

COMPETITIVIDAD Y EFICIENCIA EN LAS OPORTUNIDADES DE AHORRO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA INDUSTRIA AZUCARERA

**Julio R. Gómez Sarduy, Marcos A. de Armas Teyra,
Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos;
Ariel Gil Lozano,
E. A. "Ciudad Caracas", Ministerio del Azúcar, Cienfuegos**

Recibido: 4/enero/2005

Aprobado: 8/septiembre/2005

Se describen las oportunidades y los aspectos técnicos y económicos que deben considerarse en un programa de reducción del consumo de energía eléctrica en la industria azucarera. Se toma como caso de estudio una fábrica de azúcar con capacidad para procesar 4 000 toneladas de caña/día, que está situada en la provincia de Cienfuegos. Esta es una época de competencia para la industria azucarera y la energía ha sido siempre un factor que se debe considerar en la efectividad económica y una contribución al alivio del impacto de las tecnologías fósiles sobre el medio ambiente. Actualmente el ahorro de energía eléctrica puede considerarse una fuente de ingresos que no ha sido totalmente aprovechada debido a que se considera un subproducto que se obtiene con bajo costo en el proceso de producción de la industria azucarera. Sin embargo, existe un grupo considerable de oportunidades entre las que se destacan la operación eficiente de bombas, selección adecuada y un programa de reposición de motores eficientes, utilización de accionamientos de velocidad variable, reducción de las pérdidas en engranes y transmisiones, mejoramiento del factor de potencia, administración de la demanda, mejoramiento de la I & C, etcétera. De esta forma, la energía eléctrica ahorrada es una oportunidad de reducir costos e incrementar ganancias y una vía hacia el desarrollo sostenible.

Palabras clave: Industria azucarera, ahorro de energía eléctrica, eficiencia

Competitivy and efficiency in Electrical Energy savings opportunities in the Sugar Industry

This is an epoch of competition. Energy will always be fundamental in the tides of the market. Energy saved is a gate to economical effectiveness and a contribution of the sugar cane industry to gas emission reduction from fossil-fueled power plants. In the past century researchers focused on combustion, thermal and mechanic energy efficiency through efficient boilers, heat recovery systems, evaporators, general equipment design, operation management etc. Now days saved electric energy is an important source of revenues and a resource not enough considered because, perhaps, it's by-product and low cost of production in the sugar industry. There are some factors related with electric energy consumption in sugar factories; among them: motors and pumps efficient operation, selection and replacement program of electric motors, efficient and adjustable speeds drives, gearing losses, power factor improvement, load management systems, efficient lighting, I&C, etc. So energy saved is an opportunity to reduce costs and increase revenues and a way to sustainable future. This article relates the opportunities and the technical and economic aspects to be considered in an electric energy consumption improvement program in the sugar industry. Is supported, as a study case, in a 4 000 t/day sugar cane capacity factory in Cienfuegos Province.

Key words: Sugar Industry, saving electric energy, efficiency.

* Ms. Sc. del Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos, Cuba, [E-mail: jugosa@fmec.ucf.edu.cu](mailto:jugosa@fmec.ucf.edu.cu).

INTRODUCCIÓN

La industria azucarera, con la producción combinada de potencia y calor logra una eficiencia elevada de forma económica y simple en comparación con otros ciclos energéticos. La industria tradicional ha considerado la energía eléctrica un subproducto elemental y barato del proceso y no es frecuente encontrar información, procedimientos y programas de ahorro de energía eléctrica, si se compara con los numerosos trabajos desarrollados en cuanto a generación de vapor, evaporación y calentamiento, y molinos, desde épocas pasadas.

La reducción del consumo interno de energía eléctrica no es solo importante desde el punto de vista de compra y venta de energía en el mercado, sino, además, por el incremento de la participación de la biomasa en la estructura energética de una nación y por el imperativo de aliviar los cambios climáticos que propone la energética actual a las generaciones futuras. Un programa de ahorro y uso eficiente de la energía eléctrica en la industria azucarera tiene particularidades en dependencia de la tecnología, tipo de industria, lugar que ocupa la energía en las prioridades de desarrollo, el financiamiento, la preparación de los recursos humanos, visión de la gerencia, etcétera. En términos generales, el análisis que aquí se presenta es aplicable a todas las instalaciones y proporciona la información necesaria para establecer los criterios de medida y las acciones a tomar. Identificar las oportunidades de ahorro es un paso fundamental.

