

Análisis y evaluación de escenarios de generación de cantidades significativas de electricidad en las bioeléctricas

Iván Alfredo García-González^{1*}, Eugenio Pérez de Alejo-Victoria¹, Eduardo Hernández-Ramos²

1. Grupo de Análisis de Procesos, Facultad de Ingeniería Química, Universidad Tecnológica de La Habana "José Antonio Echeverría" (CUJAE). Calle 114 No. 11901 e/ Ciclovía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba.

*igarcia@quimica.cujae.edu.cu

2. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar (Icidca).

Vía Banca 804 y Carretera Central. San Miguel del Padrón, La Habana, Cuba.

RESUMEN

En la actualidad es una necesidad generar electricidad utilizando fuentes energéticas no convencionales debido a los fluctuantes precios del petróleo y sus derivados y a los nocivos impactos ambientales que tienen asociados estos combustibles.

En Cuba se pretende comenzar con la instalación de bioeléctricas donde es posible generar cantidades significativas de electricidad para vender al Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Para lograr diseñar conceptualmente y operar con eficacia y eficiencia en estas instalaciones es necesario estructurar y complementar la información con que cuentan los especialistas de AZCUBA y las universidades. La concepción de una bioeléctrica implica invertir sumas millonarias, por ende, es muy necesario realizar estudios que agrupen algunos de los principales aspectos en cuanto a diseño y operación de instalaciones de este tipo, así en esta investigación quedaron definidos como objetivos fundamentales el escenario de generación de electricidad y la presión y temperatura del vapor de alta. Para el desarrollo de esta investigación fue empleado el software Sistemas Termoazúcar 4.1 para la simulación de dos casos de estudio con presiones de vapor de alta diferentes quedando establecido la importancia de operar a presiones cercanas a los 8600 kPa y temperaturas entre (790-810) K. Para lograr la simulación de los casos fue necesario obtener un modelo matemático que describiera la operación de los turbogeneradores de extracción condensación. Son analizados de manera crítica ambos casos de estudio y establecidos proyectos de inversión para su mejoramiento llegando a indicadores que los hacen factibles con TIR de 20 y 36 % respectivamente.

Palabras clave: sistemas termoenergéticos, diagramas de flujo de proceso, diagramas de flujo de información, turbogeneradores de extracción condensación, turbogeneradores de contrapresión, bioeléctrica.

ABSTRACT

Generate electricity using non-conventional energetic sources is a need nowadays, due to the changing prices of oil and its derivation and the harmful impacts these products have for the environment.

In Cuba specialists intend to start facing this fact the opening of bioelectrics where a large amount of electricity can be generated to be sold to the National Electricity System (SEN). To design and operate with efficiency these facilities is needed to structure and complement the information the AZCUBA specialists and universities in the country. The conception of a bioelectric implies investing great amount of money, so it is very important to carry out some research that gather the main aspects relating to design and operation of facilities of this type. Hence, in this research the setting of the electricity generation, pressure and temperature of high vapor are considered as fundamental.

Along this research the software Sistemas Termoazúcar 4.1 (STA 4.1) was employed to simulate two study cases with pressures of different high vapor which evidenced the importance of pressure around 8 600 kPa and temperature between (790-810) K.

Both study cases are analyzed and investment projects are established to improve them reaching better results with TIR of 20 and 36% respectively. To achieve the simulation of these cases a mathematical model that described the operation of the extraction and condensation turbogenerator was obtained.

Key words: thermoenergetic systems, flow of process diagrams, flow of information diagram, extraction and condensation turbogenerator, contrapression turbogenerator, bioelectric.

INTRODUCCIÓN

Mundialmente la gran mayoría de las fuentes energéticas utilizadas provienen de combustibles fósiles. tanto en las operaciones para la obtención de combustibles como en la utilización de estos se obtiene como resultado una creciente contaminación ambiental. Cuba no se queda fuera de la influencia de la existencia de hidrocarburos en la situación energética actual. Por lo mencionado y los cambiantes precios del petróleo y derivados existe la necesidad de que se implementen y desarrollen alternativas de tecnologías para un mayor uso de las fuentes renovables de energía (1).

La caña de azúcar y el marabú son dos fuentes renovables de energía que hacen posible la generación de electricidad todo el año en instalaciones denominadas bioeléctricas, diferentes en su concepción a los centrales azucareros. La diferencia más marcada está dada en el escenario de generación de electricidad y esta diferencia se hace más elevada en los centrales cubanos debido a que por sus características no necesariamente se debe perseguir equipos eficientes en el proceso de producción. Este hecho en la concepción de una bioeléctrica cambia de manera radical ya que es de gran importancia que cada uno de los procesos que se llevan a cabo en una planta de esta índole sea lo más eficiente posible, pues esto garantizaría una mayor producción de electricidad para vender al Sistema Eléctrico Nacional. En estas instalaciones existe como objetivo fundamental generar cantidades significativas de electricidad por lo que el ciclo de potencia que las caracteriza debe ser de grandes capacidades. En resumen, el estudio de una planta de estas características debe perseguir siempre que se genere tanta electricidad como sea posible, la mayor parte del tiempo empleando bagazo u otra

biomasa. Para el estudio de estas instalaciones es necesario además del escenario de generación, establecer las condiciones de presión y temperatura con las que se genera el vapor de alta presión.

En el presente trabajo se ponen en estudio dos casos que permiten estructurar la información necesaria para establecer las pautas en el diseño conceptual de una instalación capaz de entregar cantidades significativas de electricidad desde el punto de vista técnico y económico, haciendo empleo del software Sistema Termoazúcar (STA 4.1).

MATERIALES Y MÉTODOS

Estrategia para solucionar problemas complejos. Empleo de la simulación

Para que los procesos de producción de la industria química sean adecuadamente diseñados, operados y mejorados hay que tener en cuenta que la solución de un problema está vinculada al ciclo: "Modelación, simulación (Selección de modelos y cálculo repetitivo y creativo), análisis de resultados y síntesis de soluciones". Al método cíclico de solución de problemas complejos, especialmente los de grandes dimensiones y final abierto, que aparece representado esquemáticamente en la figura 1 muchos especialistas lo enmarcan con los términos "Simulación de procesos químicos y/o análisis de procesos (2).

