

Cogeneración en la industria azucarera

Carlos J. Agüero, Jorge R. Pisa, Roberto L. Andina y Franco E. Nanni

Dpto. de Mecánica, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán, Argentina.

Resumen

El objetivo de este trabajo es analizar la posibilidad que tienen las fábricas de azúcar de Tucumán, de generar energía eléctrica a partir de la combustión del bagazo de caña. La energía eléctrica generada debe superar el consumo propio de la fábrica, de tal manera que sea conveniente la venta del excedente a la red pública. En las calderas se genera vapor que se emplea en el accionamiento de turbinas y en procesos de calefacción; el combustible usado es el bagazo de la caña y en la mayoría de los casos un combustible adicional como el gas natural, que se trata de eliminar al mejorar la eficiencia de los procesos. Al final se hace una evaluación económica del proyecto para toda la industria azucarera de Tucumán.

Palabras clave: cogeneración, industria azucarera.

Cogeneration in sugar cane industry

Abstract

The objective of this study is to analyze the capability of Tucuman's sugar factories of generating electricity from the burning of sugarcane bagasse. The amount of electricity generated should surpass the factory uptake so that selling the surplus to the public electrical grid could be economically convenient. The boilers generate steam that is used in the operation of turbines (driving force) and heating processes. In the steam generators sugar cane bagasse is used as fuel. In most of the cases, though, an additional fuel such as natural gas is employed but this should be removed to improve the efficiency of the processes. Finally, an economical evaluation of the project is made.

Keywords: cogeneration, sugar industry.

Desarrollo

Los ingenios azucareros emplean vapor de agua en la elaboración de sus productos: azúcar, alcohol, papel. El vapor es generado en las calderas, mediante la combustión del bagazo de caña y eventualmente un combustible adicional como el gas natural.

El vapor es necesario para el accionamiento de máquinas motrices (Turbinas) y calefacción en los procesos de fabricación de los productos; es un caso de Cogeneración, o sea generación simultánea de Fuerza Motriz y Vapor para procesos de calefacción.

Fuerza Motriz es el trabajo mecánico que entregan las turbinas de vapor para el accionamiento de generadores eléctricos, molinos, bombas centrífugas, ventiladores, entre otros. Se emplean turbinas de contrapresión, o sea que el vapor de escape a presión mayor que la atmosférica, es conducido por tuberías hasta los equipos de transferencia de calor, que son calentadores, evaporadores, tachos de cocimiento, secadores, columnas destiladoras, digestores, etc.

En la mayoría de los ingenios de la provincia, las calderas generan vapor sobrecalentado, de 12 a 22 ata (11,8 a 21,5 bar) y 280 a 350 °C (553 a 623 K).

El combustible empleado es el bagazo proveniente de la molienda de la caña de azúcar. El bagazo disponible

varía entre 28% y 33% de la caña molida, dependiendo de la humedad con que sale de los trapiches (50% a 55% o más). El poder calorífico del bagazo varía entre 1500 y 1800 kcal/kg (62800 y 75300 kJ/kg), según la humedad y el contenido de cenizas (2 % y más, referido a base seca) que resulta mayor en el caso de caña cosechada mecánicamente con un elevado "trash".

El bagazo obtenido de la molienda de caña, debe ser suficiente para generar el vapor que necesita la fábrica. Si no es así, se debe emplear un combustible adicional como el gas natural o fuel oil. Ese combustible adicional, expresado como gas natural referido a caña molida, tiene valores variables entre 1 y 15 nm3 de gas/t de caña (mayor en algunos casos), dependiendo del consumo de vapor, capacidad y regularidad de molienda, poder calorífico del bagazo (función de la humedad y contenido de cenizas), eficiencia de calderas, entre otros factores.

El esquema de la figura 1 corresponde a una instalación simple del sector energético de una fábrica azucarera con una o más calderas para generar vapor de presión p_0 y temperatura t_0 , que se conduce por tuberías hasta las turbinas: (en el esquema se dibujó solamente dos); una fábrica con un trapiche de 6 molinos, cuchillas y desfibrador, 6 generadores de vapor, 10 bombas centrífugas y 2 o más generadores eléctricos puede tener alrededor de 25 turbinas de vapor.