DESARROLLO

En las fábricas con generadores sincronizados al Sistema Electroenergético Nacional (SEN), una condición indispensable para lograr excedentes de energía eléctrica que puedan comercializarse en la red pública es superar la demanda interna. En caso contrario se consume energía del sistema, o sea, que los ingresos se incrementan tanto con el aumento de la potencia generada como con la reducción del consumo interno. El nivel de consumo interno se puede reducir, tanto desde la etapa de diseño como mediante la identificación de oportunidades en las industrias en operación.

El consumo de energía eléctrica depende del grado de electrificación. Es posible observar diferentes potencialidades de ahorro en industrias con una electrificación equivalente, atendiendo al tipo de tecnología, antigüedad, prácticas operativas y de administración y al uso eficiente de la energía, etcétera.

Para identificar las oportunidades es cómodo dividir la industria por departamentos, las cargas por accionamiento y tipo de máquinas y las medidas por programas. Los programas pueden ordenarse por su inmediatez, efectividad económica y por sus costos. Para esto, a modo de caso de estudio se utilizó el CAI "Ciudad Caracas", de Santa Isabel de las Lajas, en la provincia de Cienfuegos. Esta es una fábrica totalmente electrificada, sincronizada al Sistema Eléctrico Nacional (SEN), con una norma potencial de 4 025 t/caña/día, una demanda de 5,5 mW y una capacidad de generación instalada de 8,0 mW. En la tabla 1 se muestran los consumos registrados por área y tipo de accionamiento, teniendo en cuenta que 91 % de la carga instalada corresponde a máquinas asincrónicas, 7,4 % a máquinas de CD y el resto a alumbrado y otros consumidores menores.

La última columna de esta tabla muestra el consumo de energía por áreas, destacándose el peso del tándem en el consumo total de la industria.

Análisis de oportunidades. Pérdidas en el tándem

Por tradición, el consumidor principal es el tándem. Este ha sido objeto de numerosos estudios para elevar la eficiencia en la extracción de jugo, el cálculo de la potencia demandada por las mazas cañera, bagacera y superior, el gradiente de velocidad, las coronas y perfiles, el ajuste de la relación entrada-salida, la selección del accionamiento apropiado, etcétera, y son varios los autores que proponen una metodología para el cálculo de la potencia demandada por las unidades de molida, teniendo en consideración varios factores en los sistemas tradicionales que usan reductores y engranes abiertos. En muchos casos, por empirismo, incertidumbre o por razón, se instalan máquinas con una capacidad supe-

Tabla 1. Demanda registrada (en kW) por áreas y equipos

Área	Bombas	Molinos	Cuchillas	Ventiladores	Conductores	Movimientos	Otros	Total
Basculador	38,4		773		56,47	20,7	31,8	920,37
Tándem	97,86	1917,2			21,43	3,95	12,4	2052,84
Tratamiento agua	73,78					2,13	13,9	89,81
Centrífuga de 1 ^{ra}	11,6			20,3	7,5	484	8,3	531,7
Bomba calentadores	120,8							120,8
Cuádruple	71,38							71,38
Purificación	39,47			12,9	6,1	6,88		65,35
Centrífuga de 3 ^{ra}	14,4					168,14		182,54
Miel y urea	36,1					7,6		43,7
Cristalizadores	25,6			12,6		57,7		95,9
Bba. vacío-inyccc.	648,6							648,6
Generación de vapor	172,4			262,96	82,93			518,29
Otros	47,81				0,82	75,2	14,1	137,93
Total	1398,2	1917,2	773	308,76	175,25	826,3	80,5	5479,21

rior a la demanda real del molino o grupo de molinos accionados.

Cuando la selección es un motor eléctrico, el sobredimensionamiento, dentro de determinados límites, si bien provoca una inversión inicial de capital superior, no proporciona una desviación considerable de la operación eficiente del motor. Esto se debe a que en las máquinas eléctricas de gran potencia, la eficiencia tiende a comportarse aproximadamente constante con cargas parciales superiores al 70 % de la potencia nominal. En estos casos lo general es que ocurra un deterioro del factor de potencia, necesiándose determinada compensación del reactivo, encareciéndose así la instalación.