1. Situación problemática. A partir de los conocimientos sobre la industria o planta en la que se va a realizar el estudio, el cual se adquiere mediante análisis bibliográfico, entrevistas y cálculos rápidos entre otros, se debe establecer una situación problemática a solucionar que puede partir del diseño de una planta o mejoramiento de una existente. Para ello es



Figura 1. Metodología para la resolución de problemas complejos.

necesario adquirir la mayor cantidad de información disponible sobre el tema tratado.

2. Definir el problema científico y objetivo. Una vez recopilada y estudiada toda la información, así como la situación actual de la industria que se está tratando, se define un problema científico que debe corresponder con las necesidades actuales de esta, en el presente estudio: la azucarera en Cuba; y el objetivo de la investigación al cual deben converger todos los puntos de la misma.

3. Conocer el proceso. Es extremadamente necesario sobre todo para no trabajar en vano y hacer el estudio lo más eficaz y eficiente posible, tener conocimiento del proceso donde será realizado el estudio. Para el caso de la situación problemática pertinente se enmarca en el sistema termoenergético (STE) de un conjunto bioeléctrica-ingenio, teniendo en cuenta fundamentalmente la etapa de generación de electricidad como principal parámetro a seguir.

4. Modelación. La modelación matemática es una herramienta que permite, mediante cálculos matemáticos empleando ecuaciones principales y complementarias, la solución de problemas en ingeniería como la forma en que opera un equipo, por ejemplo. La obtención de un modelo matemático para la operación de un equipo o para ver el comportamiento de una de sus variables, teniendo conocimiento de las restantes puede realizarse de forma física (planta piloto) o con un modelo matemático (solo es posible simularlo). Este punto da paso a la simulación. Para la elaboración de la investigación pertinente serán seleccionados los modelos ya establecidos en el STA 4.1 con los cuales los resultados obtenidos son satisfactorios, con excepción del mo-

delo de turbogeneradores de extracción condensación (TGEC) que como se estableció anteriormente brinda el vapor que ha de alimentarse al turbogenerador, en dependencia de la extracción de vapor realizada (para el calentamiento y evaporación en el proceso) y la potencia desarrollada en el mismo. La obtención de dicho modelo será expuesta para los casos en los que no se cuenta con la curva que proporciona el fabricante.

5. Simulación. La simulación es parte del proceso Simular que empieza con la modelación matemática de procesos, en este caso de ingeniería química, mediante el uso de leyes generales (balances de materiales y energía, ecuaciones de transferencia y correlaciones para la determinación de propiedades) y variabilidad e incertidumbre no significativa, persigue como objetivo realizar “corridos” para obtener la mayor cantidad de conjuntos de resultados (mayormente numéricos) que permitan representar lo mejor posible la complejidad del proceso real y precisar las tendencias de comportamiento del proceso. Las corridas serán realizadas con el simulador STA 4.1, el cual mediante la elaboración de un diagrama de flujo de información (DFI) conecta los diferentes módulos que representan los equipos de un STE, realizando los cálculos de manera simultánea en estado estacionario para cada uno de estos módulos. Quedando representado en un esquema como el que se muestra en la figura 2.

Casos de estudio

Los datos para elaborar los casos de estudio son a partir de información con la que se cuenta sobre la operación de una bioeléctrica angolana (caso de es-

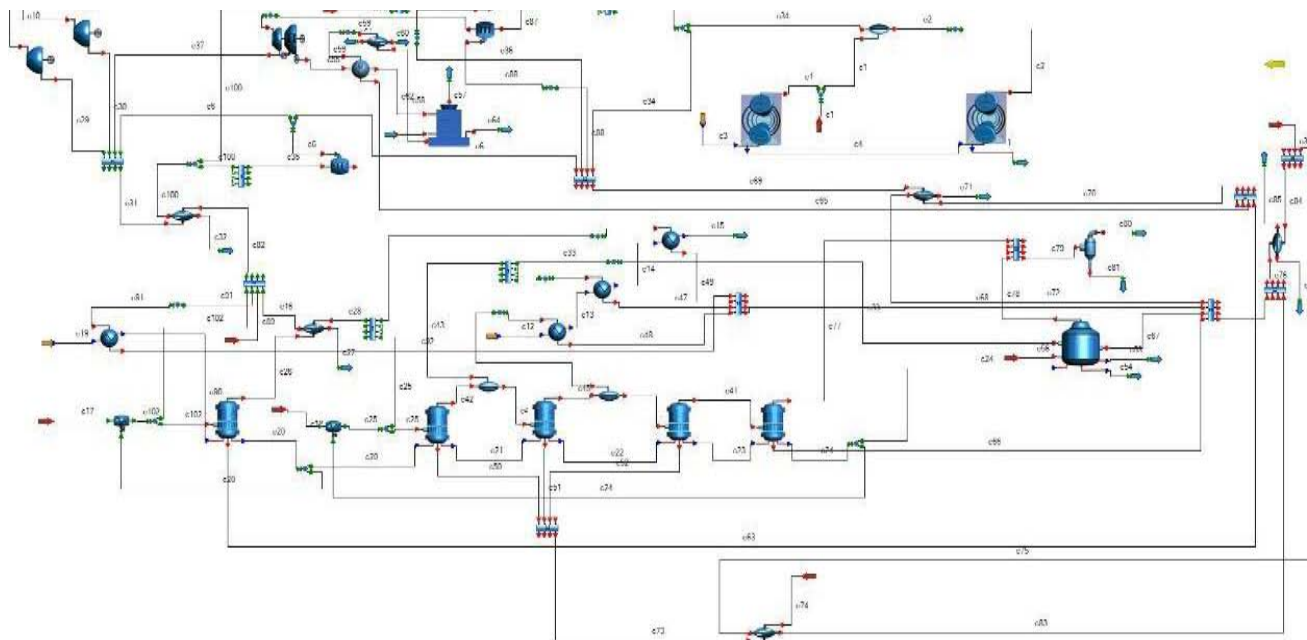


Figura 2. Diagrama de flujo de información (DFI) en el STA 4.1.

tudio 1) y la proporcionada por los especialistas del Grupo Azucarero AZCUBA, sobre los proyectos de implementación de bioeléctricas en Cuba, referida específicamente al de la bioeléctrica Ciro Redondo (caso de estudio 2). Los casos de estudio 1 y 2 serán tratados como casos base y a partir del análisis de su operación y proyección de propuestas de mejoras se tratarán los temas referentes a la operación eficaz y eficiente de estas instalaciones.

