

## XIV. DIVERSIFICACIÓN DE LA AGROINDUSTRIA AZUCARERA

# COGENERACIÓN EN LA INDUSTRIA AZUCARERA

**Mario Muñoz\***

## INTRODUCCIÓN

En los ingenios azucareros de Guatemala, la cogeneración ha tenido un desarrollo y una evolución sostenida; este impulso se ha dado por la generación secundaria de un subproducto, que pasó de ser un desecho a ser biomasa en cantidades abundantes, con un poder calorífico aprovechable que lo convirtieron en un buen combustible: el bagazo.

Con la quema del bagazo como combustible en las calderas, se logró generar y mantener la producción de vapor que ha sido la fuerza motriz y el que contiene la energía más utilizada en todos los procesos de fabricación del azúcar. Como resultado de la necesidad de incrementar la producción de dicho vapor, los ingenios cogeneradores han ido desarrollando su tecnología de modo que pasaron de turbinas de una etapa a las de multietapas; las primeras son usadas solo como transmisoras de potencia para máquinas tales como los molinos, en cambio las segundas están acopladas a generadores de electricidad. Con este cambio, los ingenios se convirtieron en cogeneradores, ya que producen energía de movimiento y en forma de calor por medio de vapor para generar energía eléctrica, y luego aprovechan la energía del vapor remanente para los procesos de fabricación del azúcar, todo esto a partir de un único combustible.

Aprovechando las mejoras en las leyes del país, la cogeneración ha crecido aún más; las nuevas leyes promovieron y liberaron la generación, el transporte y la distribución de energía eléctrica. Esto incentivó a los ingenios a invertir para aumentar la cantidad de caña para moler, a optimizar el consumo de vapor en las fábricas y a elevar su disponibilidad eléctrica con turbogeneradores más eficientes y de mayor capacidad.

Los procesos de la cogeneración en los ingenios azucareros que se ilustran en este capítulo son conceptualmente iguales o muy similares. Sin embargo, en cada ingenio cogenerador hay arreglos diferentes y también es variada la manera en que cada industria maneja sus operaciones, desde el manejo y tratamiento del bagazo, pasando por la generación de vapor y la electricidad hasta el aprovechamiento del vapor de escape en la fábrica de azúcar. Los

---

\* Ing. Mecánico Industrial, Profesional en Eficiencia Energética de CENGICANA. [www.cengicana.org](http://www.cengicana.org)

balances energéticos de cada proceso y de cada cogenerador también son distintos.

En la actualidad los recursos empiezan a limitar a la cogeneración, sin embargo en el mercado eléctrico del país, la demanda de energía eléctrica más limpia supera por mucho a la oferta, por lo tanto los ingenios enfrentan dos retos: primero, invertir y crecer en el mercado de la generación de energía con otros combustibles, tales como el carbón mineral, y segundo, optimizar y mejorar sus procesos de cogeneración a través de la eficiencia energética interna y la eficiencia en la utilización del bagazo como combustible. En este apartado, se presenta un paso breve y resumido por la historia del desarrollo de los cogeneradores, los índices de eficiencia, los beneficios y los procesos involucrados en esta forma de gestión de energía.

## ANTECEDENTES

En Guatemala, desde hace un poco más de 70 años, algunas industrias como los ingenios azucareros, han venido generando su propia energía con el fin de satisfacer las necesidades energéticas de los procesos internos para la fabricación del azúcar. Inicialmente la generación era para uso local y se limitaba a cubrir la energía cinética que demandaban los equipos de extracción de jugo, tales como picadoras y molinos, cuya fuerza motriz era el vapor principal producido en las calderas. La segunda demanda fundamental de la energía la constituían los procesos de fabricación, conocidos como de tratamiento, procesamiento y cocimiento del jugo y mieles, tales como la evaporación, el calentamiento y la cristalización.

Para cumplir con esta segunda demanda de energía se ha empleado el vapor llamado “de escape”, es decir, vapor que ha cedido parte de su energía en un proceso primario (i.e. moviendo una turbina), pero conserva suficiente energía a una presión y temperatura menor, el cual, según algunas definiciones, se convierte en la primera manifestación de la cogeneración en los ingenios azucareros. La razón de esta afirmación proviene del hecho de que la fuente del vapor de escape era la descarga de las máquinas de extracción que utilizan en una primera fase la energía cinética contenida en el vapor principal. Esto quiere decir que el vapor principal que se usa en los equipos de extracción de jugo es el mismo que luego se utiliza en el proceso de fabricación del azúcar solo que con menor energía, menor presión y menor temperatura. Dicha energía es casi agotada por los equipos de extracción, el remanente contenido en el vapor de escape es la energía doblemente aprovechada.

Con el aumento de la cantidad de caña molida en los ingenios y, por ende, el crecimiento de las fábricas, más el afán por optimizar el proceso de fabricación del azúcar, los ingenios cogeneradores fueron invirtiendo en turbinas de vapor más grandes acopladas a generadores eléctricos. De esta manera lograron generar energía eléctrica y así en época de zafra se independizaron de la red eléctrica nacional, constituyéndose así en un ahorro energético para el país. Estas turbinas también descargan vapor de escape, por lo tanto, se logró mantener y mejorar la disponibilidad de esa energía térmica hacia la fábrica.

El siguiente paso que algunos ingenios cogeneradores han dado es electrificar los procesos de extracción de jugo (picadoras y molinos) que típicamente eran movidos con vapor y ahora son eléctricos. Como resultados, el uso de la energía es más eficiente ya que el vapor principal que antes se utilizaba para mover picadoras y molinos ahora se emplea exclusivamente para mover turbogeneradores, que a la vez producen energía eléctrica, y así la extracción y todos los equipos e instalaciones del proceso funcionan de manera más eficiente.

Con esta última estrategia, los ingenios internamente han logrado “cogenerar”, paralela y secuencialmente, energía principal y de escape tanto térmica como eléctrica. La producción de estas formas de energía se ha realizado con la quema en calderas de un solo combustible, el bagazo.

