

Simulación de sistemas de cogeneración en la industria azucarera de Tucumán

Guillermo De Boeck*, L. Patricia Garolera De Nucci*, Federico J. Franck Colombres*,
Dora Paz* y Mario Octaviano**

RESUMEN

Se plantearon posibles modificaciones del circuito de vapor de un ingenio tipo de Tucumán, tendientes a obtener una mayor generación de excedentes de energía eléctrica. El ingenio tipo considerado tiene una capacidad de molienda de 10.000 t/día de caña con una producción de vapor a 20 bar y un consumo de vapor vivo de 51,4% caña. Las alternativas analizadas contemplan: distintos niveles de presión (43, 65 y 85 bar); tres tipos de turbo-generadores (de contrapresión, de extracción-contrapresión y de extracción-condensación); electrificación de los accionamientos motrices y diferentes consumos de vapor para calefacción en fábrica (35 y 40% caña). Se empleó el programa Cycle Tempo 5.0, herramienta flexible y de fácil utilización para el cálculo de los balances de masa y energía. El estudio de pre-factibilidad técnica realizado muestra que un ingenio tipo podría lograr excedentes de generación de alrededor de 89,3 kWh/t caña cambiando sus unidades de generación por equipos de 85 bar y turbogeneradores de extracción-condensación, para un consumo de vapor en fábrica de 35% caña.

Palabras clave: Cycle Tempo, simulación de procesos, cogeneración, industria azucarera.

ABSTRACT

Simulation of cogeneration systems in sugar factories in Tucumán

Feasible modifications of the steam scheme of a typical sugar factory in Tucumán were posed in order to obtain a higher surplus in electric power generation. The typical sugar factory considered in this work had a 10.000 t/day milling capacity and produced steam at 20 bar, consuming 51.4% cane of live steam. The analyzed alternatives for this type of factory included different pressure levels (43, 65 and 85 bar), three different types of turbo generators (back pressure, back pressure/extracting and condensing/extracting turbo generators), electrification of drives and different steam consumption rates for heating purposes (35 and 40% cane). Cycle Tempo 5.0 program, a flexible and easy-to-use tool for mass and energy balance calculations, was used. A technical pre-feasibility study showed that a typical sugar factory using 35% cane heating steam could indeed achieve a generation surplus of about 89.3 kWh/t cane by replacing its generation units with 85 bar equipment and extraction–condensation turbo generators.

Key words: Cycle Tempo, process simulation, cogeneration, sugar industry.

* Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC. **Ingenio Santa Bárbara. gdeboeck@eeaoc.org.ar

INTRODUCCIÓN

La crisis energética actual está impulsando a la industria azucarera local a transformarse en un complejo agroindustrial de producción diversificada (azúcar, bioetanol y energía). Lo mismo sucedió en países vecinos, donde la producción de bioelectricidad para venta a la red es un negocio de constante y rápido crecimiento (Olivério and Ferreira, 2010).

Desde el punto de vista energético, los ingenios azucareros del norte argentino manejan una cantidad de biomasa suficiente, proveniente de la caña de azúcar, capaz de proveer la energía necesaria para el proceso de producción de azúcar y alcohol, generando además un excedente de energía eléctrica para su venta a la red nacional (Aso *et al.*, 2008).

Este desafío exige modificaciones en el sector de generación de vapor para llegar a mayores niveles de presión de trabajo en colectores (mínimo 43 bar) y turbo-generadores de energía eléctrica más eficientes, para un mejor aprovechamiento del vapor utilizado (Walter, 1994; Lozano, 1998).

Según Paz y Cárdenas (2005), la operatividad de la industria azucarera es optimizable, tanto desde el punto de vista exergético como del energético, en busca de una máxima eficiencia en la generación y uso del vapor en el proceso fabril. Trabajos similares realizados para ingenios colombianos, demuestran la factibilidad de mejoras operativas en el proceso con vistas a generar excedentes energéticos (Castillo Monroy *et al.*, 2010).

La utilización de simuladores para el cálculo termodinámico, con el propósito de seleccionar la mejor alternativa como solución a una demanda o necesidad energética incorporando solo información primaria, es provechosa ya que permite comparar cuantitativamente las generaciones y los consumos que se obtendrían al instalar nuevos equipos o cambiar las condiciones de trabajo en el proceso productivo (De Boeck *et al.*, 2011).

A la fecha, un ingenio del sur de Tucumán ya genera excedentes de energía eléctrica para la venta a la red pública, gracias a la incorporación de calderas modernas de alta eficiencia que operan a 43 bar y un turbogenerador de extracción-contrapresión.

El objetivo del presente trabajo es mostrar las ventajas que ofrece un simulador energético para estudios de pre-factibilidad técnica de alternativas de modificación a un esquema termodinámico de una industria azucarera tipo de Tucumán, con el propósito de cogenerar energía eléctrica para venta a la red.

