la capacidad de molida del central de 324

124 @/día es equivalente a 3 683 t/día (153.46 t/hora). Como plantea (Hugot, 1986) se tiene que el Central azucarero requiere como promedio 20 HP/THC de potencia instalada, multiplicando la molida horaria por este índice se tiene la ecuación 4:

$$E_{producción} = 153.46 \frac{t}{h} * 20 \frac{HP}{TCH} = 3\,069.20\,HP = 2\,288.70\,kW \quad (4)$$

Este valor es el consumo del Central azucarero como tal, según la potencia instantánea demandada

$$I_{ahorro} = E_{producción} * horas\ de\ trabajo (2\,472\,h) * 0.24 \frac{\$}{kWh} = 1\,357\,839.94\,\$ \quad (5)$$

Energía eléctrica vendida al SEN

$$\begin{aligned} I_{venta} &= (E_{total\ producida} - E_{producción}) * 0.24 \frac{\$}{kWh} \\ &= (11\,356\,413.8\,kWh - 5\,657\,666.40\,kWh) * 0.24 \frac{\$}{kWh} \\ &= 5\,698\,747.40\,kW * 0.24 \frac{\$}{kWh} = 1\,367\,699.38\,\$ \quad (6) \end{aligned}$$

Efecto económico total del Central azucarero por generación de energía eléctrica (consumo propio más venta)

$$\begin{aligned} I_{Total} &= I_{venta} + E_{producción}(Ahorro) = 1\,367\,699.38\,\$ + 1\,357\,839.94\,\$ \\ &= 2\,725\,539.32\,\$ \quad (7) \end{aligned}$$

CONCLUSIONES

La implementación de la metodología elaborada permite un análisis detallado de los principales indicadores de un central azucarero, evitando cálculos innecesarios, donde el comportamiento de los equipos tecnológicos se puede evaluar con exactitud siempre que se haga una correcta selección de datos, según el área de trabajo.

La metodología también permite saber 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.

La metodología, al estar estructurada operativamente sobre un Excel, resulta de fácil operatividad, sin exigir un alto grado de especialización para ello y, además, ofrece una adecuada exactitud en los cálculos, así como, una mayor facilidad de trabajo y rapidez en la obtención de resultados.

El caso de estudio permitió conocer que para el central caso de estudio de 153.46 t/hora de molienda potencial para una zafra de 120 días y bajo condiciones normales de funcionamiento se pueden lograr ingresos por la venta de energía eléctrica al SEN, ascendente a 1 367 699.38 \$ y un efecto económico total (consumo propio más venta) equivalente a 2 725 539.32 \$.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alderetes, C. O. (2016). *Calderas a bagazo: Proyecto, operación y mantenimiento*. Buenos Aires, Argentina.

Arocha, L. A. (2016). *Evaluación y propuestas de mejoras del esquema termo energético de la Unidad Empresarial de Base "Carlos Baliño" (Tesis de grado)*. Universidad Central "Marta Abreu de Las Villas", Villa Clara, Cuba.

Bastida, F. E. (2016). *Potencialidades de mejoras de los esquemas térmicos de la provincia de Cienfuegos. Caso de estudio CAI Ciudad Caracas (Tesis de grado)*. Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba.

Carreño, D. D. (2016). *Potencialidades de mejoras en los esquemas térmicos de los centrales azucareros de la provincia de Cienfuegos. Caso de estudio central Antonio Sánchez*. (Tesis de grado). Universidad de Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba.

Hugot, E. (1986). *Handbok of the cane Sugar Engineering*. Amsterdam, Holanda: Elsevier Science Publishers.

Minas, M. d. (2019). *Resolución 345 de la Gaseta Oficial de la República de Cuba*. La Habana: Recuperado de: www.gacetaoficial.gob.com.

Morales, L. F. (2017). *Evaluación energética y de la seguridad tecnológica ambiental en el central azucarero "Carlos Baliño"* (Tesis de grado). Universidad Central "Marta Abreu de Las Villas", Villa Clara, Cuba.

Motito-Legrá, J. (2016). *Estudio energético en la UEB Central Paquito Rosales de la provincia Santiago de Cuba*. (Tesis de grado). Universidad de Oriente, Santiago de Cuba, Cuba.

Rein, P. (2006). *Cane Sugar Engineering*. Londres, Inglaterra: Verlag Dr. Albert Bartens KG pp. 667-678.

Rein, P. (2012). *Ingeniería de la caña de azúcar*. Berlin, Alemania: Bartens.

Silvia, M. M. (2013). *Balance Energético en la UEB Central Azucarero Urbano Noris* (Tesis de grado). Universidad de Holguín, Holguín, Cuba.

Victoria, H. E. (2009). *El análisis de procesos y el empleo adecuado de la energía en la producción de azúcar crudo y electricidad en ingenios cubanos*. Matanzas, Cuba: Editorial Universitaria pp. 139-142.