

---

# Análisis Térmico de un Sistema de Cogeneración de Fuerza Motriz y Vapor para Procesos de Calefacción en la Industria Azucarera

Carlos José Agüero, Jorge R. Pisa y Roberto L. Andina

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

## Resumen

Se trata de determinar las características de una turbina de vapor (TV) y generador de vapor (GV) para una fábrica de azúcar, que necesita fuerza motriz (FM), energía eléctrica (EE) y vapor para sus procesos de calefacción, evaporación, cocimiento, refinado, destilación de alcohol, etc.; o sea que se trata de un sistema de cogeneración que usa como combustible el bagazo de la caña de azúcar.

La fuerza motriz debe ser la necesaria para el accionamiento de generadores eléctricos, molinos, bombas y ventiladores, y el vapor de escape de las turbinas de vapor debe ser suficiente para los procesos de calefacción mencionados.

También se consideran las posibilidades de aumentar la generación de EE para entregar a la red pública el excedente.

Se hacen balances energéticos y exergéticos para analizar la importancia de las pérdidas de cada sector, en el balance global.

Palabras clave: cogeneración, turbina de vapor industrial.

---

*Thermal Analysis of a Cogeneration System of Driving Force and Vapor for Heating Processes in Sugarcane Industry*

## Abstract

*It is intended to determine the characteristics of a turbine steam and a steam generator for a sugar factory which needs a driving force (or electrical power) and vapor for the processes of heating, evaporation, cooking, refinement, alcohol distillation, etc, i.e., a system of cogeneration using sugar cane bagasse as fuel. The driving force must be the appropriate one for the operation of electrical generators, windmills, pumps and fans and the steam exhaust of the TV should be enough for the heating processes mentioned above. The possibilities to increase the generation of EE to deliver to the public network the surplus energy are also considered. Energetic and exergetic balances are carried out to analyze the importance of the losses of each sector in the overall balance.*

*Key words: cogeneration, industrial steam turbine.*

## Introducción

Se llama Cogeneración, a la generación simultánea de Fuerza Motriz (FM) y/o Energía Eléctrica (EE) y de vapor para procesos de calefacción. Para la generación de FM se emplean Turbinas de Vapor (TV) de contrapresión que accionan molinos, bombas centrífugas, ventiladores, compresores, etc. Y en caso de generar EE se emplean turbinas de contrapresión o de extracción de vapor y eventualmente un cuerpo de condensación. El vapor de esca-

pe o de extracción se usa como medio de calefacción en intercambiadores de calor: calentadores, evaporadores, columnas destiladoras, digestores, cocimiento, etc.

### Selección de una turbina de vapor para cogeneración

La figura 1, muestra una instalación simple de un sistema de cogeneración: generador de vapor, turbina de va-

por de contrapresión para el accionamiento de un generador eléctrico y vapor de escape para los intercambiadores de calor, bomba de condensado, depósito de agua, bomba de alimentación y válvulas de vapor de auxilio y de alivio. Se supone que la energía eléctrica generada, es la necesaria para todos los accionamientos electro-mecánicos e iluminación de la fábrica.

En caso de emplear otras TV para accionamientos mecánicos, se instalan en paralelo con la del esquema.

La selección de las TV debe ser hecha de manera que se cumplan los balances energéticos y de masas; o sea que el consumo de vapor (kg/h) de las TV debe ser el necesario para la generación de la potencia (kW) y que el vapor de escape satisfaga las necesidades de los procesos de calefacción. La potencia interna de la TV y el caudal de vapor están relacionados por la siguiente expresión:

$$N_i = G_s \times \Delta i \text{ (kW)} \tag{1}$$

Potencia interna:

$$\tag{2}$$

$\eta_{el}$ : Rendimiento eléctrico

Rendimiento mecánico

Caudal de vapor  $G_s$  en kg/s y Salto interno de entalpías en kJ/kg.

O sea que con  $G_s$  y  $N_i$  definidos, resulta el salto de entalpía necesario en la TV y con las condiciones del vapor (saturado seco) en el escape, se determinan presión y temperatura del vapor vivo (Ver esquema en diagrama entalpía – entropía,  $i - s$  ó  $h - s$ ).

