

UTILIZACION DE DIAGRAMAS FUNCIONALES PARA LA OPTIMIZACIÓN TERMOECONÓMICA DE INGENIOS AZUCAREROS

Mauricio Colombo

Departamento de Ingeniería Química – Universidad Nacional de Tucumán
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología
Av. Independencia 1800 (4000) Tucumán, Argentina
macolombo@herrera.unt.edu.ar

María Rosa Hernández

Departamento de Ingeniería Química – Universidad Nacional de Tucumán
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología
Av. Independencia 1800 (4000) Tucumán, Argentina
rhernandez@herrera.unt.edu.ar

José Luz Silveira

Departamento de Energía
UNESP - Universidad Estatal Paulista
FEG - Guaratinguetá- SP – Brasil
joseluz@feg.unesp.br

Resumen. *El desarrollo de nuevas técnicas que permitan el análisis y optimización de sistemas energéticos es indispensable en un mundo con recursos naturales finitos y demanda creciente de energía eléctrica para los países en desarrollo. La cogeneración viene usándose hace tiempo en el proceso de manufacturación de azúcar, ya que requiere tanto de vapor como de energía eléctrica. En las instalaciones existentes se genera vapor en calderas de baja presión utilizando el bagazo (residuo fibroso de la molienda de caña) como combustible. Actualizando los parámetros de operación, en particular, utilizando presiones más elevadas de generación, se podría producir energía eléctrica excedente, con posibilidades de venta a la red. El método utilizado para evaluar alternativas de cogeneración combina la Segunda Ley de la Termodinámica, a través del concepto de exergía, con la evaluación económica del sistema térmico. En este trabajo se hace uso de una herramienta poderosa por su versatilidad y robustez para implementar una superestructura de optimización que contemple todos los casos posibles planteados de acuerdo a las funciones exergéticas de costo definidas por el diagrama funcional. Además, el presente trabajo muestra la necesidad de realizar estudios de sensibilidad paramétrica y el análisis de las variables de optimización seleccionadas*

Palabras clave: *cogeneración, optimización, diagramas funcionales, industria azucarera*

1. Introducción

El término cogeneración implica la producción simultánea de calor y trabajo en una industria haciendo uso secuencial de un combustible común.

El desarrollo de nuevas técnicas que permitan el análisis y optimización de sistemas energéticos es indispensable en un mundo con recursos naturales finitos y demanda creciente de energía para los países en desarrollo. La Termoeconomía, como ha sido presentado por diversos autores (Coelho et al, 1997; Barreda et al, 1998, Barreda y Nebra, 1999) es una herramienta poderosa para analizar y mejorar diferentes sistemas de energía, desde que involucra la evaluación de costos de distintos sistemas de transformación de energía. La determinación de estos costos constituye un asistente eficaz en la toma de decisiones para comparar proyectos alternativos de inversión, tecnologías y distintas condiciones de operación.

En este artículo se utiliza el Costo de Manufactura Exergético (CMEX) como un nuevo método desarrollado para el análisis y optimización de sistemas de producción combinada de calor y trabajo. Se seleccionó como caso de estudio, la aplicación de CMEX a un ingenio azucarero de la Provincia de Tucumán (Argentina) por la relevancia que tiene esta industria sobre las economías regionales y las posibilidades que presenta para cogeneración.

2. Objetivos

La cogeneración viene usándose hace tiempo en el proceso de manufacturación de azúcar, ya que requiere tanto de vapor como de energía eléctrica. En las instalaciones existentes se genera vapor en calderas de baja presión utilizando el bagazo (residuo fibroso de la molienda de caña) como combustible. Estos sistemas fueron desarrollados cuando no se tenía en cuenta la posibilidad de exportar energía.

Más aún, desde que se consideraba inútil el almacenamiento de grandes cantidades de bagazo, la mayoría de las calderas fueron diseñadas de modo tal de utilizar todo el bagazo disponible. Como consecuencia, se generó una "auto-ineficiencia" en las fábricas de azúcar, utilizando todo el bagazo combustible en sus calderas de baja presión.

Actualizando los parámetros de operación, en particular, utilizando presiones más elevadas de generación, se podría producir energía eléctrica excedente, con posibilidades de venta a la red.

3. Metodología

El método utilizado para evaluar alternativas de cogeneración combina la Segunda Ley de la Termodinámica, a través del concepto de exergía, con la evaluación económica del sistema térmico.

Frangopoulos (1987) ha mostrado que para el análisis de configuraciones alternativas es necesario llevar a cabo las siguientes tareas:

1. Identificación de las funciones globales de cogeneración y para cada unidad de proceso en particular
2. Evaluación de los flujos exergéticos de entrada - salida de cada uno de los componentes del sistema
3. Construcción del diagrama funcional termoeconómico
4. Selección de parámetros y determinación de sus valores
5. Formulación de la función incremental de exergía asociada a las entrada - salida de cada unidad.
6. Formulación del costo exergético de manufactura.

3.1. Construcción del diagrama funcional. Un caso sencillo

En la Fig. (1) se muestra un caso sencillo de cogeneración a efectos de ilustrar la construcción del diagrama funcional correspondiente, de acuerdo a la metodología desarrollada por Luz Silveira (1998). La principal ventaja de este método es su bajo esfuerzo computacional, porque es un método algebraico directo, de fácil implementación teniendo en cuenta las posibilidades que ofrece de manipular los parámetros seleccionados.

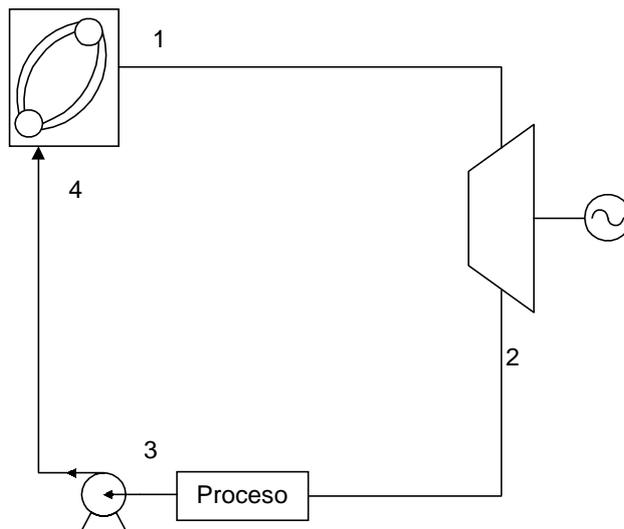


Figura 1. Esquema de un sistema de cogeneración sencillo

Cada unidad componente de la planta recibirá un número identificatorio, el cual permitirá visualizar la trasposición del sistema de cogeneración sencillo mostrado al diagrama funcional del sistema considerado.

