

**Título:** Posibilidades del ahorro energético en la entrega de electricidad al SEN por fábricas de azúcar.

**Title:** Possibilities of the energy saving in the electricity delivery to the SEN from sugar factories.

Autores: MSc. Ing. Ovaldo Romero Romero, Prof. Aux.  
Ing. Ernesto Barrera Cardoso.  
Dr. Ing. Rolando Alfredo Hernández León, Prof. Tit.  
Dr. Ing. Héctor Pérez de Alejo Victoria, Prof. Tit:

Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales. Avenida de los Mártires No 360. CP 60 100. Sancti Spiritus.  
Telef. 0053 41 2 77 68. Email. [osvaldo@suss.co.cu](mailto:osvaldo@suss.co.cu)

### **Resumen**

En el presente trabajo se realiza un análisis de las posibilidades de incrementar la entrega de electricidad al sistema electro energético nacional, SEN, mediante la identificación de potenciales de ahorro de energía eléctrica, mecánica y térmica; con ese objetivo se realizan electro balances de la instalación, se analizan los principales equipos consumidores de energía mecánica y se profundiza en aspectos fundamentales del consumo de energía térmica.

Se obtienen como resultados más importantes que el estudio de estos potenciales constituye una importante herramienta para identificar las vías y métodos de incrementar la entrega de electricidad al SEN y aplicarlo a la fábrica Melanio Hernández permitió identificar en este central un potencial de venta de electricidad superior a los 4.33 GWh de energía anuales, que le posibilitarían obtener ingresos brutos por más de 207 800.00 USD por zafras de 120 días y un 85 % de aprovechamiento de la capacidad potencial, representando estos potenciales una generación de 1,5 MW de potencia.

Palabras Claves: Ahorro de energía, cogeneración, industria azucarera.

### **Abstract**

In the present work it is carried out an analysis of the possibilities of increasing the electricity delivery to the electric national system, ENS, by means of the identification of potentials of electric, mechanics and thermal energy saving; with that objective electro balances of the installation, the main consumers of mechanical energy are analyzed and it is studied the fundamental aspects of the consumption of thermal energy.

They are obtained as the most important results that the study of these potentials constitutes an important tool to identify the roads and methods to increase the electricity delivery to the ENS and to apply it to the factory Melanio Hernández. It allowed to identify in this mill one annual potential of electricity supply bigger than 4.33 GWh of energy, that would easy up gross incomes for more than 207 800.00 USD for sugar season of 120 days and 85 % of usage of the potential capacity, representing these potentials a generation of 1,5 MW of electricity.

Key words: Energy saving, cogeneration, sugar industry.

### **Introducción**

Desde 1996 el Centro de Estudios de Energía y Procesos Industriales del Centro Universitario José Martí Pérez vienen trabajando en un proyecto para extender la generación de energía eléctrica en la industria azucarera, para lograra así la factibilidad económica de inversiones para plantas modernas de cogeneración con bagazo en esta industria. En el desarrollo del trabajo se han planteado, además de una solución de combustible para extender la operación al período estimado, un procedimiento de análisis de fábricas de azúcar que desean incrementar la entrega de electricidad al sistema electro energético nacional, SEN.

La mayoría de los trabajos revisados en la bibliografía insisten en la necesidad de realizar un diseño adecuado para la planta de cogeneración, pero no siempre se profundiza en la necesidad del mejoramiento energético de la instalación; en este sentido es común que se realicen análisis de posibilidades de incrementar la entrega al SEN por soluciones aislada, sin embargo, no aparecen trabajos que realicen un

análisis integral de las oportunidades de incrementar la entrega de electricidad al SEN, mediante el estudio de potenciales de los diferentes tipos de energía que se utilizan en una fábrica de azúcar.

El presente trabajo tiene como objetivo mostrar la experiencia de un estudio de potenciales energéticos como vía de incrementar la entrega de electricidad al SEN en una fábrica de azúcar que trabaja por montar una planta de cogeneración a alta presión.