Vapor vivo:  $P_o$ ,  $t_o$

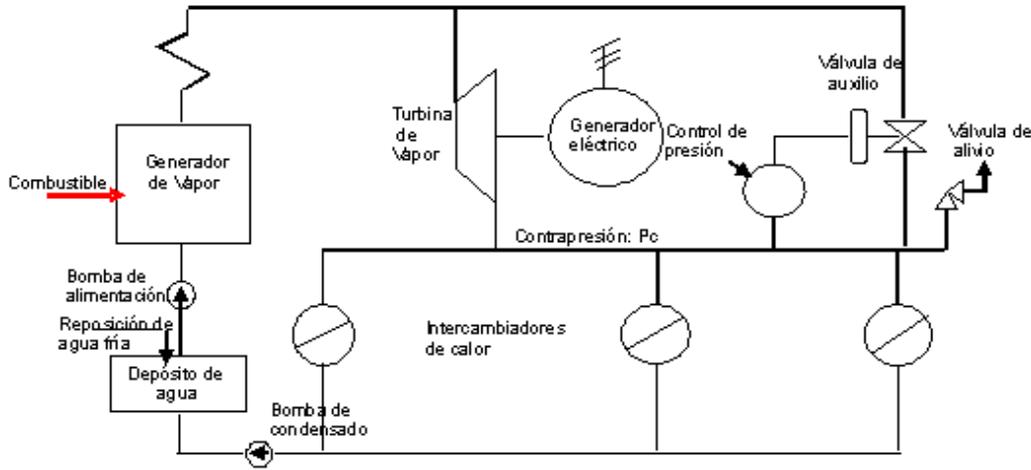


Fig. 1 Esquema de la instalación

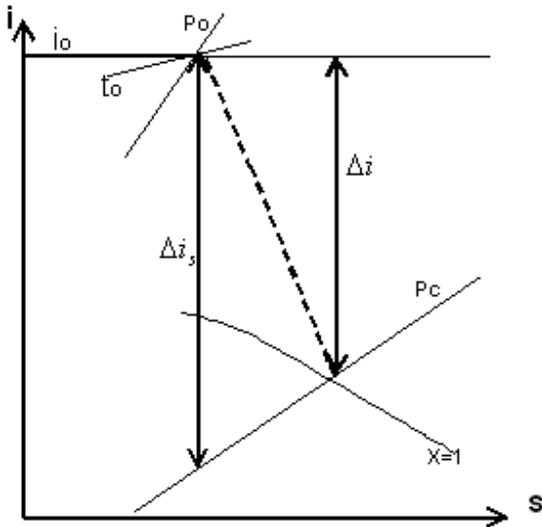


Fig. 2 Diagrama de Mollier;  $\Delta i$ : Salto de entalpía interno;  $\Delta i_s$ : Salto de entalpía isoentrópico.

### Ejemplo 1: Análisis de una fábrica de azúcar de la región

Capacidad de molienda de caña horaria: 500 t/h

Consumo de vapor de 2,45 bar abs, saturado (126,8 °C): 300.000 kg/h (Fábrica de azúcar con refinera y destilería de alcohol, 600 kg de vapor/t de caña)

Entalpía del vapor en el escape de la TV, a 2,55 bar abs y 140 °C: 2744 kJ/kg (Se considera un estado de vapor en el escape de la TV, que tenga en cuenta caídas de presión y temperatura en la tubería que conduce el vapor desde la misma hasta los consumidores; pues de no ser así, el equipo intercambiador de calor no rendiría su capacidad nominal).

Energía eléctrica necesaria, estimando 28 kWh/t de caña: 14.000 kW

Consumo específico de vapor en la TV: 21,4 kg/kWh

Considerando los rendimientos eléctrico y mecánico, la potencia interna de la TV resulta:  $N_i = 15.000$  kW

Cálculo del salto interno de entalpía en la TV:

$$\Delta i = 15.000 \times 3.600 / 300.000 = 180 \text{ (kJ / kg)} \quad (3)$$

Entalpía del vapor en la admisión de la TV:

$$i_0 = 2744 + 180 = 2.924 \text{ (kJ / kg)} \quad (4)$$

Rendimiento interno de la TV: 0,72

Salto isoentrópico:

$$\Delta i_s = 180 / 0,72 = 250 \text{ (kJ / kg)} \quad (5)$$

Con estos valores y considerando la laminación en la válvula de regulación, en el diagrama de Mollier se determinan las condiciones necesarias del vapor  $p_0$  y  $t_0$  en la admisión de la TV: 10 bar y 250 °C.

A este valor se debe agregar la pérdida de carga en la tubería que conduce el vapor desde la caldera y además un plus para tener en cuenta las variaciones de los procesos y de esta manera determinar las condiciones de trabajo de la caldera.