El bagazo es un subproducto que se origina en la molida de la caña de azúcar; viene en la caña en forma de fibra que ya no se puede aprovechar en la extracción del azúcar. A lo largo de su historia, los ingenios han hecho esfuerzos para quemar eficientemente el bagazo de manera que existan cada vez mayores excedentes y así se pueda generar más energía eléctrica. Los que lo han logrado, generan para sí toda la energía térmica y eléctrica que necesitan, además cuentan con un excedente que les ha permitido vender parte de esa energía “cogenerada” a la red eléctrica nacional, de esta manera los ingenios cogeneradores han logrado contribuir a satisfacer la creciente demanda energética del país.

Adicionalmente, la cogeneración en los ingenios azucareros ha representado un factor positivo para el medio ambiente, argumentándose que la utilización de un combustible de origen “no fósil” ha disminuido la emanación de algunos gases de efecto invernadero a la atmósfera.

# CONCEPTO BÁSICO

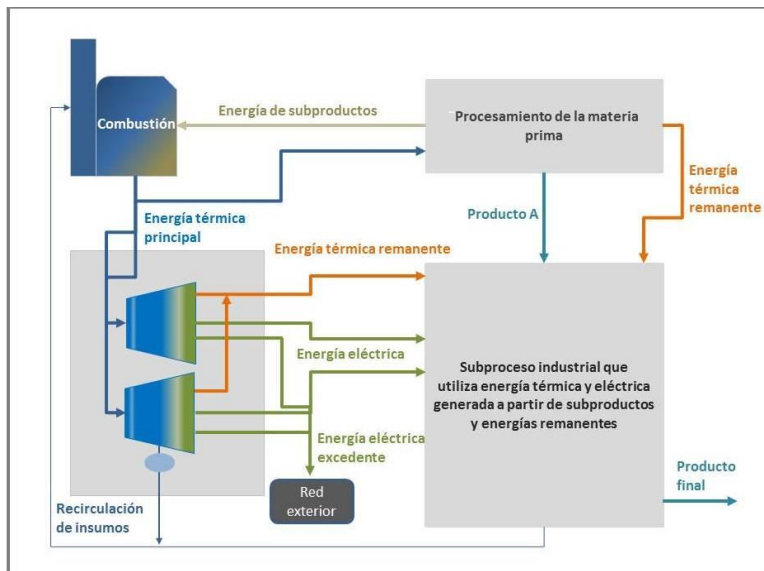
No existe una sola definición para la cogeneración, así varios autores la consideran una técnica y otros, un proceso o un sistema. Desde un punto de vista energético, la cogeneración está definida así:

## Definición

Una definición simplificada es: cogeneración es la técnica empleada para la producción secuencial de energía, por lo general eléctrica y térmica, a partir de una sola fuente de energía.

Sin embargo, la cogeneración puede verse integralmente como un proceso y no como una técnica: es un proceso mediante el cual la descarga de calor de un proceso se convierte en una fuente de energía para otro proceso de conversión posterior.

En los sistemas de cogeneración (Figura 1), los procesos primarios y secundarios de la utilización de la energía se dan simultánea y secuencialmente; las energías que se transforman pueden ser de naturaleza eléctrica, mecánica o térmica. Esta última suele presentarse en forma de calor aunque el concepto se aplica también al frío. Todas estas energías siempre se generan a partir de la combustión de un solo combustible.



**Figura 1. Sistema de cogeneración con producción simultánea y secuencial de energía térmica y eléctrica**

La idea básica de la cogeneración es aumentar el rendimiento global integrando dos sistemas energéticos, generalmente la energía eléctrica con la térmica (calor). Como resultado, el sistema combinado entrega una mayor eficiencia y menores costos que realizando la operación de cada recurso energético por separado.

### **Tipos de cogeneración**

Si la energía que se generó por primera vez es utilizada y descarga calor que se usa después como calor de proceso, entonces se llama *topping* o proceso de cabecera. Si la descarga de calor de un proceso industrial se utiliza secundariamente para generar energía, entonces tenemos una configuración de *bottoming* o de cola.

**Cogeneración de ciclo de cabecera:** En este ciclo se genera primero la energía eléctrica; para producir la electricidad se utilizan turbinas de vapor, turbinas a gas o motores de diésel y luego el calor descargado se emplea en algún proceso industrial posterior, por ejemplo, en sistemas de evaporación y cocimiento u otros requerimientos de carácter térmico. Es el sistema más aplicado en la industria azucarera. Si se trata de turbinas a vapor, tanto los gases de escape de las calderas como la descarga de vapor en las turbinas se convierten en fuentes de calor para otros procesos.

**Cogeneración de ciclo de cola:** Este ciclo es térmico, pretende recuperar calor de un proceso industrial para luego producir energía eléctrica. En este caso se requiere vapor de temperatura y presión adecuadas para la operación de turbogeneradores que generen la energía eléctrica. Este proceso no es útil en los ingenios cogeneradores.

### **Características necesarias para la cogeneración**

En principio, cualquier proceso que tenga una importante demanda de calor y electricidad es un posible cogenerador. Sin embargo, en términos generales puede establecerse que los potenciales cogeneradores deben cumplir con alguna de las siguientes características:

- Producir importantes excedentes de calor, ya sea a través de los gases calientes provenientes de la combustión en las calderas o en forma de vapor de escape de baja presión proveniente de la descarga o extracción de las turbinas.
- Disponer de un combustible muy barato, de suministro continuo, estable y uniforme. De hecho, mientras mayor es la diferencia de precios entre el combustible y la electricidad, mayor beneficio económico reporta implementar un sistema de cogeneración.

- El proceso industrial involucrado debe ser continuo, de otra manera se perdería la energía cogenerada.