MATERIALES Y MÉTODOS

Planteo del caso base

El caso base corresponde a un ingenio tipo, de capacidad de molienda de 10.000 t/día, con una produc-

ción de vapor vivo de 51,4% caña a una presión y temperatura de 21 bar y 320°C.

El vapor se genera en calderas de baja presión que utilizan bagazo proveniente de la molienda como combustible, con un rendimiento térmico promedio de 62%.

Tanto en el accionamiento mecánico de los molinos del trapiche, como en los ventiladores de tiro inducido (VTI) y bombas de alimentación de las calderas, se considera el uso de turbinas de vapor tipo Elliot, que trabajan a una contrapresión de 2,4 bar.

La generación de energía eléctrica para abastecer el consumo propio en fábrica de los motores de las bombas de jugos, mieles y agua y el correspondiente al accionamiento de equipos de iluminación, se realiza a través de un turbogenerador de contrapresión que trabaja a una presión de escape de 2,4 bar.

La temperatura del vapor de escape de las turbinas de los sectores de trapiche y calderas es de 160°C, y la del turbogenerador 140°C, superior a la de saturación (126°C). Se consideró inyección de agua en la línea de vapor escape para llevarlo a un estado próximo a la saturación (130°C).

El consumo de vapor escape de calefacción comprende el utilizado en los recalentadores de jugo clarificado, en las primeras cajas evaporadoras y en el desaireador de condensados para alimentación de calderas. Las pérdidas de calor por radiación en recalentadores y cajas evaporadoras se consideraron en un 6%.

Las primeras cajas del sector de evaporación producen el vapor vegetal necesario para el calentamiento de los jugos mixto y encalado, para la concentración del jugo clarificado y para la etapa de cocimiento.

Se asumió que los calentadores de aire de secadores de azúcar y las centrífugas de azúcar consumen vapor vivo laminado a sus correspondientes presiones y que todas las pérdidas de vapor de válvulas de purga y trampas de vapor se producen en el colector de vapor vivo. Esta consideración se mantuvo para todos los casos de estudio siguientes, a pesar de que ello representó una ineficiencia energética, con el objeto de simplificar el subsecuente análisis comparativo.

La representación de este caso base, utilizando el programa Cycle Tempo, queda esquematizada en la Figura 1 A.

Los valores de entrada adoptados para el cálculo de los balances de materia y energía del esquema propuesto se muestran en la Tabla 1.

Análisis de alternativas de cogeneración

Se realizó un análisis, con simulación, de cinco esquemas factibles de mejoras en un circuito de vapor de un ingenio tipo (caso base), con el objeto de producir excedentes de energía eléctrica. Las modificaciones planteadas para el caso base fueron las descritas a continuación:

Tabla 1. Valores de entrada para un ingenio tipo de molienda de 10.000 t/día.

Sector/corriente	Parámetro			
	Presión [Bar]	Temp. [°C]	Potencia [Kw]	Otros
Caldera	-	-	-	$\eta = 62 \%$
Vapor vivo	21	320	-	-
Vapor escape	2,4	130	-	-
VTI y bombas calderas	21 - 2,4	320 - 160	1700	$\eta_{\text{global}} = 53 \%$
Turbinas trapiches	21 - 2,4	320 - 160	5350	$\eta_{\text{global}} = 53 \%$
Turbogenerador	21 - 2,4	320 - 140	6019	$\eta_{\text{global}} = 66 \%$
Consumo secadero de azúcar y centrífugas	-	-	-	3% caña
Pérdidas de vapor	-	-	-	1,5% caña
Jugo clarificado	1,65	98	-	100% caña
Calor perdido en evaporación y recalentadores	-	-	-	6,00%
Condensado de reposición	2,4	65	-	-
Saturador de vapor	2,4	80	-	-
Agua alimentación calderas	30	-	-	-
Vapor vegetal primer efecto (VG1)	1,65	-	-	Vapor saturado

Caso 1: reemplazo de calderas de 21 bar por calderas de 43 bar

En este caso se planteó la primera modificación al caso base, donde las actuales calderas bagaceras, de 21 bar de presión y baja eficiencia energética (62%), se reemplazaron por unidades modernas de 43 bar y mayor eficiencia (85%) (Figura 1 B). Se cambió el turbogenerador de contrapresión por uno de extracción-contrapresión, que pudo operar a la nueva presión de admisión de 43 bar.

Se mantuvieron los accionamientos mecánicos de los sectores trapiche y calderas con turbinas de vapor a igual consumo específico que el caso base. El consumo de vapor escape para calefacción, resultado de la simulación del caso base, se mantuvo constante, al igual que en los casos siguientes.