Datos generales y suposiciones para la simulación

Para llevar a cabo la simulación del caso de estudio se tuvieron en cuenta un grupo de datos generales y suposiciones los cuales son:

- El bagazo empleado en los generadores de vapor se asume que es 30 % de la caña molida.
- Se debe guardar el 5 % de bagazo sobrante para caso de paradas en el central.
- El rendimiento bruto de generación con bagazo en los generadores de vapor es de 85 %.
- El consumo de condensados contaminados se asume en un 43% respecto a la caña molida.
- Existen dos generadores de vapor para el análisis de la explotación de la capacidad nominal; se fija el primero de ellos en el simulador como si operara a máxima capacidad y en dependencia del consumo de proceso es calculado el porcentaje de explotación del segundo.
- Aunque se puede suponer el consumo de vapor, tomando valores de 42- 45 % respecto a la caña

molida, se cuenta con suficientes datos para la simulación del mismo.

- El flujo de jugo alcalizado se asume en un 114 % respecto a la caña molida con un Brix de 14.1.
- El flujo de jugo claro se asume en un 100 % respecto a la caña molida con un Brix de 14.3.
- El esquema de cocción en tachos es de tres masas cocidas con doble semilla, el agua empleada para la dilución de mieles se asume en un 4 % respecto a caña.
- El consumo eléctrico en no zafra se supone que es solo en la bioeléctrica y destilería, para ello el consumo de la bioeléctrica se asume con un valor equivalente al 10 % de la potencia instalada.

Caso de estudio 1

El caso de estudio número uno ilustra la operación de una bioeléctrica en el extranjero (BIOCOM) con capacidad de vender una cantidad significativa de electricidad al Sistema Eléctrico Nacional. El mismo presenta una molida potencial de 147.22 kg/s y cuenta con una potencia instalada para la generación de electricidad de 41.4 MW en dos turbogeneradores de contrapresión y 12.5 MW en un turbogenerador de extracción condensación. El objetivo de la simulación de este caso de estudio es analizar el sistema termoenergético de esta instalación para determinar la potencialidad de generación de electricidad durante el año entero. El diagrama de flujo de proceso (DFP) de la bioeléctrica se muestra en la figura 3 .

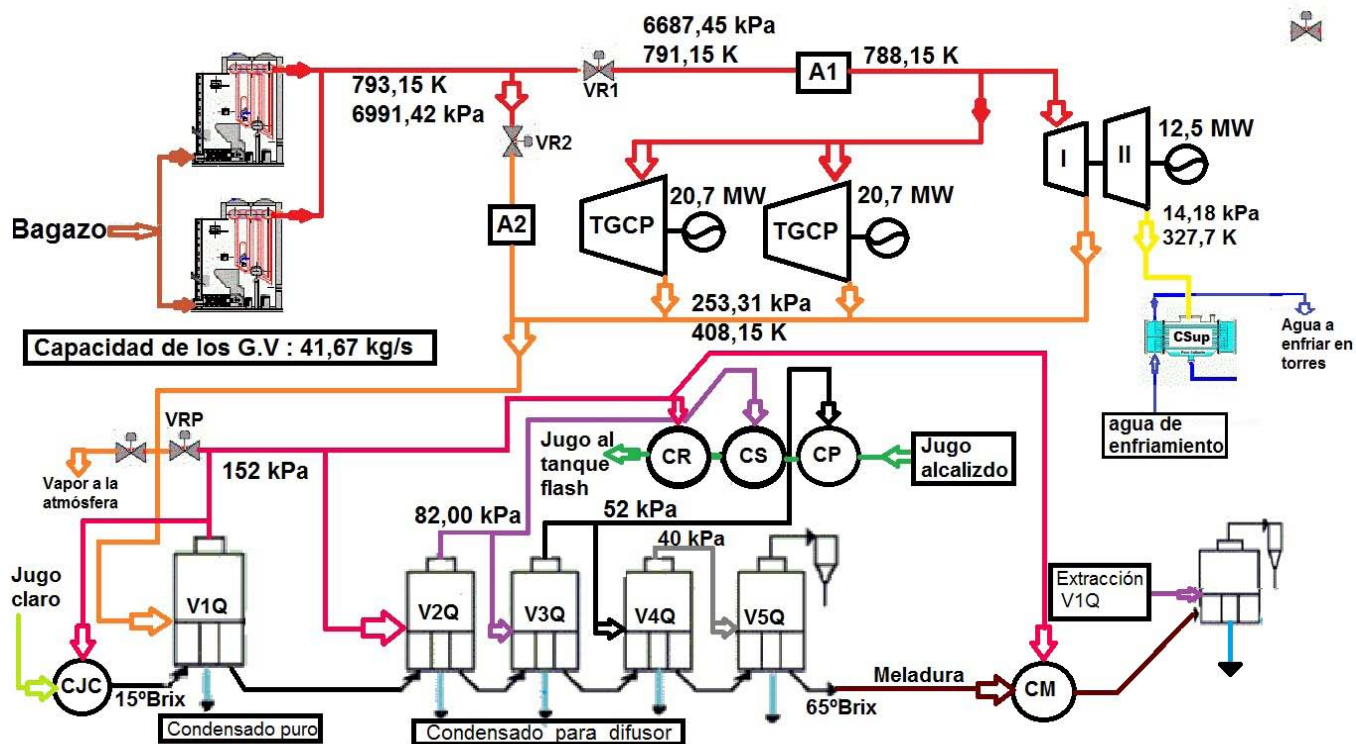


Figura 3. Diagrama de flujo de proceso (DFP) del sistema termoenergético de BIOCOM.

