

**Titulo:** Optimización de la operación anual de una planta de cogeneración con bagazo.

**Title:** Optimization of the annual operation of a cogeneration plant with Bagasse.

**Autores:** MSc. Ing. Osvaldo Romero Romero.

Dr. Ing. Peter Douglas, Prof. of Waterloo University

MSc. Lic. Juan Lutgardo Ríos, Prof. Aux.

Ing. Esteban Jesús Quintero Concepción.

Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales. Avenida de los Mártires No 360. CP 60 100. Sancti Spiritus.

Telef. 0053 41 2 77 68. Email. [osvaldo@suss.co.cu](mailto:osvaldo@suss.co.cu)

### Resumen

El presente trabajo se realiza con el objetivo de optimizar la duración de los períodos de operación de un complejo azucarero integrado que opera todo el año procesando caña energética como materia prima al terminar la zafra azucarera, para su realización se tomó como objeto de estudio el central Melanio Hernández, en el que se propone una planta para cogenerar todo el año utilizando esta alternativa de combustible para después de la zafra.

Para la realización del mismo se planteó una función objetivo en la que se persigue maximizar las ganancias anuales del complejo integrado y su planteamiento se basa en la variación que tendrán los costos variables de operación sobre todo de la destilería y la planta de cogeneración a partir de los aportes de miel y bagazo que se puedan obtener en cada uno de los períodos de operación.

Los resultados más importantes que se alcanzan con el trabajo demuestran la factibilidad de la optimización realizada, la validez de la función objetivo obtenida y la importancia que sigue teniendo para la rentabilidad de un complejo integrado con estas características el período de producción azucarera.

Palabras Claves. Optimización, Cogeneración, Integración de Procesos, Caña Energética.

### Abstract

The present work is carried out with the objective to optimize the duration of the periods of operation of an integrated sugar complex that it operates all the year processing energetic sugar cane as raw material when finishing the sugar season. For all this the sugar factory Melanio Hernández, was taken as object of study in which a cogeneration plant will be built to generate electricity all the year.

For the realization of the work an objective function is obtained to maximize the annual incomes of the integrated complex and it is based on the variation, that will have the variable costs of operation the mainly of the distillery and the cogeneration plant starting from the contributions of honey and biomass, that can be obtained in each one of the periods of operation.

The most important results that are reached with the work demonstrate the feasibility of the carried out optimization, the validity of the obtained objective function and the importance that it continues having for the profitability of a complex integrated with these characteristics the period of sugar production.

Key words. Optimization, Cogeneration, Integration of Processes, Energy Cane.

### Introducción.

La necesidad de incrementar el uso de las fuentes renovables de energía es un tema de mucha actualidad en el contexto nacional e internacional, no solo por las limitaciones para adquirir los recursos energéticos, sino también por el impacto ambiental de la utilización de los combustibles fósiles.

Para un país como Cuba, que posee una infraestructura energética basada en los combustibles fósiles y que con la desaparición del campo socialista de Europa perdió varios acuerdos comerciales de beneficio mutuo con estos países, la búsqueda de alternativas de utilización de estas fuentes energéticas constituye una de las principales vías para poder incrementar el suministro de energía y responder a los incrementos de la demanda.

En Cuba desde la década de los años 90 del siglo XX se ha estado trabajando en el incremento del uso de las fuentes de energías renovables y otras fuentes energéticas nacionales, estos trabajos han permitido que en