### Material y Método

#### Potenciales de ahorro de energía eléctrica.

Se propone realizar electro balance de la instalación según León 99 (5), lo que permite determinar entre otras cosas las pérdidas energéticas en los circuitos de la instalación y evaluar potenciales de ahorro como el que se obtienen por reubicación de los capacitores en el caso estudiado en este trabajo. Los capacitores deben ser instalados con la observación de las exigencias de seguridad contra incendio en la pizarra de distribución de los grupos de carga, debido a que la instalación centralizada en la pizarra central es menos conveniente. Basado en lo anterior se realizó un estudio de la reubicación de las unidades capacitivas desde la barra central, donde estaban instalados, hasta los diferentes puntos del sistema. Los grandes bancos de capacitores se separaron en pequeñas unidades y se distribuyeron por los circuitos que más circulaba la potencia reactiva y tuvieran más bajo el factor de potencia. El siguiente algoritmo explica los pasos propuestos para determinar estos potenciales.

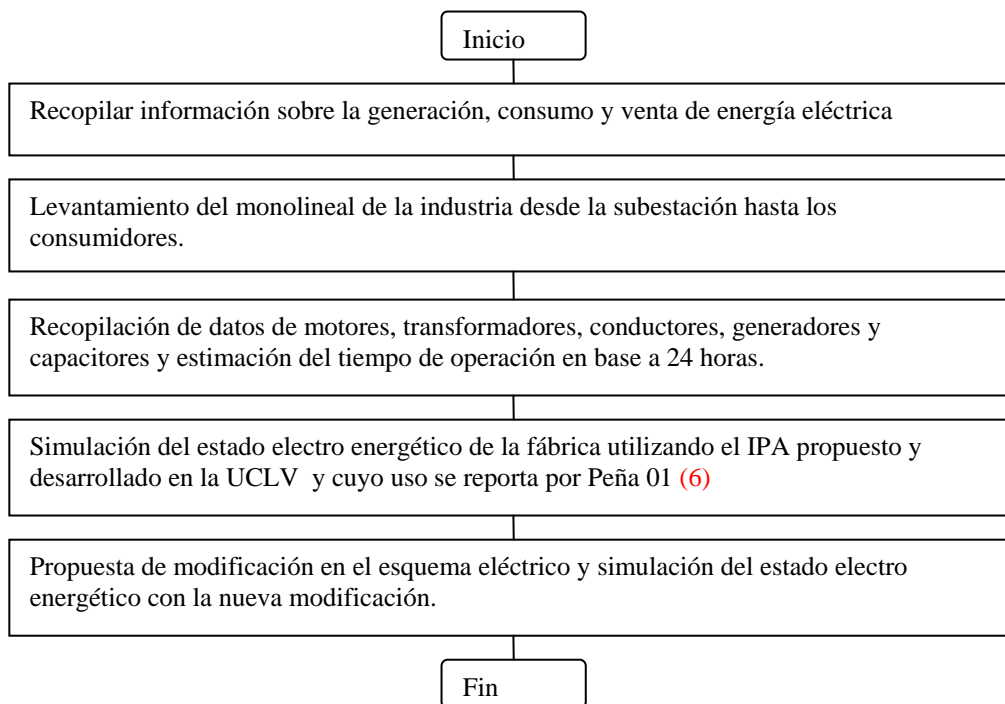


Diagrama No 3: Algoritmo para determinar los potenciales de ahorro de energía eléctrica.

#### Potenciales de ahorro de energía mecánica.

Para analizar los posibles potenciales de ahorro de energía mecánica se propone recopilar información a cerca de los principales consumidores de energía mecánica, a partir de ahí trabajar por identificar aquellos grandes consumidores de esta energía y estudiar alternativas de minimizar el consumo de estos grandes consumidores, para lo cual se pueden utilizar herramientas automatizadas métodos de cálculos propuestos y validados por otros autores. En el ahorro de energía mecánica existe un alto potencial de entrega de electricidad, pocas veces considerado cuando se trabaja en esta dirección y existen métodos para determinarlo.

Lo primero que se debe realizar es una caracterización del estado de las cargas de los sistemas de bombeo, para ello se analizan los siguientes aspectos Valle 00 (8).