Caso 2: electrificación de los accionamientos mecánicos

Las modificaciones consideradas en este caso fueron la sustitución de las turbinas de vapor de los VTI, bombas de alimentación de calderas y molinos de trapiches por motores eléctricos (Figura 1 C). Como consecuencia de las modificaciones planteadas, todo el vapor escape para calefacción fue generado en el turbogenerador de contrapresión, quedando estrechamente ligada la generación de energía eléctrica al consumo de calefacción a fábrica.

Caso 3: sustitución del turbogenerador

Manteniendo el esquema del caso anterior, con electrificación de los sectores de calderas y trapiches, se planteó en este caso la sustitución del turbogenerador de contrapre-

sión por un equipo de extracción-condensación, con el propósito de consumir la totalidad del bagazo generado en la molienda e independizar parcialmente la generación de energía eléctrica del proceso de fabricación de azúcar (Figura 1 D).

Caso 4: incremento de la presión de trabajo a 65 bar

Se incrementó la presión de generación en calderas a 65 bar, manteniendo las condiciones de consumo y pérdidas de vapor de fábrica en la línea de escape como fue planteado en el caso 3 (Figura 1 D).

Caso 5: incremento de la presión de trabajo a 85 bar

Se incrementó a 85 bar la presión de generación en calderas usando el mismo circuito de vapor analizado en los casos 3 y 4 (Figura 1 D).

Siendo este el caso estudiado de mayor excedente de energía eléctrica, se adoptó este esquema para analizar la influencia de la disminución del consumo de vapor de calefacción a fábrica en la generación de excedentes de energía eléctrica, considerando dos casos:

Caso 5a: reducción del consumo específico de vapor a proceso a 40% caña.

Caso 5b: reducción del consumo específico de vapor a proceso a 35% caña.

Herramienta de cálculo utilizada para el análisis comparativo

Para la resolución de los balances de masa y energía del caso base y las mejoras propuestas para este, se utilizó