este país se genere en la actualidad el 100 % de la energía eléctrica a partir de fuentes nacionales y que se hayan encontrado alternativas con energías renovables para electrificar zonas muy alejadas de la red eléctrica nacional y hacer posible así llegar la electricidad a escuelas, hospitales, consultorios médicos y viviendas que carecían de este servicio y que ahora pueden disponer de las ventajas sociales de varios programas de desarrollo concebidos y puestos en vigor por el gobierno para el uso educativo de la televisión y la informática. Es sabido que la principal reserva energética renovable de Cuba está en la caña de azúcar, ya que de una zafra, como las desarrolladas hasta 1990 y en las que se producían 8 millones de toneladas de azúcar, el país podía obtener en forma de bagazo una cantidad aproximada a 3,5 millones de toneladas equivalente a petróleo y si se sumaba la paja de la caña este potencial llegaba hasta los 6 millones de toneladas equivalentes a petróleo, (3), si las producciones de azúcar se mantienen en los 4 millones de toneladas métricas, después de las reformas realizadas por el Ministerio del Azúcar (MINAZ) a partir del año 2002, el potencial energético de la biomasa que se produce será de alrededor de 3 millones de toneladas equivalente a petróleo anuales.

Sin embargo no ha sido posible hasta hoy realizar inversiones en la industria azucarera cubana que permitan incrementar el aprovechamiento energético actual de esta biomasa, a pesar de que este ha sido un tema muy estudiado por especialistas del MINAZ, le empresa de generación eléctrica, las universidades y otros centros de investigación, para que se tenga una idea, en Cuba se genera como promedio en una fábrica de azúcar valores cercanos a los 25 kWh/t de caña procesada, en tanto existen países como Hawaii que generan como promedio más de 100 kWh/t.

La limitación fundamental, para incrementar el uso energético de la caña de azúcar en Cuba y otros países productores de azúcar, está asociada a la necesidad de realizar grandes inversiones en plantas de cogeneración, con vapores de mayor presión y turbinas de extracción condensación y a la ejecución de zafras de menos de 300 días. La causa es, que debido al monto de las inversiones, se necesita que estas plantas generen energía eléctrica más de 300 días al año para hacer rentable la inversión realizada; en países como Hawai, Islas Reunión y otros se realiza la zafra azucarera y al terminar ésta, se continúa generando energía eléctrica utilizando un combustible fósil como fuel oil, carbón o gas.

En el caso de Cuba, no se dispone de una alternativa energética viable para generar energía eléctrica en una fábrica de azúcar al terminar la zafra azucarera y a pesar de que se han estudiado las alternativas de usar residuos de la cosecha de la caña, extender la zafra azucarera o el uso del fuel oil fuera de la zafra, todas estas alternativas presentan limitaciones para su uso industrial. Lo anterior motivó el inicio de una investigación en el Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales (CEEPI) del Centro Universitario José Martí Pérez de Sancti Spiritus para proponer una nueva alternativa que permita generar energía eléctrica en una fábrica de azúcar al terminar la zafra.

Los trabajos realizados por este Centro de Estudio han permitido demostrar la viabilidad de una nueva alternativa energética para generar después de la zafra utilizando bagazo de caña energética (muy alto contenido de fibra) que será procesada por el TANDEM del Central al terminar la zafra. Con esta alternativa se logra extender la operación de la planta a más de 300 días anuales y permite alcanzar un complejo azucarero que opera todo el año diversificado e integrado, ya que el procesamiento de caña energética posibilita obtener jugo para producir alcohol y a su vez de la operación de la planta energética se obtiene el vapor necesario para la destilería, esta solución responde a lo planteado por González 03 (3), al explicar que el incremento de la competitividad de la industria de la caña de azúcar, solo es factible mediante un desarrollo prospectivo integrado en lo material y energético de las industrias que fabrican azúcar y las plantas de derivados, pero a su vez esta nueva alternativa mejora el concepto de integración, ya que no solo se integra en el período de zafra, sino que se extiende una operación integrada a todo el año.

Esta alternativa genera tres momentos en la operación del Central que serán una zafra azucarera, una zafra energética dividida en dos momentos con características bien diferentes. Cada uno de estos períodos de operación requerirán de determinadas entradas y proporcionarán diferentes productos de salidas del complejo integrado. Para la operación de la planta se fijó una duración de 330 días anuales, sin embargo no se ha estudiado cuanto debe durar cada uno de los períodos de operación de la planta.