- Se determina índice de carga para cada equipo, para tener información de si el motor se encuentra subcargado o sobrecargado, este índice es la relación existente entre la potencia real consumida o demandada y la potencia de chapa o sea:

$$\text{Índice de Carga} = \frac{N \text{ chapa}}{N \text{ régimen}} = \frac{I * V * \cos \varphi * \eta \text{ (chapa)}}{I * V * \cos \varphi * \eta \text{ (régimen)}} \quad (2.34)$$

- Se determina un índice de energía consumido o en régimen en (kWh/turno), resultado de la multiplicación del índice de energía instalado por el índice de carga.
- En ambos casos, índice de energía instalado e índice de energía a régimen, se calcula el índice total por área y el por ciento que representa cada una del total, para realizar diagramas de Pareto que caractericen a las áreas mayores consumidoras y a los motores más alejados de su carga nominal en cada área.

El ahorro de energía eléctrica ( $Ahe_t$ ) se puede determinar también por la formula siguiente planteada por (5, 6, 8):

$$Ahe = \sum_1^n ( Fc/100 (0.746 * Pn) * To * Ce * ((100/\eta_b) - (100/\eta_a))) \$ \quad (2.35)$$

**Donde :**  $Ahe_e$  : Ahorro de energía (\$ / año), **N** : Horas diarias de operación, **Fc**: Factor de carga del motor a la hora n ( %), **Pn**: Potencia nominal del motor (HP), **To**: Tiempo de operación anual (horas), **Ce** : Costo de la energía a la hora n ( \$ / kWh),  $\eta_b$ : Eficiencia del motor en operación para el estado de carga en la hora n. (%),  $\eta_a$ : Eficiencia del motor sustituto para el estado de carga en la hora n (%).

Con esta información, se proceden a estudiar alternativas de utilización de estos potenciales como sería utilizar motores de alta eficiencia o el uso de reguladores de velocidad en bombas de la fábrica donde existan otros métodos de regular flujo. (6, 8)

Más adelante se realiza un análisis de posibilidades de entrega de energía por realizar otros cambios, como por ejemplo, el efecto en la entrega de electricidad de cambiar conductores de bagazo de rastrillo a conductores de banda. Se determina también el consumo de potencia del TANDEM con el accionamiento por máquinas de vapor, con motores eléctricos y motores hidráulicos. Para cada uno de los medios de accionamiento se construyen los diagramas de Sankey y se calculan las ventajas energéticas y económicas de usar motores eléctricos o hidráulicos en comparación con las máquinas de vapor, lo cual se toma en cuenta como posible potencial de ahorro de energía mecánica.

### **Potenciales de ahorro de energía térmica.**

Las posibilidades energéticas por el ahorro de energía térmica es bien demostrada desde que se analizan diferentes alternativas del esquema térmico, sin embargo aún cuando se obtengan alternativas adecuadas para la instalación y los objetivos propuestos, siempre es posible encontrar nuevos potenciales de ahorro para incrementar la electricidad que se entrega al SEN, para ello se propone, seguir los mismos pasos dados para el caso de la energía mecánica.

Con el objetivo de conocer el potencial de ahorro de energía térmica del proceso, se profundiza en los parámetros térmicos del área de evaporación, cocción y calentamiento para el esquema de la fábrica, se realizan simulaciones del esquema con parámetros reales y se valora el aporte en energía eléctrica al realizar las modificaciones. (4, 3, 1)

Otros elementos y soluciones novedosas dentro de las posibilidades de ahorrar energía térmica se pueden analizar. En el trabajo se hace un diseño teórico de un intercambiador de calor para la primera etapa de calentamiento del jugo mezclado, el cual funciona con vapor de los tachos; se conoce que el vapor de jugo de los tachos tiene una presión absoluta que puede variar entre 0,14 y 0, 25 bar, en este caso la presión de este vapor es de 0,17 bar y tiene una temperatura de 56,6 ° C aproximadamente. Utilizando esta información se procede al diseño teórico del equipo, utilizando para ello una hoja de cálculo de Excel dada por Christoph 95 y Romero 99 (2, 7).