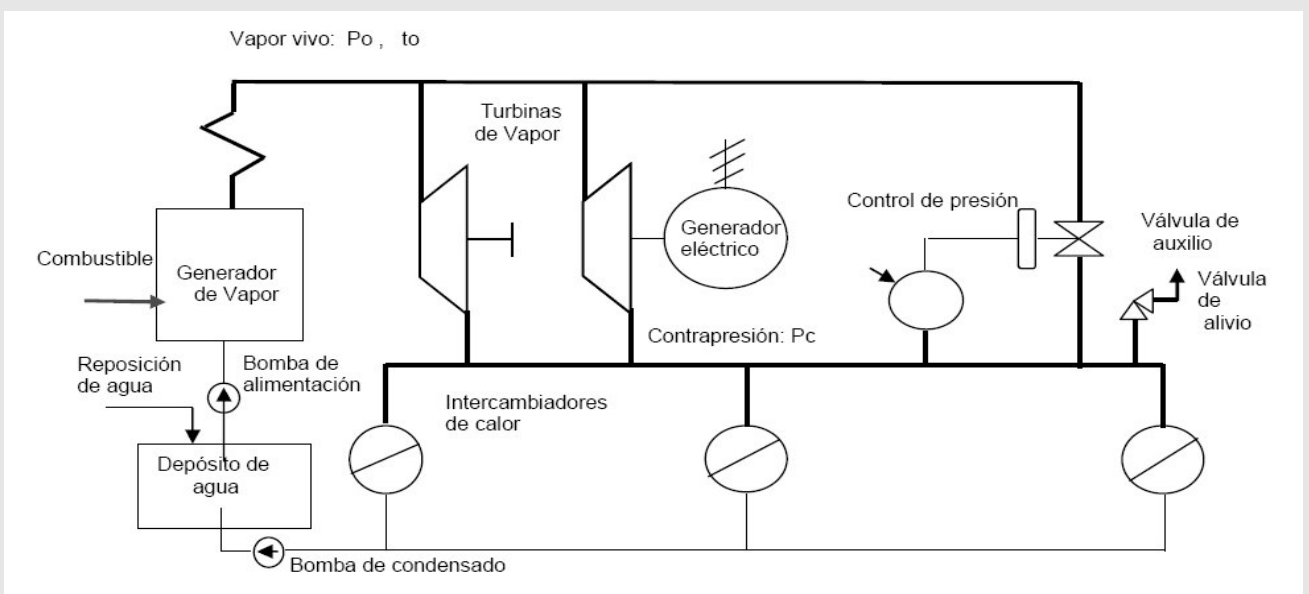


Fig. 1 Esquema simple de la instalación de una turbina industrial de contrapresión para cogeneración de fuerza motriz y vapor para procesos de calefacción.

El vapor de escape de todas las turbinas se conduce hasta los intercambiadores de calor. También se indican una válvula de auxilio para el caso de ser insuficiente el vapor de escape y una válvula de alivio para el caso en que sobre vapor; ambos casos son indeseables, por lo que deben ser evitados; esto se logra con la correcta selección de las turbinas. Este sistema es consecuente con el concepto de cogeneración propiamente dicha (o cogeneración pura), donde una industria de procesos genera su propio combustible y con un adecuado balance energético puede satisfacer sus demandas de Fuerza Motriz, Energía Eléctrica y vapor para los equipos intercambiadores de calor (calefacción de productos).

Selección de la Turbina de Vapor (TV)

La selección de las turbinas se hace en función del caudal de vapor G_v (kg/s) que necesita la fábrica para los procesos de transferencia de calor, estado del vapor a la presión p_c entre 2 y 4 ata (1,96 y 3,92 bar) aproximadamente saturado, potencia mecánica y eléctrica para el consumo propio, N_e (kW), es la potencia total:

$$N_e = N_i \times \text{Rend}_m \times \text{Rend}_{el}, \text{ donde } N_i \text{ es la potencia interna} = G_v \times \Delta i.$$

De esta expresión se deduce el salto de entalpía necesario Δi . Con el diagrama $i-s$ (entalpía – entropía)

se determina el estado del vapor necesario en la entrada de las turbinas. Ver figura 2.

La potencia N_e , referida a caña molida, se estima entre 25 y 30 kWh/t y el consumo de vapor entre 500 y 650 kg/t de caña. Estos valores dependen de la capacidad y eficiencia de la fábrica y los productos (azúcar crudo, blanco refinado, alcohol, papel y otros).

Para hacer una correcta selección de las TV necesarias, de modo que no falte ni sobre vapor de escape para la fábrica, se deben definir con precisión los parámetros mencionados en el párrafo anterior.

Con el caudal de vapor necesario G_v (kg/h), presión y temperatura del vapor vivo, se define el generador de vapor (uno o más).

Se puede hacer un prorrateo termodinámico de la energía aportada por el combustible, entre la generación de fuerza motriz y el vapor consumido en los procesos de calefacción. Para las condiciones del esquema mostrado resulta en término medio, 35% para generar la F. M. que necesita la fábrica y 65% para el vapor de escape empleado en los intercambiadores de calor. Estos valores tienen solamente un significado estadístico y pueden variar según el criterio empleado para el prorrateo; no son válidos para establecer precios de venta de la E.E. generada.

