

Modelo para minimizar el consumo de vapor en un múltiple efecto de evaporación en un ingenio azucarero

*Fernando Villada**, *Jaime A. Valencia**, *Germán Moreno**,
*J. Joaquín Murillo***

(Recibido el 25 de febrero de 2002)

Resumen

Se muestra en este trabajo un modelo matemático para minimizar los consumos de vapor en un sistema de evaporación de múltiple efecto. La técnica utilizada fue la programación dinámica y los resultados fueron probados en un ingenio azucarero colombiano.

----- *Palabras clave:* cogeneración, eficiencia energética, programación dinámica, industria azucarera.

Steam consumption minimization model in a multiple evaporation effect in a sugar plant

Abstract

In this work, a mathematical model to minimize the steam consumption in a multiple effect evaporation system is shown. The model is based in the dynamic programming technique and the results are tested in a colombian sugar mill.

----- *Key words:* cogeneration, energy efficiency, dynamic programming, sugar industry.

* Grupo de Investigación en Manejo Eficiente de la Energía Eléctrica. GIMEL. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Antioquia, Colombia.

** Facultad de Ingeniería Eléctrica. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia.

Introducción

Durante los últimos años, la industria azucarera y el sector de procesos químicos en general se han visto obligadas a reducir los consumos energéticos debido al aumento considerable en los costos de los combustibles y a la necesidad de mejorar la eficiencia global de la planta.

La infraestructura de los ingenios azucareros con sistemas propios de cogeneración y la posibilidad de aumentar aún más su eficiencia energética, les permite generar energía eléctrica para la venta, adicionando un nuevo producto a su negocio que siempre ha sido el azúcar y sus derivados.

Son muchas las áreas que deben tenerse en cuenta en un proceso de optimización en un ingenio azucarero [1], pero la que tiene mayor influencia en ahorro de vapor y por consiguiente mejorar los ingresos mediante la disminución en consumo de combustibles y en la generación de excedentes de energía eléctrica es el sistema de evaporación de múltiple efecto.

En las ecuaciones que describen el comportamiento de un múltiple efecto de evaporación [3, 6] se tienen muchas variables con efecto significativo en la optimización energética del sistema como son, el número de efectos, la utilización de motocompresores y termosteres, el aprovechamiento de extracciones y vapores de expansión para otros procesos, y el nivel de automatización alcanzado.

Dado que las variables anteriores son fundamentalmente discretas y en el proceso de optimización se tienen decisiones interrelacionadas y en forma secuencial, se utiliza la programación dinámica como herramienta para resolver el problema. El concepto básico de programación dinámica [2] consiste en dividir un problema en etapas y optimizar en cada etapa cualquier condición dada. Luego se pueden combinar los resultados. De esta forma, el resultado total es la suma del resultado

de la decisión inmediata más el resultado óptimo de todas las decisiones futuras a las cuales ésta conduce.

En este trabajo se modela matemáticamente el balance energético en el sistema de evaporación y su relación con la energía eléctrica generada y el valor presente neto (VPN) producto de la venta de dicha energía. Luego, se optimiza el sistema utilizando como herramienta la programación dinámica de tal forma que se encuentra la estructura óptima que maximice la rentabilidad o VPN producto de la venta de electricidad. Finalmente se valida el modelo con los datos de un ingenio azucarero colombiano.

Modelo matemático del balance energético

El balance energético en un ingenio azucarero convencional se muestra en forma simplificada en la figura 1, donde se aprecian la energía de entrada en el bagazo y consumida por las calderas E_1 ; la energía utilizada para mover las turbinas de accionamiento de picadoras, molinos, ventiladores, etc. E_2 ; la energía eléctrica generada E_3 , la energía suministrada como vapor de reposición (make up) E_4 , y los consumos de vapor X y b_i en los diferentes puntos del proceso¹ como son evaporadores, calentadores, tachos, soplos de vapor, etc.