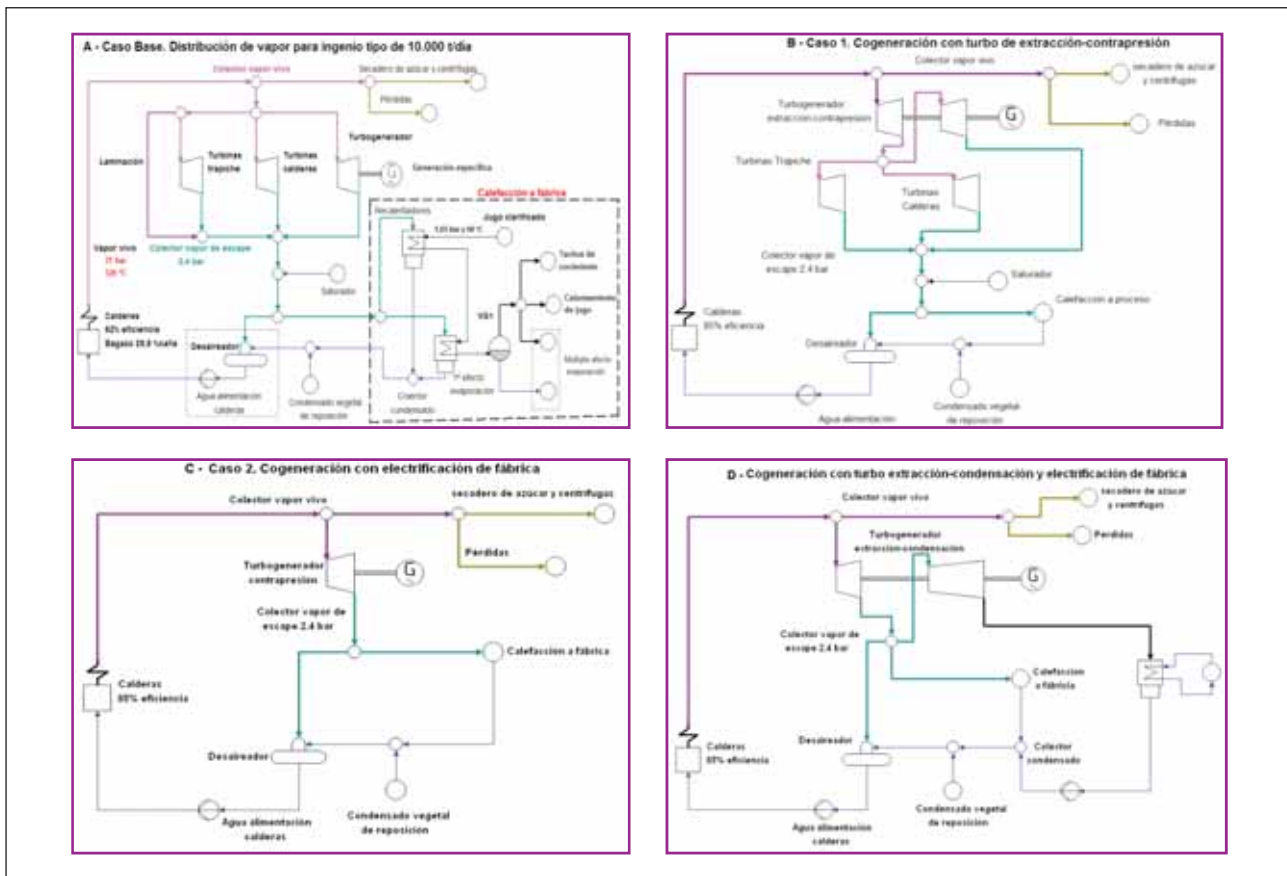


Figura 1. Esquemas de los casos analizados. A) Caso base: circuito de vapor de un ingenio tipo con capacidad de molienda de 10.000 t/día. B) Caso 1: sustitución de calderas antiguas por unidades modernas de 43 bar. C) Caso 2: electrificación de accionamientos mecánicos. D) Casos 3, 4, 5, 5a y 5b: esquema para ingenio tipo con turbogenerador de extracción-condensación y calderas modernas.

un simulador energético desarrollado por el departamento de Energía de la Universidad de Delft, Holanda, para el análisis termodinámico y la optimización de sistemas para la producción de electricidad, calor y refrigeración, llamado Cycle Tempo 5.0 (Universidad Tecnológica de Delft, Holanda, 2010).

Este simulador presenta como ventaja un esquema de programación avanzado con una amplia base de datos, que lo convierte en un programa altamente flexible y de clara estructuración que facilita la interactividad programa-usuario. Como desventaja, puede mencionarse que los resultados se muestran en unidades internacionales y con sistema de numeración inglés, los cuales no pueden ser modificados por el usuario.

Cálculo del consumo de bagazo

La eficiencia energética de los generadores de vapor (η_t) se define como la relación de la energía aprovechada respecto de la energía entregada, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\eta_{t(\text{caldera})} = \frac{\text{Energía}_{\text{aprovechada}}}{\text{Energía}_{\text{entregada}}} = \frac{\text{Energía}_{\text{vapor}} - \text{Energía}_{\text{agua}}}{\text{Energía}_{\text{combustible}}}$$

Para el caso de la industria azucarera, el combustible utilizado para la producción de vapor es el bagazo, producto de la molienda de la caña de azúcar. Su poder calorífico inferior (PCI) varía en función de su humedad relativa, porcentaje de sacarosa y preparación del bagazo según la siguiente fórmula simplificada (Hugot, 1986):

$$\text{PCI} = 17794 - 50,24 \times S - 203 \times W \quad [\text{kJ}/\text{kg}]$$

Donde:

W = porcentaje de humedad del bagazo

S = porcentaje de sacarosa en el bagazo

Considerando W = 51,5% y S = 2,0%, se obtiene
PCl_{bagazo} = 7239 kJ/kg.

Una vez resueltos los balances de materia y energía con el simulador y conocido el PCI, pudo determinarse el caudal de bagazo consumido (B) para el caso base y los casos 1 y 2, a partir de la expresión siguiente:

$$\text{Energía}_{\text{combustible}} = B \cdot \text{PCI}$$

En los casos 3, 4 y 5, la energía disponible en la totalidad del bagazo (30% caña) se ingresó como dato al simulador para resolver los balances de masa y energía a un máximo caudal de vapor vivo generado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resolución del caso base

Los resultados obtenidos de los balances de masa y energía para el caso base presentados por Cycle Tempo se muestran en la Figura 2. La energía suministrada a la caldera resultó de 250.092,31 kW, que correspondió a un consumo de bagazo de 29,8% caña. Esta energía aportada por el bagazo es la que generó en las calderas 214,5 t/h (51,4% caña) de vapor vivo necesario para satisfacer las demandas de calefacción del proceso de producción de azúcar y producir los 6019 Kw (14,4 kWh/t caña) de energía eléctrica para consumo propio en planta.

Otro resultado a destacar es la necesidad de adicionar una corriente de laminación (1,3% caña) para suplir el vapor escape necesario para calefacción, debido a que el aporte de las máquinas térmicas no es suficiente. Se observa también que el vapor escape utilizado en el primer efecto de evaporación genera 167 t/h (40% caña) de vapor vegetal 1 (VG1), que es usado en la etapa posterior del múltiple efecto de evaporación y en las etapas de cocimiento.

Resolución de los casos de cogeneración propuestos

Los principales resultados para el caso base y los

casos de cogeneración propuestos se muestran en la Tabla 2.

