

UNA ESTRATEGIA HIBRIDA PARA LA OPTIMIZACION TERMOCONOMICA DE SISTEMAS DE COGENERACION

Mauricio Colombo

Departamento de Ingeniería Química – Universidad Nacional de Tucumán
Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología
Av. Independencia 1800 (4000) Tucumán, Argentina
Tel. +54-381-4364093 Ext. 201
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
Tel. +54-381-4364093 Ext. 2
rhernandez@herrera.unt.edu.ar

José Luz Silveira

Departamento de Energía
UNESP - Universidad Estatal Paulista
FEG - Guaratinguetá- SP – Brasil
+55-12-3125-2800 R. 1904
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 para los países en desarrollo, dado que el manejo eficiente de estos recursos contribuye además a la preservación del medio ambiente.

Los sistemas de cogeneración contribuyen al logro de estos objetivos pues hacen uso eficiente de un combustible común para la generación de calor útil y potencia.

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.

La optimización económica de estos sistemas ha sido objeto de numerosos análisis entre los que se destacan dos enfoques principales:

1) aquellos que hacen uso de diagramas funcionales que permiten analizar y distribuir costos exergéticos en forma sistemática

2) aquellos que usan programación matemática empleando variables binarias para la optimización estructural de sistemas

Ambos enfoques tienen sus ventajas y limitaciones, y, por lo general las limitaciones de uno constituyen las ventajas del otro.

En este trabajo se propone una estrategia híbrida que combine lo mejor de ambos enfoques, consiguiendo 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.

Adicionalmente, las funciones termodinámicas de interés han sido modeladas de forma tal que el problema de optimización planteado es lineal mezcla entera (MILP), donde se hace uso de variables binarias para tomar decisiones con respecto a las alternativas estructurales que se presentan, consiguiéndose así un óptimo global del sistema considerado.

Palabras clave:

Cogeneración-optimización-milp

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. La Termoeconomía, como ha sido presentado por diversos autores (Coelho y otros, 1997; Barreda y otros, 1998, Barreda y Nebra, 1999) es una herramienta poderosa para analizar y mejorar diferentes sistemas de energía, ya 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.

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

La optimización económica de estos sistemas ha sido objeto de numerosos análisis entre los que se destacan dos enfoques principales:

- 1) aquellos que hacen uso de diagramas funcionales que permiten analizar y distribuir costos exergéticos en forma sistemática para una estructura determinada,
- 2) aquellos que usan programación matemática empleando variables binarias para la optimización estructural de sistemas.

Ambos enfoques tienen sus ventajas y limitaciones, y, por lo general las limitaciones de uno constituyen las ventajas del otro, como puede observarse en la Tab. 1.

Tabla 1. Comparación de enfoques de optimización termoeconómica.

| Enfoque de optimización | Ventaja | Desventaja |
|-------------------------|---|--|
| Diagramas funcionales | La determinación de costos exergéticos es sencilla. Permite una distribución eficiente de los costos fijos. Algoritmo robusto y de fácil resolución. | Debe realizarse un "barrido" del espacio vectorial de las variables. No puede garantizar un óptimo global. No permite optimizaciones de estructuras. |
| Programación matemática | Permite optimizar estructuras. En el caso de un problema convexo, garantiza el óptimo global. Los códigos computacionales para el tratamiento de variables continuas y binarias son eficientes. | Complejidad matemática de la formulación. Dificultades en la resolución en el caso de problemas NLP y MINLP. |

En este trabajo se propone una estrategia híbrida que combine lo mejor de ambos enfoques, de modo tal de contar con 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.

Para ello, se utiliza el Costo de Manufactura Exergético (CMEX) como índice para el análisis y optimización de sistemas de producción combinada de calor y trabajo. Se seleccionó como caso de estudio la aplicación de CMEX al Ingenio Concepción (CACSA) 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.

Como se puede apreciar en la Figura 1, 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.