## COGENERACIÓN EN LA INDUSTRIA AZUCARERA

La cogeneración en la industria azucarera está sujeta a un marco legal amparado en la Ley General de Electricidad.

### **Marco legal<sup>1</sup>**

La Ley General de Electricidad del país establece que es libre la generación de electricidad y no se requiere autorización previa por parte del Estado, y el artículo 8 del mismo cuerpo legal, establece que es libre la instalación de centrales generadores.

El proceso de generación, transporte y distribución de electricidad en Guatemala había estado regulado normalmente por la Ley del Instituto Nacional de Electrificación (INDE) Decreto Legislativo No. 1287 del 27 de marzo de 1959, el cual estableció los mecanismos para poder entrar al negocio de la electricidad y era el Consejo Directivo que lo conformaba, el órgano encargado de proponer al ejecutivo los niveles tarifarios. Esta institución se creó con el carácter de entidad estatal descentralizada, con autonomía funcional, personalidad jurídica, fondos privativos y plena capacidad para adquirir derechos y contraer obligaciones en materia de su competencia.

El negocio de la electricidad tradicionalmente se había manejado por la vía estatal (INDE, EEGSA y empresas eléctricas municipales); la Constitución de la República de Guatemala ha dejado planteado por muchos años (artículo No. 129), que en la producción de electricidad puede participar el sector privado. En los últimos años la economía nacional ha experimentado una serie de cambios, enmarcados en el proceso de la globalización y ajuste estructural impulsado por los organismos financieros internacionales, que ha implicado promover la modernización de la economía. Ese aspecto se ha manifestado en una mayor apertura hacia el exterior y la reestructuración del aparato estatal, en función de una mayor participación de los agentes privados, bajo el esquema de la desmonopolización. La idea de que el Estado debe relegar al sector privado las actividades productivas que no puede cumplir (papel subsidiario) ha pasado a ser fundamental, lo que ha motivado la necesidad de un ordenamiento que para

---

<sup>1</sup> **Logan Christel.** (2008). Régimen jurídico aplicable a la actividad de generación de energía eléctrica en el ordenamiento jurídico guatemalteco. Guatemala. 134 páginas.

el caso del subsector eléctrico se ha materializado en propuestas concretas de tipo legal, que en primera instancia está permitiendo el proceso de la desmonopolización en este subsector.

Dentro del marco de la problemática del subsector eléctrico brevemente esbozada, se inicia el proceso de la desmonopolización, para lo cual el primer paso consistió en nombrar una Comisión Multisectorial que se ocuparía de proponer soluciones integrales a la problemática del subsector eléctrico que generaría la nueva Ley General de Electricidad.

Dentro de las conclusiones y recomendaciones de la Comisión destacan:

- a) Desmonopolizar el subsector eléctrico.
- b) Establecer mecanismos para que las relaciones entre los agentes que participan en el sub-sector se realicen, eliminando la injerencia política.
- c) Garantizar que los agentes que participan en cualquiera de las funciones del servicio (generación, transmisión, distribución y comercialización) operen en igualdad de condiciones.
- d) Revisar la legislación y estructuración de las empresas públicas del subsector.
- e) Garantizar que los recursos naturales renovables y no renovables sean utilizados racionalmente.
- f) Promover el uso de fuentes alternas de energía para la generación eléctrica.
- g) Revisar la estructura de distribución de energía y promover la competencia y reconversión de las empresas distribuidoras, así como facilitar la participación de nuevas empresas.
- h) Establecer mecanismos para la venta de acciones y cualquier otro proceso que permita optimizar los recursos de la Empresa Eléctrica de Guatemala, S.A. (EEGSA).
- i) Todas las empresas eléctricas tendrán la autonomía para administrar su producción, compras y distribución de energía.
- j) Efectuar los cambios necesarios a la legislación vigente, para que cualquier empresa pueda fijar sus propios precios.

### **Ley de Fomento al Desarrollo de Fuentes Nuevas y Renovables de Energía:**

La Ley General de Electricidad constituye el marco dentro del cual se inscribe toda actividad dedicada a cualquier parte del proceso (generación, transmisión, distribución y comercialización). Es importante destacar que en cuanto al proceso concreto de la cogeneración, existe esta ley (Decreto-Ley No. 20-86). La que tiene como objetivo fundamental el promover y fomentar el aprovechamiento de fuentes nuevas y renovables de energía, fuentes no convencionales y fuentes nuevas en el país, estableciendo incentivos y ventajas legales a las actividades que involucren uno o más de los siguientes campos: investigación, experimentación, educación, capacitación, promoción, difusión, producción, fabricación de equipos



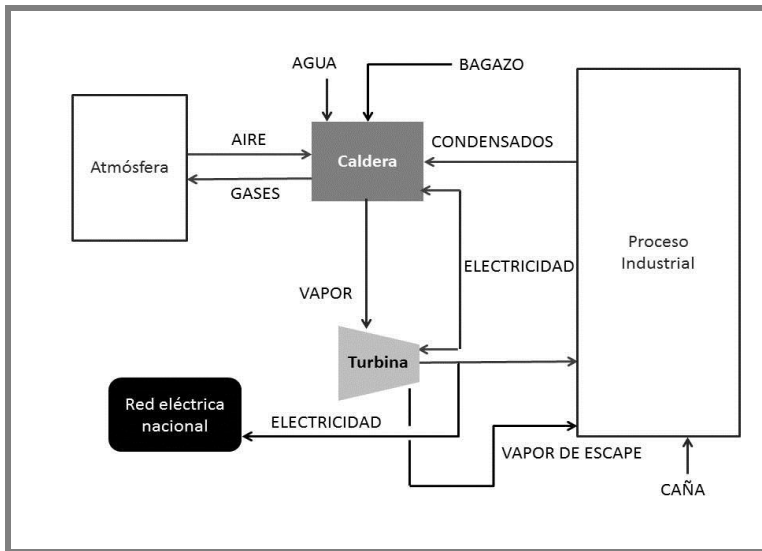
específicos. El aprovechamiento de fuentes nuevas y renovables de energía y la comercialización de los productos obtenidos de estas actividades, se define “aquellas como fuente nueva y renovable de energía aquellas como la radiación solar, el viento, las mareas, el agua, la geotermia, la biomasa y cualquier otra fuente de energía que no sea la nuclear ni la producida por hidrocarburos y sus derivados” (Artículo 7).