De la figura 1 se puede deducir cómo la energía eléctrica generada depende del balance de la energía de entrada en el bagazo, la energía consumida en las otras turbinas de accionamiento de equipos y la energía requerida por el proceso. De esta forma los ingenios cañeros han pasado de ser compradores de energía eléctrica y combustible a ser autosuficientes en el presente y su proyección en el futuro próximo es continuar optimizando energéticamente la planta de tal forma que se obtengan excedentes de electricidad para la venta.

1 Estos elementos se definen en el apéndice

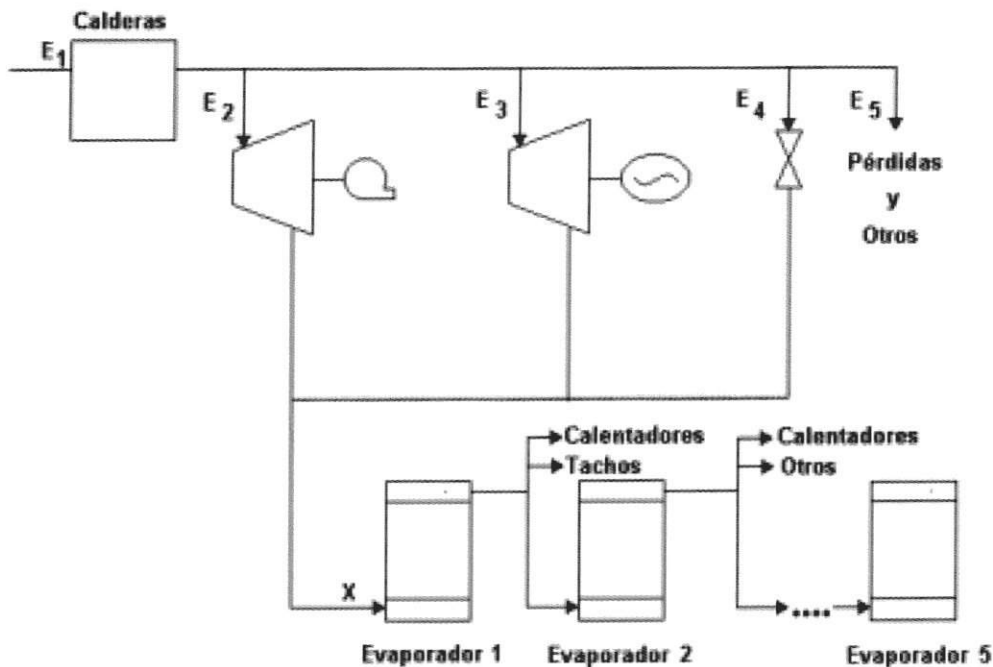


Figura 1 Balance energético en un ingenio cañero convencional

La optimización energética se logra con modificaciones en diferentes puntos del proceso como las calderas de vapor, disminución de pérdidas y consumos de vapor directo, automatización, utilización de equipos continuos (tachos, centrífugas, etc.) y sistema de evaporación.

Este trabajo se centra en el sistema de evaporación, que es el consumidor de la mayoría de la energía utilizada en un ingenio azucarero y por tanto el más relevante en un proceso de optimización para generar excedentes de energía eléctrica para la venta.

El sistema de evaporación de múltiple efecto

La figura 2 muestra el sistema de evaporación, el cual corresponde a la parte del proceso donde el jugo es concentrado a la consistencia de la meladura antes de ser enviado a los tachos de vacío para ser cristalizado en azúcar crudo. La concentración es realizada en varios evaporadores

conectados en serie, llamados “múltiple efecto”. El jugo viaja de un cuerpo a otro por el incremento gradual del vacío. Los vapores obtenidos en cada cuerpo del múltiple efecto sirven para calentar los tubos de la calandria y evaporar el agua adicional en el siguiente cuerpo. Un múltiple efecto consistente de tres cuerpos es llamado un triple efecto; de cuatro cuerpos un cuádruple efecto y así consecutivamente.

El sistema de evaporación de múltiple efecto es basado en el descubrimiento de Norbert Rillieux de Louisiana, quien patentó el doble efecto en 1843 y el triple efecto en 1846 utilizando superficies de calentamiento tubular horizontales [3]. Rillieux estableció tres principios bien conocidos a saber:

- a) En un múltiple efecto de evaporación, por cada unidad de vapor utilizada, se pueden evaporar un número de unidades de agua igual al número de cuerpos utilizados en el múltiple efecto.