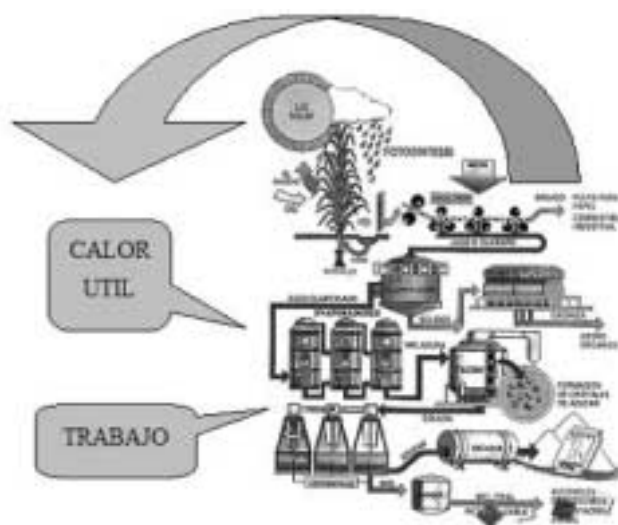


Figura 1. Diagrama simplificado de un ingenio azucarero

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.

De acuerdo a Szargut (1980), el concepto de exergía o disponibilidad está asociado al trabajo potencial (máximo trabajo reversible) que un sistema puede realizar en un determinado estado termodinámico para alcanzar el equilibrio con el ambiente.

Considerando únicamente el equilibrio termodinámico:

$$ex_i = (h_i - h_0) - T_0 (s_i - s_0) \quad [1]$$

Como la exergía es una propiedad no conservativa, es decir se destruye, la exergía entrante a un sistema siempre será mayor que la saliente. La diferencia entre la exergía entrante y la saliente es la pérdida exergética del proceso.

$$I = \sum ex_e - \sum ex_s \geq 0 \quad [2]$$

Kotas (1980) ha definido la eficiencia exergética, como se expresa en la ecuación 3:

$$\psi = \frac{\sum ex_s}{\sum ex_e} \leq 1 \quad [3]$$

Frangopoulos (1987) y Luz Silveira (1998) han mostrado que para el análisis termoeconómico 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 la entrada - salida de cada unidad.
6. Formulación del costo de manufactura exergético.

Construcción del diagrama funcional. Un caso sencillo.

En la Fig. 2 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.

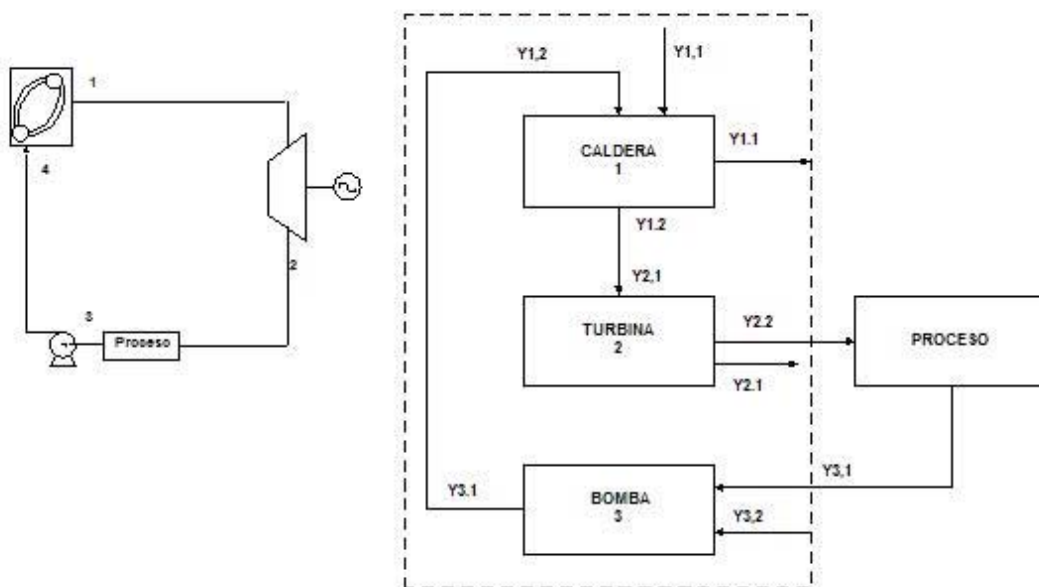


Figura 2. Construcción del diagrama funcional

Cada unidad componente de la planta recibirá un número identificador, el cual permitirá visualizar la trasposición del sistema de cogeneración 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 Figura 5 se refieren a incrementos exergéticos y no al valor absoluto de esta propiedad termodinámica.