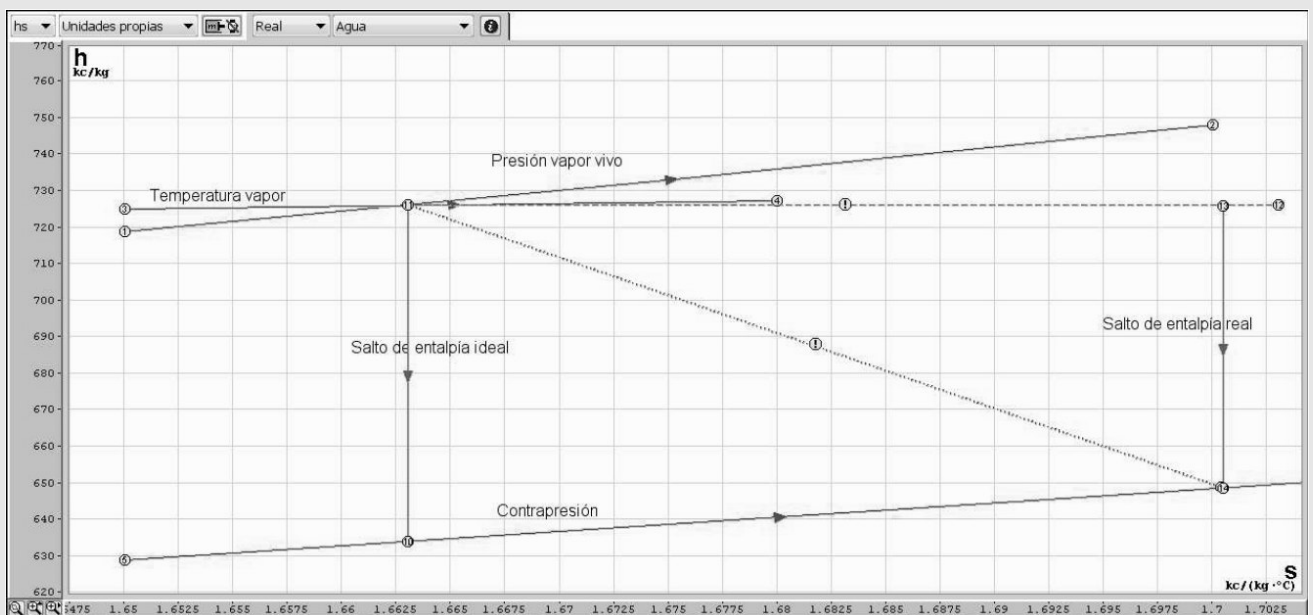


Fig. 2 Esquema del diagrama entalpía – entropía para vapor de agua.

Incremento de la generación de energía eléctrica

En caso de querer generar más energía eléctrica, ya sea por un mayor consumo propio o para vender el excedente, con el mismo caudal de vapor G_v que requiere la fábrica, existen varias posibilidades:

1) Generar vapor con una caldera de mayor presión y temperatura 64 bar, 450 °C (723 K), por ejemplo y también mejor rendimiento; con el mayor salto de entalpía disponible para la TV de accionamiento del generador eléctrico, se obtiene una potencia mayor. Es necesario cambiar el generador y la turbina, que debe ser del mismo tipo que la anterior o sea de contrapresión.

Con la mejor eficiencia de las calderas, el consumo de combustible (bagazo) puede ser el mismo o menor y se eliminaría el adicional.

2) Instalar una TV de alta presión y temperatura, de contrapresión y superpuesta a las existentes. También es necesaria una nueva caldera que genere el vapor a mayor presión y temperatura. Ver figura 3.

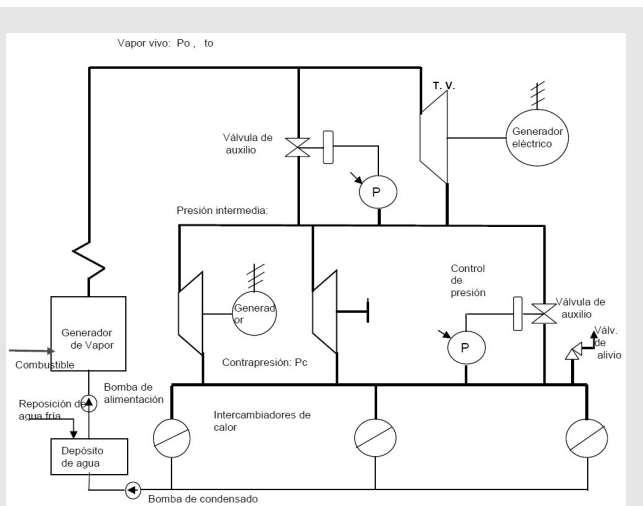


Fig. 3 Instalación con una TV superpuesta.

3) Una TV de contrapresión, de alta presión y con extracción de vapor para las TV de baja presión. Todo el vapor de escape se emplea en la fábrica. Ver figura 4.

Desde un punto de vista termodinámico, es más eficiente un sistema con TV de contrapresión, donde todo el vapor de escape se consume en los procesos de

calefacción, sin necesidad de accionar las válvulas de auxilio o alivio; pero la capacidad de generación de energía eléctrica es condicionada por el consumo de vapor de la fábrica.

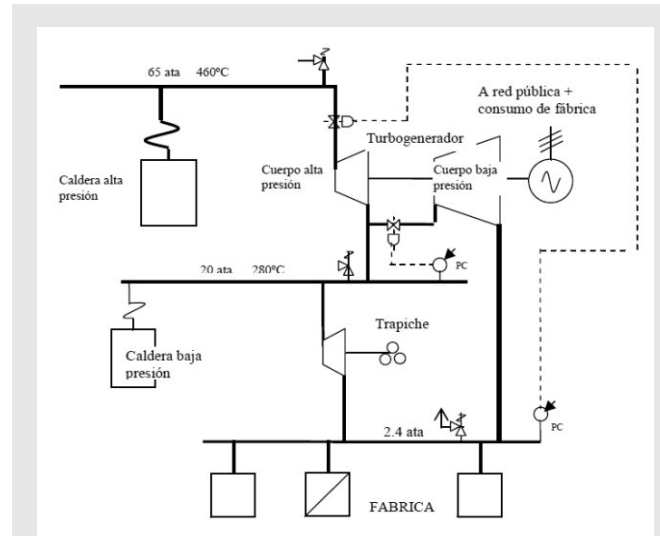


Fig. 4 TV de contrapresión con extracción de vapor (con unidades internacionales).

Cogeneración con TV con extracción de vapor y cuerpo de condensación

Cuando el objetivo es generar una potencia eléctrica mayor, empleando todo el bagazo disponible y eventualmente el desecho agrícola de la caña cosechada (RAC), es necesaria una instalación como la que se muestra en figura 5, con una TV con extracción de vapor para los procesos de calefacción de la fábrica y un cuerpo de condensación que trabaja con el vapor excedente. La TV de un solo eje, acciona el generador eléctrico que provee toda la energía eléctrica necesaria para el accionamiento de todos los molinos, bombas, ventiladores, etc., mediante motores eléctricos.