### **Flujo de la energía en la cogeneración**

En una planta cogeneradora típica de los ingenios, la generación de vapor principal se produce en las calderas. Una caldera acuotubular recibe constantemente condensados calientes desde el proceso de evaporación; los evaporadores producen el condensado después de utilizar el vapor de escape y lo devuelven para volver a ser evaporado en la caldera. El condensado se evapora solo si recibe una transferencia de calor por radiación y convección proveniente de la combustión del bagazo; a la vez el bagazo (combustible) no se quemará, a menos que exista una suficiente cantidad de aire atmosférico comburente entrando al quemador. En la mayoría de instalaciones modernas, el aire antes de entrar a la cámara de combustión pasa por un precalentador en donde le es cedido el calor remanente en los gases de chimenea de la caldera. El aire así precalentado es utilizado para el proceso de combustión y para mantener una turbulencia adecuada y un lecho de bagazo, y así favorecer una completa combustión.

El bagazo es un combustible que proviene del proceso de extracción por lo que la generación eficiente en la caldera depende de la estabilidad de la molienda y de los procesos industriales. De la caldera surgen dos flujos de energía: por un lado está la contenida en el vapor producido y que más adelante será aprovechada en la turbina y por otro, la energía, que significa una pérdida, es la contenida en los gases de chimenea, que representan la entropía de este proceso y que son expulsados a la atmósfera. Aunque los gases de la caldera algunas veces se usan para precalentar los condensados y el aire de combustión, llevan un remanente de energía que ya no se aprovecha.

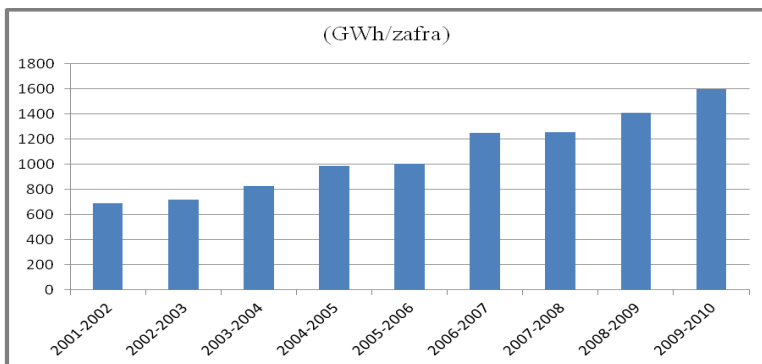
En el turbogenerador se utiliza toda la energía contenida en el vapor al convertir su entalpía en energía eléctrica. La energía eléctrica es empleada para cubrir la demanda del proceso industrial, las necesidades de la caldera y de la misma turbina. El excedente de la energía eléctrica sale del sistema hacia la red eléctrica nacional y el vapor de escape de la turbina, con menor presión y temperatura, ingresa al proceso industrial donde es aprovechado y luego condensado para regresar a la caldera y comenzar nuevamente el ciclo. En la Figura 2, se ilustra el flujo de los insumos energéticos necesarios para la cogeneración de energía térmica y eléctrica.



**Figura 2. Flujo de energía en un ingenio cogenerador**

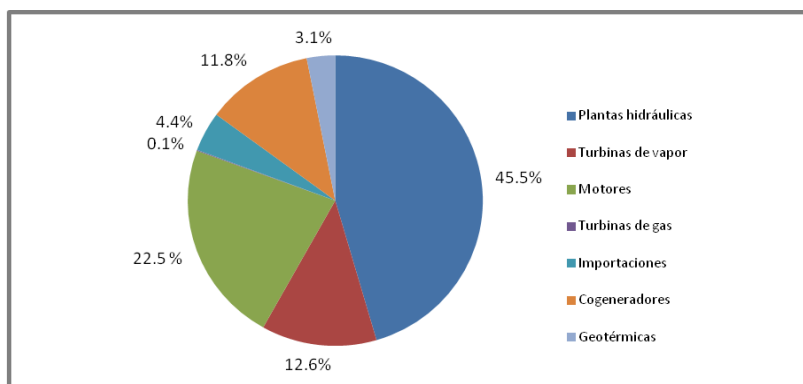
### **Demanda y oferta en el mercado energético**

En la práctica, la cantidad de energía que puede ser generada y cogenerada por cada ingenio azucarero, varía según la capacidad de cada uno, eso ha representado un incentivo para el crecimiento y para futuras inversiones. Al principio, los ingenios fijaron su interés en la posibilidad de aumentar su producción de energía para autoconsumo, pensando en limitar sus inversiones para hacer más eficientes sus procesos y contar con mayor disponibilidad de electricidad en la fábrica; hoy el enfoque es crecer también como suplidores de energía eléctrica. En la Figura 3, se ve cómo ha crecido la generación de los ingenios cogeneradores en las últimas diez zafras, favorecidos por las nuevas leyes y por el crecimiento de la demanda energética general del país.



**Figura 3. Crecimiento de la generación de los ingenios cogeneradores**

El bagazo es considerado biomasa, según un informe estadístico del Administrador del Mercado Mayorista de Guatemala (AMM); la generación interna de energía eléctrica del país a finales del año 2010 fue de 7,913.91 GWh; un 11.8 por ciento de esta energía fue cogenerada a partir de biomasa. En la Figura 4, se observa la contribución anual que los ingenios azucareros hicieron a través de la cogeneración en el año 2010 para satisfacer la necesidad de energía eléctrica en el país.