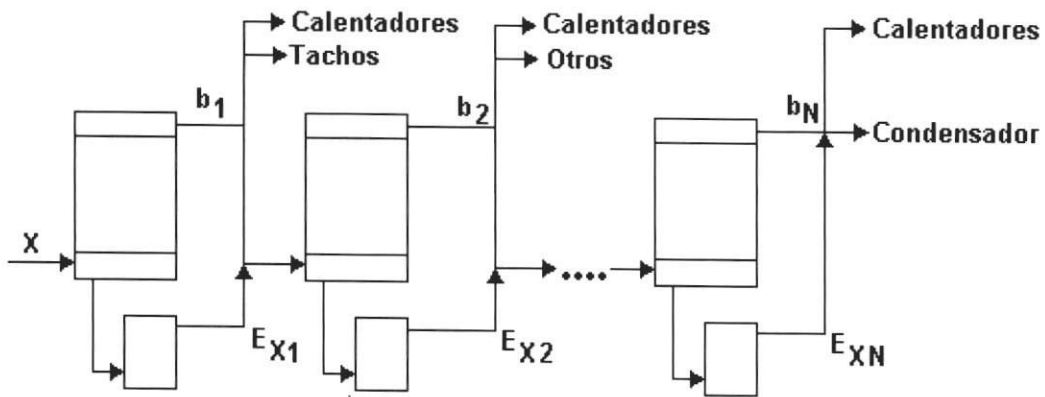


Figura 2 Sistema de evaporación de múltiple efecto

Donde:

b_1 : Masa de vapor extraído del cuerpo 1.

b_2 : Masa de vapor extraído del cuerpo 2.

b_N : Masa de vapor extraído del cuerpo N .

E_{x1} : Vapor de expansión obtenido de los condensados del evaporador i .

E_{xN} : Vapor de expansión obtenido de los condensados del evaporador N .

X : Consumo total de vapor del sistema de evaporación.

b) Cuando se extrae vapor de alguno de los cuerpos del múltiple efecto para ser usado en calentadores o tachos de vacío, se obtiene un ahorro de vapor igual a la cantidad de vapor usado dividido entre el número de cuerpos del múltiple efecto y multiplicado por la posición relativa del número del cuerpo del cual se ha extraído el vapor.

c) Para una operación efectiva del múltiple efecto se deben instalar elementos de extracción de gases no condensables de la calandria y de las tuberías donde pueda ocurrir condensación del vapor.

Con base en los principios de Rillieux es posible usar combinaciones entre el sistema de evaporación, calentadores, tachos de vacío y número de efectos. Todas estas combinaciones se diseñan con el objetivo de ahorrar el vapor utilizado en la evaporación y concentración del jugo clarificado, el calentamiento de jugo, así como también en los tachos de vacío.

Ecuaciones del balance energético

En primer lugar, y con base en el balance energético de la figura 2, se muestran a continuación las ecuaciones más importantes que describen el comportamiento de un sistema de evaporación de múltiple efecto [3, 6].

A partir del balance de materia sólida, se obtiene la cantidad de jugo concentrado que sale de cada evaporador como se muestra en la ecuación 1.

$$m_{jc} = m_{jd} \frac{r_d}{r_c} \quad (1)$$

Donde:

m_{jc} : Masa de jugo concentrado saliente del evaporador.

m_{jd} : Masa de jugo diluido entrante al evaporador.

r_d : Contenido de sólidos disueltos en jugo diluido.

r_c : Contenido de sólidos disueltos en jugo concentrado.

La cantidad de agua evaporada puede calcularse con la ecuación 2.

$$m_{ae} = m_{jd} \left(1 - \frac{r_d}{r_c} \right) \quad (2)$$

El consumo de vapor del sistema de evaporación está dado por la ecuación 3.

$$X = [E + (n-1)b_1 + (n-2)b_2 + \dots + 2b_{n-2} + b_{n-1}] \frac{1}{n} \quad (3)$$

Donde:

X : Consumo total de vapor del sistema de evaporación.