#### Consumo de combustible en la caldera

En un GV que emplea el bagazo de la caña como combustible, con 50 a 51 % de humedad y poder calorífico inferior de aproximadamente 7325 kJ/kg, 70 % de rendimiento y agua de alimentación de 100 °C, para generar 300.000 kg de vapor/h a 13 bar y 250°C resulta que necesita:  $300.000 \times (2.924 - 417) / (7.325 \times 0,70) =$

$$146.000 \text{ (kg de bagazo/h)} \quad (6)$$

Considerando que de la molienda de una tonelada de caña se obtienen aproximadamente 290 kg de bagazo y se tendrán:

$$500.000 \times 0,29 = 145.000 \text{ (kg de bagazo/h)} \quad (7)$$

O sea que el balance energético se cierra con gran aproximación.

Debido a inconvenientes operativos, mala eficiencia de

los equipos, elevada humedad y contenido de cenizas del bagazo, mayor consumo de vapor en procesos, etc., se presentan desbalances transitorios en la relación de consumo de calor y generación de energía, que se controlan con las válvulas de auxilio o de alivio. Estos son procesos exergéticamente ineficientes y conducen a un consumo de combustible adicional o un excedente de bagazo y eventualmente ambas cosas.

#### Selección de la tubería y el GV

Al diseñar la tubería que conduce el vapor desde el GV a la TV, se deben tener en cuenta aspectos tales como las pérdidas de carga, un diseño elástico para compensar los esfuerzos debidos a las dilataciones térmicas, la aislación, costo económico, etc.

Las pérdidas de carga dependen de la longitud y del diámetro de la tubería. Como ya se mencionó anteriormente, a la presión del vapor en la admisión de la TV, se suma el valor calculado de las pérdidas para obtener la presión en la caldera y se debe considerar un cierto margen, por seguridad, para tener en cuenta las variaciones en los procesos.

Para analizar las pérdidas en cada sector de la instalación, generalmente se hacen balances energéticos y exergéticos. En los diagramas siguientes se indican estas pérdidas:

#### Diagrama de Exergías

- Los valores de las exergías están referidas a 1 kg de bagazo con 50% de humedad, considerando su exergía igual a su poder calorífico superior: PCS = 9.000 (kJ/kg de bagazo) = 100 %
- En la caldera se generan 2 kg de vapor con 1 kg de bagazo
- Exergía de 2 kg de agua de alimentación de 100 °C: 89,6 (kJ) = 1 %
- Exergía de 2 kg de vapor de 13 ata, 250 °C generado en la caldera: 1.894 (kJ) = 21 %
- Pérdida de exergía en la tubería que conduce vapor de la caldera hasta la TV: 47,5 (kJ) = 0,53 %
- Exergía del vapor en la admisión de la TV: 1.846,5 (kJ) = 20,5 %
- Exergía del vapor de escape de la TV, para procesos de calefacción: 1.324,4 (kJ) = 14,7%
- Pérdidas de exergía en la TV: 174 (kJ) = 1,94 %
- Energía eléctrica obtenida:  
 $N_{el} = 28 \text{ (kWh/t de caña)} \times 3.600 \text{ (kJ/kWh)} / 290 \text{ (kg de bag/t de caña)} = 347,6 \text{ (kJ/kg de bag)} = 3,86 \%$  (8)