## Resultados y discusión.

### Potenciales de ahorro de energía eléctrica.

Después de realizar el electro balance de la fábrica a partir del monolineal de la instalación, se resume en la tabla 1 los ahorros de energía activa y reactiva que se obtiene al simular en el electro balance la reubicación de los capacitores.

**Tabla 1:** "Reducciones de perdidas por la reubicación de las unidades capacitivas"

Elemento	Perd. (kWh/d)	Perd. (KVARh/d)	Red. de Per. (kWh/d)	Red. de Per. KVARh/d)	Reducción de Perdidas en el Central. (MWh/a)	
					Activa	Reactiva
Línea	1260	932	768	24		
Transformadores	342	1842	3	433	78,64	44,47

Estos ahorros pueden convertirse en ingresos por más de 3 800 USD por zafras, si se exportan al SEN a un precio de 48 \$/MWh, puede observarse el impacto que puede tener una sola transformación en los circuitos eléctricos, esto ratifica la necesidad de profundizar en aspectos referidos al consumo de energía.

### Potenciales de ahorro de energía mecánica.

La tabla 2 muestra los resultados de simular la sustitución de 11 motores subcargados de eficiencia estándar por motores de alta eficiencia, solución que daría lugar a una reducción del consumo de energía eléctrica de 709 kWh/d, lo que representaría para una zafra de 120 días y un 15 % de tiempo perdido un total de 72.32 MWh/zafra que se podrían vender al SEN y producir ingresos de alrededor de 3 500 \$ para el mismo período.

**Tabla 2:** "Ahorros por sustitución de motores de eficiencia estándar por motores de alta eficiencia"

Motor	KW (baja efi.)	HP (alta efi.)	Fp(%)	Ef.(%)	Carga(%)	E.ahor. (kWh/d)	E.ahor. (kVARdd)
M46	100	40	23.8	10	84.1	74.4	559.7
M113	185	125	6.7	5.1	82.9	110.4	430.7
M149	180	100	15.3	6.6	89	122.4	808.2
M132	127	100	5.5	4.1	84.5	70.8	278.7
M50	65	50	8.1	3.1	99	38.4	266.3
M98	85	60	6	2.8	98.6	33.6	202.3
M252	7.46	7.5	10.8	5.7	72.3	7.2	43.4
M253	7.46	5	8.9	9.7	79.2	9.6	40.3
M268	5.5	3	20.8	9.5	99.3	7.2	44.9
M40	7.46	5	9.8	7.5	79.6	7.2	29.5
M26	55	60	2.1	3.3	87.7	36	78.3

Las tablas 3 y 4 muestran la energía que se puede ahorrar y los ingresos que reportaría si se utilizan reguladores de velocidad en dos bombas, en lugar de recircular jugo para controlar el flujo, en ambos casos produciría ingresos superiores a los 2500 USD por zafra. Cálculado con el software profesional Energy.

**Tabla 3:** Ahorro de energía bomba de guarapo a fábrica por uso de reguladores de velocidad.

	Resumen de Resultados			
	Throttling	A.C-Drive	Recirculation	A.C-Drive
Consumo (KWh/zaf.)	134862	83757	137422	83757
Total Energy savings	51105		53665	
USD savings	2453,04		2575,92	

**Tabla 4:** Ahorro de energía en la Bomba Intupible 5 por el uso de reguladores de velocidad.

	Resumen de Resultados			
	Throttling	A.C-Drive	Recirculation	A.C-Drive
Consumo (KWh/zaf.)	-	-	137422	83757
Total Energy savings	-		53665	
USD savings	-		2575.2	

En la tabla 5, se resume el ahorro energético y el valor económico, por sustituir los conductores de tablilla para bagazo por conductores de banda. La tabla 6 muestra el resumen de los ahorros que se obtendrían para dos variantes alternativas de accionamiento del TANDEM en comparación con las máquinas de vapor.