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 _{ij} | j-ésima entrada a la i-ésima unidad |
| Y _{ik} | k-ésima salida de la i-ésima unidad |

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

Unidad 1. Caldera

$$Y_{1,1} = \dot{E}_{\text{comb}} = m_{\text{comb}} \text{ PCI} \quad [4]$$

$$Y_{1,1} = \dot{E}_g = m_g C_p \Delta T \quad [5]$$

$$Y_{1,2} = m_v (ex_1 - ex_4) \quad [6]$$

$$Y_{1,2} = Y_{3,1} \quad [7]$$

Unidad 2. Turbina de vapor/ Generador eléctrico

$$Y_{2,1} = \dot{E}_p \quad [8]$$

$$Y_{2,2} = m_v ex_2 \quad [9]$$

$$Y_{2,1} = Y_{1,2} \quad [10]$$

Unidad 3. Bomba de agua/motor eléctrico

$$Y_{3,1} = m_v (ex_3 - ex_4) \quad [11]$$

$$Y_{3,1} = m_v ex_3 \quad [12]$$

$$Y_{3,2} = \dot{W}_{\text{bomb}} = m_v (h_3 - h_4) / \eta_b \quad [13]$$

Tabla 2. 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 |

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

Se seleccionó como caso de estudio el Ingenio Concepción (CACSA) 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.

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 Concepción estudiado por Colombo y Luz Silveira (2001) se muestran en la Tab.3. El sistema opera en paridad térmica, dado que la prioridad es satisfacer la demanda de calor del proceso. El correspondiente diagrama funcional se muestra en la Fig. 4.

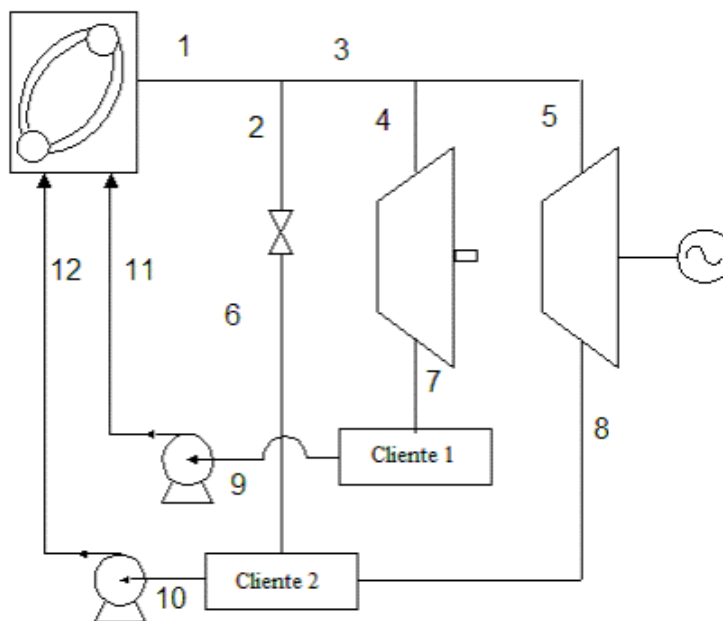


Figura 3. Representación esquema energético de CACSA

Tabla 3. Datos significativos de CACSA

| | | | |
|-------------------------|----------|----------------------------|----------|
| 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 | | |

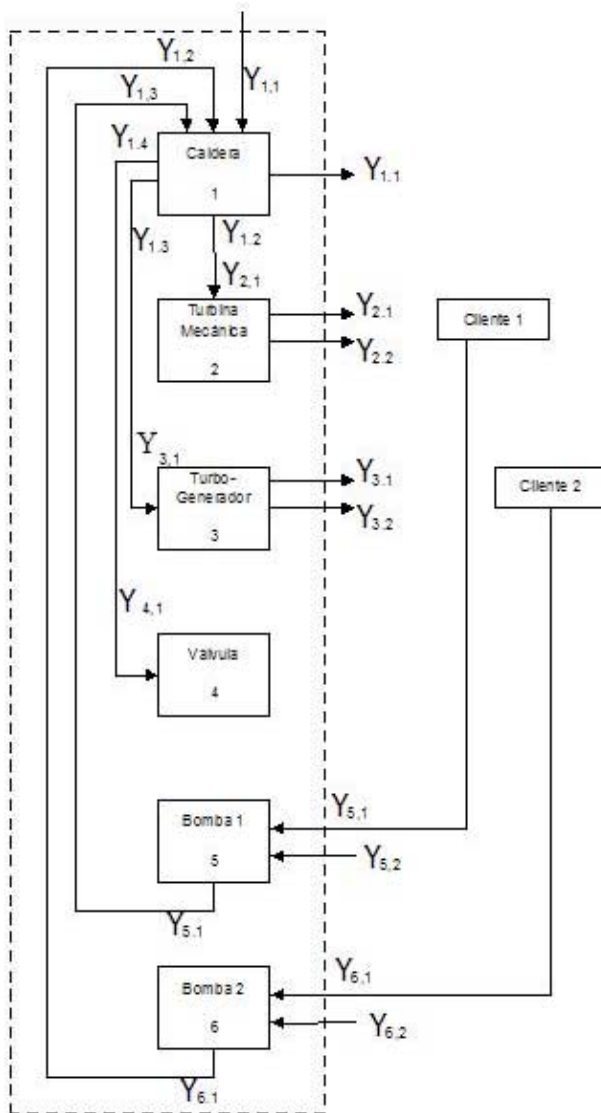
Utilización del diagrama funcional. Definición del costo de manufactura exergético (CMEX).