El diagrama funcional del sistema representa las unidades reales interconectadas por líneas de funciones exergéticas. Obsérvese que los flujos considerados en la Fig. (2) se refieren a incrementos exergéticos y no al valor absoluto de esta propiedad termodinámica.

Observése que la línea funcional de frontera separa los insumos y productos del sistema energético con el medio exterior, y por lo tanto, las necesidades térmicas de proceso (clientes) son externos al sistema energético en cuestión.

La nomenclatura utilizada es la siguiente:

Y	Funciones exergéticas en base incremental
$Y_{i,j}$	j-ésima entrada a la i-ésima unidad
$Y_{i,k}$	k-ésima salida de la i-ésima unidad

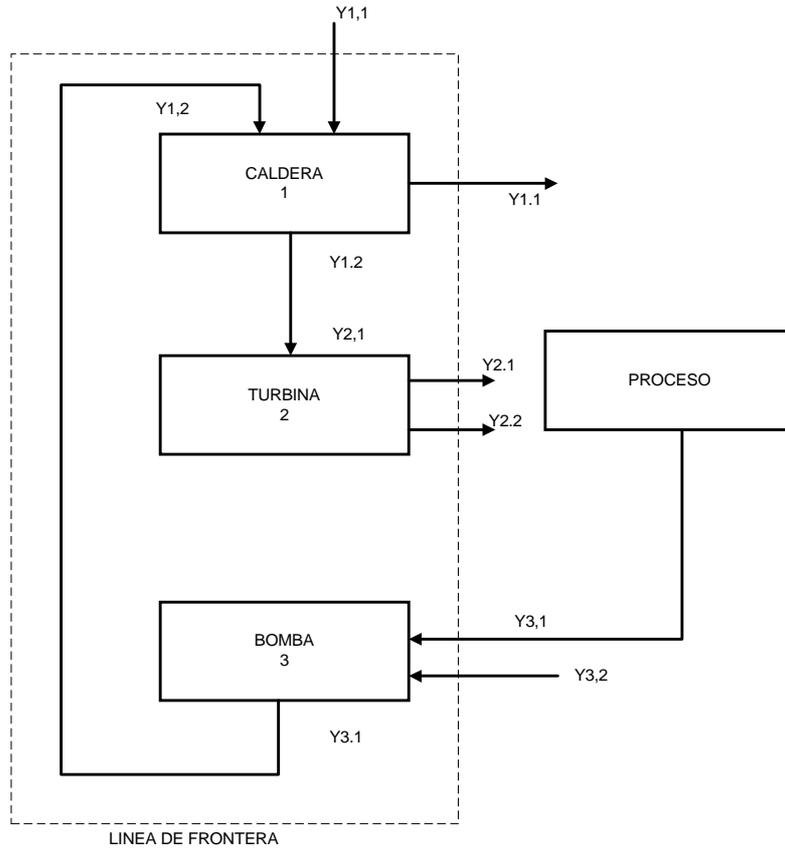


Figura 2. Diagrama funcional del esquema de cogeneración sencillo

Las funciones exergéticas asociadas a las unidades reales pueden escribirse como:

3.1.1. Unidad 1. Caldera

$$Y_{1,1} = \dot{E}_{comb} = m_{comb} PCI \tag{1}$$

$$Y_{1,1} = \dot{E}_g = m_g C_p \Delta T \tag{2}$$

$$Y_{1,2} = m_v (ex_1 - ex_4) \tag{3}$$

$$Y_{1,2} = Y_{3,1} \tag{4}$$

3.1.2. Unidad 2. Turbina de vapor/ Generador eléctrico

$$Y_{2,1} = \dot{E}_p \tag{5}$$

$$Y_{2,2} = m_v ex_2 \tag{6}$$

$$Y_{2,1} = Y_{1,2} \tag{7}$$

3.1.3. Unidad 3. Bomba de agua/motor eléctrico

$$Y_{3,1} = m_v (ex_3 - ex_4) \tag{8}$$

$$Y_{3,1} = m_v ex_3 \tag{9}$$

$$Y_{3,2} = \dot{W}_{bomb} = m_v (h_3 - h_4) / \eta_b \tag{10}$$

Tabla 1. Nomenclatura utilizada en la definición de funciones exergéticas

\dot{E}_p	Potencia demandada
m_{comb}	Caudal de combustible consumido
PCI	Poder calorífico inferior del combustible
\dot{E}_{comb}	Exergía del combustible
\dot{E}_g	Exergía de los gases de escape
m_g	Caudal de gases de escape
C_p	Calor específico promedio de los gases de escape
ΔT	Diferencia de temperatura en los gases de escape
m_v	Caudal de vapor producido
ex_i	Nivel exergético de la corriente i
\dot{W}_{bomb}	Trabajo necesario en la bomba
h_i	Entalpía de la corriente i
η_b	Eficiencia de la bomba

3.2. Caso de estudio seleccionado. Un diagrama funcional más complejo

Se seleccionó como caso de estudio un ingenio azucarero de la Provincia de Tucumán, Argentina, por las posibilidades que presenta esta industria para cogeneración y el impacto que significaría sobre las economías regionales, la posibilidad de racionalizar el consumo de energía.