Descripción del sistema termoenergético de BIOCOT etapa de alta presión (bioeléctrica)

La etapa de alta presión está constituida por dos generadores de vapor de una capacidad nominal de 41.67 kg/s generando el vapor con una presión de 6 991 kPa y 793 K, este vapor de alta presión es atemperado y expandido para operar los turbogeneradores con las condiciones recomendadas por el fabricante para el vapor de entrada a los turbogeneradores las cuales son de 6 687 kPa y 788 K. El escape de los dos turbogeneradores de contrapresión (TGCP), una extracción del turbogenerador extracción condensación (TGEC) y lo que pasa por la válvula reductora de alta, satisface la demanda de vapor de baja presión (253.31 kPa) y temperatura de 408.13 K. El vapor de baja presión del TGEC va a un condensador de superficie con una presión de 14.17 kPa y una temperatura de 326 K.

Además del vapor de la extracción del turbogenerador, que permite suplir la demanda de vapor de baja presión del proceso, y el vapor que sale de los dos TGCP, pasa parte del vapor de alta presión a través de una válvula reductora de alta (VRA), fundamentalmente para compensar las demandas fluctuantes de vapor que causan los tachos no continuos y las operaciones inadecuadas. El vapor que sale de la VRA y el de la extracción del turbogenerador pasan por atemperadores para reducir los grados de sobrecalentamiento y así evitar los efectos nocivos que causa en la transferencia de calor. Los grados de sobrecalentamiento no deben pasar de 318 K (3).

Según Gaspar (4), el consumo equivalente en potencia de la fábrica es de 15.3 MW, además el central cuenta con una destilería anexa con una capacidad de producir 220 m³/d de etanol y tiene un

consumo de vapor de 6.11 kg/s. Este consumo se mantiene todo el año pues la destilería opera en zafra y no zafra.

Caso de estudio 2

Consideraciones para llevar a cabo la simulación del caso de estudio 2

- Norma potencial al 100 % de la capacidad diaria de molida de caña de la fábrica.
- La molida potencial es de 147.22 kg/s de caña.
- Tiempo de operación en zafra 183 días, lo cual está en correspondencia con el programa de desarrollo azucarero de AZCUBA.
- El combustible utilizado en este trabajo es solo la biomasa cañera (bagazo).

Descripción del sistema termoenergético del caso de estudio 2

El caso de estudio 2 ilustra el sistema termoenergético (STE) de la bioeléctrica Ciro Redondo, propuesta por ECIAZ (5). Se asume que existen dos generadores de vapor con capacidad nominal de 41.67 kg/s, el vapor se genera con una presión de 8612.62 kPa y temperatura de 808.15 K. Existe instalado un TGEC de 60 000 kW de potencia que opera a un 90 % de su carga nominal con una extracción para el proceso con presión de 319.17 kPa y temperatura de 416.95 K.

Determinación del flujo de caja anual de los sistemas termoenergéticos correspondientes a cada caso de estudio

En el conjunto bioeléctrica-ingenio como en cualquier proceso productivo el objetivo fundamental es

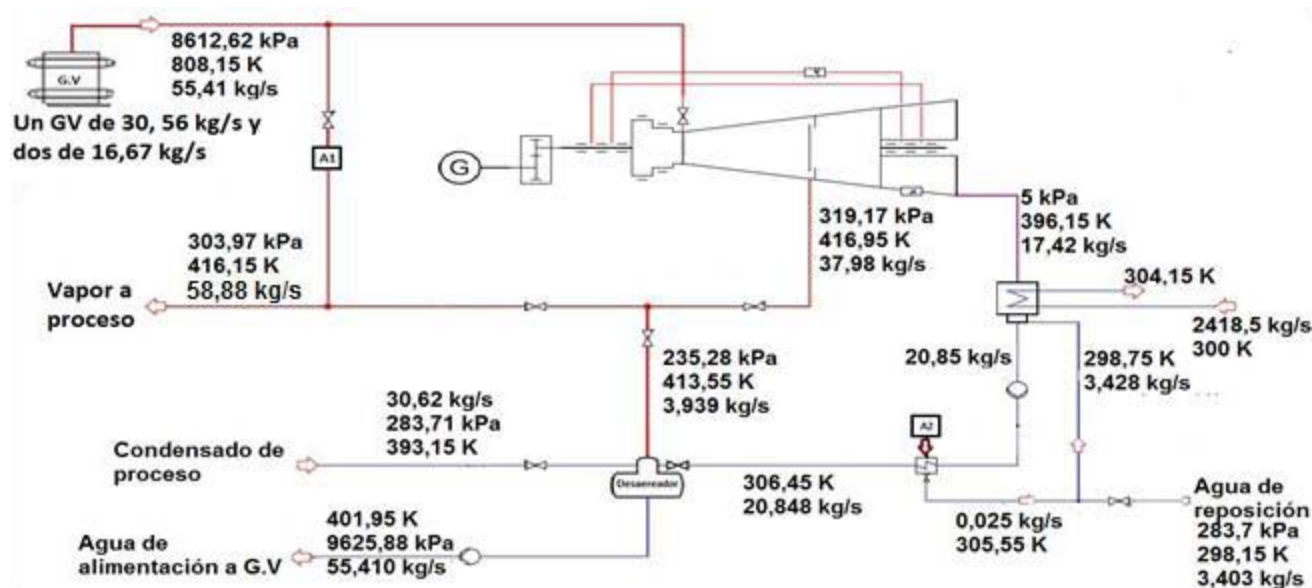


Figura 4. Diagrama de flujo de proceso (DFP) de la bioeléctrica Ciro Redondo.

generar la mayor cantidad de ganancias, en un sistema de este tipo las fuentes de ingresos y egresos fundamentales son:

- Fuentes de ingresos:
 1. Venta de electricidad al Sistema Eléctrico Nacional (SEN).
 2. Venta de azúcar comercial y miel final.
 3. En caso de que exista una destilería, venta de etanol.
 4. En un central convencional es también una fuente de ingreso la venta de bagazo sobrante al finalizar la zafra, no así para el caso de las bioeléctricas pues este se emplea para la generación de electricidad en tiempo de no zafra
- Fuentes de egresos:
 1. Compra de la caña necesaria a moler en el central.
 2. Compra de un combustible alternativo en caso de que exista déficit de bagazo como fuel oil, marabú o bagazo de un central tributario.
 3. Compra de agua de reposición si no son suficientes los condensados puros en el sistema termoenergético.
 4. Compra de electricidad al SEN en caso de que no se pueda satisfacer la demanda eléctrica del central con la potencia instalada.