E : Masa de agua evaporada en el sistema.

n : Número de cuerpos.

b_i : Masa de vapor extraído del cuerpo i .

Otro factor importante del sistema de evaporación son los vapores de expansión, los cuales se originan en la reducción de la presión de los condensados cuando se realimentan a la planta de evaporación, reduciendo así el consumo de vapor. Su desventaja es que al mismo tiempo ocasionan una reducción en el agua evaporada por el sistema de evaporación.

De los balances de entalpía y masa de un tanque de expansión localizado entre los evaporadores i y j , es fácil obtener la expresión para el vapor de expansión realimentado a la calandria del evaporador j , como se muestra en la ecuación 4.

$$E_{xi} = M_{ci} \frac{h_{ci} - h_{cj}}{h_{Exi} - h_{cj}} \quad (4)$$

Donde:

E_{xi} : Vapor de expansión obtenido de la reducción de presión de los condensados del evaporador i .

h_{ci} : Entalpía específica de los condensados del evaporador i .

h_{Exi} : Entalpía específica del vapor de expansión generado.

De los principios de Rillieux y las ecuaciones anteriores se pueden deducir múltiples alternativas para ahorrar consumo vapor e incrementar la evaporación de agua en el sistema de evaporación de múltiple efecto, como el incremento en el número de efectos, extracciones de vapor para calentamiento de jugos y proceso en tachos, y aprovechamiento de vapores de expansión entre otros.

El vapor ahorrado en el sistema de evaporación proveniente del escape de las turbinas de extracción, o en muchos casos, de válvulas reductoras de presión, puede ser utilizado para generar excedentes de energía eléctrica para la venta, utilizando turbinas de condensación. El consumo real de vapor en estas turbinas, teniendo en cuenta la presión y la temperatura del vapor en las calderas y el cambio de entropía dentro de la misma turbina, está dado por la ecuación 5.

$$CRV = \frac{3412.1}{(h_1 - h_0) \eta_{ib} \eta_{tr} \eta_r \eta_g \eta_a} P_s \quad (5)$$

Donde:

P_s : Potencia de salida en eje de la turbina en kW.

CRV : Consumo real de vapor en lb/kW-hr.

h_1 : Entalpía total del vapor de entrada a la turbina en Btu/lb.

h_2 : Entalpía total del vapor de escape de la turbina en Btu/lb.

η_{ib} : Eficiencia termodinámica de la turbina.

η_{tr} : Eficiencia del transformador de voltaje conectado al generador.

η_r : Eficiencia del engranaje reductor de velocidad.

η_g : Eficiencia del generador eléctrico.

η_a : Eficiencia de equipos auxiliares.

La eficiencia termodinámica de la turbina de vapor depende del estándar mecánico de construcción, la potencia de salida y la caída de calor adiabática. A mayor caída de calor, se obtendrá mayor eficiencia termodinámica.

Modelo de optimización

El problema de optimización radica en que el ahorro en el consumo de vapor producto de cada alternativa y que se refleja directamente en excedentes de energía eléctrica para la venta, tiene a la vez un costo monetario que hace necesaria la evaluación económica de su factibilidad. Se requiere, por tanto, encontrar un modelo que permita determinar la estructura óptima del sistema de evaporación de tal forma que se maximice la rentabilidad de la venta de energía eléctrica producto de la optimización. Teniendo en cuenta que cada alternativa tiene restricciones de orden técnico (segunda ley de la termodinámica, número máximo de efectos de evaporación igual a seis debido a las limitaciones en la caída de presión en cada efecto, etc.), y que a la vez implica cambios en las condiciones de otras alternativas, el modelo debe interrelacionar todas las variables del sistema de evaporación teniendo en cuenta todas las restricciones.

Para la solución del problema se eligió la programación dinámica, la cual es la técnica más apropiada para resolver problemas que requieren decisiones interrelacionadas, es decir, decisiones que se deben tomar en forma secuencial y las cuales influyen en las decisiones futuras de esa secuencia. El concepto básico de programación dinámica consiste en dividir un problema en etapas y optimizar en la etapa correspondiente cualquier condición dada. Luego se pueden combinar los resultados; de esta forma, el resultado total es la suma del resultado de la decisión inmediata más el resultado óptimo de todas las decisiones futuras a las cuales esta conduce.