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.

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 .



Unidad 1:

Y1.1= exergia combustible + aire

Y1.1= exergia gases

Y1.2= m emec (ex1- ex 7)

Y1.3= m eelec (ex1 - ex8)

Y1.4= m valv (ex1 - ex 6)

Y1.2= Y6.1

Y1.3= Y5.1

Unidad 2: Turbina accionamiento mecánico

Y2.1= m emec (ex4 - ex7)

Y2.2= m cliente1 ex7

Y2.1= Y1.2

Unidad 3: Turbina a vapor y generador eléctrico

Y3.1= Energía eléctrica

Y3.2= m cliente 2 ex8

Y3.1= Y1.3

Unidad 4: Válvula de expansión

Y4.1= Y1.4

Unidad 5: Bomba 1

Y5.1= m cliente1 ex9

Y5.2= mcliente 1 ex11

Unidad 6: Bomba 2

Y6.1= m cliente 2 ex10

Y6.2= mcliente2 ex12

Figura 4. Diagrama funcional del caso de estudio seleccionado

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:

$$CMEX = C \text{ electricidad} + C \text{ vapor} + (1-\theta) CC \text{ electricidad} - \theta P \text{ venta electricidad} \quad [14]$$

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

$\theta = 0$ corresponde a déficit de energía eléctrica y $\theta = 1$ 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:

$$C \text{ electricidad} = \text{coel } Y_{3.1} \quad [15]$$

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

$$C \text{ vapor} = \text{cov} (Y_{2.2}-Y_{5,1}+Y_{3.2}-Y_{6,1}) \quad [16]$$

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

$$CC \text{ electricidad} = \text{cco} (E_p-Y_{3.1}) \quad [17]$$

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

$$P \text{ venta electricidad} = \text{pv} (Y_{3.1}-E_p) \quad [18]$$

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:

$$\text{coel} = \frac{I_{pl} f}{H (Y_{2,1} + Y_{2,2} + Y_{3,1} + Y_{3,2} - Y_{5,1} - Y_{6,1})} + \text{ccomb} \frac{E_c - Y_{2,1} - (Y_{2,2} - Y_{5,1}) - (Y_{3,2} - Y_{6,1})}{Y_{3,1}} \quad [19]$$

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

$$\text{cov} = \frac{I_{pl} f}{H (Y_{2,1} + Y_{2,2} + Y_{3,1} + Y_{3,2} - Y_{5,1} - Y_{6,1})} + \text{ccomb} \frac{Y_{2,1} + (Y_{2,2} - Y_{5,1}) + (Y_{3,2} - Y_{6,1})}{(Y_{2,2} - Y_{5,1}) + (Y_{3,2} - Y_{6,1})} \quad [20]$$

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 según Colombo y Luz Silveira (2001) están tomadas de Boehm (1987).