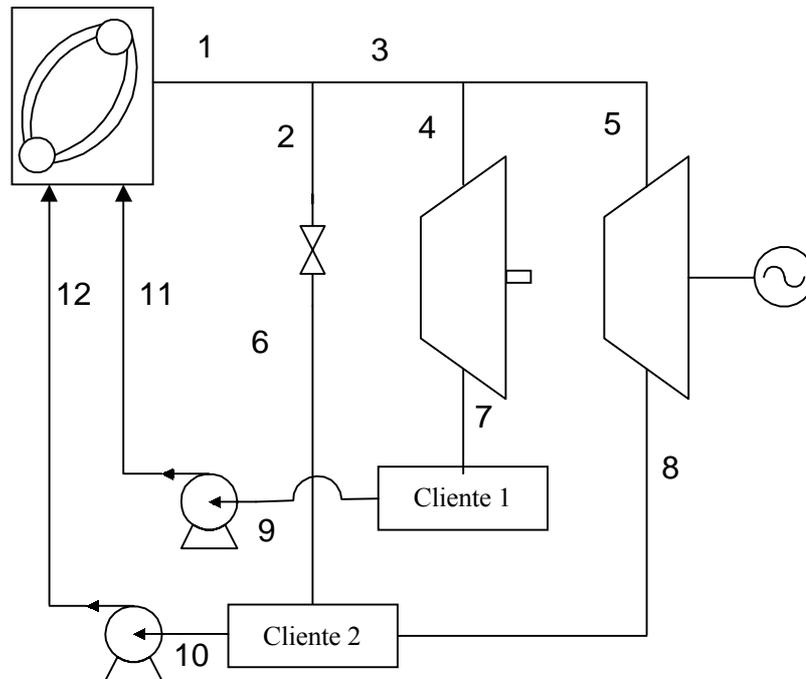


Figura 3. Esquema simplificado de cogeneración de un ingenio azucarero

Como se observa en la Fig. (3) se presentan dos tipos de demanda de potencia: generación de energía eléctrica y energía de accionamiento mecánico para las distintas unidades de proceso. A su vez, existen dos demandas de calidades distintas de vapor. Los datos más significativos del ingenio estudiado por Colombo y Luz Silveira (2001) se muestran en la tabla (2). El sistema opera en paridad térmica. El correspondiente diagrama funcional se muestra en la Fig. (4).

Tabla 2. Datos significativos ingenio azucarero

Molienda	891 tn/h	Demanda vapor cliente 2	162 tn/h
Fibra en caña	14 %	Demanda eléctrica	9355 kw
Humedad del bagazo	50 %	Horas de operación anuales	2400
Sacarosa en bagazo	2 %	Contrapresión cliente 1	0.22 MPa
Bagazo producido	281 tn/h	Contrapresión cliente 2	0.18 MPa
Demanda vapor cliente 1	380 tn/h		

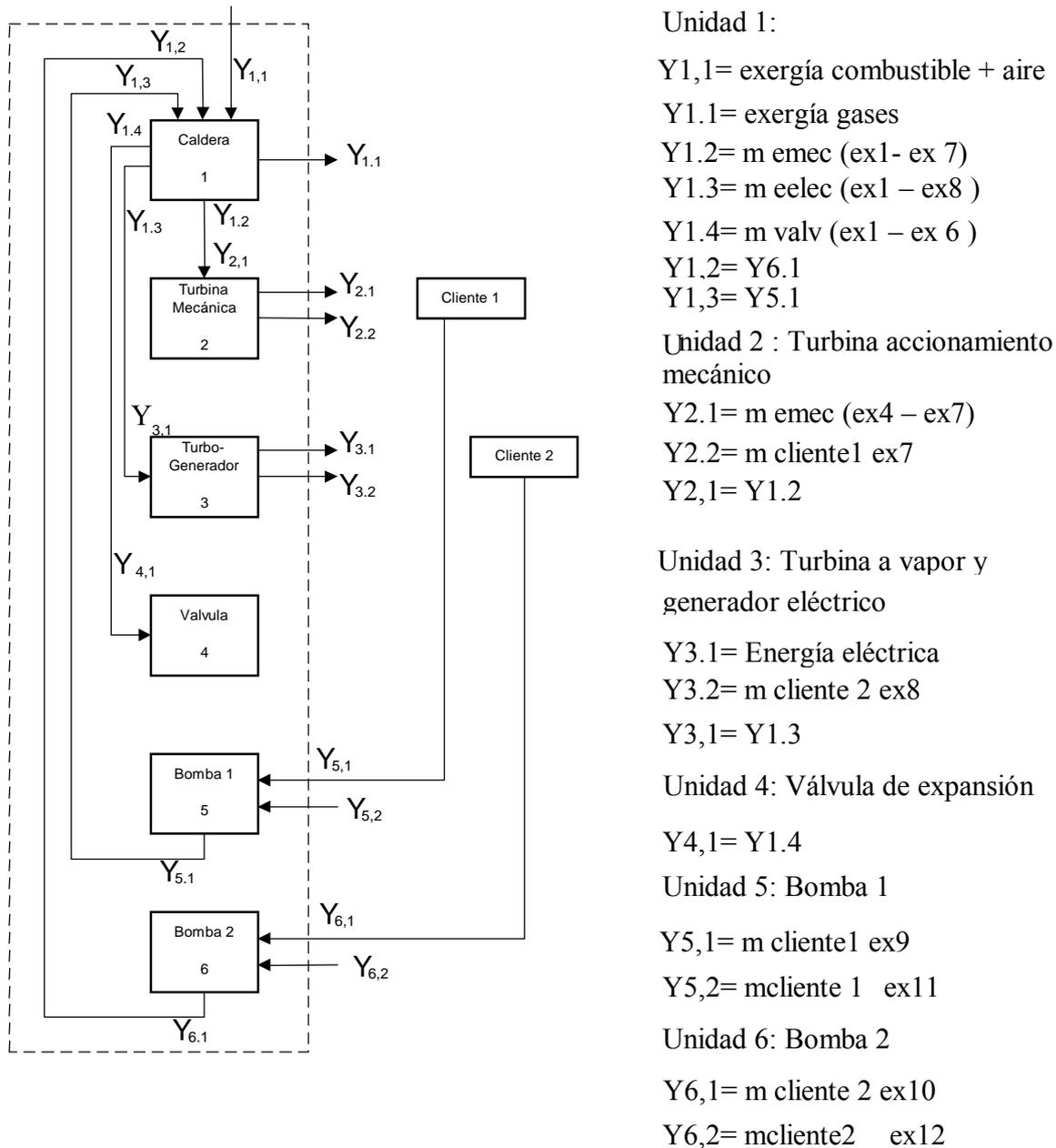


Figura 4. . Diagrama funcional ingenio azucarero

3.3. Utilización del diagrama funcional. Definición del costo de manufactura exergético (CMEX).

El objetivo de la optimización termoeconómica es la selección dentro de un conjunto de soluciones posibles, de aquella solución que sea la mejor, con respecto a un criterio de performance especificado y que satisfaga las restricciones impuestas al problema bajo estudio.