Para la estimación del flujo de caja anual del conjunto bioeléctrica-ingenio se emplea el simulador STA 4.1 el cual presenta la posibilidad de realizar el cálculo económico del fichero realizado. Seleccionando la opción de cálculo económico el simulador muestra la ventana expuesta en la figura 5. Además del cálculo del flujo de caja anual en período de zafra, es necesario la estimación de este para el período de no zafra producto de la venta de electricidad al SEN que permite el TGECE en una bioeléctrica, para ello los cálculos serán realizados de igual manera con el fichero elaborado para período de no zafra.

Proyecto de inversión como propuesta de mejora para el sistema termoenergético de los casos de estudio

Como proyecto de inversión para el caso de estudio 1 correspondiente al STE de la bioeléctrica BIOCUM se propuso un cambio de los turbogeneradores existentes. Sustituyendo los dos turbogeneradores de 20.5 MW por uno de 30 MW de contrapresión y otro de extracción condensación igual al ya existente en la instalación.

Para la bioeléctrica Ciro Redondo se propone la instalación de un TGCP de 15 MW de potencia con el objetivo de aumentar la generación de electricidad en período de zafra.

Para la estimación de los costos de los TGCP se

Cálculo económico
Introduzca los datos del DFI o personalizados

Datos a analizar: Datos del DFI Tipo de análisis: Independiente

☒ Analizar caña y componentes Actualizar

Corriente de miel final	c53(Miel final)	5,9938396	kg/s
Corriente de azúcar	c54(Azúcar comercial)	18,2060892	kg/s
Corriente de bagazo sobrante	c103(Bagazo Sobrante)	5,9530794	kg/s
Déficit de condensados puros	c75(Déficit de condensados del difuso)	0	m³/s

Caña molida	147,22	kg/s	Biomasa consumida	0	kg/s
Potencia eléctrica generada	53,9	MW	Petróleo consumido	0	m³/s

Cachaza%Caña	5	%	Tiempo de operación	24	h/día	Tasa impositiva	0,35000	Fracción
Bagazo vendido	1,0000000	%	Duración de la zafra	150,000000	días	Costo de inversión	0,0000000	\$
Potencia eléctrica demandada	15300,0000	kW	Tiempo de vida económica	5	años	Depreciación	0	\$/año
						Tasa de interés	0	%

Cancelar < Atrás Siguiente > Salir

Figura 5. Ventana de entrada de datos para la realización de los cálculos económicos.

cuenta con la información disponible que toma como referencia un TGCP NG40/40 chino de 7.5 MW. Los datos referentes al costo de este equipo en dólares estadounidenses se muestran en la tabla 1.

Debido a la falta de información para la estimación de los costos sobre fletes y seguros en la transportación terrestre y marítima, cantidad de contenedores, etc. no es posible poder calcularlos; a partir de este momento se asume que los mismos son costos CIF (precio que debe pagar el cliente) de los equipos en el puerto de La Habana.

Para el cálculo del costo de adquisición del TGEC de 12.5 MW de potencia se emplea la información

de un estudio que determina de manera detallada el costo de adquisición de un equipo de este tipo de procedencia china, pero de 25 MW de potencia; los datos referentes a este equipo se muestran en la tabla 2.

Estos costos son necesarios actualizarlos en cuanto a la capacidad empleando la fórmula de Williams y por fecha mediante los índices de Marshall y Swift, con este factor se puede estimar en base al costo del equipo principal los costos inducidos tales como: instalación del equipo, compra e instalación de tuberías, circuitos eléctricos, instrumentación y controles automáticos, ingeniería, etc.

Tabla 1. Costo de un TGCP chino marca NG40/40 de 7,5 MW

Equipamiento	Cantidad de unidades	Costo unitario
Turbina de vapor de contrapresión de 7.5 MW y equipos asociados. Modelo: NG 40/40	1	1 560 000
Generador de 7.5 MW, 13.8 kV y equipos asociados	1	670 000
Sistemas de protecciones y sincronización para el generador (con sistema 220 V DC)	1	350 000
Torre de enfriamiento. Modelo: GNZF-500, 500 m³/h, 28 °C bulbo húmedo	1	153 000
Bombas de agua	2	11 000
Desobrecalentador	3	89 500
Sistema contra incendios para generador: Tanque de CO ₂ , capacidad 42 kg, 16 MPa	1	6 800
Sistema de control automático	1	192 000

Tabla 2. Costo de adquisición de TGEC chino de 25 MW en el puerto de La Habana

Equipamiento	Precio USD
Turbina extracción –condensación de 25 MW y equipos asociados.	3 950 000
Generador de 25 MW, 13.8 kV modelo WX14Z y equipos asociados.	1 810 000
Sistema de protecciones y sincronización para generador (con sistema 220 V DC)	328 000
Subtotal 1	6 088 000
Torre de enfriamiento (2 unidades)	2 140 000
Modelo: GNZF-4200, 4200 m³/h, 28 °C de bulbo húmedo.	
Bombas de agua circulación (3 unidades)	61800 *3 = 185 400.0
Desobrecalentador (2 unidades)	109000 *2 = 218 000
Sistema contra incendios para generador: Tanques (3 unid.) CO ₂ de 42 kg capacidad y presión 16 MPa	8500*3= 24 500.0
Sistema de control automático	206 000.00
Válvulas, motores de accionamiento y accesorios para el sistema de circulación	178 000.00
Subtotal 2	2 951 900
Total	9 039 900