Determinación del costo de combustible

a) Base energética

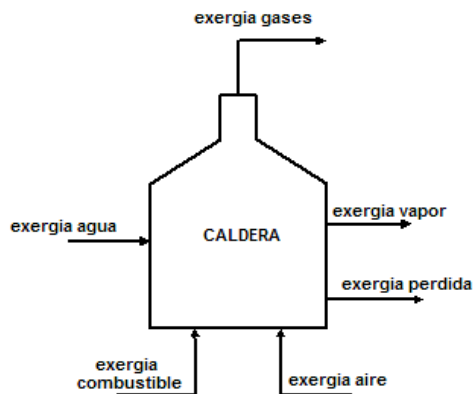
Como se mencionó anteriormente el combustible utilizado es el bagazo que está formado por el residuo fibroso de la extracción de jugo de azúcar. Por esta razón, debe tratarse al bagazo como un "commodity" con un costo intra-empresa. Este tratamiento implica considerar el combustible alternativo (gas 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. Colombo y otros (2002) han derivado la siguiente expresión para obtener la equivalencia energética entre bagazo y gas natural que sirve de base para determinar el costo del bagazo.

$$\frac{\eta \text{PCI} F_{\text{bag}}}{4.18} = \text{PCG} \eta_g F_g \quad [21]$$

Donde PCG , η_g y F_g representan razonablemente el poder calorífico medio, el rendimiento en la combustión y el caudal de gas natural, mientras que PCG , η_g y F_g representan el poder calorífico medio, el rendimiento en la combustión y el caudal de bagazo.

b) Base exergética

A efectos de derivar una expresión para calcular el equivalente exergético del bagazo se realizará un balance exergético macroscópico sobre la caldera. En la Figura 6 se esquematizan los flujos exergéticos involucrados, como así también las hipótesis de cálculo.



Hipótesis de cálculo

1. La exergia del combustible está dada por su poder calorífico inferior
2. El vapor obtenido se encuentra a 2.1 MPa y 300 °C
3. Temperatura de los gases de salida: 250 °C
4. Presión de los gases de salida: 0.1013 MPa
5. Se obtienen 25.73 kg de gases secos/ kg gas natural
6. Se obtienen 5.668 kg gases secos/ kg bagazo

Figura 5. Hipótesis de cálculo del equivalente exergético del bagazo

Con estas hipótesis de cálculo puede derivarse la siguiente expresión para calcular el equivalente exergético del bagazo:

$$\frac{F_{bg} \text{ ex}_{bg}}{F_{gas} \text{ ex}_{gas}} = \frac{2.26 \eta_{exbg}}{17.34 \eta_{exgas}} \tag{22}$$

donde F, ex y η_{ex} representan el caudal, la exergia y el rendimiento exergético del gas natural y del bagazo respectivamente.

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 sobre base exergética y 14 \$/tn sobre base energética. Teniendo en cuenta que estos valores se encuentran dentro del orden de magnitudes que habitualmente se pagan por la materia prima (caña de azúcar) este costo implicaría 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.

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:

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

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, expresadas matemáticamente a través de variables binarias, expresan las necesidades estructurales del problema y se encuentran 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.

5. El modelo mezcla entera lineal (MILP)

En general, los problemas involucrados serán del tipo no lineal en las propiedades termodinámicas del vapor y las funciones cóncavas de costos de equipos y cuando se consideran distintas alternativas de optimización estructural, ello nos conduce a grandes problemas de optimización no lineal entera mixta (MINLP), de muy difícil resolución, dependiendo el resultado obtenido del punto inicial y sin garantizar que se ha obtenido el óptimo global del sistema.

A efectos de resolver el problema planteado, se desarrolló un modelo ad-hoc de mezcla entera lineal, que puede conducirnos a un óptimo global, en función de las hipótesis planteadas, para lo cual se siguieron las etapas que se indican a continuación:

Etapa 1: Linealización de las propiedades del vapor

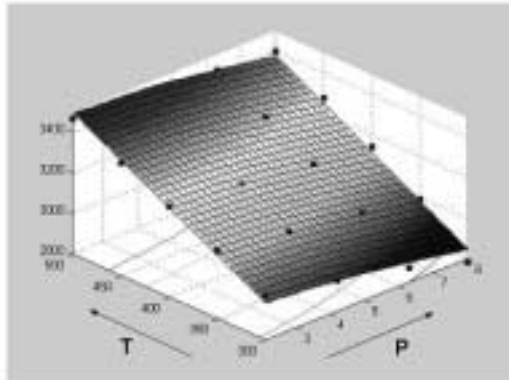
Dentro del rango de interés, se correlacionaron la entalpía y entropía del vapor como función de la temperatura y presión.

Las estadísticas de la correlación obtenida para la entalpía y entropía pueden verse en las Fig. 6 y 7 respectivamente.

Como puede apreciarse en esas correlaciones, mientras que la entalpía y entropía varían linealmente con la temperatura, la situación es muy diferente con respecto a la presión.