**Figura 4. Producción de energía eléctrica en el 2010 en Guatemala (% del total de GWh)**

## PROCESOS

### Ciclos de cogeneración

Los procesos o ciclos de cogeneración que utilizan turbinas de vapor y que están más difundidos en la industria azucarera son los de contrapresión y condensación; el primero es el más convencional, el segundo es el más eficiente y moderno pero necesita cantidades de vapor de más alta presión y temperatura (i.e. >600 psig y 700 °F). Además de estos dos procesos, hay un tercero que actualmente se encuentra en fase de demostración y experimentación: Es el ciclo combinado con Gasificación del bagazo que en el país aún no se tiene documentada la existencia de plantas que cogeneren con dicho proceso.

**Ciclo de contrapresión:** Estos procesos toman su nombre por el tipo de turbina de vapor que mueve al generador de energía eléctrica. En este proceso el vapor principal de alta o baja presión entra a una turbina de contrapresión, donde la entalpía del vapor se transforma de energía cinética o de

movimiento, que a su vez se transmite a un generador de energía eléctrica. El vapor en cada paso de transformación dentro de la turbina pierde paulatinamente presión y temperatura, y al final de su recorrido por la turbina el vapor se descarga con un remanente de presión y temperatura; este vapor de baja presión o de escape es conducido por tuberías a un proceso posterior y/o paralelo donde es utilizada la energía aún contenida en ese vapor. El trabajo que el vapor entrega en la turbina sirve para mover un generador eléctrico, el cual a través de su rotación en un campo magnético genera la energía eléctrica, esta a la vez sirve para mover y mantener en funcionamiento los equipos e instalaciones de la planta industrial y si hay excedentes se venden a la red eléctrica nacional.

**Ciclo de condensación:** Este ciclo es más complejo porque necesita vapor de más altas presiones y temperaturas, esto implica instalaciones más modernas y eficientes; el vapor de este proceso ingresa a la turbina, el vapor entrega su energía en la diferentes etapas de la turbina, estas máquinas son tan eficientes que el vapor no llega a la descarga, es decir, su presión y temperatura se agotan dentro de la turbina, el vapor se extrae por otros medios; frecuentemente se utilizan bombas de vacío. Con este vacío el vapor pasa hacia un condensador donde se enfría y condensa, luego es conducido al inicio del ciclo para convertirse nuevamente en vapor que regresará a la turbina, constituyéndose así en un ciclo cerrado. Sin embargo, en esta disposición no existe la cogeneración, por lo tanto en el cuerpo de esta turbina son dispuestas extracciones de vapor a diferentes presiones y temperaturas para que alguna de estas extracciones pueda aportar el vapor de escape necesario para los procesos industriales. En este arreglo, una parte del vapor se condensa y la otra se extrae con energía remanente para los procesos industriales.

El vapor en la turbina entrega entalpía y produce un trabajo, que sirve para generar energía eléctrica, que a la vez se utilizará para los equipos de la planta industrial y para vender a la red eléctrica nacional.

Una ventaja de este ciclo es que cuando el proceso industrial no requiera vapor de escape, entonces puede cerrarse la extracción de la turbina y mandar todo el vapor hacia la condensación. Se genera así exclusivamente energía eléctrica, es decir, que la turbina puede ser de ciclo dual, cogeneración en época de zafra y generación en época de no zafra.

En la Figura 5, se ilustran los ciclos de cogeneración más comunes.

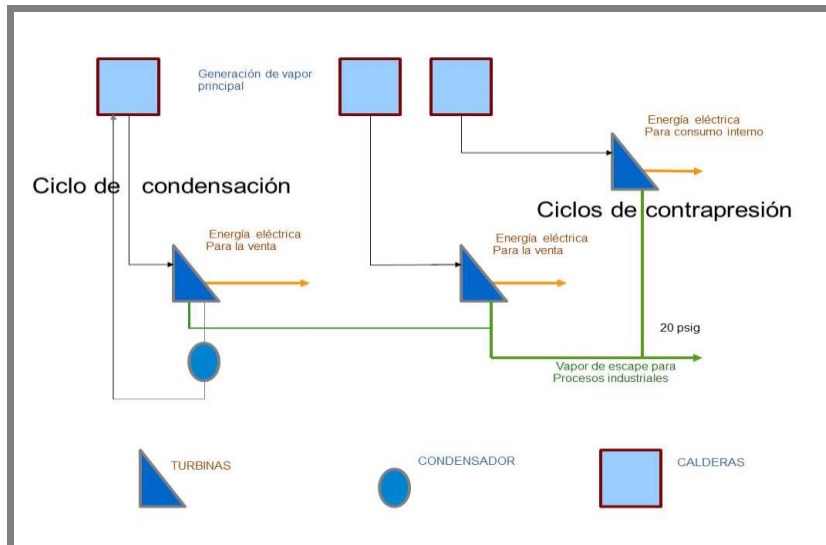


Figura 5. Planta industrial que opera con los dos ciclos de cogeneración

### Producción de energía térmica

La energía térmica primaria es la contenida en el vapor principal; el agua es calentada, evaporada y generalmente llevada a su temperatura de sobrecalentamiento, con la ganancia de presión y temperatura; este vapor es conducido hacia las turbinas donde entrega entalpía y realiza un trabajo.