El excedente de energía eléctrica se entrega a la red pública, de modo que el generador está conectado en paralelo con dicha red.

Publicación registrada en

latindex

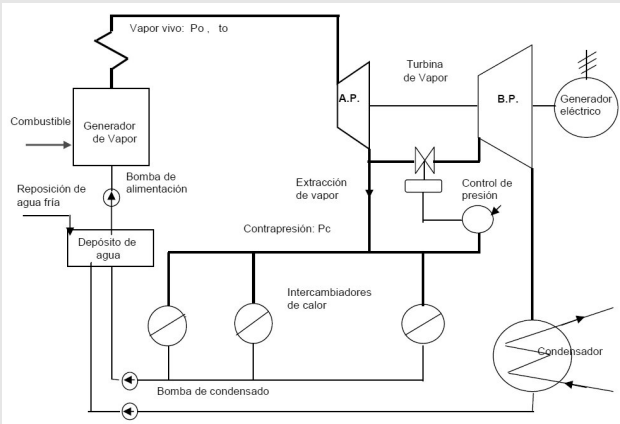


Fig. 5 TV industrial con extracción de vapor y un cuerpo de condensación.

Con todo el combustible (bagazo) disponible, se genera vapor a presión p_0 y temperatura t_0 , que se conduce hasta la TV que consta de un cuerpo de alta presión (AP) y otro de baja presión (BP). El 100% de vapor fluye a través del cuerpo AP, que entrega parte del trabajo mecánico necesario para el accionamiento del generador eléctrico (GE). Con el control de la presión p_c se regula la extracción de vapor que necesita la fábrica y el vapor restante se expande en el cuerpo BP hasta la presión en el condensador (vacío), refrigerado con agua a la temperatura ambiente.

Para ser consecuente con la definición que se hizo de procesos de cogeneración, se debe aclarar que este sistema no es un caso de cogeneración pura, puesto que el vapor que fluye por el cuerpo de baja presión hacia el condensador, realiza solamente trabajo para la generación de E.E. y no se emplea en procesos de calefacción. Además se debería analizar la conveniencia o no, de emplear el bagazo excedente como materia prima para la fabricación de otros productos (papel, alimento balanceado) o como combustible gasificado en un ciclo combinado con turbina de gas y caldera de recuperación, con un rendimiento térmico superior.

Ejemplo de cálculo

Para esclarecer los conceptos expuestos, se realiza a continuación un cálculo de la potencia eléctrica generada por medio de este sistema, suponiendo que el generador eléctrico entrega a la fábrica la energía eléctrica que necesita y el excedente a la red pública. Todos los accionamientos son eléctricos.

Tabla 1: Planilla de cálculo

Descripción	Sistema Técnico	Sist. Internacional
Molienda diaria de caña	10.000,00	tn/día
Horas efectivas de molienda diaria	24,00	horas
Molienda efectiva por hora	416,67	tn/h
Bagazo disponible (% caña)	29,00	
Bagazo disponible	120.833,33	kg/h
Rendimiento de la caldera	2,10	kg vap/kg bag
Generación de vapor con las calderas	253,75	tn/h
Presión del vapor vivo	68,00	ata
Temperatura del vapor vivo	460,00	°C
Volumen específico del vapor vivo	0,05	m ³ /kg
Entalpía del vapor vivo	792,00	kcal/kg
Entalpía extracción a 2,2 ata	647,00	kcal/kg
Salto de entalpía efectivo en el cuerpo de alta presión	135,20	kcal/kg
Entalpía vapor al condensador(0,08ata título: 0,9)	557,70	kcal/kg
Salto de entalpía total	234,30	kcal/kg
Bagazo consumido	120.833,33	kg bag/h
Consumo de vapor en fábrica de azúcar (estimado)	550,00	kg/tn caña
Consumo de vapor (Extracción de 2,2 ata)	229.166,67	kg/h
Vapor al condensador	24.583,33	kg/h
Potencia eléctrica total generada	42.724,66	kW
Consumo específico de En. El.	28,00	kWh/t caña
Potencia eléctrica para la fábrica	11.666,67	kW
Potencia eléctrica excedente	31.057,99	kW
Energía eléctrica excedente por día de molienda	745.391,86	kWh/día
En. El. total generada por ton. de caña molida	102,54	kWh/t caña
En. El. excedente por ton. de caña molida	74,54	kWh/t caña
En. El. generada por ton. de bagazo consumido	353,58	kWh/t bag

Se considera una fábrica con capacidad de molienda diaria de 10.000 t de caña (416,67 t/h); consumo específico de vapor de 550 kg/t de caña, o sea que la extracción de vapor en la TV es $416,67 \times 550 = 229.168$ kg/h.

Nota 1: En esta planilla se detalla el cálculo de las potencias eléctricas total y excedente generada. Con fines prácticos se consideró un rendimiento de la turbina de vapor donde están incluidos los rendimientos mecánicos y eléctricos. O sea los valores de los saltos de entalpía se interpretan como efectivos.
 Potencia eléctrica generada = $(229.168 \times 135,2 + 24.582 \times 234,2) / 860$
 $\Delta i_e = 135,2$ kcal/kg (566 kJ/kg)
 Equivalencia de un kWh = 860 kcal.

Nota 2: Se supone que todos los accionamientos de la fábrica son eléctricos.

Nota 3: $41.028,49$ kW x 24 hs / 10.000 t de caña = 98,47 kWh/t de caña.

Nota 4: $98,47 - 28 = 70,47$ kWh/t de caña.