Se pueden aplicar numerosos criterios para determinar las mejores condiciones bajo las cuales se puede operar o diseñar un sistema. La naturaleza de estos criterios depende del tipo de proyecto, y de las diferentes perspectivas en las etapas de búsqueda, desarrollo y diseño.

La elección de este criterio es un paso esencial en cualquier estudio de optimización, pues el efecto de imponer diferentes objetivos, producirá diferentes soluciones óptimas.

El costo de manufactura exergético ha sido definido por Luz Silveira (1998) teniendo en cuenta los costos de producción de los insumos asociados a la producción de frío o calor en el proceso y la energía eléctrica comprada o producida por generación.

El costo de manufactura exergético explota la capacidad del diagrama funcional para obtener expresiones sencillas de los costos asociados a las funciones exergéticas .

Además, los diagramas funcionales permiten fácilmente el tratamiento de problemas de optimización estructurales y/o de variables discretas, lo que permite una gran flexibilidad operativa para resolver problemas de decisión del tipo “what if...”

Obsérvese que sólo serán importantes para la determinación del costo de manufactura exergético (CMEX), las funciones exergéticas que atraviesan la línea de frontera del diagrama funcional correspondiente. De acuerdo al diagrama funcional de la Fig. (4) el CMEX para este sistema estaría dado por:

$$CMEX = C \text{ electricidad} + C \text{ vapor} + (1-\alpha) CC \text{ electricidad} - \alpha P \text{ venta electricidad} \quad (11)$$

donde :

C electricidad : costo de generación de electricidad

C vapor : costo de generación de vapor

CC electricidad : costo de compra de electricidad a la red

P venta electricidad : precio de venta a la red de electricidad generada

$\alpha = 0$ corresponde a déficit de energía eléctrica y $\alpha = 1$ a superávit

El costo de generación de electricidad está compuesto por el producto de un coeficiente unitario de costo, dependiente del diagrama funcional, y la generación de energía eléctrica, es decir

$$C \text{ electricidad} = coel Y_{3.1} \quad (12)$$

El costo de generación de vapor está compuesto por el producto de un coeficiente unitario de costo, dependiente del diagrama funcional, y la generación de calor (o frío) útil, es decir

$$C \text{ vapor} = cov (Y_{2.2}-Y_{5,1}+Y_{3.2}-Y_{6,1}) \quad (13)$$

El costo de la electricidad comprada a la red está compuesta por el producto del coeficiente unitario de costo y la cantidad de energía comprada, es decir

$$CC \text{ electricidad} = cco (E_p - Y_{3.1}) \quad (14)$$

Donde E_p es la demanda eléctrica

El excedente de energía eléctrica está compuesto por el producto del precio unitario de venta y el excedente de energía eléctrica, es decir

$$P \text{ venta electricidad} = pv (Y_{3.1} - E_p) \quad (15)$$

La utilización de diagramas funcionales permite llevar a cabo en forma sencilla la siempre engorrosa tarea de distribución de costos entre productos (calor y energía eléctrica) cuando se utilizan recursos comunes a ambos (Silveira y Tuna, 1999).

El coeficiente unitario de costo de generación de electricidad [\$/ kwh] puede definirse como:

$$coel = \frac{I_{pl} f}{H (Y_{2.1} + Y_{2.2} + Y_{3.1} + Y_{3.2} - Y_{5,1} - Y_{6,1})} + ccomb \frac{E_c - Y_{2.1} - (Y_{2.2} - Y_{5,1}) - (Y_{3.2} - Y_{6,1})}{Y_{3.1}} \quad (16)$$

El coeficiente unitario de costo de generación de vapor [\$/ kwh] puede calcularse como:

$$cov = \frac{I_{pl} f}{H (Y_{2.1} + Y_{2.2} + Y_{3.1} + Y_{3.2} - Y_{5,1} - Y_{6,1})} + ccomb \frac{Y_{2.1} + (Y_{2.2} - Y_{5,1}) + (Y_{3.2} - Y_{6,1})}{(Y_{2.2} - Y_{5,1}) + (Y_{3.2} - Y_{6,1})} \quad (17)$$

Donde I_{pl} representa la inversión en la planta de cogeneración [\$/] y está compuesta por la suma de las inversiones correspondientes a una planta convencional de potencia, la turbina adicional de generación de energía de accionamiento mecánico y una bomba; f es el factor de anualización utilizado para convertir las inversiones a una base temporal, H las horas de operación al año, E_c es la exergía del combustible y $ccomb$ el costo de combustible . Las expresiones de los costos correspondientes a las inversiones están tomados de Boehm (1987).

El costo de la planta convencional de potencia es función de la potencia generada (E_g) expresada en Mw y está dado por:

$$I_{pot} = 580000 E_g^{0.85} \quad (18)$$

El costo de la turbina es función de la generación de potencia mecánica (E_m) expresada en kw y está dada por:

$$I_{turb} = 9000 \left(\frac{E_m}{100} \right)^{0.36} \quad (19)$$

El costo de la bomba es función de la potencia de bombeo (E_b) necesaria expresada en kw y está dado por

$$I_{bomb} = 7500 \left(\frac{E_b}{100} \right)^{0.36} \quad (20)$$

3.3.1. Determinación del costo de combustible.

Como se mencionó anteriormente el combustible utilizado es el bagazo que está formado por el residuo fibroso de la extracción de jugo de azúcar. Por esta razón, debe tratarse al bagazo como un “commodity” con un costo intra-empresa. Este tratamiento implica considerar el combustible alternativo (gas natural) que debería utilizarse para obtener la misma capacidad de generación de vapor. Ello implica la determinación del rendimiento de la caldera operando con bagazo, para lo cual se tendrá en cuenta el poder calorífico del bagazo y las pérdidas que ocurren en el proceso de combustión.