Para el caso 1, que contempla el cambio de las unidades de generación y presión de trabajo del vapor a valores de 43 bar y 406°C, manteniendo las turbinas de extracción-contrapresión, se observó un excedente de energía eléctrica de 24,6 kWh/t caña. En el caso 2, utilizando el nivel de presión del caso 1, pero introduciendo la electrificación de los sectores de trapiches y VTI de calderas, se produjo un excedente de 31,5 kWh/t caña.

En los casos 1 y 2, en los que se utilizaron turbinas de extracción-contrapresión para accionar los generadores eléctricos, se presentó la desventaja de la dependencia de la generación de energía eléctrica con respecto al consumo de vapor de calefacción de la fábrica y la imposibilidad de operar fuera del periodo de zafra, debido a que este tipo de turbinas requieren de un usuario del vapor escape.

Los casos 3, 4 y 5, que representaron un mismo circuito de vapor trabajando a tres diferentes niveles de presión, 43 bar, 65 bar y 85 bar, generaron un excedente de energía eléctrica de 63,0 kWh/t caña, 72,2 kWh/t caña y 79,5 kWh/t caña, respectivamente. Estos valores son considerablemente mayores a los de los casos 1 y 2, debido al reemplazo del turbogenerador de extracción-contrapresión por uno de extracción-condensación (Figura 3).

Como se observa en la Figura 3 en el caso 5, con el empleo de turbogeneradores de extracción-condensación, se lograron los mayores índices de generación de energía eléctrica, con la posibilidad de utilizar la totalidad

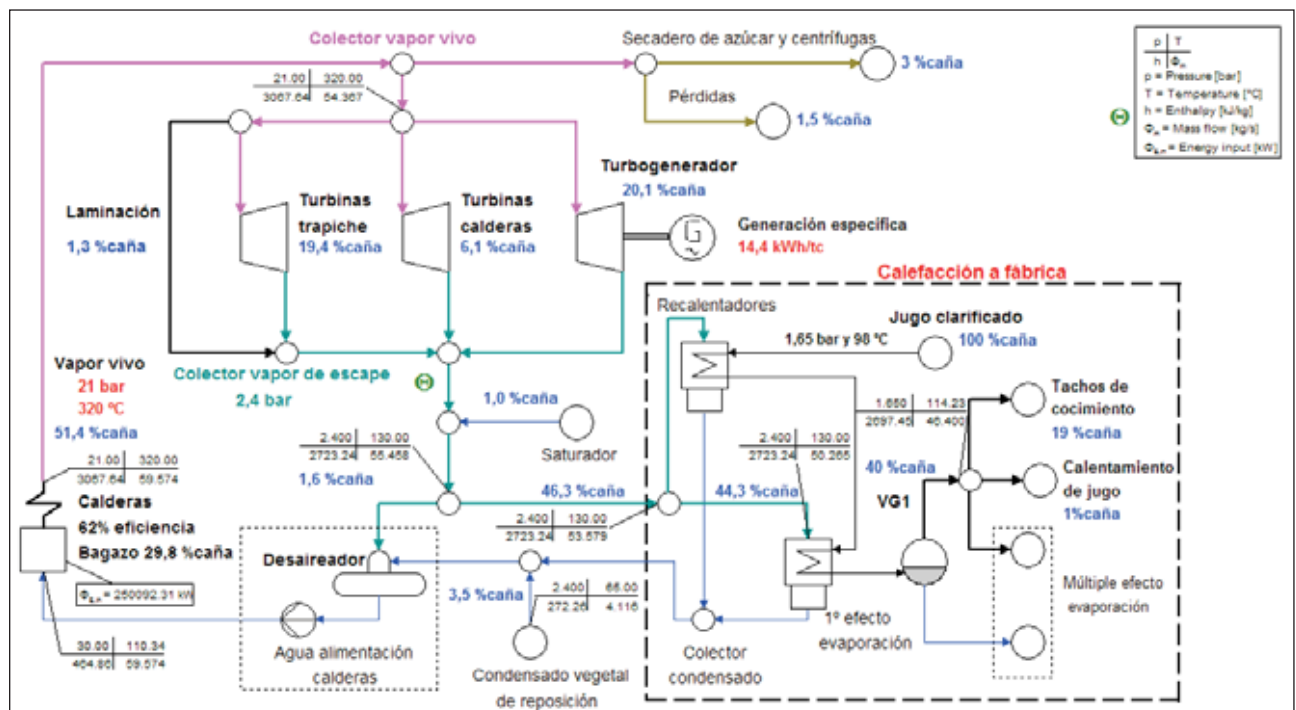


Figura 2. Caso base: distribución de vapor de un ingenio tipo con capacidad de molienda de 10.000 t caña/d.