Nota 5: $41.028,49$ kW / 120,833 t bag/h = 339,55 kWh/t bag

Conclusiones técnicas

Para obtener estos resultados, serían necesarias básicamente calderas para generar 260 t/h de vapor con una eficiencia de 2,1 kg de vapor/kg de bagazo (o mayor) y una TV con generador eléctrico de 45 MW.

En el ejemplo desarrollado en la planilla anterior, se determina que la posibilidad de generación de energía eléctrica total referida a caña molida: 98,47 kWh/t y disponer de un excedente de 70,47 kWh/t, depende de varios factores:

- 1) Combustible disponible: cantidad y poder calorífico.
- 2) Eficiencia del generador de vapor, presión y temperatura.
- 3) Consumo de vapor de la fábrica.
- 4) Consumo de fuerza motriz de la fábrica.

En la zafra 2011, la molienda de caña en Tucumán fue aproximadamente de 13.000.000 toneladas (s/partes de producción del centro azucarero) y conforme a los valores de la planilla de cálculo, con el excedente de E.E. de 70,47 kWh/t de caña, y en 150 días de zafra, resulta:

$70,47 \text{ kWh/t} \times 13.000.000 / 1000 = 916.110$
MWh/zafra
 $916.110 / 150 = 6.107,4$ MWh/día
Potencia eléctrica excedente: 254,47 MW

Los picos de consumo de Tucumán superan los 400 MW.

Para determinar con mayor precisión los valores posibles de energía total y excedente, es necesario realizar en cada fábrica azucarera un balance energético para evaluar los factores mencionados anteriormente, siendo necesario contar con la conformidad de la empresa y la colaboración del personal técnico.

Se debe hacer la evaluación económica de cada proyecto, con los costos de los equipos, montaje, conexiones eléctricas, puesta en marcha, mano de obra, etc. y las amortizaciones, considerando los precios de la energía eléctrica en los mercados interno y externo.

Cuando se analiza el costo de los combustibles empleados, se debe tener en cuenta que el bagazo em-

pleado ya existe, o sea que no hay un costo adicional y además, con la mayor eficiencia del generador de vapor, se puede eliminar el consumo de combustible adicional (gas natural) que representa varios millones de U\$S por zafra.

Considerando todos los ingenios de Tucumán, con un consumo específico medio de 8nm³ de gas/t de caña, resulta un ahorro de:

$8 \text{ nm}^3/\text{t} \times 13.000.000 \text{ t/zafra} = 104 \times 10^6 \text{ nm}^3 \text{ de gas/zafra}$
Equivalencia en BTU: $104 \times 10^6 \times 9300 \times 3,97 = 3.839.784 \times 10^6 \text{ BTU}$.

Además de este ahorro en combustible adicional, se puede considerar que al entregar a la red 969.020 MWh en una zafra, las centrales termoeléctricas reducen también el consumo de combustible, que en el caso de un ciclo combinado con turbinas de gas y vapor con rendimiento aproximado de 50% o sea un consumo específico de 0,20 nm³ de gas/kWh, sería: $969.020.000 \times 0,20 = 193.804.000 \text{ nm}^3$.

Impacto ambiental: Disminución de la emisión de dióxido de carbono (CO₂) al medio ambiente

Con la reducción del empleo de combustible adicional (como el gas natural), sería menor la emisión de gases por las chimeneas de los generadores de vapor. Estos gases tienen un porcentaje de CO₂ (1,1 nm³/nm³ de gas natural) que contribuye al calentamiento global, debido al efecto invernadero. Con la reducción de gas natural en las centrales térmicas, se reduciría la emisión de CO₂ al ambiente si los ingenios, al no tener cogeneración, deben quemar la totalidad de su bagazo para satisfacer sus necesidades energéticas, como actualmente sucede.

Al poner en práctica el sistema de cogeneración planteado, es de esperar una reducción de consumo de gas natural en las centrales térmicas del sistema público, lo que traería aparejado una reducción de la emisión de CO₂ al ambiente.

Es importante observar que el gas natural ahorrado corresponde a un combustible fósil no renovable, que es reemplazado por una biomasa renovable.

Evaluación económica del proyecto

El estudio tiene como objetivo llevar adelante unos cálculos preliminares acerca de la viabilidad de un proyecto integral de reconversión de la industria azucarera de Tucumán (aplicable también al norte del país), dirigido a:

- 1) Mejorar la eficiencia de las fábricas azucareras existentes en lo que atañe al consumo de energía.
- 2) Eliminar el consumo de combustibles adicionales al bagazo en los generadores de vapor.
- 3) Generar un excedente de energía eléctrica para ser vendida al Sistema Interconectado Nacional.

De acuerdo a los estudios adjuntos de ingeniería, estos objetivos pueden conseguirse en forma simultánea realizando inversiones y renovación de equipamiento en las plantas existentes.

En esta Etapa I del estudio se trabajará con una estimación acerca de las necesidades de inversión que sean capaces de satisfacer los objetivos 1, 2 y 3. La estimación es una media de U\$S 1.000 por KW (u\$S 1.000.000 POR MGW DE CAPACIDAD INSTALADA) de potencia eléctrica, donde se incluye el consumo propio de la fábrica.