El objetivo de este trabajo es realizar un análisis de optimización de la operación de la planta, para determinar la longitud óptima de cada uno de los períodos de zafra atendiendo a las ganancias anuales del complejo integrado.

### Desarrollo.

Los trabajos de ingeniería, según Edgar O1 (1) necesitan del diseño inicial del equipamiento y de la forma de realizar la operación en períodos largos; la optimización ayuda a encontrar en esas circunstancias los parámetros del equipamiento o la operación para obtener mayores ganancias, mínimos costos, mínimas pérdidas energéticas, etc. La optimización requiere de una función objetivo bien definida, una restricción de igualdad y restricciones de desigualdades.

Según el propio autor existen dos categorías generales de modelos para la optimización, los basados en la teoría física del problema y los basados en la descripción empírica, también llamados modelos a caja negra, este último es el modelo usado en el presente trabajo.

Para la optimización del proceso se utilizaron 6 etapas generales de trabajo dadas por Edgar O1 (1) que son.

1. Analizar el proceso, hacer lista de variables, definir características de interés.
2. Determinar criterios de optimización y función objetivo específica.
3. Desarrollar expresiones matemáticas, desarrollar un modelo válido para el proceso o el equipo, incluir las restricciones de igualdad e desigualdad.
4. Si el problema es muy largo y complejo, descomponer en partes si es posible o simplificar la función objetivo y el modelo.
5. Aplicar técnicas de optimización al estado matemático del problema.
6. Chequear la respuesta y examinar la sensibilidad de los resultados a los cambios de los coeficientes en el problema y las restricciones.

### Optimización de la operación de la planta de cogeneración con caña energética en el central Melanio Hernández.

La optimización se realizó atendiendo a la longitud de los diferentes períodos de operación de la fábrica, los cuales se identifican y caracterizan a continuación.

1. Zafra azucarera. Será el período en que la fábrica estará procesando caña de azúcar y además se recuperarán los residuos agrícolas de la cosecha. En esta etapa se trabaja por una máxima generación de energía y entrega de excedentes al sistema electro energético nacional (SEN), producir azúcar para el consumo nacional o la exportación, producir alcohol y crear excedentes de biomasa para la operación de la planta durante la zafra energética 2. Las investigaciones realizadas demuestran que este período debe ser mayor de 95 días si se desea obtener rentabilidad de la inversión.
2. Zafra energética 1. Será el período en que la fábrica procesará caña energética, en este período se persigue como objetivo producir el máximo posible de energía eléctrica para entregar los excedentes al SEN, producir alcohol a partir de jugo de caña energética y sustituir así grandes cantidades de miel final en la producción de alcohol de la destilería; por otra parte durante esta fase se busca obtener altos sobrantes de bagazo para operar la planta en la zafra energética 2.
3. Zafra energética 2. Estará caracterizada por la operación de la planta a partir de la combustión de la biomasa almacenada como consecuencia de los sobrantes de la zafra azucarera y la energética 1, en este caso se tratará de generar el máximo de energía eléctrica para entregar excedentes al SEN y como en todas las etapas, asegurar el suministro energético de la fábrica de azúcar y la destilería.

Con el objetivo de conocer donde se alcanzarían los valores óptimos de ganancias de la operación de la planta, para las condiciones de análisis utilizadas, se decidió realizar un trabajo de optimización para determinar cuantos días debería operar la planta con caña azucarera, cuantos con caña energética y cuantos debe operar con las reservas de biomasa que se obtengan del procesamiento de ambas variedades de caña.

En el análisis de la optimización y para la determinación de la función objetivo se trabajó atendiendo a las tres plantas integradas, es decir el central, la destilería y la planta de cogeneración. Se analizó para plantear la

función objetivo que los costos variables de la producción de alcohol deben variar en función del balance de miel final, teniendo en cuenta los aportes de la caña azucarera en cuanto a este producto y de la caña energética en cuanto a la miel final que se sustituye al utilizar el jugo como sustrato en la fermentación. Con el análisis de este balance se obtuvo la relación del costo de producción de la destilería en función de la miel final que se aporta y la que se debe comprar para completar la producción de todo el período de operación de la destilería.