Para conseguir una expresión lineal sólo en función de la temperatura, se forzó a la presión a tomar valores discretos usando variables binarias según las ecuaciones 23 a 25, donde P_k es un conjunto de valores numéricos de P representativos del rango de interés.

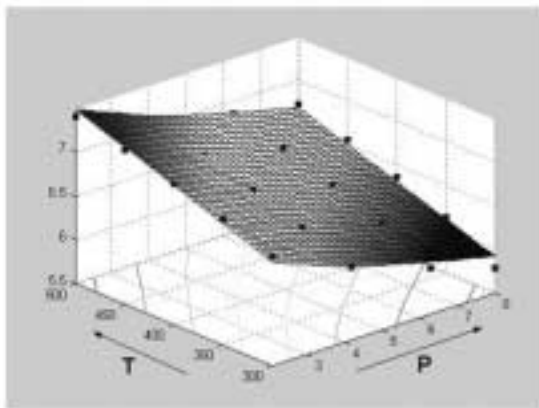
$$h(P, T) = P^\alpha (A + BT) - C(P - 2.1)$$



| Coefficiente | Valor | Error Standard |
|--------------|-------|----------------|
| α | 0.03 | ± 0.01 |
| A | 2200 | ± 40 |
| B | 2.5 | ± 0.1 |
| C | 40 | ± 10 |

Figura 9. Correlación de la entalpía del vapor

$$s(P, T) = P^\alpha (A + BT) - C(P - 2.1)$$



| Coefficiente | Valor | Error Standard |
|--------------|--------|----------------|
| α | - 0.05 | ± 0.01 |
| A | 5.7 | ± 0.1 |
| B | 0.0042 | ± 0.0002 |
| C | 0.06 | ± 0.03 |

Figura 7. Correlación de la entropía del vapor

$$P_k = \{P_1, P_2, \dots, P_n\} \tag{23}$$

$$P = \sum_i y_i P_k \tag{24}$$

$$\sum_i y_i = 1 \tag{25}$$

Etapa 2: Linealización de los flujos de exergía.

Para evitar las bilinealidades derivadas del producto del caudal por la exergía específica, se definirán valores máximos y mínimos de la exergía total de una corriente, de acuerdo a las siguientes expresiones:

$$Ex_i = \lambda exer_{\min} + (1 - \lambda) exer_{\max} \quad [26]$$

$$0 \leq \lambda \leq 1 \quad [27]$$

Etapa 3: Linealización de las funciones de costo de equipos.

Se procedió a correlacionar linealmente las expresiones de costos para los rangos de aplicación de las variables de interés, como se muestra en la Tab. 4

Tabla 4. Linealización de funciones de costo de equipos.

| Rango de aplicación | Ecuación | R ² |
|------------------------|----------------------------------|----------------|
| 0 – 65 Mw | $I_{pot} = 10^6 + 300491 E_g$ | 0.9970 |
| 5000 – 50000 kW | $I_{turb} = 37768 + 0.998 E_m$ | 0.9662 |
| 0 – 300 kW | $I_{bomb} = 2727.9 + 41.184 E_b$ | 0.9634 |
| 5 - 10 ⁵ Kw | $I_{cond} = 99017 + 4.0645 Q$ | 0.9593 |