En un análisis integral, la oportunidad de ahorro de energía o de dinero depende del tipo y de la eficiencia de cada motor, del estado de carga en cuestión y de los ahorros adicionales que se obtengan por la mejora del factor de potencia en el circuito.^{1,3}

Otra oportunidad se presenta en la reducción de pérdidas en la transmisión. La velocidad requerida por las mazas de los molinos se logra mediante una serie de reducciones intermedias. La eficiencia total de la transmisión se encuentra entre 69 y 72 %. En la instalación examinada se pierden aproximadamente 575 kW en los reductores y engranes abiertos. Esta es una de las mayores oportunidades de ahorro que existen

en la industria azucarera y que, con las tecnologías tradicionales en uso continuarán disipándose al ambiente. La utilización de equipos motrices individuales en los que se prescindir de las reducciones basadas en relaciones de reductores, catalinas y piñones, permite un ahorro potencial próximo a 10,5 % del consumo total energético de la industria. En este sentido, investigar en la aplicación de los motores hidráulicos u otro tipo de sistema es una alternativa que debe considerarse.

Ahorro en los motores asincrónicos

Un programa de perfeccionamiento energético contempla el análisis de la eficiencia de los motores en operación. Debido a la elevada efectividad económica cuando se mejora ligeramente la eficiencia, es necesario relacionarse con los diferentes métodos de evaluación de la eficiencia, con el grado de complejidad de cada uno de estos, con la precisión que se obtiene, y, sobre todo, que se pueda seleccionar o establecer un procedimiento de acuerdo con cada situación específica.

La mayoría de los motores existentes en la industria han sido evaluados en fábrica por una de las normas siguientes: IEC 34-2; IEEE-112 ó NEMA MG1, aplicadas fundamentalmente en Estados Unidos de Norteamérica, y las JEC-37 y CS-390, en Japón y Canadá, respectivamente.

Un mismo motor, comprobado bajo normas diferentes, arroja eficiencias diferentes. En la indus-

tria surgen complicaciones adicionales debido a que las condiciones establecidas por las normas no se repiten y el límite de desbalance de voltaje y contenido de armónicos puede ser excedido en una medida considerable. Por otra parte, algunos métodos necesitan detener la producción para realizar pruebas, lo cual es un obstáculo para su aplicación práctica.

En la industria del azúcar algunos de estos ensayos necesarios pueden llevarse a cabo en el período inactivo o durante las paradas programadas, si se dispone de las fuentes y equipos necesarios para algunas pruebas. Entonces, cuando se decide evaluar un motor en condiciones de campo es importante usar las técnicas más apropiadas para obtener resultados suficientemente aceptables.

Métodos y mediciones para la evaluación de la eficiencia

Existen muchos métodos para determinar la eficiencia; por ejemplo, la IEEE-112 establece cinco métodos denominados A, B, C, E y F con las variantes E₁, F₁. En la práctica industrial una evaluación puede fundarse en la combinación de varios métodos básicos. Entre estos están:^{4, 5, 6}

1. Método de los datos de chapa
2. Método del deslizamiento
3. Método de la corriente
4. Método del circuito equivalente
5. Método de segregación de pérdidas
6. Métodos estadísticos
7. Método de torque en el entrehierro
8. Método de torque en el eje o método directo

En todos los métodos la eficiencia se calcula según la ecuación siguiente:

$$\eta = P_{SALIDA} / P_{ELECTRICA\ ENTRADA}$$

La potencia de salida es la potencia de entrada menos las pérdidas. De la forma en que se determinan las pérdidas depende la exactitud del método aplicado. Entre las mediciones necesarias pueden encontrarse: lectura de la chapa, medi-

ción de la velocidad por medios ópticos, medición de la corriente, medición de los voltajes de fase o de línea, medición de la potencia de entrada, determinación de la resistencia del estator, temperatura del devanado, medición de torque en el eje, datos de ensayos de vacío y cortocircuito, forma de ondas del voltaje y la corriente y análisis armónico. La adquisición de todos estos datos requiere instrumentos con errores individuales menores de 0,5 %, a plena escala. En particular, en las condiciones de campo, la medición de la velocidad debe realizarse con tacómetros ópticos.

Sustitución de motores subcargados

En la instalación se identificó que el 11,4 % de los motores en operación tenía un factor de carga inferior al 60 %. El número de máquinas, potencia y potencial de ahorro estimado se muestran en la tabla 2. Por supuesto que un programa de sustitución lleva implícito un estudio de cada caso en particular y su correspondiente análisis de costo-beneficio. Sin embargo, en muchos casos existen en la reserva máquinas más apropiadas que pueden instalarse sin grandes costos.