Tabla 2. Resultados comparativos para el caso base y los casos de cogeneración.

	Caso base	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5	Caso 5a	Caso 5b
Presión y temperatura del vapor [bar] - [°C]	21 - 320	43 - 406	43 - 410	43 - 410	65 - 460	85 - 520	85 - 520	85 - 520
Eficiencia energética de calderas [%]	62	85	85	85	85	85	85	85
Generación de vapor en calderas [% caña]	51,4	51,8	52,4	66,7	64,7	63,1	63,1	63,1
Bagazo [% caña]	29,8	23,2	23,6	30,0	30,0	30,0	30,0	30,0
Índice de generación [kg _{vapor} /kg _{bagazo}]	1,7	2,2	2,2	2,2	2,2	1,9	1,9	1,9
Turbinas trapiche [% caña]	19,4	19,4	-	-	-	-	-	-
Turbinas calderas [% caña]	6,1	6,1	-	-	-	-	-	-
Turbogenerador [% caña]	20,1	47,3	47,5	62,2	60,2	58,6	58,6	58,6
Extracción a 21 bar [% caña]	-	25,5	-	-	-	-	-	-
Extracción a 2,4 bar [% caña]	-	-	-	49,3	49,1	48,9	43,4	39,1
Contrapresión a 2,4 bar [% caña]	20,1	21,8	47,5	-	-	-	-	-
Condensación a 0,1 bar [% caña]	-	-	-	12,9	11,1	9,7	15,2	19,6
Laminación [% caña]	1,3	-	-	-	-	-	-	-
Vapor escape [% caña]	47,9	47,9	47,5	49,3	49,1	48,9	43,4	39,1
Vapor a calefacción [% caña]	46,3	46,3	46,3	46,3	46,3	46,3	40,0	35,0
Energía eléctrica total [kWh/t]	14,4	39,0	63,2	94,7	103,9	111,2	116,7	121,0
Consumo energía interna [kWh/t]	14,4	14,4	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7	31,7
Energía eléctrica excedente [kWh/t]	0,0	24,6	31,5	63,0	72,2	79,5	85,0	89,3

del bagazo disponible (30% caña) y la independencia de la generación de energía eléctrica con respecto al consumo de vapor para calefacción en fábrica. Además, se amortiguarían las posibles fluctuaciones de molienda que llegarán a producirse por falta de caña en el período de zafra. Este caso resulta la mejor de las alternativas estudiadas hasta el momento, manteniendo el consumo de vapor para calefacción en fábrica (46,3% caña).

Para lograr mayores excedentes de energía eléctrica en el caso 5, se planteó la reducción del consumo de vapor escape de calefacción en fábrica a 40% caña (caso 5a) y 35% caña (caso 5b). Esto es posible mediante modificaciones en el esquema de las etapas de calentamiento, evaporación y cocimiento, no descriptas en este trabajo, ya que escapan a su objetivo.

Esta disminución del consumo de vapor escape en fábrica incrementó aún más la generación de energía eléctrica excedente para la venta a la red pública a valores de 85 y 89,3 kWh/t caña, siendo el esquema de máximo aprovechamiento energético el caso 5b (Figura 4).

Esta configuración tiene la flexibilidad de poder generar energía eléctrica en el período de interzafra. Para prolongar la generación eléctrica, puede utilizarse un combustible auxiliar, como por ejemplo el residuo agrícola de cosecha (RAC). Sin embargo, la desventaja de este esquema es el requerimiento de sistemas costosos de refrigeración para la línea de condensación.

CONCLUSIONES

La utilización del simulador Cycle Tempo 5.0 para la resolución de los balances de masa y energía ha demostrado ser una potente herramienta en estudios de pre-factibilidad de sistemas de cogeneración, gracias a la flexibilidad que este presenta para la reproducción, modificaciones y cálculo de los balances, como así también para la presentación de los valores obtenidos.

De los resultados obtenidos en el estudio de los casos 1 y 2, se pudo concluir que el solo hecho de reemplazar las calderas actuales, de baja eficiencia de generación (21 bar, 320°C), por equipos modernos con eficiencias y presiones mayores (43 bar, 406°C), redujo en un 6,6% caña el consumo de bagazo a iguales condiciones de consumo de vapor en fábrica, generando además excedentes de energía eléctrica para la venta a la red pública. Este ahorro en el consumo de bagazo permitiría disponer de combustible renovable en los casos donde se interrumpe la molienda de caña por falta de materia prima, sin tener que recurrir al uso de otro combustible adicional de origen fósil.