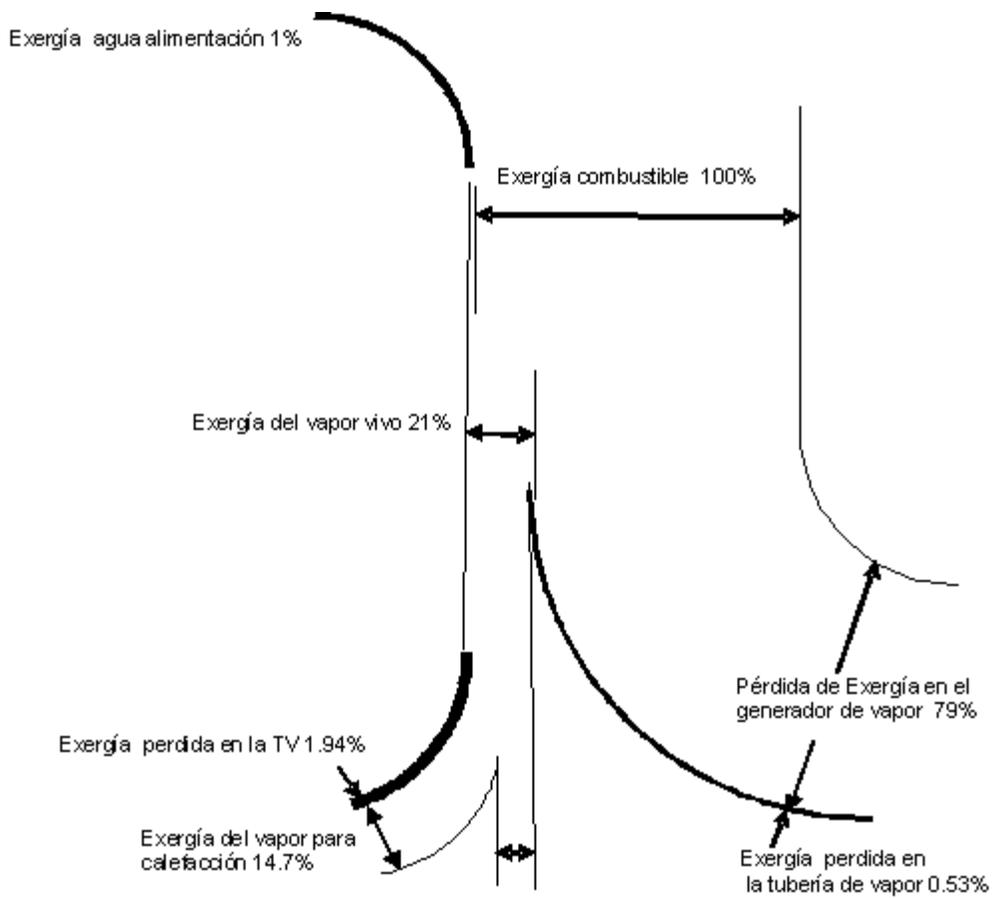


Fig. 3 Diagrama de exergías

**Diagrama Energético (Entalpías)**

- Se consideran 2 kg de vapor/kg de bagazo y se refieren todas las energías al poder calorífico inferior = 7.325 (kJ/kg de bagazo) = 100 %. El rendimiento del generador de vapor está referido al PCI.
- Energía del agua de alimentación de 100 °C: 837 (kJ/kg) = 11,4 %
- Energía de vapor de 13 ata 250 °C: 5.863 (kJ) = 80 %
- Pérdidas en el generador de vapor: 2299 (kJ) = 31,4 %
- Energía del vapor en la admisión de la TV, de 11,5 ata y 240 °C: 5.828 (kJ) = 79,5 %
- Pérdidas en la tubería de vapor: 35 (kJ) = 0,48 %
- Energía del vapor de escape de la TV para calefacción: 5.489 (kJ) = 74,9 %
- Energía del condensado: 1.063 (kJ) = 14,5 %
- Energía Eléctrica obtenida: 347,6 (kJ) = 4,75 %

**cet**  
 REVISTA DE CIENCIAS EXACTAS E INGENIERIA  
 FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y TECNOLOGIA

Nuestra revista invita a docentes e investigadores de universidades nacionales a realizar sus aportes y proponer sus trabajos.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUMÁN

Visite nuestra página:  
[www.herrera.unt.edu.ar/revistacet](http://www.herrera.unt.edu.ar/revistacet)