En una etapa posterior (Etapa II) se podrá "afinar" esta estimación, mediante un relevamiento de todas y cada una de las fábricas ya existentes, de modo de disponer de un cálculo más preciso acerca de los requerimientos de cada una de ellas; esto es así porque el conjunto de fábricas azucareras funcionan con máquinas, equipos y procesos de diferentes características. Algunas fábricas con una tecnología más moderna podrán alcanzar los objetivos 1, 2 y 3, con montos menores (U\$S/MWh a vender) que otras. Para esta Etapa II se requerirá de fondos destinados a solventar los estudios "uno a uno" que se requieran realizar en cada fábrica.

En un proyecto mayor, se puede considerar una producción de alcohol adicional al que ya se produce como subproducto, con molienda de caña específica para alcohol. También se podría usar como combustible para generar más vapor, el residuo agrícola de la caña (RAC) que actualmente queda en el campo, con los inconvenientes conocidos.

Sería necesario hacer un nuevo análisis para deter-

minar la generación de E.E. considerando el mayor volumen de bagazo disponible, el aumento del consumo de vapor en la destilería y seleccionar una TV de mayor potencia.

Análisis económico

Utilizando los datos que se desprenden del estudio de ingeniería del proyecto, podemos valorizar los ingresos esperados, que son básicamente de dos clases:

- a) Energía eléctrica generada y vendida al sistema interconectado
- b) Gas economizado (8 nm³ por tonelada de caña molida)

La molienda de la zafra en Tucumán en 2011 alcanzó 13 millones de toneladas de caña.

A un consumo de 8 nm³ de gas por tonelada de caña molida se ahorrarían:

$13.000.000 \cdot 8 = 104.000.000 \text{ nm}^3$, equivalentes 3.839.784 millones de BTU (Poder calorífico del gas: 9.300 kcal/nm³ y 1kcal = 3,97 BTU; 27,08 nm³ equivale a 1.000.000 BTU).

Números preliminares

A) Venta de energía eléctrica: 969.009,6 MWh * 90 U\$S/MWh = 87.210.864 U\$S.

B) Ahorro de gas: 3.839.784 millones de BTU * 10 U\$S/millón BTU = 38.397.840 U\$S.

Lo que representa unos ingresos anuales de 125.608.704 U\$S (combinando A y B).

Los valores mencionados pueden observarse en la Planilla de Cálculo adjunta (tabla 2).

Para la inversión, hemos redondeado la cifra en 400 millones de dólares; como puede verse hemos tomado un precio de venta de la energía de 90 U\$S por MWh y para el gas ahorrado hemos computado 10 U\$S por millón de BTU, cifra equivalente a la mitad de lo que Argentina pagaba por el gas importado de Qatar en los años 2011 y 2012.

Si bien es verdad que el precio al que se vende el MWh en el mercado argentino es menor que los 90 U\$S, también es cierto que esos precios de venta no reflejan los costos de producción, son subsidiados, no son

sustentables en el tiempo y son el origen de graves distorsiones en el mercado eléctrico y energético de Argentina.

El precio de 90 U\$S el MWh, es un precio más que razonable, ya que se equipara con el valor internacional de un barril de petróleo. Conviene tener en cuenta que para producir un MWh en una central térmica se necesita "quemar" aproximadamente un barril de petróleo, siendo esto, solamente el insumo y falta todavía agregar el costo de capital de la estación generadora (las máquinas, los equipos, la mano de obra, etc.).

De modo tal que, valorizar el MWh de energía eléctrica al precio de un barril de petróleo en el mercado mundial significa una hipótesis de mínima.

El periodo de vida: El tiempo asignado para el Proyecto es de 20 años.

La tasa de retorno: Como se sabe, la tasa interna de retorno sobre el capital invertido (TIR) refleja el rendimiento esperado medido en centavos- por cada dólar colocado en el proyecto y por año.

De aquí se desprende que se podrían generar 31 centavos de dólar por año por cada dólar invertido, bajo las condiciones tomadas como "de base".

Análisis de sensibilidad

El Proyecto es tan atractivo, desde el punto de vista de su rentabilidad que "tolera" unas reducciones significativas en los valores de la energía generada y/o ahorrada: En efecto, aún si el precio (o la cantidad) de gas ahorrado fuera cero, el proyecto seguiría siendo rentable al 20% anual real con un Valor Actual Neto de 24,61 millones de dólares. Lo anterior quiere decir que si, aún no se ahorrara el gas que se supone o que se lo entregara a título gratuito, el proyecto sigue siendo rentable.

Si el gas no tuviera un valor nulo, pero la electricidad se vendiera a un precio menor (por ejemplo 45 U\$S por MWh en vez de 90) seguiríamos teniendo rentabilidad de 20% anual y VAN cero (esto es, la tasa interna de retorno TIR es de 20% a unos precios del MWh de 45 dólares y un precio del millón de BTU de 10 U\$S).

El Peor de los Casos: Con el gas a 5 U\$S por millón de BTU (la cuarta parte de lo que pagamos a Qatar y

menos de lo que pagamos a Bolivia) y la electricidad a 65 U\$S el MGWH (los dos tercios de lo que cuesta el petróleo para generarla) el Proyecto seguiría siendo rentable con una tasa de 20% al año como Tasa Interna de Retorno y un VAN CERO.

Valor crítico para la E. E. vendida: El valor crítico o "de corte" para la electricidad generada y vendida es de 65 U\$S el MWh, sin embargo la rentabilidad obtenida seguiría siendo 20% al año, si se financiara con tasas más bajas que 20%, el proyecto obviamente "soportaría" precios aún menores para la electricidad entregada a la Red.

Mínimo período de duración del proyecto: A veces también definido como "periodo de recuperación del capital", en SEIS años se recupera la inversión "ganando" una tasa de 20% real al año.