Es conveniente señalar que en cualquiera de los procedimientos internacionales como los de Peters y Hand, los costos inducidos totales pueden fluctuar entre 1.76 a 7.08 veces mayores que el costo del equipo principal. Esto puede también ser válido para Cuba. Se prefieren los criterios de Petrides porque permite usar los valores menores en cada intervalo, lo que reduce el costo inducido total calculado. Ajustándose a las condiciones en Cuba, se puede asumir que sean un 20 % menor que en el extranjero.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis del caso de estudio 1 durante la zafra

El caso de estudio 1 se elaboró a partir de la información proporcionada por Gaspar (4), para la culminación del caso fue necesario en el área de evaporación asumir las presiones de cuerpo de cada uno de los vasos evaporadores para lograr satisfacer la demanda de los equipos acoplados a estos y alcanzar el Brix deseado a la salida, verificándolos con la información con la que se contaba. En la tabla 3 se muestran los principales indicadores para la operación de estos equipos.

1. La presión de los cuerpos de los vasos evaporadores debe ir disminuyendo como es lógico, como característica destacada del funcionamiento de estos equipos se tiene la baja presión de cuerpo en cada una de las cámaras.
2. A partir del segundo vaso se alcanza presiones de vacío (presiones menores que la atmosférica), esto mejora considerablemente la transferencia de calor en el equipo donde son empleadas las extracciones realizadas en los vasos a partir del segundo, pues para vapor saturado mientras menor es la presión, mayor es el calor latente de este, pero mayor es su volumen específico. Es lógico que se desee perseguir presiones de vacío en la operación de estos equipos, el hecho que limita esto es que si el volumen específico del vapor de extracción de los vasos es muy alto, es necesario mucha área de intercambio de calor en

los equipos de calentamiento que emplean este vapor como portador energético.

3. Las tasas de evaporación de estos equipos dan una medida de la posibilidad de arrastre de sólidos. Que exista arrastre de sólido en estos equipos compromete la recuperación de condensados puros del sistema, es por ello que es estrictamente necesario que se tomen como condensados puros los que realmente lo son, para que no exista déficit y por ende no exista necesidad de comprar agua externa al proceso lo que encarecería el mismo. Aunque en los centrales azucareros existe un laboratorio para el análisis de los condensados, se puede asumir según Pérez de Alejo (2) que las tasas de evaporación no deben superar los 39.1 kg/h m² para poder asumir sin mucho error que no existe arrastre. Como las tasas de evaporación en el múltiple, cumplen con este parámetro se puede asumir que los condensados obtenidos en estos equipos son puros.
4. En el análisis de las tasas de evaporación es muy importante verificar la tasa del último vaso del múltiple pues esta va al condensador barométrico y es una masa de vapor con contenido energético que no se aprovecha, para el múltiple efecto en cuestión esta tasa es aceptable por lo que el calor perdido en el condensador barométrico es muy elevado.

Principales indicadores operacionales del sistema termoenergético en período de zafra

1. Existe una cantidad de bagazo sobrante correspondiente a un 14 % respecto a la caña molida lo cual permite acumularlo para continuar generando electricidad en el período de no zafra.
2. No existe expulsión de vapor a la atmósfera, lo que debe ser siempre así pues el hecho de que no lo sea, compromete la factibilidad del proceso, aunque no es menos cierto que aun en Cuba existen centrales que no cumple con este importante indicador y es un hecho de que no se ha concientizado por parte de no pocos especialistas.
3. El vapor directo que pasa por la reductora es de 0.37 % respecto a la caña molida lo cual es

Tabla 3. Parámetros operacionales de los vasos evaporadores

Vaso evapo- rador	Presión de cuerpo (kPa)	Coeficiente glo- bal de transf. de calor (W/m ² K)	Tasa de evapora- ción (kg/h.m ²)	Economía	Brix alcanzado a la salida del vaso
Vaso 1 Q	151.98	1 316.62	34.93	0.92	21.05
Vaso 2 Q	82.70	1 312.84	37.56	1.00	34.23
Vaso 3 Q	53.54	982.45	15.45	1.01	46.11
Vaso 4 Q	40.20	1 608.98	12.15	1.03	53.40
Vaso 5 Q	15.13	414.24	13.77	1.13	65.05

característico de operación eficaz y eficiente, ya que la existencia de una cantidad elevada de vapor pasando por esta válvula se traduce a elevadas pérdidas exergéticas pues este vapor no realiza trabajo alguno en los turbogeneradores. El hecho de que este valor sea bajo se debe a la existencia de los turbogeneradores instalados y a la combinación de TGEC y TGCP pues los TGCP de gran capacidad permiten satisfacer una demanda elevada de proceso y la demanda restante se satisface realizando una extracción al TGEC.

4. En el proceso existe una cantidad apreciable de vapor pasando por la reductora del mismo, esto se debe fundamentalmente a que la demanda de vapor necesaria de la extracción del primer efecto del quintuple es muy elevada respecto a la evaporación obtenida en este efecto. Este parámetro se debe disminuir aumentando el Brix de la salida de este vaso lo que se traduce en una mayor evaporación. El cambio de este valor supone una modificación de la operación en la estación de evaporación en su totalidad.
5. La elevada producción eléctrica de la fábrica combinada con la demanda tan baja de la misma permite que se pueda vender una cantidad significativa de electricidad al sistema eléctrico nacional igual a 72.81 kW.h/t caña, aunque la combinación de turbogeneradores empleados limita la venta en período de no zafra, puesto que operaría solamente el TGEC que es el de menor capacidad (12.5 MW).
6. Inicialmente existía un déficit de condensados puros correspondiente a un 8 % respecto a la caña molida pues no se tomaban los condensados de los primeros vasos del múltiple para satisfacer esta demanda, estos condensados se empleaban para satisfacer la demanda de agua en el difusor y el sobrante se empleaba directamente como condensado contaminado. Al tomar el excedente como condensados puros existirá sobrante del mismo correspondiente a un 8.6 % respecto a la caña molida.
7. El porcentaje de explotación de la capacidad nominal instalada de un 91.68 % permite afirmar que los equipos instalados en el sistema son explotados prácticamente a su máxima capacidad lo que no frecuentemente ocurre en centrales cubanos. Para el tiempo de no zafra, solamente será empleado uno de los generadores pues el consumo de vapor se reduce considerablemente correspondiente al consumo específico del TGEC de 12.5 MW.
8. La eficiencia total de cogeneración en base biomasa es de un 54.58 % esto se debe fundamentalmente a que las mayores capacidades de potencia instalada son de turbogeneradores de