**Combustibles utilizados:** Una de las condiciones básicas para que se dé la cogeneración es que solo un combustible esté presente en los procesos de generación, entrega y aprovechamiento de la energía, tanto térmica como eléctrica. En el caso de los cogeneradores de la Agroindustria Azucarera Guatemalteca, el combustible más utilizado es el bagazo. El bagazo constituye una biomasa sobrante de la molienda de la caña de azúcar; el bagazo es un compuesto celulósico fibroso, con poder calorífico en base seca de 19,868.51 KJ/kg y en base húmeda (51%) de 7,887.50 KJ/kg. En el Cuadro 1, puede verse la composición química típica del bagazo de caña:

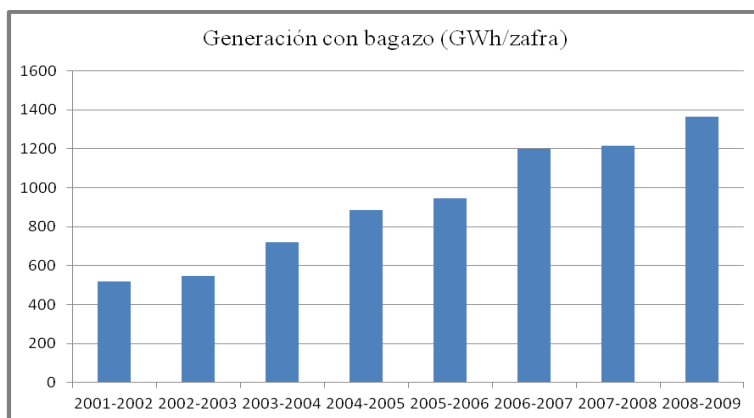
Cuadro 1. Componentes típicos del bagazo

| Compuesto      | %     |
|----------------|-------|
| Carbono        | 23.52 |
| Hidrógeno      | 3.47  |
| Oxígeno        | 22.03 |
| Cenizas        | 1.49  |
| Humedad (agua) | 49.5  |

El bagazo de la caña de azúcar tiene tres características físicas fundamentales:

- 1) *El contenido de humedad*: es la propiedad más importante desde el punto de vista de rendimiento energético en la producción de vapor principal, éste depende mucho del tipo de molinos y sus ajustes y de la manera en que la extracción del jugo es llevada a cabo. Normalmente, la humedad del bagazo está en un rango estrecho entre 49 por ciento y 52 por ciento. Esto quiere decir que de una unidad de masa de combustible quemado en las calderas, aproximadamente la mitad es bagazo y la otra es agua.
- 2) *Contenido de cenizas*: El porcentaje de cenizas fluctúa entre 0.75 por ciento y 4 por ciento; la cantidad de estas cenizas depende del tipo de suelo, edad, quema, forma de alce, recolección y lavado de la caña antes de ser molida. Los constituyentes varían de acuerdo con el tipo de suelo, abonos, variedades, clima imperante, etcétera.
- 3) *La granulometría*: La forma, tipo y disposición de la fibra depende del grado de preparación que tenga la caña en el proceso de extracción de jugo, el número de juegos de cuchillas, desmenuzadoras, picadoras y molinos. Además, a menor tamaño de la partícula de bagazo, menor peso, por lo tanto el tiempo de caída de la partícula desde la entrada al horno a la parrilla es mayor, por lo tanto un menor tamaño asegura una mejor combustión.

En la Figura 6, se ilustra el desarrollo del uso del bagazo como combustible, los ingenios cogeneradores han hecho paulatinamente cambios tecnológicos en sus plantas, para sustituir con bagazo a los combustibles fósiles tal como el Fuel Oil No. 6 o bunker C. En las últimas diez zafras, los cogeneradores prácticamente han duplicado su consumo de bagazo, de esta manera han aumentado su generación total y a la vez han sustituido los hidrocarburos por un combustible más barato y limpio.



**Figura 6. Generación de cogeneradores a partir exclusivamente de bagazo**

**Producción de vapor principal:** El combustible proveniente de la molienda de la caña o de las bodegas de *stock*, es conducido a través de fajas transportadoras hacia las calderas; ahí es alimentado manual o automáticamente hacia adentro de los hogares de las mismas.

Las calderas son generadores de vapor acuotubulares, que aprovechan la energía térmica (calor) proveniente de la combustión del bagazo y que, a través de convección y conducción en las paredes de los tubos, lo transfieren al agua contenida dentro de sus tuberías hasta alcanzar la temperatura de ebullición y de sobrecalentamiento. Luego el horno de la caldera sigue absorbiendo energía en forma de calor latente de vaporización, por lo que el suministro de agua a la caldera debe permanecer constante durante la operación. El vapor producido se conduce por tuberías hasta la casa de turbinas.

Los factores más importantes que se toman en cuenta para una adecuada y eficiente producción de vapor en las calderas son:

- *El control automático de la presión*, este es un factor que debe diseñarse adecuadamente; los lazos (circuitos) de control deben equilibrar la cantidad de combustible y aire que se alimentan y los gases que se extraen del hogar de la caldera para que los sets de operación se mantengan constantes.
- *La humedad del bagazo*, esta variable afecta la combustión del bagazo retardándola, ya que el calor generado por el combustible primero deberá evaporar el agua contenida para luego seguir quemando y gasificando la fibra. La humedad dependerá de la cantidad de agua de imbibición usada en la extracción del jugo y de las condiciones de operación de los molinos. Debe encontrarse un equilibrio para optimizar el uso los recursos y las operaciones, a fin de sacar el mayor rendimiento posible en los procesos de extracción y de generación de vapor.
- *El exceso de aire*, un proceso eficiente de producción de vapor es aquel que también controla estrechamente el exceso de aire en la combustión, un exceso de aire asegura la transformación de todo el carbono en dióxido de carbono y saldrá en los gases de chimenea. Por el contrario, una menor cantidad de exceso de aire hace que parte del combustible que entra al hogar no se queme totalmente, produciendo monóxido de carbono (CO) y partículas carbonosas, por lo tanto aumentan las pérdidas por combustible no quemado y hay mayor porcentaje de cenizas en los drenajes, ceniceros y chimeneas. Demasiado aire también promueve la formación de NO<sub>x</sub> y baja la temperatura de los gases.
- *La cantidad de ceniza*, las cenizas que se forman en la combustión, están compuestas en su mayoría por arena del campo, que no arde y pasa inmediatamente a formar parte de los “no quemados” de la caldera. Las cenizas y arenas menos pesadas vuelan junto a los gases de combustión hacia la chimenea, y causan desgaste por abrasión en los componentes por donde pasan, especialmente en las regiones de máxima velocidad de los gases.