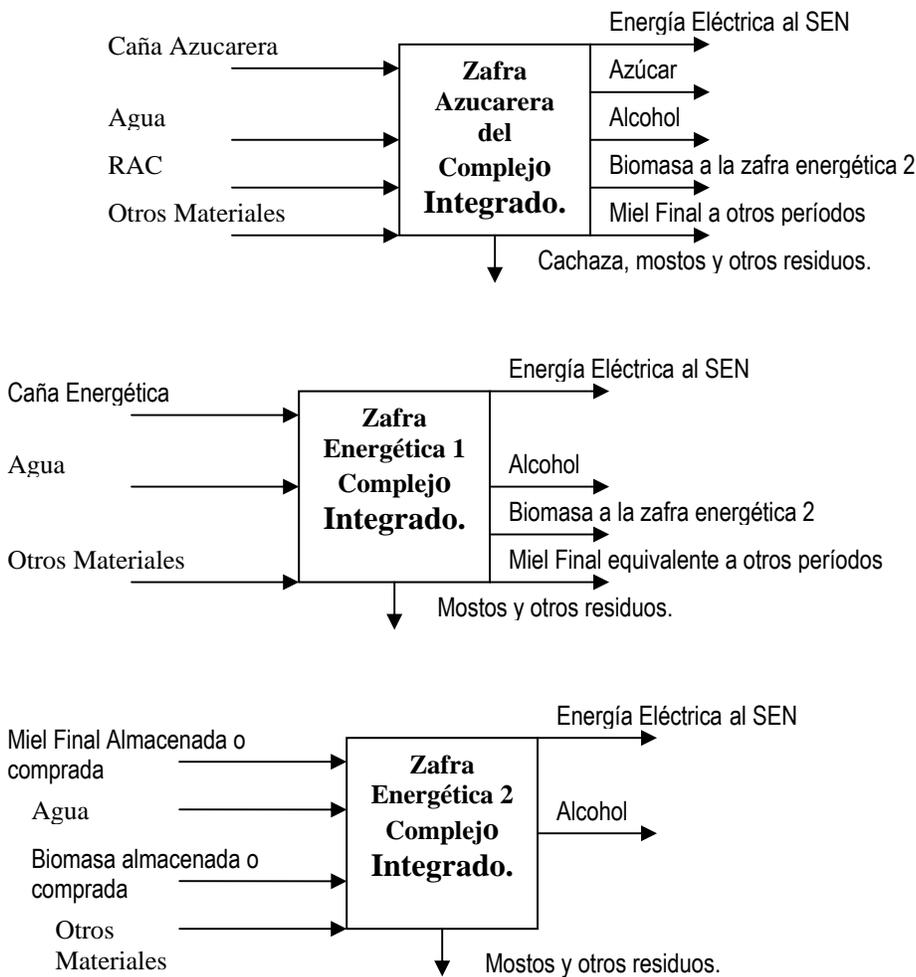
De la misma forma se procedió para determinar los costos de producción de la planta de cogeneración en el período de zafra energética 2, donde se opera solamente con biomasa almacenada y cuyos costos variables dependerán del aporte de bagazo de los otros dos períodos. El siguiente gráfico describe el análisis realizado desde el punto de vista de la división de los períodos de operación.

Fig. 1: Subprocesos en operación en cada uno de los períodos de producción del complejo integrado.

Central – Destilería – Planta de Cogeneración.