**Tabla 5:** Ahorro de energía y ganancias por la remodelación de dos conductores de bagazo.

Disminución de potencia en ambos conductores. (kW)	Energía que se ahorra en una zafra de 120 días. (MWh)	Valor de las posibles ventas de esta energía. (\$)
10,61	25,77	1236,96

**Tabla 6:** Eficiencias de los equipos, consumo de potencia y costos de la energía para dos variantes de accionamiento del TANDEM.

	Alternativas		
	Sist. Actual. Maq. Vapor.	Motores eléctricos.	Motores hidráulicos.
Eficiencia de los equipos motrices. (%)	60.6	95	93
Eficiencia de la transmisión del TANDEM (%)	67.64	60	85
Eficiencia total de equipos motrices y transmisiones. (%)	41	57	79
Potencia requerida para accionar los equipos. (KW)	3043.3	2188.2	1577.7
Consumo de energía para una zafra. (KW.h/zaf.)	7449998.4	5356713	3862209.6
Ahorro de energía con relación al esquema actual.		2093,285.4	3587,788.8
Costo de la energía consumida para una zafra.(\$/zaf.)	294200.6	214268.5	154488.4
Ahorros con relación al esquema existente.		79932.1	139712.2

Puede apreciarse que existe un alto potencial por ahorro de energía mecánica, que para este central, según los análisis realizados se podrían ahorrar alrededor de 2,3 GWh de energía en una zafra de 120 días y un 15 % de tiempo perdido, de los que 2.1 GWh, es decir el 91 % se puede aprovechar con solo electrificar el TANDEM.

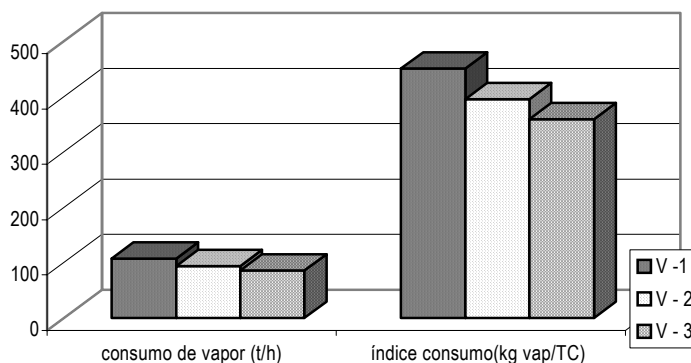
#### Potenciales de ahorro de energía térmica.

La tabla 7 muestra los ahorros de energía que se producirían si al utilizar una turbina de extracción condensación de 23 MW de potencia y 6 MPa de presión de vapor, al esquema térmico de proceso en operación en Melanio Hernández se le incorpora un nuevo preevaporador de mayor capacidad y se mejoran los parámetros termodinámicos en evaporadores y calentadores, esto podría incrementar la generación en 0.71 MW de potencia y los ingresos en 98 150 \$/zafra.

**Tabla 7:** Incremento de la generación por cambios en el esquema energético.

	Consumo vap(t/h)	Exergía entrada	Pérdida exergía	Exergía térmica	Generac. Electric.	Ganancias
Propuesta 3	86.1	38.96 MW	6.56 MW	87.11 MW	23.69 MW	0.71 MW
Propuesta A.	107.95	38.96 MW	6.56 MW	94.07 MW	22.97 MW	98150.4 \$

**Gráfico 3.5:** Índice y consumo de vapor para las propuestas 1, 2 y 3



La determinación del ahorro de vapor por una nueva modificación al esquema térmico para incrementar la generación de energía eléctrica en una turbina de extracción condensación se resume en el gráfico 3.5, puede verse como es posible aprovechar nuevos potenciales de energía térmica a partir del mejoramiento de los parámetros de operación de los equipos de proceso, simulados con el SIMFAD; por otra parte el diseño teórico de un intercambiador que trabaja con vapor de los tachos constituye una posibilidad novedosa de explotar mejor el potencial de los flujos térmicos intermedios del proceso azucarero, para generar mayor cantidad de energía eléctrica al SEN, la siguiente tabla da cuenta de ello. Esta solución permitiría incrementar la entrega de electricidad al SEN en otros 13 KW, lo que permitiría obtener ingresos para una zafra de más de 1800 USD, por las ventas de esta energía.