- *La operación*, las buenas prácticas de operación de una caldera acuotubular incluyen un adecuado control químico del agua de alimentación, una limpieza oportuna del hollín adherido a las tuberías de transferencia, una limpieza rápida y eficiente del hogar y parrilla del hogar.
- *El diseño del hogar*, una parrilla de fácil limpieza, sin entradas de aire exterior, con entradas de aire de combustión adecuadas y bien dispuestas, con alimentadores de bagazo que contabilicen y desmenucen el bagazo y toberas que produzcan una fuerte turbulencia en el hogar garantizan una eficiente combustión del bagazo.
- *El monitoreo*: Las variables operativas de la caldera, tales como, el nivel de agua de alimentación, presión, temperatura, eficiencia, caudal de vapor, etcétera se monitorean constantemente a través de un adecuado sistema de medición y alarmas que respondan a los valores permisibles de operación.

**Producción de vapor de proceso:** El vapor de escape no se produce directamente en las calderas; este vapor que generalmente tiene una presión de entre 15-25 psig, es el vapor principal que ya entregó la mayor parte de su energía en las turbinas, que sale casi agotado de las mismas y se conduce hacia el proceso industrial transformándose así en vapor de proceso. La cantidad de vapor de escape es la misma que el vapor producido en las calderas, solo que de menor presión y temperatura. Este vapor constituye la razón número uno por la que el proceso se convierte en cogeneración. Comúnmente, el proceso industrial es el que determina qué cantidad y presión de vapor de escape se necesita; la producción de energía eléctrica por cogeneración está estrechamente ligada a este requerimiento, es decir, si el proceso industrial disminuye o se detiene, también deberá disminuir el proceso de cogeneración de energía eléctrica y, por consiguiente de energía térmica primaria en las calderas. De otra manera, el vapor de escape tendría que tirarse a la atmósfera perdiéndose para siempre.

### **Generación de energía eléctrica**

La energía eléctrica es producida en los turbogeneradores; el vapor principal generalmente sobrecalentado, proveniente de las calderas ingresa a la turbina en la cual la energía se transforma de energía térmica a trabajo mecánico: La turbina gira rápidamente acoplada a un generador eléctrico que a la vez produce una corriente eléctrica; esta corriente es transformada y conducida a los equipos eléctricos del proceso de fabricación de azúcar y del mismo proceso de generación de energía. Los excedentes de electricidad son conducidos a la red eléctrica nacional para ser distribuida por empresas externas.

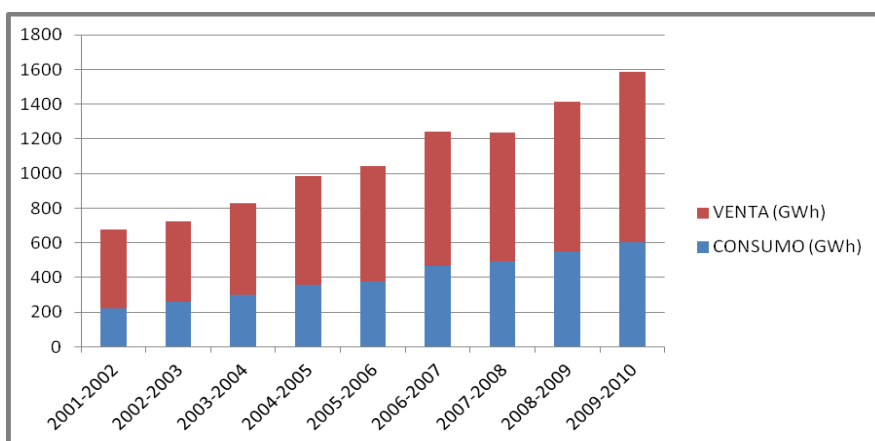
**Transformación de energía mecánica a eléctrica:** La turbina es una máquina rotativa de alta velocidad; se necesita que una fuerza motriz la haga girar y esa energía la aporta el vapor generado en la caldera, que es conducido por tuberías



de acero y admitido dentro de la turbina de forma controlada por medio de válvulas de admisión que, automáticamente controlan el flujo de vapor de acuerdo con la regulación de carga eléctrica de la máquina. El vapor que ha ingresado a la turbina pasa por la placa de toberas, encargada de distribuir inicialmente el vapor sobre todos los álabes de la primera rueda de la turbina, y así sucesivamente el vapor pasa impulsando a todas las ruedas de la turbina, en cada etapa el vapor pierde parte de su presión, temperatura y velocidad. La turbina está acoplada a un generador eléctrico, por lo tanto el generador gira junto con la turbina; en algunas unidades existe un reductor de velocidad acoplado entre la turbina y el generador. El trabajo que el vapor hace en la turbina se manifiesta como energía mecánica de alta rotación; el rotor del generador gira dentro de un estator fijo que le rodea y por efecto del campo magnético entre ellos se establece una corriente eléctrica de alto voltaje.

**Utilización de la energía eléctrica:** La energía eléctrica que fluye desde el generador, es conducida a transformadores que suben o bajan el voltaje de la corriente, dependiendo del uso posterior. La energía eléctrica de menor voltaje es enviada a los diferentes procesos industriales para cubrir todas las necesidades de energía eléctrica internas de la planta, tales como iluminación, aire acondicionado, potencia para mover equipos mecánicos, eléctricos y controles electrónicos.

La energía eléctrica es transformada a mayor voltaje, generalmente a 69,000 ó 230,000 Voltios y 60 Hz, con el fin de poder sincronizar con la red eléctrica nacional y vender los excedentes producidos. Paralelamente, en la turbina se está descargando vapor de escape que constantemente fluye hacia el proceso industrial, así termina y se mantiene el ciclo de la cogeneración.