El poder calorífico inferior del bagazo [kJ/kg de bagazo] de acuerdo a Hugot (1982) está dado por:

$$PCI = 17800 - 50s - 203w \quad (21)$$

Donde s y w representan el porcentaje de sacarosa y de agua contenidos en el bagazo.

Las pérdidas energéticas que ocurren en la caldera de acuerdo a Hugot (1982), pueden resumirse en las siguientes:

1. calor latente del agua que se forma por combustión del hidrógeno del bagazo
2. calor latente del agua contenida en el bagazo
3. calor sensible de los gases que abandonan la caldera
4. pérdidas en sólidos no quemados
5. pérdidas por radiación del horno y especialmente de la caldera
6. pérdidas debidas a la mala combustión del carbono cuando se obtiene CO en lugar de CO₂

Las pérdidas de los incisos (1) y (2) se tuvieron en cuenta al emplearse el poder calorífico inferior del bagazo. Las pérdidas del inciso (3) en kJ/kg de bagazo, se calculan según Hugot (1982) de acuerdo a la Eq. (22) y las pérdidas de los incisos (4), (5) y (6) se tendrán en cuenta a través de respectivos coeficientes.

$$q_{perd} = 4.18t(1-w) \left(1.4m + \frac{0.50}{1-w} - 0.12 \right) \quad (22)$$

Donde t es el nivel térmico de los gases de salida de la chimenea, w el contenido de humedad del bagazo y m la relación del aire empleado en la combustión con respecto al valor teórico.

Luego, la cantidad de vapor (V) que puede obtenerse utilizando bagazo como combustible está dada por:

$$V = (E_{comb} - q_{perd}) \alpha_1 \beta \gamma \quad (23)$$

Donde E_{comb} representa la exergía del combustible, dada por el poder calorífico inferior, y α_1 , β y γ son los coeficientes que toman en cuenta las pérdidas de sólidos no quemados, por radiación y por combustión incompleta, respectivamente.

El rendimiento de la caldera estará dado por :

$$\eta = \frac{V}{PCI} \quad (24)$$

Luego, el costo del bagazo se obtendrá igualando la cantidad de vapor producida a partir de bagazo con aquella obtenida a partir de gas natural, como se muestra en la Eq. (25).

$$\frac{\eta PCI F_{bag}}{4.18} = PCG \eta_g F_g \quad (25)$$

Donde PCG , η_g y F_g representan el poder calorífico medio, el rendimiento en la combustión y el caudal de gas natural, mientras que F_{bag} representa el caudal de bagazo.

Considerando valores medios para la tarifa y los parámetros del gas natural en la provincia de Tucumán, se obtuvo un valor para el bagazo de 18 \$/tn. Teniendo en cuenta que ronda los valores que habitualmente se pagan por la materia prima (caña de azúcar) este costo implica que el productor de azúcar debe considerarse como un productor de energía, siendo el azúcar un subproducto. En vista de ello, se considerará este precio como un valor máximo y se presentarán diferentes escenarios para el precio del bagazo en el cálculo de optimización.

4. Representación del problema de optimización estructural.

De acuerdo a Biegler et al (1997) pueden desarrollarse distintos algoritmos de resolución para los problemas de optimización de estructuras, dependiendo de la representación seleccionada para el problema. En estas representaciones, el objetivo es incluir todas las alternativas que sean factibles para encontrar la solución óptima.

Básicamente, el problema de optimización estructural puede plantearse como:

$$\begin{aligned} \min \text{Costo} &= \text{costo de inversión} + \text{costo de operación} \\ \text{sujeto a} & \quad \text{balances de masa y energía} \\ & \quad \text{restricciones lógicas} \end{aligned}$$

En el caso que nos ocupa, CMEX ha sido definido como la función objetivo a minimizar, con las restricciones determinadas por los balances de masa y energía a través de las ecuaciones ya presentadas. Las restricciones lógicas pueden ser consideradas desde la enumeración exhaustiva de todas las posibilidades hasta la más sofisticadas técnicas de programación matemática. Ello da lugar básicamente a los dos tipos principales de representación: estructura en forma de árbol y superestructura.

En la estructura en forma de árbol se enumeran (explícitamente o implícitamente) los distintos nodos del árbol de decisiones, mientras que en la superestructura se trata de representar todas las posibilidades que podrían presentarse a través de variables binarias.

En general, los problemas involucrados serán del tipo no lineal lo cual, cuando se consideran distintas posibilidades de optimización estructural, nos conduce a grandes problemas de optimización mezcla entera no lineal (MINLP), de muy difícil resolución.

Un enfoque alternativo, como el presentado en este trabajo, explota las mejores propiedades de las representaciones presentadas a través del reconocimiento de estructuras flexibles y fiables, de modo tal que se reduzca el esfuerzo computacional.

4.1. Estudio de caso.

Los datos más significativos para el estudio de caso presentado, pueden verse en la tabla (2). Se estudiaron tres alternativas de cogeneración a distintas condiciones de generación, donde el caso 1 corresponde a la situación normal de operación de la planta. Los parámetros térmicos de los distintos sistemas considerados se muestran en la tabla (3).

Tabla 3. Parámetros térmicos del sistema

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Presión de generación (MPa)	1.72	4.2	6.3
Temp. de generación (°C)	316	350	400
Exergía mecánica (kw)	41295	41295	41295
Exergía eléctrica (kw)	9355	46214	63157
Exergía del vapor (kw)	83982	83982	83982
Exergía del combustible (kw)	5048969	534567	556889

Las variables binarias considerarán distintos escenarios de precios de bagazo (8;12 y 18 \$/tn) y de precios de venta de la electricidad generada (0,005; 0.010 y 0.015 \$/kwh). Se considerará, además la posibilidad de inversión para ahorrar consumos de los clientes 1 y 2, en el caso que pudiera venderse la energía eléctrica excedente a la red.