6. Definición de la superestructura

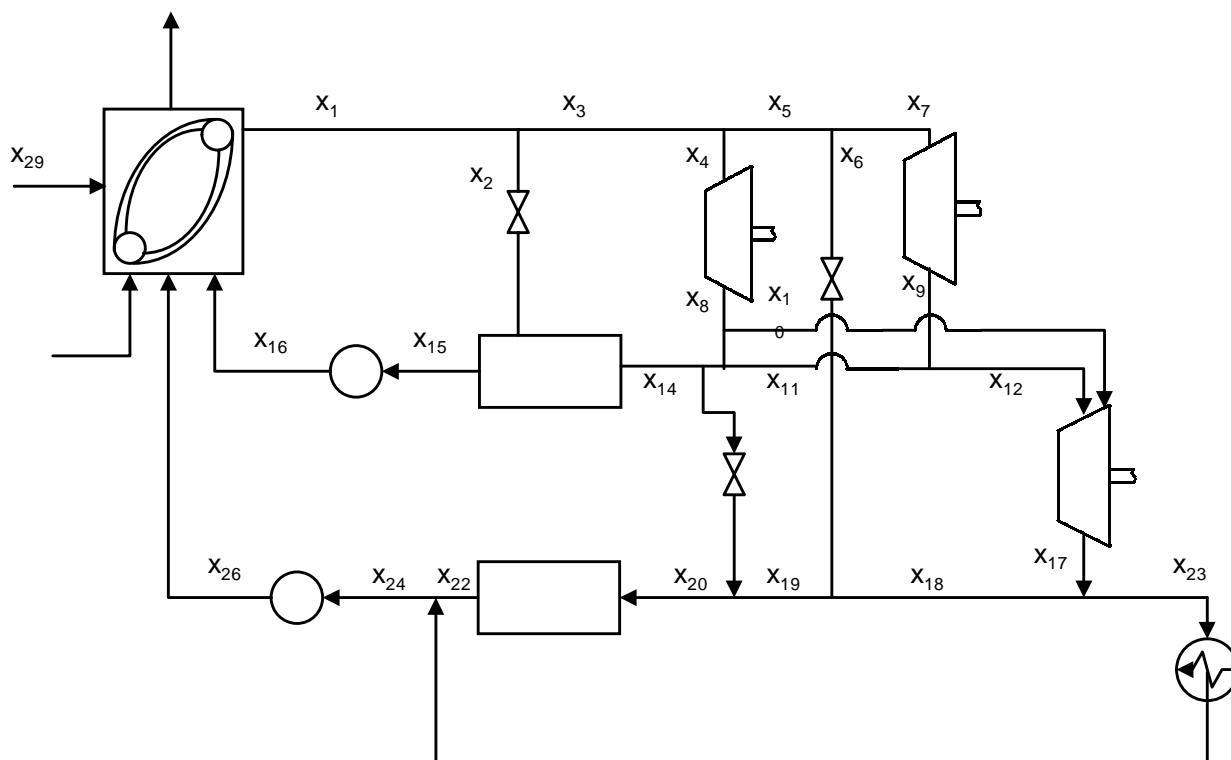


Figura 8. Superestructura para optimización estructural y operativa

En la Figura 11 puede apreciarse la superestructura resultante, donde se tuvieron en cuenta tanto para la turbina que cubre la demanda de accionamiento mecánico, como para la turbina que cubre la demanda de electricidad, que el escape puede atender las demandas de los clientes 1 y/o 2 y que además pueden generar energía adicional en una turbina de extracción y/o condensación. Se incluyó también para el análisis para la generación de energía eléctrica una turbina de gas que puede abastecer la demanda de calor del cliente 1 .

7. Resultados de la optimización

Los resultados obtenidos se presentan en la Fig. 9 para los distintos escenarios propuestos, indicándose a través de símbolos los distintos precios de bagazo considerados y con números las presiones y temperaturas de generación de vapor de los distintos casos.