Es importante dividir el problema en partes o etapas simples. En cada etapa, por lo menos se toma una decisión; es decir, se optimiza una variable

de decisión. La salida o retorno de cualquier etapa depende de las decisiones anteriores, esto es, de las condiciones de entrada para esa etapa y de alguna función objetivo. Matemáticamente esto se expresa como:

$$r_i = f(d_i, s_i)$$

Esto significa que el resultado inmediato (retorno) r_i de una decisión en la i -ésima etapa depende de las condiciones s_i que prevalecen en ese instante y de la decisión d_i tomada en ese instante. La decisión total f_i es el resultado total debido a la decisión y a las condiciones de entrada en la etapa i .

$$f_i = r_i(d_i, s_i) + f^*_{i-1}(d_i, s_i) = r_i + f^*_{i-1}$$

Donde f^* es la distancia total obtenida a partir de las decisiones óptimas. La ecuación anterior expresa que el retorno total f_i es igual al resultado inmediato en la etapa i debido a la decisión d_i y a las condiciones de entrada s_i más los valores óptimos a partir de todas las otras etapas.

Regresando al problema inicial; la función objetivo es maximizar el valor presente neto (VPN) resultante de la reconfiguración del sistema de evaporación. Se entiende como VPN, los flujos de caja en toda la vida útil descontados a valor presente, donde:

Flujo de caja año i = Utilidad neta + fuentes - aplicaciones

Bajo el enfoque de la programación dinámica, el problema inicial se puede dividir en 5 etapas, una por cada etapa de evaporación y en las cuales se analiza su aporte en kilovatios para exportar, la inversión requerida y el beneficio medido en valor presente neto.

De esta forma, en cada una de las etapas se consideran las siguientes alternativas:

- Ninguna modificación.
- Extracción de vapor para calentadores y tachos.

- Instalación de tanques recolectores de vapores de expansión.
- Vapor para precalentamiento y recolectores de vapores de expansión combinados.

Resultados y discusión

Tratando de simplificar al máximo, el problema se dividió en 5 etapas, con 4 alternativas por etapa, luego la combinación de ellas resulta en 1.024 rutas posibles de solución, las cuales implicarían un tiempo prolongado de cálculo. La aplicación de la programación dinámica permite simplificar al

máximo estos cálculos como se muestra en el caso siguiente, donde se utilizó una hoja de cálculo, lográndose además la auto-matización del proceso para cambios en las variables.

Como aplicación del problema se toma un ingenio con una molienda de cuatrocientas cincuenta toneladas de caña por hora, fibra del 14% en caña, reposición (make up) a vapor de escape del 2,5% en caña, cinco efectos de evaporación, precio pactado para venta de electricidad de \$40 dólares americanos por megavatio-hora, y los datos del sistema de evaporación mostrados en las tablas 1 y 2.

Tabla 1 Datos básicos del ingenio azucarero

<i>Jugo clarificado</i>		<i>Generación energía eléctrica</i>	
Flujo (kg/s)	67,00	Generación actual (kW)	7.100
Extracción de jugo (%)	102%	Eficiencia turbogenerador	75%
Sólidos disueltos (brix)	13,5%	Vr. Us\$/ kW Instalado	600

Tabla 2 Datos sistema de evaporación

<i>Cuerpo</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
Sólidos disueltos salida (%)	25	30	35	46	61
Temperatura meladura (°C)	114,00	105,00	94,00	70,00	53,00
Temperatura calandria (°C)	122,00	113,50	104,50	83,50	69,50
Agua evaporada (kg/s)	27,22	6,03	4,97	5,33	4,67
Area actual (m ²)	2.570	1.672	1.301	1.301	1.486
Extracción calentamiento	Sí (100 °C)	Sí (90 °C)	No	No	No
Extracción para tachos	Sí (a, b, c)	No	No	No	No
Recuperación vap. expansión	No	No	No	No	No

Utilizando los datos del ejemplo como entradas y realizando los cálculos en una hoja electrónica, siguiendo el modelo de programación dinámica se obtienen como resultado las diferentes alternativas en cada etapa con su aporte en kilovatios para la venta, la inversión requerida y el beneficio medido como valor presente neto. De esta forma se determina la ruta óptima o estruc-

tura de mayor rentabilidad para el ingenio. Algunos de los resultados se muestran en la tabla 3.