contrapresión por ende hay una gran cantidad de vapor que pasa por los turbogeneradores de contrapresión que además se emplea como medio de calentamiento.

9. El consumo de vapor de escape en el proceso de azúcar crudo respecto a la caña molida de 42.44 % se corresponde con los valores máximos que se deben alcanzar en los conjuntos bioeléctrica-ingenio actuales. Este consumo de vapor relativamente bajo permite, entre otras cosas, que sobre más bagazo al finalizar la zafra.
10. De mantenerse la combinación de turbogeneradores empleada no sería adecuado disminuir el consumo de vapor en el proceso, pues este hecho traería como consecuencia expulsar vapor a la atmósfera o para evitarlo, disminuir la carga de los TGCP.

Los indicadores operacionales referentes a los equipos no solo caracterizan el proceso como factible, sino que describen una elevada eficiencia en el proceso de calentamiento y evaporación de azúcar.

Análisis económico del sistema termoenergético del caso de estudio 1 en período zafra

Para estimar en período zafra a cuanto ascendió el flujo de caja de la bioeléctrica Biocom se asumió que la misma duraría 183 días, en la tabla 4 se muestran los principales ingresos y egresos de este período.

Tabla 4. Valor total de los ingresos y egresos de la bioeléctrica Biocom en zafra

Ingresos		
Concepto	Valor (CUP)	%
Azúcar	604 676 298	66,34
Bagazo	18 830	0,002
Cachaza	931 351	0,10
Electricidad	260 401 606	28,56
Miel	45 502 298	4,99
Total	911 530 386	100
Egresos		
Caña	355 776 413	100

El objetivo de este estudio económico fue únicamente para determinar el flujo de caja anual de la instalación resultando el mismo de 361 240 082 CUP. Como resultado importante de este estudio se puede observar que la venta de electricidad representa un porcentaje elevado de los ingresos totales, típico de estas instalaciones no así en los centrales cubanos actuales.

Tabla 5. Bagazo sobrante estimado para operar en no zafra

Parámetro	kg/s	kg/h	kg/d	kg/zafra	t/zafra
Bagazo sobrante	5,652	20 349	488 376	89 372 808	89 373
Días de zafra	183				
Vapor de los GV	41,67	150 012	3 600 288	Días no zafra	
Consumo de bagazo de GV	8,77	31 572	757 728	118	
Días totales de operación en el año	301				

Análisis económico del sistema termoenergético del caso de estudio 1 en período de no zafra

Para el análisis de la operación de Biocom en período de no zafra fue necesario estimar bagazo disponible para este período a partir del sobrante durante la zafra. En la tabla 5 se muestran los resultados necesarios para simular el STE de Biocom en período de no zafra.

Una vez estimado el bagazo disponible para operar en período de no zafra se determinaron las ganancias en este periodo donde solamente los ingresos son generados por concepto de venta de electricidad y ascienden a un valor de 38 016 000 CUP. El resultante flujo de caja para este período asciende a un valor de 24 710 400 CUP.

Del cálculo de los correspondientes flujos de caja de cada variante de operación del caso de estudio 1 (período zafra y no zafra) se concluye el estudio con la estimación del flujo de caja anual para este sistema resultando el mismo de 399 256 082 CUP.

Aunque se obtienen elevadas ganancias en este sistema, las mismas pueden ser incrementadas sobre todo en el período de no zafra, es por ello que fue propuesto un proyecto de inversión para aumentar la capacidad de venta de electricidad al SEN en período de no zafra, el cual es uno de los objetivos fundamentales de una bioeléctrica.

Análisis de los resultados del caso de estudio 2 en período de zafra

El estudio de los indicadores se realizó de forma comparativa tomando como referencia el caso de estudio 1, para ver los cambios que trae en el sistema el empleo de presiones mayores. Las conclusiones fundamentales de este caso fueron:

1. Existe una cantidad de bagazo sobrante (5.89 % respecto a caña) muy inferior a la del caso de estudio 1, provocado por la gran demanda de vapor que tiene el TGEC unido a que la extracción realizada recomendada en el STE de esta instalación no es suficiente para satisfacer la demanda de proceso. Esto trae consigo que el bagazo para operar en no zafra sea mínimo y si sea necesario comprar bagazo a algún central tributario u otra biomasa.

2. Debido a que la demanda de vapor de proceso no se satisface con la extracción realizada al TGEC, se necesita una cantidad significativa de vapor que debe pasar por la válvula reductora (12.81 % respecto a la caña molida).
3. La electricidad vendida al SEN es inferior que en el caso de estudio 1 debido a que el TGEC no se encuentra operando a plena carga.
4. La capacidad de los generadores de vapor instalados es mejor aprovechada debido a la alta demanda de vapor de fábrica que existe en el sistema.
5. La relación calor potencia es inferior respecto al caso anterior debido a que es necesario generar mucha mayor cantidad de vapor y la potencia generada es inferior provocado por la operación del TGEC a una capacidad aproximada de un 75 % de la carga nominal.
6. Como resultado del análisis de estos indicadores operacionales se decanta la conclusión de que en una instalación de estas características debe existir una combinación de turbogeneradores de contrapresión y de extracción condensación, ya que el TGEC aporta la posibilidad de operar en no zafra y el de contrapresión da más estabilidad al sistema pues ante algún cambio en el consumo de vapor es más fácil adaptar un TGCP a las nuevas condiciones de operación que un de extracción condensación.