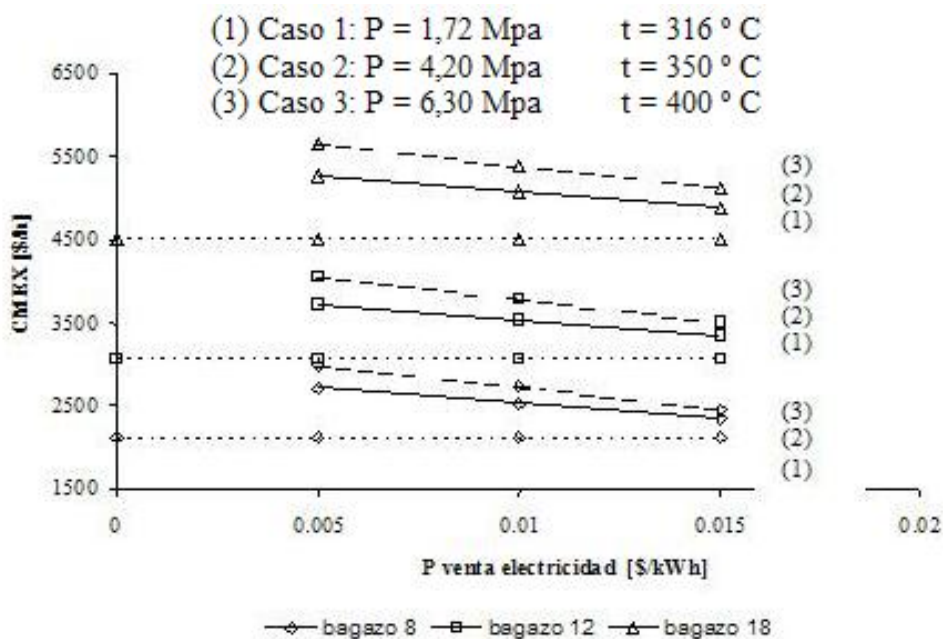


Figura 9. Resultados de la optimización

El precio del bagazo es la variable que tiene un gran impacto sobre CEMEX, mucho más importante que el efecto de la presión y del precio de venta de la electricidad generada que son de magnitud similar similar. Además, el efecto del precio del bagazo es mayor cuando se consideran escenarios caracterizados por 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.

El caso de estudio presentado muestra que la menor presión de generación es la mejor opción. 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.

8. Conclusiones

La metodología híbrida propuesta a través de la combinación de métodos que utilizan herramientas termodinámicas con énfasis en la 2da. Ley y programación matemática permite que se aborden casos complejos explotando las mejores cualidades de ambos para el análisis de distintos escenarios con pequeño esfuerzo computacional, gran fiabilidad y flexibilidad.

9. Agradecimiento

Este trabajo fue desarrollado en el marco de los Proyectos WESAP (INT/01/K07 - financiado por The Perez Guerrero Trust Fund of the Group of 77 a través del Programa de la Naciones Unidas Para el Desarrollo - PNUD) e Ingeniería de Sistemas de Procesos (auspiciado por el Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Tucumán).

Los autores agradecen al personal técnico de CACSA.

10. Referencias

- Barreda, E. R., Cerqueira, S. A. A. G., Nebra, S. A., (1998). Energy Conversion and Management, v.39, n.16-18, pp.1773 - 1780.
- Barreda del Campo, E.R., Nebra, S. A., (1999). COBEM99: XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Águas de Lindóia.
- Biegler, L.T., Grossman, I.E., Westerberg, A.W.,(1997), Prentice Hall International Series.
- Boehm, R.F., (1987), John Wiley & Sons, New York.
- Coelho, S.T., Oliveira Junior S., Zylbersztajn, D., (1997). XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica COBEM 97, Bauru-SP.
- Colombo, M. and Luz Silveira J., (2001), 5th CAIP Computación Aplicada a las Industrias de Procesos
- Frangopoulos, C. A.,(1987), Energy, v. 12, n 7, pp 563-571
- Kotas, T., J. (1985) Butterworths, London

- Luz Silveira, J., (1998). Tesis de Libre Docencia. Universidad Estatal Paulista, Brasil
- Silveira, J. L and Tuna, C. E, (1999). 5th ASME/JSME Thermal Engineering Joint Conference, p.14-19.
- Szargut, J., Morris, D. R., Steward, F. R. (1988) Hemisphere, New York

11. Derechos autorales

Los autores son los únicos responsables por el contenido del material impreso contenido en este trabajo.

HYBRID STRATEGY FOR THE TERMOECONOMICAL OPTIMIZATION OF COGENERATION SYSTEMS

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 the analysis and optimization of energy systems is indispensable in a world with finite natural resources and growing demand of energy for development countries, since the management of these resources also contributes to preserve the environment.

Cogeneration systems contribute to the achievement of these objectives because they use a common fuel for the efficient generation of useful heat and power.

The methodology used to evaluate cogeneration alternatives combines the Second Law of Thermodynamics, through an exergetic approach, with the economic evaluation of the thermal system.

The economic optimization of these systems has been object of numerous analysis among those stand out two principal approaches:

- 1) those that make use of functional diagrams that allow to analyze and to distribute exergetic costs in systematic form
- 2) those that use mathematical programming using binary variables for make decisions and for the structural optimization of systems

Both approaches have their advantages and limitations, and, in general the limitations of one constitute the advantages of the other one.

In this work it is proposed a hybrid strategy that combines the best of both approaches getting a powerful tool for their versatility and robustness to implement a superstructure of optimization that contemplates all the possible cases outlined according to the exergetic cost functions defined by the functional diagram.

Additionally, the thermodynamic functions of interest have been modeled in such way that the outlined problem of optimization becomes a mixed integer lineal programming (MILP), where use of binary variables is made to make decisions and to solve the structural optimization problem.

Keywords:

Cogeneration-optimization-milp