Tabla 2. Motores subcargados

Número de motores	32
Potencia total instalada	480 kW
Potencia real	211,6 kW
Ahorro potencial por selección adecuada del motor	16,92 kW
% de disminución en relación con el consumo total	0,3 %
Ahorro de energía en una zafra	40,62 MW-h

Motores que fallan y son reparados o han sido re-enrollados

Otra oportunidad de ahorro es la relacionada con la eficiencia que se obtiene de un motor una vez que ha sido reparado. El rebobinado de los motores implica pérdidas de eficiencia, ya que las condiciones de chapa no deben mantenerse, debido al comportamiento de las pérdidas de núcleo en función del procedimiento de extracción de las bobinas, el daño causado al aislamiento de la laminación y al proceso de

limpieza del estator. Las pérdidas de cobre dependen de la nueva extensión del devanado y de las características y disposición de los conductores empleados. Es criterio de algunos investigadores que la eficiencia se reduce en 2 % en los motores de potencia inferior a 30 kW, y en 1 % para mayores potencias, excluyendo aquellos motores que son reparados en talleres acreditados con programas de alta calidad como EASA-Q ó ISO 9000 (4)(5).

Un programa de sustitución de máquinas viejas o reparadas se debe ejecutar cuando resulta económicamente justificado o cuando la confiabilidad del motor en operación está en duda. Si se tiene en cuenta que en el caso estudiado aproximadamente el 75 % de los motores que se encuentran en operación han sido rebobinados, al menos una vez, existe un potencial evaluable. Si se considera una disminución de la eficiencia de un

1 % en los motores reparados en relación con el original se tiene por este concepto un incremento en las pérdidas de aproximadamente 46,7 kW, lo que representa 0,85 % del consumo total y 6 166,22 USD adicionales en una zafra corta.

Aplicación de accionamientos de velocidad variable

Dentro de las instalaciones de bombeo se expondrá como ejemplo la bomba de guarapo a calentadores. El flujo de guarapo debe ser constante para lograr un trabajo estable en el sistema de calentamiento-evaporación, por lo que se implementa un esquema de control para satisfacer este requerimiento. Uno de los esquemas tradicionalmente empleado es el que se muestra en la figura 1, donde se logra el caudal constante **Q** por medio de la válvula **V₂**, que deriva al tanque el exceso de flujo (**Q_{der}**).

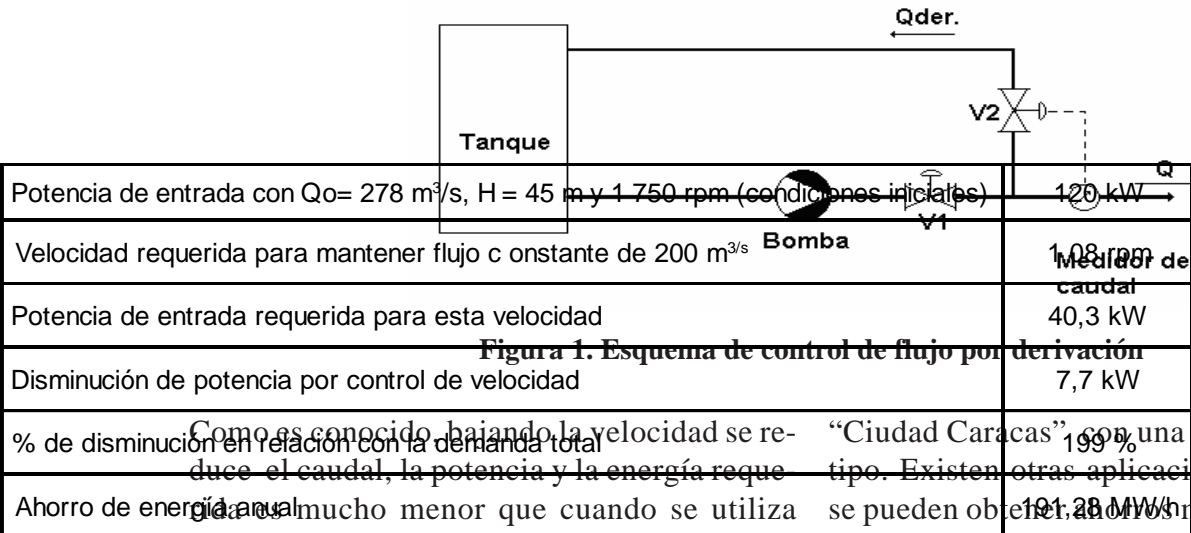


Figura 1. Esquema de control de flujo por derivación

Como es conocido, bajando la velocidad se reduce el caudal, la potencia y la energía requerida, mucho menor que cuando se utiliza cualquier otro método para controlar el flujo de una bomba. Se muestra en la tabla 3, como caso, un experimento llevado a cabo en el CAI