Central Azucarero		
Destilería	Destilería	Destilería
Planta de Cogeneración	Planta de Cogeneración	Planta de Cogeneración
Zafra Azucarera	Zafra Energética 1	Zafra Energética 2

Fig. 2: Aportes de cada uno de los períodos al balance global del complejo integrado.



$$G = N \text{ Gza} + M \text{ Gze1} + L \text{ Gze2}$$

(2.44)

Se desea maximizar las ganancias anuales.

$$\text{Gza} = (\text{VuC} - \text{CuC}) + (\text{VuD} - \text{CuD}) + (\text{VuPc} - \text{CuPc})$$

(2.45)

$$\text{EPbza} = (\text{Cm} * \% \text{ Bzo ca}) - \text{Bzo req za}$$

(2.46)

$$\text{Abzo za} = \text{Epbza} / \text{Bzo req ze2}$$

(2.47)

$$\text{Epbze1} = (\text{Cm} * \% \text{ Bzo ce}) - \text{Bzo req ze1}$$

(2.46.1)

$$\text{Abzo ze1} = \text{Epbze1} / \text{Bzo req ze2}$$

(2.47. 1)

$$L = \text{Abzo za} * N + \text{Abzo ze1} * M$$

(2.48)

$$\text{VuC} = t \text{ az} * \text{Paz}$$

(2.49)

$$\text{VuD} = \text{hl alch.} * \text{P alch.}$$

(2.50)

$$\text{VuPc} = \text{EE} * \text{P EE}$$

(2. 50. 1)

$$\text{Am za} = (\text{Cm} * 0,032 \text{ tm/tc}) / (0,43 \text{ tm/Hl alchl} * \text{Hl alchl}).$$

(2.51)

$$\text{Am ze1} = (\text{Cm} / 5,814 \text{ tc/tm}) / (0,43 \text{ tm/ hl} * \text{hl alchl}).$$

(2.52)

**Función Objetivo para la optimización, donde:** G = Ganancia anual de la planta (pesos), N = Días de zafra azucarera, Gza = Ganancia diaria de la zafra azucarera (pesos), M = Días procesando caña energética, Gze1 = Ganancias diaria de la zafra energética 1. Procesando caña Energética (pesos), L = Días de generación con biomasa almacenada, Gze2 = Ganancia diaria de la zafra energética 2. Generación con biomasa Almacenada (pesos).

Donde: Vu = Valor de las ventas unitarias de cada una de las plantas de la Fábrica (pesos), Cu = Costos unitarios asociados a la producción de cada una de las Plantas (pesos), C = Central, D = Destilería, Pc = Planta de Cogeneración.

**Balance de bagazo,** para estimar cual es el aporte a la generación de energía de cada una de las etapas de operación planificadas, donde: Epbza = excedentes de la producción de Bagazo de la zafra azucarera (t), Cm = Caña molida durante la zafra azucarera (t/d), % Bzo ca = Por ciento de bagazo de la caña azucarera (%), Bzo req za = Bagazo requerido durante la zafra azucarera (t/d).

Aporte de bagazo de la zafra azucarera a la zafra energética 2, donde: Abzo za = Aporte de bagazo de la zafra azucarera en días, Bzo req ze2 = Bagazo requerido durante la zafra energética 2 (t/d).

Donde: Epbze1 = excedentes de la producción de Bagazo de la zafra energética 1 (t), Cm = Caña molida durante la zafra energética 1 (t/d), % Bzo ce = Por ciento de bagazo de la caña energética (%), Bzo req ze1 = Bagazo requerido durante la zafra energética 1.

Donde: Abzo ze1 = Aporte de bagazo de la zafra energética 1 en días, Bzo req ze2 = Bagazo requerido durante la zafra energética 2 (t/d).

Días de zafra energética 2.

Donde: t az = Toneladas de azúcar producidas por día, Paz = Precio del azúcar en el mercado.

Donde: Hl alch = Hectolitros de alcohol que se producen en un día, P alch = Precio del alcohol.

Donde: EE = Energía eléctrica vendida diaria, P EE = Precio de la energía eléctrica.

**Aporte de miel de la zafra azucarera, donde:** Am za = aporte de miel expresado en días para producir alcohol que se obtienen de un día de zafra azucarera.

Am ze 1 = aporte de miel expresado en días para producir alcohol que se obtienen de un día de zafra energética 1.