Máxima inversión: Si los requerimiento estimados de capital estuvieran errados (es decir hubiéramos subestimado las inversiones necesarias y las mismas fueran UN 50% MAYORES (muy improbable) el Proyecto continuaría siendo rentable al 20% al año.

Ahorro de contaminación y bonos de carbón: Al "liberar" gas para otros usos por parte de la industria azucarera significa que se ahorra emisión de CO₂ en unas magnitudes significativas, las que podrían ser cambiadas por bonos de carbón en los mercados internacionales. Sin embargo, estas "externalidades positivas" no fueron consideradas en la presente etapa de estudio.

Obviamente su cómputo mejoraría aun más la rentabilidad del Proyecto.

Importancia de la energía generada, frente al consumo de Tucumán: En el Anexo estadístico podemos observar que el consumo o energía facturada para el año 2009 en la Provincia de Tucumán alcanzó los 2.012.588 MWh/año, de aquí se desprende que lo generado por el Proyecto (969.009 MWh/año) es equivalente a casi la mitad del consumo de Tucumán en 2009. (El consumo de Tucumán para el año 2012 puede ser un 15% mayor, unos 2.300.000 MWh/año).

Conclusiones económicas

Por todo lo señalado anteriormente podemos concluir lo siguiente:

- 1) Proyecto altamente rentable desde el punto de vista económico, financiero y ambiental.
- 2) Proyecto deseable desde el punto de vista de la mayor eficacia en el uso de los recursos naturales, especialmente de la biomasa contenida en la materia vegetal.
- 3) Proyecto susceptible de ser mejorado mediante la expansión de la molienda y de la siembra con el propósito de incrementar la producción de alcohol (y por lo tanto de electricidad).
- 4) Proyecto que puede llevarse adelante con tecnologías y recursos locales (industria metalúrgica de Tucumán) con alta generación de Valor Agregado local.
- 5) Posibilidad de exportación del Know How al resto de los países azucareros del Cono Sur.
- 6) El proyecto tiene un potencial para generar TODA la energía que necesita Tucumán en un año, aún cuando su producción tiene la estacionalidad de la zafra azucarera.
- 7) Con los valores con los que hemos trabajado se genera alrededor de 50% del consumo del año 2009, sin embargo esta capacidad puede expandirse si se incorpora al proceso el "RAC", lo que eliminaría la quema del mismo en el campo.

El funcionamiento de los generadores en el año completo (y no solo en el periodo de zafra) introduciría unos costos adicionales que en este trabajo no fueron evaluados, sin embargo el capital inmovilizado durante seis meses estaría operativo el año entero.

Para que el funcionamiento fuera posible en todo el año - o al menos durante 300 días- sería necesario resolver problemas de almacenamiento y recolección del RAC.

Tabla 2: Análisis Económico y Financiero

CALCULOS PRELIMINARES Y ANALISIS DE SENSIBILIDAD EN UN PROYECTO DE CO-GENERACION EN LA INDUSTRIA AZUCARERA DE TUCUMAN		
PRODUCCION ELECTRICA	969.009,6	MWh/AÑO
AHORRO DE GAS	38.397.840	MILLONES DE BTU /AÑO
INGRESOS	125.608.804	DOLARES/AÑO
INVERSION	400.000.000	US\$
INGRESOS GAS AHORRADO	3.839.784	MILLONES DE BTU
ENERGIA VENDIDA	969.009,6	MWh/AÑO
PRECIO GAS	10	US\$/MILLON DE BTU
PRECIO ENERG	90	US\$/MWh
TIEMPO	20	AÑOS
INGRESOS GLOBALES	125.608.704	DOLARES
VAN AL 20% (****)	\$ 211.661.599	DOLARES
TIR (***)	31,26%	TASA ANUAL DE RENDIMIENTO S/CAPITAL INVERTIDO
*** EL SIGNIFICADO DE LA "TIR" ES EL SIGUIENTE: BAJO LAS CONDICIONES EXPLICITADAS EL RENDIMIENTO ANUAL EN MONEDA CONSTANTE DEL CAPITAL INVERTIDO EN EL PROYECTO SERIA 31,26% AL AÑO.		
**** EL SIGNIFICADO DEL "VAN" AL 20% ES EL SIGUIENTE: OBTENIENDO UNA RENTABILIDAD DE 20% SOBRE EL CAPITAL INVERTIDO EL PROYECTO ARROJARIA UN VALOR ACTUAL DE 211.661.599 DOLARES		
***** EL ANALISIS DE SENSIBILIDAD REVELA QUE EL PROYECTO ES "RESISTENTE" A UN ESCENARIO BASTANTE PEOR Y QUE CONTINUA SIENDO RENTABLE BAJO CONDICIONES ADVERSAS.		
ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL PROYECTO A MODIFICACIONES EN ALGUNAS VARIABLES		
MINIMO PRECIO DEL GAS	0 \$	CON EL PRECIO DEL GAS CERO EL VAN SIGUE SIENDO POSITIVO E IGUAL A \$ 24,61 MILLONES A UNA TASA DE 20% ANUAL
MINIMO PRECIO DE LA ELECTRICIDAD Y MINIMO PRECIO PARA EL GAS		CON UN PRECIO DE LA ENERGIA DE 45,14 u\$s POR MWh EL VAN SERIA CERO A UNA TASA DE 20% AL AÑO CON UN PRECIO DE LA ENERGIA VENDIDA DE 65 US\$ POR MWh Y DE 5 u\$s POR MILLON DE BTU PARA EL GAS OBTENDRIAMOS EL MISMO VALOR QUE EN EL CASO QUE EL GAS VALIESE CERO
MINIMAS CANTIDADES DE ELECTRICIDAD		CON 486.063 MWh GENERADOS (ES DECIR UN 50% DE LA CAPACIDAD) EL PROYECTO SIGUE SIENDO VIABLE AL 20%
MINIMO PERIODO DE DURACION DEL PROYECTO		CON UNOS TIEMPOS DE DURACION DE 6 AÑOS EL PROYECTO ES RENTABLE AL 20%
MAXIMA INVERSION DE CAPITAL		CON 600 MILLONES DE INVERSION (50% MAYOR QUE LA SUPUESTA) LA INVERSION CONTINUARIA SIENDO RENTABLE AL 20%