En los resultados se observa cómo para el ingenio tomado como ejemplo, donde sólo se hacían extracciones de vapor del primero y segundo efecto para precalentamiento y calentamiento del jugo, los tachos sólo se alimentaban de extrac-

Tabla 3 Estructura óptima sistema de evaporación con precio de venta de \$40USD/kWh

Cuerpo	1	2	3	4	5
Extracción calentamiento	Sí (100 °C)	Sí (90 °C)	Sí (79 °C)	Sí (55 °C)	Sí (38 °C)
Extracción para tachos	Sí (a, b)	Sí (c)	No	No	No
Recuperación vap. expansión	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Ahorro energético (kW)	305	785	644	677	329
Generación total (kW)	2740				
Inversión total (US\$)	2.052.324				
VPN (US\$)	1.541.041				
Agua evaporada (kg/s)	53,59				
Brix final (%)	62,56%				

ción del primer efecto y no se aprovechaba el beneficio de los vapores de expansión; se encuentra una estructura óptima con extracciones de vapor en los cinco efectos para calentamiento del jugo, instalando tanques recuperadores de vapor de expansión también en los cinco efectos y alimentando los tachos de masa "C" con extracción del segundo efecto. En estas condiciones se obtendría una generación adicional de energía eléctrica de 2740 kW (38,5% de la actual), con una inversión de US\$2.052.324, obteniéndose un valor presente neto de US\$1.541.041. Se logró un beneficio adicional como es el incremento de la concentración de meladura de 61 a 62,56 °brix.

Es importante anotar que los resultados mostrados en la tabla 3 se obtuvieron para un precio de venta de la energía de \$40 USD/kWh correspondiente al valor promedio internacional; en Colombia se tienen precios del orden de \$25 USD/kWh y no se ofrece ningún incentivo para este tipo de proyectos. Bajo estas circunstancias y resolviendo de nuevo el problema de optimización, se obtiene la ruta de mayor rentabilidad con una generación de 2.366 kW y un valor presente neto del proyecto de apenas \$206.789 USD.

Los resultados de la estructura óptima para estas nuevas condiciones se muestran en la tabla 4, donde se puede apreciar que el descenso con-

Tabla 4 Estructura óptima sistema de evaporación con precio de venta de \$25USD/kWh

Cuerpo	1	2	3	4	5
Extracción calentamiento	Sí (100 °C)	Sí (90 °C)	Sí (79 °C)	Sí (55 °C)	No
Extracción para tachos	Sí (a, b)	Sí (c)	No	No	No
Recuperación vap. expansión	Sí	Sí	Sí	No	No
Ahorro energético (kW)	312	957	789	308	0
Generación total (kW)	2.366				
Inversión total (US\$)	1.641.279				
VPN (US\$)	206.789				
Agua evaporada (kg/s)	54,407				
Brix final (%)	66,22%				

siderable en el VPN no hace atractivo el proyecto, ya que cualquier situación adversa de orden técnico o atmosférico que con frecuencia se presentan en los ingenios azucareros podría ocasionar pérdidas considerables en el proyecto de cogeneración.

La situación descrita ha imposibilitado la puesta en marcha del proyecto de cogeneración presentado para el ingenio del ejemplo a pesar de que éste se ha venido desarrollando desde 1996 [1]. Adicionalmente, Colombia carece de una reglamentación precisa que permita garantizar un precio estable y la compra de excedentes como ocurre en los países europeos quienes adicionalmente otorgan una prima especial en el precio de venta a los autoproductores [7, 8]. Esperamos que la ley de uso racional de energía [9] que pone esta labor en manos del ministerio de minas y energía permita desarrollar efectivamente este tipo de proyectos.