## Resultados de la optimización realizada.

Determinación de la función objetivo.

Zafra Azucarera.

$$\text{Guza} = \text{VuC} - \text{CuC} + \text{VuD} - \text{CuD} + \text{VuPc} - \text{CuPc}$$

$$\text{Guza} = 93\,109.83 + 0,05 N + 0,16 M$$

Zafra Energética 1.

$$\text{Guze1} = \text{VuD} - \text{CuD} + \text{VuPc} - \text{CuPc}$$

$$\text{Guze1} = 0,05 N + 0,16 M - 47\,479.8$$

Zafra Energética 2.

$$\text{Guze2} = \text{VuD} - \text{CuD} + \text{VuPc} - \text{CuPc}$$

$$\text{Guze2} = 33725,9 + 603,45 N + 3292,56 M - 8098 L$$

La Función objetivo resultante es:

$$G = 93109,83 N + 0,05 N^2 + 0,21 MN + 0,16 M^2 - 47479,8 M + 33725,9 L + 603,45 NL + 3292,56 ML - 8098 L^2$$

Se establecieron como restricciones las siguientes.

$$[N + M + L = 330], [N \geq 95] \text{ y } [N \leq 150]$$

Con estos resultados se procedió a la optimización utilizando para ello el programa Gams y obteniéndose el siguiente resultado.

Valor óptimo procesando caña azucarera  $N = 150$  días.

Valor óptimo procesando caña energética  $M = 146$  días.

Valor óptimo generando con biomasa almacenada  $L = 34$  días.

Para evaluar, si cambios en la función objetivo podrían afectar los resultados obtenidos, se hicieron corridas del GAMS para + 10 % y - 10 % de los términos de la ecuación; el óptimo de zafra azucarera se mantuvo siempre en 150, el de la energética 1 se movió entre 141 y 150 días y el de la 2 entre 29 y 38 días, lo que demuestra que cambios en estos terminos no producen grandes cambios en los resultados de la optimización. Teniendo en cuenta que en 5 años, los días promedios de lluvia en Sancti Spiritus en los días de zafra energética han sido 45, se hizo una corrida adicional, con una nueva restricción de que los días de zafra energética 2 debían ser 45 o más, en este caso el resultado fue una zafra energética 2 de 45 días y una energética 1 de 135 días, manteniéndose la zafra azucarera en 150 días. Todo lo anterior ratifica que en un complejo integrado con estas características, el desarrollo de la zafra azucarera sigue teniendo un alto significado en las ganancias finales de toda la operación.

### Conclusiones.

1. La alternativa de cogeneración con caña energética al terminar la zafra asegura la operación de un complejo azucarero integrado con la planta de derivados durante todo el año.
2. Es factible la optimización del tiempo de los períodos de operación, atendiendo a las ganancias unitarias de las diferentes plantas integradas y a los aportes de cada uno de los períodos de operación al funcionamiento integrado durante todo el año.
3. La optimización realizada variando los coeficientes de la función objetivo desde -10 y hasta +10 % produjo solo pequeños cambios en el número de días óptimo de las zafras energéticas 1 y 2, demostrándose así la validez de la función objetivo.
4. La optimización realizada da como resultado que debe realizarse una zafra azucarera de 150 días, una energética 1 de 135 días y una energética 2 de 45 días.

### Bibliografía.

1. Edgar, T.F., Himmelblau, D. M., Lasdon, L. S. [Edg 01] Optimization of chemical processes. Segunda edición. Ed McGraw-Hill. New York. 2001. 651p.
2. Grupo de investigaciones energéticas. [Gru 95] La cogeneración en la industria azucarera, una solución necesaria para el desarrollo sostenible. Proyecto de investigación. Sancti Spiritus. 1995.
3. González Suárez, E y otros. [Gon 03] Integración material y energética de un complejo azucarero en : Producción de Acetal a partir de Bioetanol. Ed. Miguel Laborde. Argentina, 2003. p 197 - 202.