**Figura 7. Venta y consumo de energía eléctrica de los ingenios cogeneradores**

En la Figura 7, se ilustra el aumento de la generación de energía eléctrica de los ingenios cogeneradores, pero también se ve cómo ha incrementado el consumo interno de los mismos, en parte, por la electrificación de los tándems de molinos, este consumo representa oportunidades de mejora que se pueden monitorear a través del uso adecuado de índices de eficiencia energética.

## ÍNDICES DE EFICIENCIA

La eficiencia energética de una central cogeneradora de un ingenio azucarero se mide básicamente a través de los índices de consumo de vapor, generación excedente y generación de vapor. Estos índices se expresan como:

- Consumo específico de vapor en el proceso ( $Kg_v$ ) por cada tonelada de caña molida ( $T_c$ ). Si disminuye el consumo de vapor en el proceso, se tendrán mayores excedentes de combustible y se amplía el rango de fechas operativas de la planta cogeneradora.

$$\text{Consumo de vapor} = Kg_v / T_c$$

- Índice específico de generación de electricidad excedente, expresado en KWh de electricidad excedente (no es considerado el consumo interno) por tonelada de caña molida ( $T_c$ ). A mayor excedente de energía eléctrica mayores ingresos por aumento del volumen de venta a la red eléctrica nacional.

$$\text{Generación excedente} = KWh/T_c$$

- Índice de generación de vapor, representa los kg de vapor generados en la caldera por cada kg de bagazo utilizado como combustible.

$$\text{Generación de bagazo} = Kg_v / Kg_b$$

Representa el rendimiento del ciclo del proceso cogenerador; a menor consumo de bagazo mayor excedente de combustible y mejor aprovechamiento de los recursos.

## COSTOS

Para contabilizar los costos de la cogeneración, primero se establece el costo del combustible-bagazo que tiene un costo correspondiente a la energía consumida en el proceso de extracción; deben agregarse los costos operativos (personal y

mantenimiento), el costo de insumos químicos para tratamiento de agua y el costo de la energía eléctrica consumida para los equipos propios de la planta cogeneradora.

Para establecer los costos de la cogeneración primero se debe distribuir y diferenciar los costos asociados a los diferentes procesos:

- El costo de producción de la energía eléctrica
- El costo de la extracción de azúcar y todo el consumo energético del proceso
- El costo del vapor de escape consumido en el proceso industrial

Segundo, se define la manera de asignar costos del combustible atribuidos a cada consumidor de energía del proceso, en la medida de lo posible, esta asignación de costo debe hacerse en base a saltos de entalpía, es decir, que debe ponderarse la energía de acuerdo con su capacidad de aportar trabajo en el punto donde es demandada.

## GLOSARIO

**Biomasa:** Masa integrada por componentes biodiversos con características de combustibilidad. Para el presente caso se refiere a la masa sujeta de combustión en los ingenios, basada en bagazo de caña.

**Potencia eléctrica:** Para un generador, la potencia es la medida de la capacidad de la planta de producir energía eléctrica, es la cantidad de energía eléctrica que dispone una planta para entregar a sus clientes. Para un consumidor, es la medida de la cantidad de energía eléctrica que necesita para operar o la cantidad de energía eléctrica que demanda de su proveedor.

**Energía eléctrica:** Se denomina así a la forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos, lo que permite establecer una corriente eléctrica entre ambos.

**Picadoras y molinos:** Equipo que prepara, desmenuza y extrae el jugo y el bagazo de la caña de azúcar.

**Zafra:** Periodo del año en que se cosecha, transporta, muele y procesa la caña de azúcar para la fabricación de dicho producto.

**Caldera:** Generador de vapor que utiliza el calor emanado por la quema de un combustible para producir vapor de agua a determinada presión y temperatura.

**Turbina:** Máquina rotativa en la que se utiliza el vapor para transformar la energía térmica a mecánica. Si está acoplada a un generador se genera paralelamente energía eléctrica, y al conjunto combinado se le denomina TURBO-GENERADOR

**Acuotubular:** Caldera que utiliza una gran cantidad de tuberías dentro de las cuales circula agua, esta al recibir una transferencia de calor se evapora.

**Vapor principal:** Vapor generado en las calderas acuotubulares para el uso posterior y exclusivo en turbinas.

**Vapor de escape:** Vapor que se descarga en la etapa final de las turbinas, y del cual aún se puede aprovechar energía en un proceso industrial posterior.

**AMM:** Administrador del Mercado Mayorista de Guatemala, ente encargado de coordinar las transacciones entre los agentes del sector de energía eléctrica del país.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Administrador del Mercado Mayorista. 2011. Informe Estadístico 2010. Guatemala. 32 p.
2. Agüero, C.; Pisa, J.; Andina, R. 2006. Consideraciones sobre el aprovechamiento racional del bagazo de caña como combustible. Perú. 8 p.
3. Batres, Luis. 2008. Beneficios económicos de instalar una planta cogeneradora de energía en Guatemala. España. 89 p.
4. Castillo, Leonidas. 2010. Resultados zafra 2009-2010. Presentación de la Asociación de cogeneradores independientes. Guatemala, CENGICAÑA.
5. Hugot, E. 1964. Manual para Ingenios Azucareros. USA.
6. Kenneth Wark, Jr. 1996. Termodinámica. Quinta Edición. Editorial McGRAW-HILL. pp. 783-787.
7. Logan, Christel. 2008. Régimen jurídico aplicable a la actividad de generación de energía eléctrica en el ordenamiento jurídico guatemalteco. Guatemala. 134 p.

8. Spiewak, Scott A. 1987. Cogeneration & Small power production manual. USA. The Fairmont Press, INC. 642 p.
9. Vargas, Luis; La Fuente, Fernando. 2000. Cogeneración en Chile. Potencialidad y desafíos. Revista Chilena de Energía. Volumen 430. pp. 1-4.