La incorporación de turbogeneradores de extracción-condensación y calderas de mayor presión permitió un máximo aprovechamiento del combustible generado en la molienda, elevando la generación específica de energía eléctrica. A su vez, el uso eficiente del vapor de calefacción en los sectores de calentamiento de jugo, evaporación y

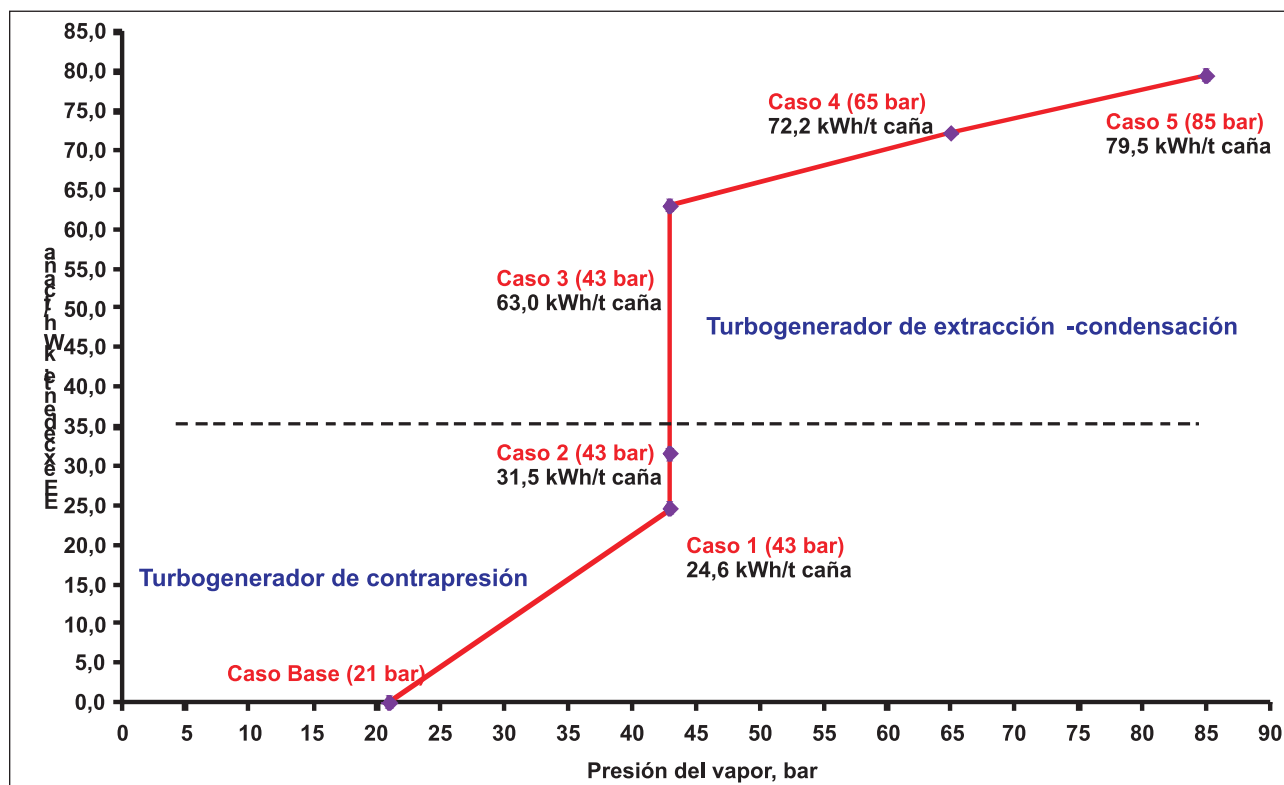


Figura 3. Excedente de energía eléctrica (EE) para las distintas presiones de vapor analizadas e igual consumo específico de vapor a fábrica.