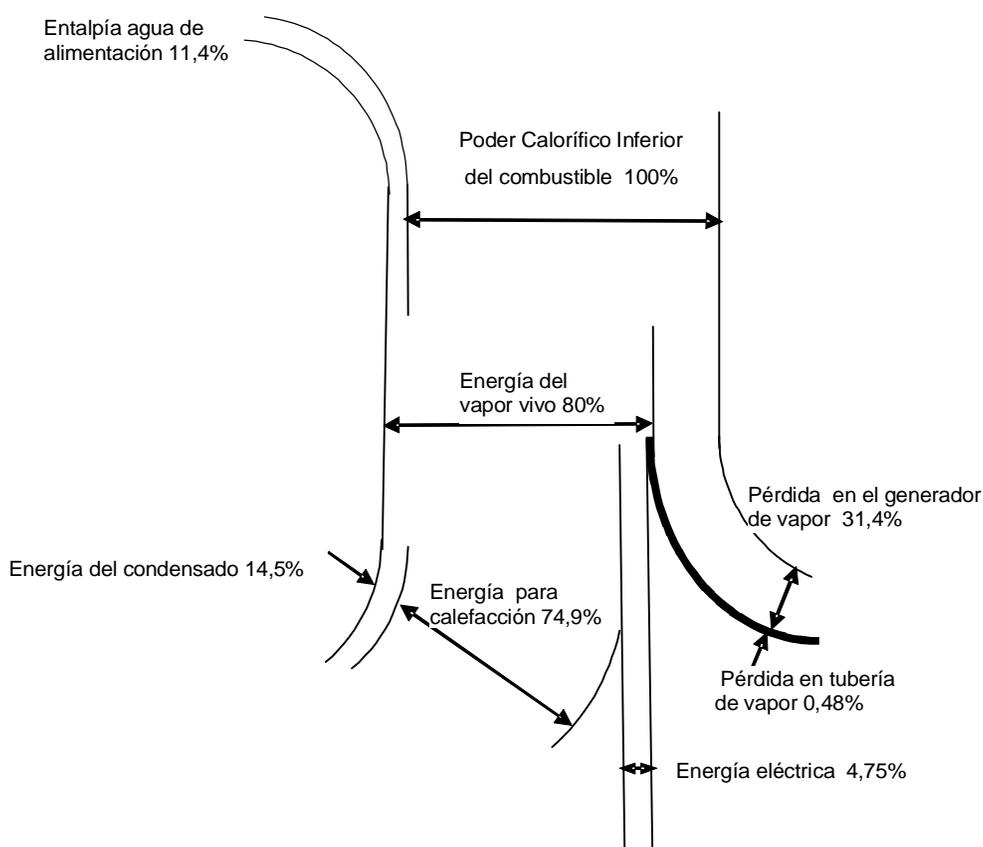


Fig. 4 Diagrama energético (entalpías)

Este ejemplo pone en evidencia que es importante tener presente que cuando se gesta un proyecto de cogeneración, es acertado comenzar el estudio por las necesidades de calor del proceso tanto en cantidad como en nivel de temperatura y a partir de allí, determinar el tipo de máquina que nos suministre la FM necesaria y el adecuado vapor, en calidad y cantidad en el escape, para cumplir con las transferencias de calor.

Es evidente que si el punto de comienzo del estudio es la cantidad y calidad de vapor disponible para el proceso, siempre es válido investigar si hay posibilidades de optimización en el aprovechamiento del calor en la calefacción, que permitirían la instalación de una planta de cogeneración más eficiente y rentable.

#### Ejemplo 2: Análisis de una instalación en operación

Es interesante observar que en instalaciones ya realizadas y que están operando, si se procede a efectuar un análisis parcial, se podría llegar a una conclusión equivocada: aumentar el diámetro de la tubería (mayor costo) para reducir las pérdidas de carga. En ese caso la presión del vapor en la admisión de la TV sería mayor y la

misma podría generar una potencia mayor. Pero si la energía eléctrica necesaria fuera igual al requerimiento inicial, la válvula de regulación haría una laminación mayor (con mayor pérdida de exergía) o bien se podría reducir el número de toberas de admisión para disponer de un salto mayor de entalpía y por consiguiente un consumo de vapor inferior, generando la misma potencia. En el diagrama T-S, observamos que la entalpía de vapor de escape, punto A, es menor que la del punto B. Este déficit energético del vapor para procesos debería ser compensado mediante una laminación de vapor a través de una válvula reductora de presión desde la caldera hasta la contrapresión.

El vapor que se lamina resulta con un elevado sobrecalentamiento, por lo que sería necesario implementar un sistema de enfriamiento con pulverización de agua de alimentación en el vapor. Esta instalación complicaría el sistema y también sería ineficiente térmicamente debido a la pérdida de exergía en el proceso de mezcla.