Análisis económico del caso de estudio 2 en período zafra

Para el estudio económico de este caso en período de zafra se asumió duración de la zafra de 183 días y el objetivo fundamental del estudio fue la determinación del flujo de caja anual en período zafra. En la tabla 6 se muestran los principales egresos e ingresos.

Al igual que en el caso de estudio 1, la venta de electricidad juega un rol muy importante para las ganancias de esta instalación en período de zafra. El flujo de caja para la bioeléctrica Ciro Redondo asciende a 282 130 623 CUP; es importante hacer notar que, aunque en esta instalación la potencia instalada es superior a la analizada anteriormente

Tabla 6. Ingresos y egresos del caso de estudio 2 en período de zafra

Ingresos		
Concepto	Valor	%
Azúcar	488 959 730	61.90
Bagazo	0	0
Cachaza	931 351	0.11
Electricidad	260 815 665	33.04
Miel	3 911 6778	4.95
Total	789 823 526	100
Egresos		
Concepto	Valor	%
Caña	355 776 413	100
Total	355 776 413	100

los ingresos son prácticamente iguales al caso anterior en período zafra al menos, pues el TGEN instalado no se puede operar a la máxima capacidad, el hecho de que se reduzcan tanto los ingresos está asociado a que el rendimiento industrial es un 2 % menor en este caso que en el anterior, esto permite ver como un cambio tan pequeño en este indicador varía el flujo de caja en aproximadamente 80 millones de pesos.

Análisis del caso de estudio 2 en período de no zafra

Para el estudio del caso en cuestión en período de no zafra fue necesario determinar el bagazo disponible en el central para operar una vez terminada la zafra. En la tabla 7 se muestra el resultado del cálculo del bagazo disponible para este período.

Como se puede apreciar, la operación de este STE solamente con bagazo se ve muy limitada con respecto al caso analizado anteriormente, los días de operación en período de no zafra se ven reducidos en un 35.5 %. El hecho del empleo de un turbogenerador de una capacidad tan grande como lo es el empleado no solo conlleva a deficiencias en la

operación durante la zafra, sino que limita la generación de electricidad en período de no zafra si se fuese a operar solamente empleando bagazo sobrante, es por ello que se verán reducidos los beneficios para este sistema comparado con sus potencialidades reales. Otro aspecto de importancia a tener en cuenta es que en este caso, uno de los generadores de vapor sí se explota a su máxima capacidad mientras que el segundo en existencia se explota un 28.12 % de su capacidad nominal condicionado por la elevada demanda de vapor del TGEN instalado en el sistema. Un resultado de importancia notable para este sistema es que por la posibilidad de operar el TGEN a máxima carga y hacerse mucho menor el consumo de electricidad de la instalación en este período, este último parámetro contemplando solamente el consumo de la sección de generación de electricidad, (generadores de vapor y turbogenerador) se producen más kW.h de electricidad, aunque no se aprecian muchos beneficios económicos por el poco tiempo de operación en no zafra. Es necesario dejar claro que los cálculos fueron realizados asumiendo que solamente se contaba con bagazo para generar vapor como parámetro común para ambos casos, es evidente que de existir un combustible alternativo (biomasa) se pudiese incrementar notablemente el flujo de caja en este período y del año en general.

Análisis económico del caso de estudio 2 en período de no zafra

Con el bagazo disponible para operar en este período y los días de operación se determinaron los beneficios obtenidos en este STE por concepto de venta de electricidad, estos ascienden a 28 505 199 CUP, una vez determinadas las ganancias para este período y restándole el impuesto sobre la ganancia se determinó en el flujo de caja siendo el mismo de 18 528 379 CUP.

En este caso de estudio al igual que en el caso anteriormente analizado para período de no zafra los beneficios obtenidos son netamente debidos a la venta de electricidad, no existen egresos asociados pues no se compra en este período ninguna materia prima, es por ello que se evidencia la necesidad de

Tabla 7. Estimación del bagazo disponible para operar en el caso de estudio 2 en período de no zafra

Parámetro	kg/s	kg/h	kg/d	kg/zafra	t/zafra
Bagazo sobrante	2,47	8 892	213 408	39 053 664	39 053
Días de zafra	183				
Vapor de los GV	55,82	200952	4822848	Días no zafra	
Consumo de bagazo de GV	26,83	96 588	23 18 112	17	
Días totales de operación en el año	200				

contar en estas instalaciones con TGEC. Por otra parte, aunque el tiempo de operación para el caso de estudio 2 en este período es notablemente menor, los ingresos no difieren tanto respecto al caso de estudio 1 debido a lo mencionado anteriormente sobre la capacidad del TGEC instalado, aunque se ve muy limitada su operación pues es inaudito para el diseño conceptual adecuado de una instalación de este tipo que no se logre operar y explotar las po-

tencialidades de sus equipos. Este caso demuestra una operación ineficaz e ineficiente en un conjunto bioeléctrica ingenio.

Una vez determinados los flujos de caja correspondientes para cada período de operación se puede concluir que el flujo de caja anual para el caso de estudio 2 es 300 659 002 CUP, inferior al caso de estudio anterior en un 24.6 % debido a la diferencia de días de operación de los dos conjuntos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Curbelo, A. Uso actual de la energía y oportunidades para la introducción de las tecnologías utilizando biomasa en América Latina. 2002, GEPROP/CRIMEA: IPROYAZ. p. 20.
 2. Pérez de Alejo, H.E. Sistema Termoazúcar, Ayuda STA 4.1. 2016.
 3. Rein, P. Cane Sugar Engineering. 2007: Berlin. p. 746.
 4. Gaspar, J. Diagrama de proceso para la operación de la Bioeléctrica Biocom en período zafra, D. bioeléctrica, Editor. 2017.
 5. ECIAZ, S.A. Premisas Compendio De Cálculos Energeticos 25 Bioelectricas. 2017, ECIAZ S.A.
-