Conclusiones y recomendaciones

El modelo desarrollado bajo la técnica de la programación dinámica, permite calcular de una forma sencilla la estructura económica óptima del sistema de evaporación en un ingenio cañero, obteniéndose así un ahorro considerable de vapor para generar energía eléctrica para la venta.

La aplicación del modelo a un ingenio azucarero permitió hallar la estructura óptima del sistema de evaporación encontrándose cómo el aprovechamiento de vapores de expansión y extracciones de vapor en todos los efectos para calentamiento y suministro a tachos de masa C permite un ahorro importante en el consumo de vapor. De esta forma se puede incrementar la generación de energía eléctrica en un 38,5% con aporte positivo a la rentabilidad de la empresa.

Como recomendación de este trabajo, se plantea la necesidad de una reglamentación que garantice la venta de excedentes energéticos y el precio de los mismos, de tal forma que las empresas se motiven para desarrollar estos proyectos contri-

buyendo a mejorar su rentabilidad y ayudándole al país en general al evitarle inversiones en grandes proyectos de generación y posibles racionalamientos.

Referencias

1. Villada, F., "Modelo Económico de Optimización para Cogeneración en un Ingenio Cañero", *International Sugar Journal*, Volume 98, May 1996, London, pp. 265-270.
2. Bellman, R., "Dynamic Programming", Princeton University Press, Princeton N.J., 1957.
3. Hugot, E. "Handbook of Sugar Cane Engineering", Elsevier, Amsterdam, 1986.
4. Murillo, J., "Optimización en la Planeación de Sistemas de Distribución", M.Sc. Thesis, Universidad Tecnológica de Pereira, Colombia, 1992.
5. Love, D., "The Use of Dynamic Programming for Determining Optimum Profiles of Operating Conditions in Continuous Pans", *Proceedings of the 19th General Assembly of the Commission Internationale Technique de Sucrierie*, Cambridge, 1991, pp. 95-117.
6. Baloh, T., Wittwer E., "Energy Manual for Sugar Factories", Berlín, 1995.
7. Ley 54/1997 del Sector Eléctrico, BOE No. 285, Madrid, 1997.
8. Real Decreto 2818/1998 de 23 de diciembre. BOE No. 312, Madrid, 1998.
9. Ley 697/2001 "Uso Racional de Energía", Diario Oficial 44.573, Bogotá, 2001.

Apéndice

Definiciones

Tacho: Evaporador de un solo efecto utilizado en los ingenios azucareros para cristalizar las mieles de azúcar concentradas.

Meladura: Miel concentrada que sale de los evaporadores para posteriormente ser cristalizada en los tachos.

Calandria: Envolvente de hierro fundido con dos placas de bronce o de hierro utilizada en los evaporados y los tachos. Dentro de estas placas se

ubican los tubos de cobre o bronce que constituyen la superficie calórica.

Brix: Porcentaje de sólidos disueltos en el jugo.

Terminología

m_{jc} = Masa de jugo concentrado saliente del evaporador.

m_{jd} = Masa de jugo diluido entrante al evaporador.

r_d = Contenido de sólidos disueltos en jugo diluido.

r_c = Contenido de sólidos disueltos en jugo concentrado.

n = Número de cuerpos o efectos del sistema de evaporación.

b_i = Masa de vapor extraído del cuerpo i .

E_{xi} = Vapor de expansión obtenido de la reducción de presión de los condensados del evaporador i .

h_{ci} = Entalpía específica de los condensados del evaporador i .

h_{Exi} = Entalpía específica del vapor de expansión generado a partir de los condensados del evaporador i .

P_s = Potencia de salida en eje de la turbina en kW.

CRV = Consumo real de vapor de una turbina en lb/kW-Hr.

h_1 = Entalpía total del vapor de entrada a la turbina.

h_2 = Entalpía total del vapor de escape de la turbina.

η_{tb} = Eficiencia termodinámica de la turbina.

η_{tr} = Eficiencia del transformador de voltaje conectado al generador.

η_r = Eficiencia del engranaje reductor de velocidad de la turbina.

η_g = Eficiencia del generador eléctrico.

η_a = Eficiencia de equipos auxiliares del grupo turbogenerador.