La tasa utilizada de 20% anual en dólares es arbitraria, simplemente refleja los retornos usualmente esperados cuando se trata de proyectos de riesgo mediano.

Consumo de energía eléctrica en la provincia de Tucumán (Año 2009):

(FTE: Secretaría de Energía de la Nación)

Residencial: 917.640 MWh.
Comercial: 376.579 MWh.
Industrial: 619.949 MWh.
Alumbrado: 98.420 MWh.
Total: 2.012.588 MWh.

Bibliografía

Agüero, A. C., Pisa, J. R., Agüero, C. J. y Torres Bugeau, A. (2004) "Poder Calorífico del bagazo de caña de azúcar", *cet Revista de Ciencias Exactas e Ingeniería*, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina, N° 24, pp. 32-37.

Agüero, C. J., Pisa, J. R. y Andina, R. L. (2006) "Consideraciones sobre el aprovechamiento racional del bagazo de caña como combustible", *cet Revista de Ciencias Exactas e Ingeniería*, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina, N° 27, pp. 15-21.

Agüero, C. J., Pisa, J. R. y Andina, R. L. (2010) "Límites en el uso de balances de exergía en los sistemas de cogeneración", *cet Revista de Ciencias Exactas e Ingeniería*, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina, N° 32, pp. 32-36.

Agüero, C. J., Pisa, J. R. y Andina, R. L. (2011) "Análisis térmico de un sistema de cogeneración de fuerza motriz y vapor para procesos de calefacción en la industria azucarera", *cet Revista de Ciencias Exactas e Ingeniería*, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina, N° 33, pp. 3-9.

Haug, C. J. (1966) "Análisis de las transformaciones energéticas y de las pérdidas de energía por medio de la exergía con referencia a la Industria Azucarera", *Publicación del Departamento de Mecánica*, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.

Haug, C. J. (1983) "Prorrato del consumo de combustible al producir energía eléctrica y vapor para procesos fabriles", *Publicación del Departamento de Mecánica*, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.

Este trabajo se realizó en el Departamento de Mecánica de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán. El análisis en ingeniería estuvo a cargo de los Ingenieros: Jorge R. Pisa, Carlos J. Agüero y Roberto L. Andina; en tanto que, el análisis económico lo llevó a cabo el Licenciado Franco E. Nanni.

Jorge R. Pisa

Ingeniero Mecánico, egresado de la Universidad Nacional de Tucumán. Ex Docente de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de esa Universidad desde el año 1976. Actualmente es Profesor Asociado de la Cátedra "Generadores e Instalaciones de Vapor" del Dpto. de Mecánica. Desarrolló 15 años de actividad profesional en el Ingenio La Fronterita, en el área energética. Realiza trabajos a terceros en el sector industrial azucarero, cítrico y del tabaco.

E-mail: jpisa@herrera.unt.edu.ar

Carlos J. Agüero

Ingeniero Mecánico, egresado de la Universidad Nacional de Tucumán, Argentina. Ex Docente de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de esa Universidad desde el año 1965, jubilado como Profesor Asociado, de la Cátedras "Turbinas de Vapor (Turbomáquinas)", "Termodinámica" y "Sistemas de Control" del Dpto. de Mecánica. Desarrolló actividad profesional en la Industria Azucarera de Tucumán en el área de mediciones, ensayos y balances térmicos y control automático de procesos. Jefe del Departamento de Instrumentación y Control Automático de la Cía. Azucarera Concepción S.A. hasta Mayo de 2005.

E-mail: caguero@herrera.unt.edu.ar

Roberto L. Andina

Ingeniero Mecánico, egresado de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la Universidad Nacional de Tucumán en el año 1975. Ejercicio de la docencia universitaria desde 1977 hasta la fecha en las asignaturas siguientes: Profesor Adjunto de "Generadores e Instalaciones de Vapor", "Turbinas de Vapor" y "Laboratorio de Máquinas II y III" del Dpto. de Mecánica de esta Facultad y Jefe de Trabajos Prácticos en "Diseño de Instalaciones Térmicas" del Dpto. de Mecánica de la Facultad Regional Tucumán de la UTN. En la actividad profesional, se desempeña en asesoramientos técnicos en la Industria del Noroeste Argentino, con participación en diferentes proyectos de instalaciones térmicas.

E-mail: randina@herrera.unt.edu.ar

Franco E. Nanni

Licenciado en economía en la UNT, Profesor a cargo del Área Economía de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la UNT. Autor del libro "Cuestiones de Economía" publicado por la editorial de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología en 2012. Colaborador del Diario "La Gaceta" en numerosos artículos sobre Macroeconomía y Economía Internacional.

E-mail: fnanni@herrera.unt.edu.ar



cet

REVISTA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERIA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍA

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN
facet
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGÍA

Publicación registrada en
latindex