4.2. Modelado de restricciones lógicas.

Biegler et al (1997) han mostrado que si bien algunas de las restricciones lógicas son bastante obvias, otras necesitan de un procedimiento sistemático para desarrollarlas. Por ejemplo, la elección entre n alternativas mutuamente excluyentes utilizando variables binarias puede representarse simplemente como:

$$\sum y_i = 1 \tag{26}$$

Mientras que la representación de la restricción de inversión “ si hay posibilidad de venta de energía eléctrica entonces puede haber ahorro de consumo en el cliente 2” no es de ningún modo obvia.

Williams (1985) ha mostrado que la proposición lógica de implicación ($P \rightarrow Q$) es equivalente a la expresión booleana ($\neg P \vee Q$) y puede convertirse a:

$$1 - y_p + y_q \geq 1 \tag{27}$$

La representación en árbol del sistema propuesto en función de la venta de energía eléctrica y sus variables binarias asociadas, se muestran en la Fig. (5).

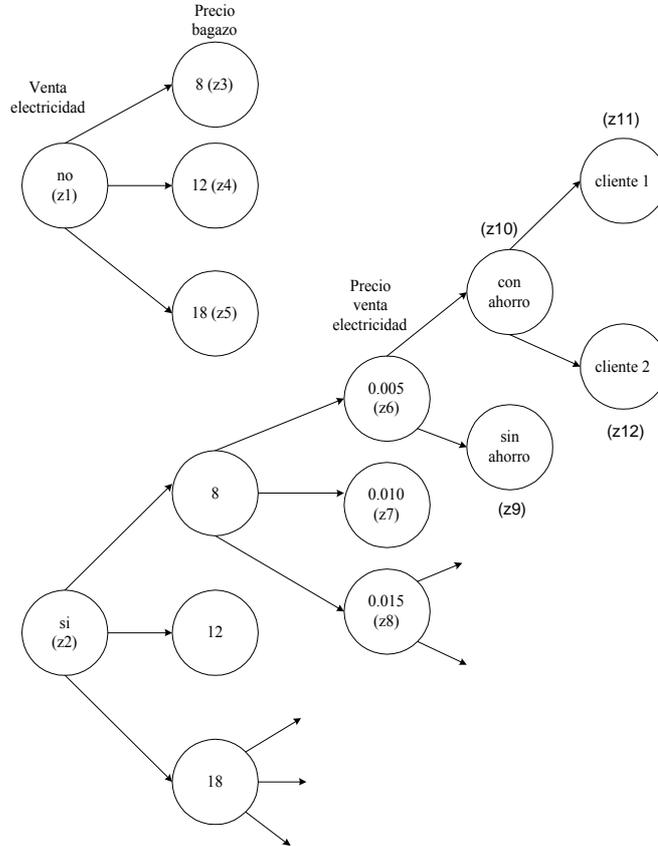


Figura 5. Representación en forma de árbol de decisiones considerando distintos precios de bagazo y de venta de energía eléctrica

La superestructura resultante y la formulación del problema de optimización se presentan en la Fig. (6)

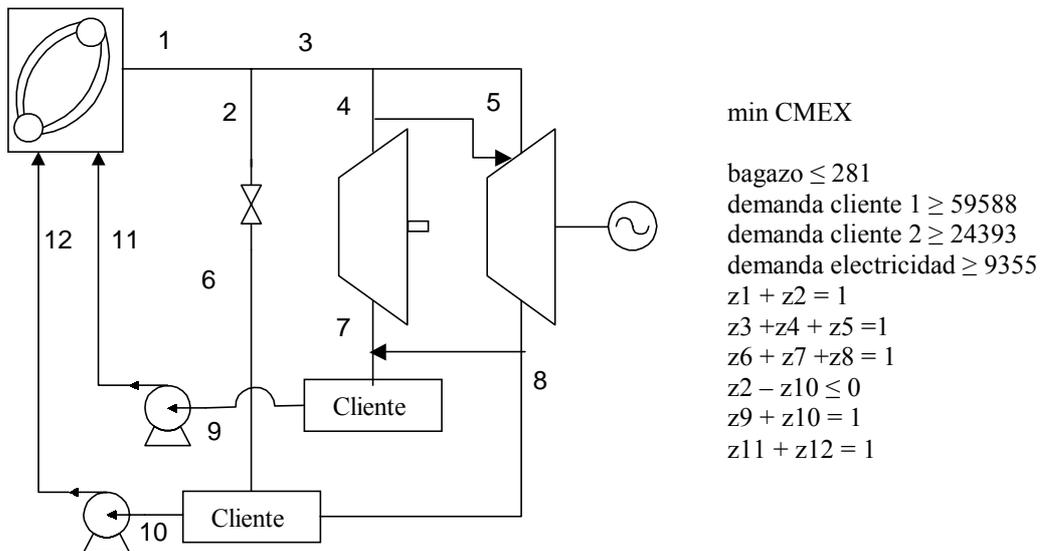


Figura 6. Representación como superestructura y formulación del problema de optimización

4.3. Resultados del problema de optimización

Los resultados obtenidos se presentan en la Fig. (7) para los distintos escenarios propuestos, indicándose en línea llena el caso base y en línea de puntos las distintas presiones de generación propuestas.

Como puede observarse en la Fig. (7) para los distintos escenarios analizados, el caso base presentado es el de menor costo de manufactura exergético, no evidenciándose ninguna mejora con el aumento de presión. Para todos los casos analizados, el caso 3 presenta un CMEX superior al caso 2.

Como se esperaba, el costo de manufactura exergético disminuye a medida que aumenta el precio de venta de la electricidad excedente, evidenciándose que el precio del bagazo tiene un ligero efecto más que proporcional cuando se consideran precios de bagazo superiores.