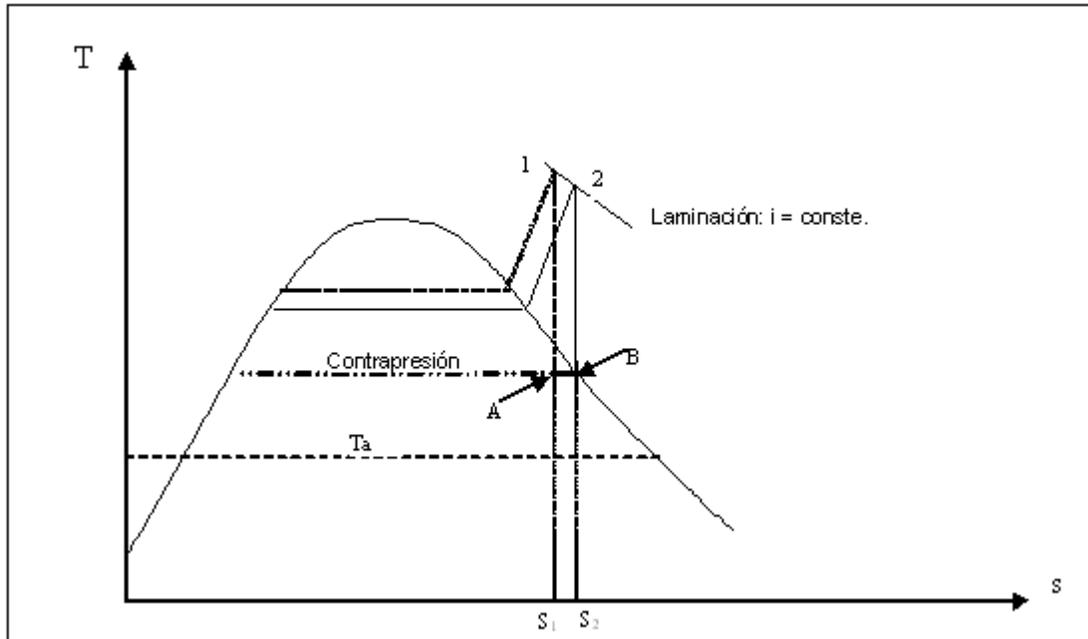


Fig. 5 Diagrama T - S

### Ejemplo 3: Posibilidad de aumentar la generación de energía eléctrica para vender el excedente

Una posibilidad interesante de analizar es la que consiste en elevar la presión y temperatura del vapor generado, con el mismo caudal y un mayor salto de entalpía, para aumentar la generación de energía eléctrica y entregar el excedente a una red de distribución pública.

En una caldera moderna, con rendimiento de 2 kg de vapor/kg de bagazo, con el bagazo disponible se pueden generar los 290.000 kg/h de vapor a 64 bar y 480 °C y en la TV se podría generar una potencia de aproximadamente 40.000 kW. Restando los 14.000 kW para la fábrica, queda un excedente de 26.000 kW para entregar a la red pública, que referidos a la caña molida resultan 52 kWh/t de caña. Esto sería si el consumo de vapor en fábrica se mantiene en 600 kg/t de caña.

Si se realizan las mejoras tecnológicas correspondientes en el proceso de fabricación y el consumo de vapor se reduce a 500 kg/t de caña y se agrega a la TV un cuerpo de condensación, se puede obtener un excedente de aproximadamente 70 kWh/t de caña.

Con una producción de caña en Tucumán, de 13.500.000 t/zafra en 5 meses, se podrían generar 945.000 MWh.

### Conclusión

De los ejemplos presentados se deduce que en todo proceso de cogeneración se deben tomar como base las

necesidades energéticas (FM, EE y calor) de los procesos de fabricación y a partir de las mismas establecer las condiciones que deben cumplir los equipos de servicio (TV, GV, Tuberías, etc). Las mismas consideraciones valen en el caso de generar un plus de EE para la venta.

### Referencias

**Agüero, A. C., Pisa, J. R., Agüero, C. J. y Torres, 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. y Andina, R.** (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.

**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", Publica-

ción del Departamento de Mecánica de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.

---

Este artículo fue escrito durante el 2º semestre del año 2010, en el Departamento de Mecánica de la Facultad de Ciencias Exactas de la Universidad Nacional de Tucumán.

---

### **Jorge R. Pisa**

Ingeniero Mecánico, egresado de la Universidad Nacional de Tucumán. 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 Departamento 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, citrícola y del tabaco.

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

### **Carlos J. Agüero**

Ingeniero Mecánico, egresado de la Universidad Nacional de Tucumán. Docente de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de esa Universidad desde el año 1965. Actual Profesor Asociado, de la Cátedras "Turbinas de Vapor (Turbomáquinas)", "Termodinámica" y "Sistemas de Control" del Departamento 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 los siguientes cargos y asignaturas: Profesor Adjunto de "Generadores e Instalaciones de Vapor", "Turbinas de Vapor" y "Laboratorio de Máquinas II y III" del Departamento de Mecánica de esta Facultad y Jefe de Trabajos Prácticos en "Diseño de Instalaciones Térmicas" del Departamento 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