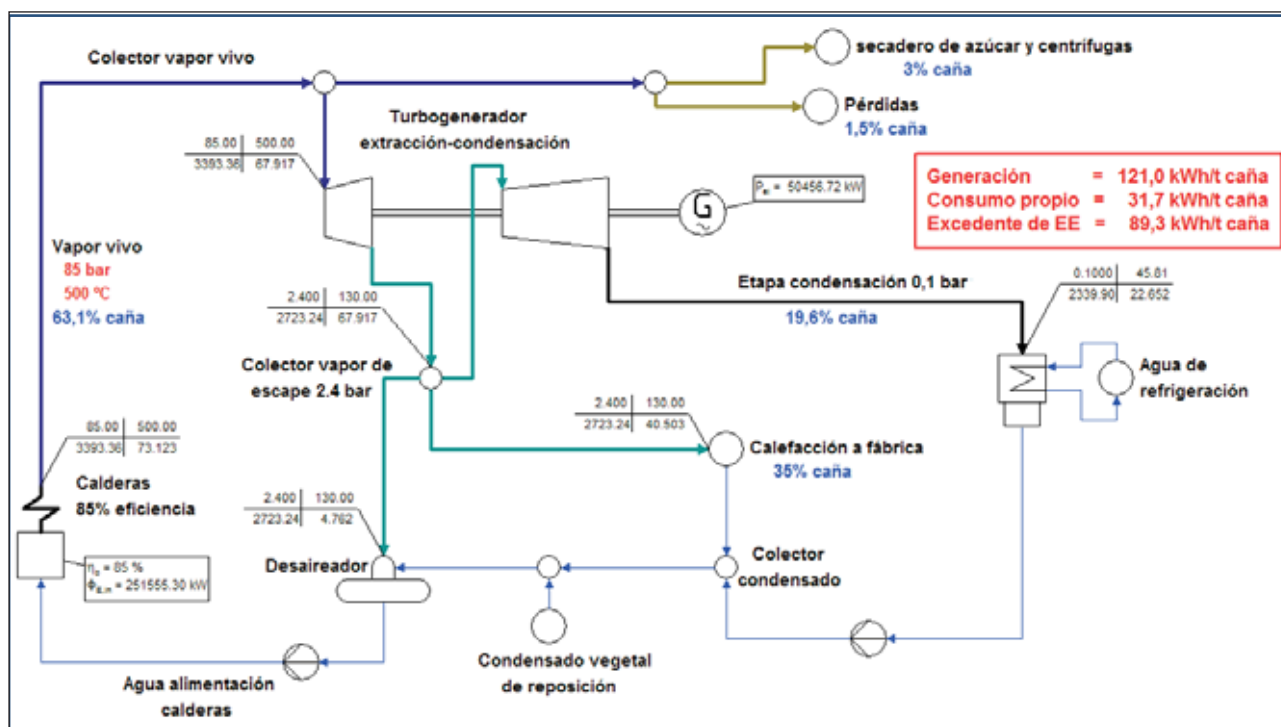


Figura 4. Caso 5b: turbogenerador de extracción-condensación a 85 bar y consumo de vapor en fábrica 35% caña.

cocimiento, permitió la reducción del vapor escape, dando lugar a una mayor cantidad de vapor en la etapa de condensación, la cual se tradujo en un incremento de dicha generación específica de energía eléctrica.

El esquema energético de presión de vapor vivo a 85 bar, generación de energía eléctrica con turbogenerador de extracción-condensación y electrificación de molinos y ventiladores de calderas a un consumo de vapor de calefacción de 35% caña (caso 5b) resultó la mejor alternativa estudiada, obteniéndose un excedente de energía eléctrica de 89,3 kWh/t caña para la venta a la red.

Los resultados de este análisis son la base para la realización a posterior de estudios acerca de la factibilidad técnico-económica de la mejor alternativa elegida en esta etapa.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Aso, G; E. Feijoo; S. Sosa y D. Paz. 2008.** Residuos agrícolas de la cosecha en verde de la caña de azúcar: experiencias de secado natural al campo. *Avance Agroind.* 29 (1): 19-22.
- Castillo Monroy, E. F; A. L. Gómez; D. Cobo and C. Aguirre. 2010.** Cogeneration potential in Colombian sugar mills. En: *Proc. Congress ISSCT*, 27, Veracruz, Mexico, pp. 1156-1163.
- De Boeck, G; D. Paz y M. Octaviano. 2011.** Uso de Cycle Tempo para cálculos energéticos. *Avance Agroind.* 31 (4): 30-35.
- Hugot, E. 1986.** Manual para ingenieros azucareros. 1. ed. en español. CECSA, México.
- Lozano, M. 1998.** Cogeneración. Área de máquinas y motores térmicos. Publicación interna. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza, España.
- Olivério, J. L. and F. M. Ferreira. 2010.** Cogeneration – a new source of income for sugar and ethanol mills or bioelectricity—a new business. En: *Proc. Congress ISSCT*, 27, Veracruz, Mexico, pp. 1564-1576.
- Paz, D. y G. J. Cárdenas. 2005.** Evaluación exergética de propuestas de disminución de consumo de vapor en usinas azucareras. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán* 82 (1-2): 1-10.
- Universidad Tecnológica de Delft, Holanda. 2010.** Cycle Tempo 5.0. Autor y responsable de la página Teus van der Stelt (T.P:vanderStelt@tudelft.nl). [En línea]. Disponible en <http://www.tudelft.nl/live/pagina.jsp?id=8c53f82e-a500-41f1-971b-629e832bfbef&lang=en>. (modificado 8 julio 2010; consultado 21 julio 2010).
- Walter, A. C. S. 1994.** Viabilidade e perspectivas da cogeração e da geração termelétrica junto ao setor sucro-alcooleira. Tesis doctoral. UNICAMP, Campinas, Brasil.