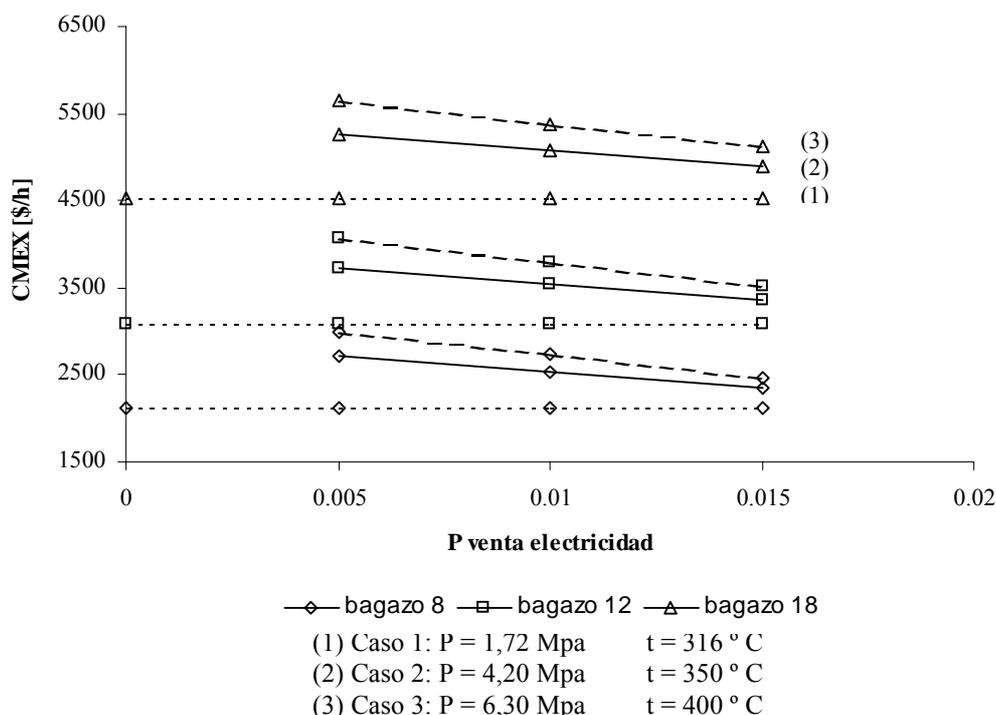


Figura 7. Costo de manufactura exergético en función del precio de venta de electricidad en \$/kwh para distintos precios de bagazo

4.4. Alternativas de ahorro exergético

Resulta interesante observar los cambios que se presentan cuando se consideran escenarios de ahorro exergético sobre los potenciales consumidores.

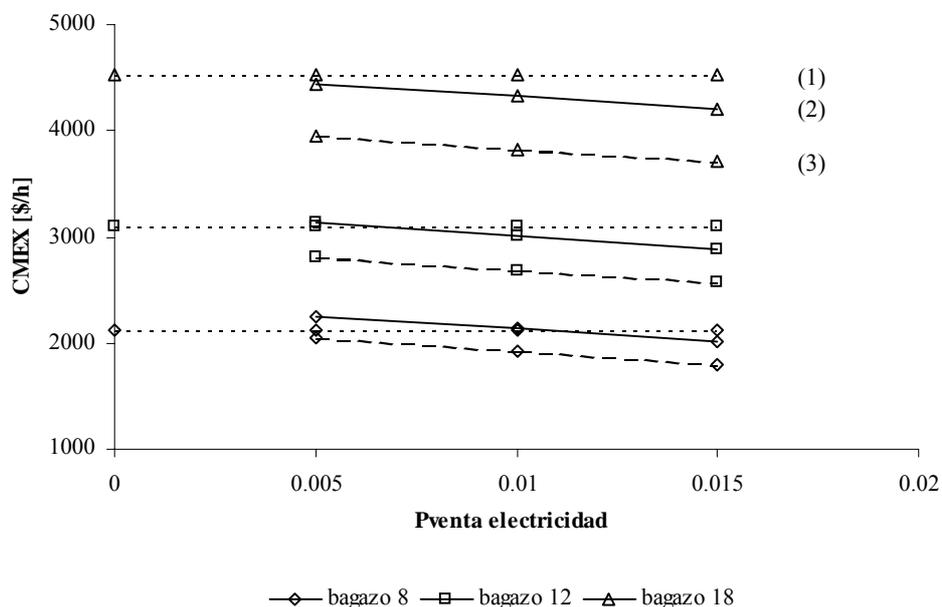


Figura 8. Costo de manufactura exergético cuando se considera un ahorro exergético del 20 % en el cliente 1.

Al considerarse la posibilidad de un 20 % de ahorro sobre el consumidor 2, la situación presentada no sufrió cambios, es decir, el caso base sigue siendo la mejor alternativa.

La Fig. (8) muestra la situación cuando se considera un 20 % de ahorro sobre la demanda del cliente 1. Es interesante observar ahora, que para la mayoría de los casos presentados, salvo cuando el precio de la electricidad generada es muy bajo, se obtienen mejores valores de CMEX cuando se considera la posibilidad de generar vapor a presiones más elevadas. También merece observarse el efecto más que proporcional que presenta el aumento del precio del bagazo sobre el CMEX.

5. Análisis de sensibilidad.

A efectos de estudiar la influencia de los distintos parámetros y variables de optimización seleccionados en los distintos escenarios, los resultados obtenidos se dividieron en dos grupos llevándose a cabo en cada uno de ellos un diseño factorial 2^k donde k es el número de variables de decisión consideradas (presión, precio del bagazo, precio de venta de la energía eléctrica generada). Los resultados para estos casos se muestran en la tabla (4).

Tabla 4. Resultados de la optimización considerando 3 variables: presión, precio de bagazo y precio de venta de energía eléctrica generada

variable 1: presión [Mpa]		variable 2 : precio del bagazo [\$/tn]		variable 3: precio venta electricidad [\$/kwh]	
Grupo 1	Grupo 2	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 1	Grupo 2
0 = 4,2	0 = 4,2	0 = 8	0 = 12	0 = 0,005	0 = 0,010
1 = 6,3	1 = 6,3	1 = 12	1 = 18	1 = 0,010	1 = 0,015
CMEX [\$/h]					
		Grupo 1		Grupo 2	
RUN 000		2710		3545	
RUN 001		2525		3361	
RUN 010		3729		5074	
RUN 011		3545		4890	
RUN 100		2999		3792	
RUN 101		2730		3523	
RUN 110		4061		5385	
RUN 111		3792		5116	

Utilizando los datos de la tabla (4) se puede analizar el cambio en el costo de manufactura exergético en función del cambio de cada variable considerada. Ello implica determinar el promedio de los resultados a un nivel dado de la variable y compararlo con el valor promedio en el otro nivel considerado, con lo que se pueden obtener los resultados que se muestran en la tabla (5)

Tabla 5. Sensitividad de CMEX a cambios de las variables de decisión.