**Tabla 8:** Resultados del diseño teórico de un intercambiador de calor para la primera etapa de Calentamiento, usando vapor de jugo de los tachos como elemento calefactor.

Parámetro	Valor de diseño
Presión del vapor de los tachos (Pa)	0,0017
Temperatura del vapor ° C	56, 6
Temperatura de entrada del jugo ° C	35
Temperatura de salida del jugo ° C	50
$\Delta t$ (k)	12,65
Coefficiente de transferencia (U) (W/m <sup>2</sup> k)	900
Número de tubos	539
Diámetro del equipo (m)	1,4
Velocidad del jugo en los tubos (m/s)	1,68
Caída de presión del jugo (bar)	1,23
Diámetro de la tubería de vapor (m)	0,80
Vapor de jugo que condensará (t/h)	5,8
Ahorro de agua al condensador (t/h)	106
Ahorro potencia bomba de inyección (kW)	10
Ahorro de vapor de escape (t/h)	2,0
Rendimiento exergetico esperado (%)	89

### Conclusiones

1. Solamente por la reubicación de los capacitores, se encontró en esta fábrica un potencial de más de 80 MWh/a que permitirían obtener ingresos por ventas de más de 3800.00 USD.
2. El análisis de cinco aspectos relativos al consumo de energía mecánica en la fábrica permitió identificar un potencial de entrega de electricidad al SEN de más de 2,3 GWh anuales, dentro del que la electrificación del TANDEM aportaría el 90 %.
3. Profundizar en las relaciones energéticas del esquema de evaporación – cocción – calentamiento permitió identificar potenciales por este concepto de cerca de 0.8 MW, lo que significaría ingresos por 110 000.00 USD en una zafra de 120 días.
4. El estudio de los potenciales de entrega de electricidad por ahorro de energía en el central constituye una importante herramienta para determinar las vías y los métodos de elevar este indicador en una fábrica de azúcar que trabaja por elevar la cogeneración.

### Recomendaciones

Realizar estudios integrales de potenciales energéticos en las fábricas de azúcar que pretenden desarrollar la cogeneración como estrategia de diversificación.

### Bibliografía

1. [BarC 01] Barrera Cardoso, E. L. Cogeneración. Variante de esquemas térmicos y emisiones asociadas en el CAI Melanio Hernández. Ernesto Luis Barrera Cardoso:Osvaldo Romero Romero.-- T.D.UCLV. 2001.
2. [Chr 95] Christoph D, Manzke, E. Nutzung von Brüden der Verdampfungskristallisatoren zur Rohsafterwärmung in einem neuen Robündelwärmeübertrager in der Zuckerfabrik Groningen. Zuckerindustrie No 2, 1995.

3. [DeAC 98] De Armas, C. M. Sobre modelación y simulación de procesos con un enfoque energético en el área de evaporación-calefacción. VII curso-seminario internacional de turbo maquinaria. Querétaro, junio de 1998.
4. [Ker 75] Kern, D. Procesos de transferencia de calor. Edición Revolucionaria. La Habana. 1975.
5. [Leo 99] León Benítez, C. A. y Percy Viego, F. Ahorro de energía mediante el empleo de motores de alta eficiencia en la industria azucarera. Centro Azúcar, No 3. 1999.
6. [PeñD 01] Peña Cuenca, D. Estudio electro energético, cogeneración y ahorro de energía en el CAI Melanio Hernández. Darío Peña Cuenca: Osvaldo Romero Romero.--T.D.UCLV. 2001.
7. [Rom 99] Romero Romero, O. Berechnung einer Variante zur Verrinderung des Dampfverbrauches einer Zuckerfabrik mit der Nutzung von Brüden der Kristallisationsanlage/Osvaldo Romero Romero: D. Christoph.—Projektarbeit. Bibliothek des Zuckerinstitutes Berlin, August 1999.
8. [Vlle 01] Valle Toledo, R. Alternativa de ahorro de energía en el CAI Melanio Hernández. Rómulo Valle Toledo: Osvaldo Romero Romero.--T.D.UCLV. 2001.