Variable	Promedio nivel 0 [\$/h]	Promedio nivel 1 [\$/h]	Cambio en CMEX [\$/h]
Grupo 1			
presión	3127	3395	268
precio bagazo	2741	3781	1040
precio venta electricidad	3374	3148	- 226
Grupo 2			
presión	4217	4454	237
precio bagazo	3555	5116	1561
precio venta electricidad	4449	4222	- 226

Como se puede apreciar en la tabla (5) en ambos agrupamientos, el precio del bagazo es la variable que tiene un gran impacto sobre el CMEX, resultando similar el efecto de la presión y del precio de venta de la electricidad generada. Además, el efecto del precio del bagazo es mayor cuando se consideran escenarios caracterizados por el grupo 2, esto es, para los valores más altos de las variables consideradas. Ello implica que la determinación del valor del combustible utilizado (bagazo) de ninguna manera es una cuestión menor, y debe ser tratada lo más cautelosamente posible en la formulación de problemas de optimización de este tipo de agroindustrias.

6. Conclusiones

Los beneficios de adoptar la metodología propuesta para el análisis de sistemas de cogeneración de alta eficiencia pueden resumirse de la siguiente manera:

1. La generación de energía utilizando un combustible "limpio" como el bagazo provoca menor impacto ambiental, con una pequeña porción de ceniza y exenta de SOx. La contribución neta al impacto ambiental de un sistema de cogeneración utilizando bagazo es cero, porque el CO₂ absorbido para el crecimiento vegetativo de la caña de azúcar es mayor que el emitido por la planta de cogeneración
2. La metodología propuesta a través de la utilización de diagramas funcionales, permite el análisis de distintos escenarios con pequeño esfuerzo computacional, gran fiabilidad y flexibilidad.
3. Permite identificar "cuellos de botella" exergéticos de modo tal que pueda incrementarse el beneficio económico del sector.
4. El caso de estudio presentado muestra que existiendo posibilidad de venta de energía eléctrica excedente a la red, las alternativas analizadas de aumento de presión de generación sólo son económicamente provechosas si se puede conseguir un ahorro de las necesidades del cliente 1, siendo este consumidor el "cuello de botella" exergético del sistema. Merece destacarse que el sistema es particularmente sensitivo al precio del combustible utilizado (bagazo) y mucho menos dependiente de la presión de generación y del precio de venta de la energía eléctrica excedente.

7. Agradecimientos

Mauricio Colombo y María Rosa Hernández agradecen el apoyo del Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.

Los autores agradecen al personal técnico de Compañía Azucarera Concepción S.A.

8. Referencias

- Barreda, E. R., Cerqueira, S. A. A. G., Nebra, S. A., 1998. "Thermoeconomic Analysis of a Cuban Sugar Cane Mill", Energy Conversion and Management, v.39, n.16-18, pp.1773 - 1780.
- Barreda del Campo, E.R., Nebra, S. A., 1999. "Análise Termoeconômica de uma Usina de Açúcar e Álcool Brasileira". COBEM99: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1999, Águas de Lindóia.
- Boehm, R.F., 1987, "Design Analysis of Thermal Systems", John Wiley & Sons, New York.
- Biegler, L.T., Grossmann I. E. and Westerberg A.W., 1997, "Systematic Methods of Chemical Process Design", Prentice Hall International Series, New Jersey.
- Coelho, S.T., Oliveira Junior S., Zylbersztajn, D., 1997. "Análise Termoeconômica da Cogeração da Eletricidade a partir do Bagaço de Cana. Estudo de Caso para uma Usina no Estado de São Paulo". XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica COBEM 97, 1997, Bauru-SP.
- Colombo, M. and Luz Silveira J., 2001, Anales of the 5th CAIP Computación Aplicada a las Industrias de Procesos, Vol.1, Campos da Jordao, Brasil, pp. 41-44.
- Frangopoulos, C. A., 1987. "Termo-economic Functional Analysis and Optimization", Energy, v. 12, n 7, pp 563-571
- Hugot, E., 1982, "Manual para Ingenieros Azucareros", Cia. Editorial Continental S.A. de C.V., Mexico
- Luz Silveira, J., 1998, Tesis de Libre Docencia. Universidad Estatal Paulista, Brasil
- Silveira, J. L and Tuna, C. E, 1999. "Thermoeconomic Analysis Method for Optimization of Combined Heat and Power". Proceedings of 5th ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference, p.14-19.
- Williams, H. P., 1985, "Model Building in Mathematical Programming, Ed. Wiley-Interscience, New York.

UTILIZATION OF FUNCTIONAL DIAGRAMS FOR THE THERMOECONOMICAL OPTIMIZATION OF SUGAR PLANTS

Mauricio Colombo, María Rosa Hernández

Departamento de Ingeniería Química – Universidad Nacional de Tucumán

Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología

Av. Independencia 1800 (4000) Tucumán, Argentina

macolombo@herrera.unt.edu.ar, rhernandez@herrera.unt.edu.ar

José Luz Silveira

Departamento de Energía

UNESP - Universidad Estatal Paulista

FEG - Guaratinguetá- SP – Brasil

joseluz@feg.unesp.br

Abstract..The development of new techniques that allow analysis and optimization of energy systems is indispensable in a world with finite natural resources and growing demand of electrical energy for development countries. Cogeneration is used in sugar plants, since it requires steam production and electric power. The method used to evaluate cogeneration alternatives combines Second Law of Thermodynamics, through an exergy approach, with the economic evaluation of the thermal system. In this work a powerful tool is developed to implement an optimization superstructure that contemplates all the possible cases outlined according to exergetic cost functions defined by the functional diagram. Also, the present work shows the need for parametric sensitivity analysis of selected optimization variables

Keywords: cogeneration, optimization, functional diagrams, sugar plants