“Ciudad Caracas”, con una instalación de este tipo. Existen otras aplicaciones en las cuales se pueden obtener ahorros similares mediante el control de la velocidad como en bombas de suministro de agua, bombas de inyección y rechazo, etcétera.

Tabla 3. Ahorro de energía en bombas de guarapo a calentadores

Este principio se extiende a los ventiladores, los que se rigen por leyes semejantes y tienen un papel relevante en la eficiencia de los generadores de vapor y que son regulados ineficientemente por compuertas, como es el caso de los ventiladores de tiro inducido y forzado.

Administración de la demanda en un sistema de cogeneración

Un programa de administración de la demanda consiste en planificar, implementar y monito-

rear las actividades del sistema para estimular la modificación del comportamiento en el uso de la energía eléctrica, incluyendo la reducción de la demanda y su desplazamiento en el tiempo.

El objetivo primario del programa de administración de la demanda es liberar capacidades de forma que se produzcan mayores entregas y que las máximas ocurran en los horarios más satisfactorios, de acuerdo con las tarifas establecidas que coinciden, además, con los horarios críticos del SEN (figura 2).

Figura 2. Costo de producción y precios de compra y venta de energía para la EA Ciudad Caracas

También se logra reducir la demanda y el costo de la energía cuando esta se compra en los mismos horarios. Los tipos de programas que se establecen para lograr modificar el nivel de demanda y su ubicación en el tiempo varían; sin embargo, una oportunidad común es desplazar el trabajo de las centrífugas de primera y segunda fuera del horario punta o pico. En el caso que se estudió es posible incrementar aproximadamente 0,8 MW la venta de energía entre las 16:00 y las 22:00 horas locales.

Para establecer un programa de administración de la demanda hay que analizar la tarifa y la factura de electricidad y estudiar si esta tiene un peso importante; determinar si existe un potencial de reducción de las demandas máximas y la demanda de punta, determinar cuándo ocurren las demandas máximas durante el período de facturación e identificar cargas que

contribuyen a los picos de demanda y determinar cuáles se pueden disminuir, desconectar o desplazar en el tiempo, de acuerdo con el tipo de tarifa. Para esto se usan diversos métodos que van desde el control manual de las cargas hasta equipos computarizados altamente sofisticados, totalmente automáticos, que significan una importante inversión.

Para establecer un programa de administración de la demanda hay que analizar la tarifa y la factura de electricidad y estudiar si esta tiene un peso importante; determinar si existe un potencial de reducción de las demandas máximas y la demanda de punta, determinar cuándo ocurren las demandas máximas durante el período de facturación e identificar cargas que contribuyen a los picos de demanda y determinar cuáles se pueden disminuir, desconectar o desplazar en el tiempo, de acuerdo con el tipo de tarifa. Para esto

se usan diversos métodos que van desde el control manual de las cargas hasta equipos computarizados altamente sofisticados, totalmente automáticos, que significan una importante inversión.

Mejoramiento del factor de potencia

Operar con bajo factor de potencia, además del impacto en el pago de electricidad, si se adquiere de la red pública, tiene otras implicaciones de igual o mayor significación, particularmente sensibles en la efectividad económica y energética de la industria azucarera. Por los variados efectos negativos de un bajo factor de potencia, en las tarifas eléctricas de los mercados de electricidad, se imponen cuotas a manera de multas si el factor de potencia es menor que cierta cifra y, usualmente, se ofrece una reducción en la factura de electricidad (bonificación) a instalaciones con un factor de potencia elevado. En la instalación evaluada el factor de potencia se mantiene superior a 0,92, con el uso de medios compensadores. Se ajustaron los “taps” del transformador de enlace con el sistema para reducir el reactivo y entregar la máxima potencia activa.

Instrumentación, control y mantenimiento por diagnóstico (I&C y M)

Con excepción de las fábricas construidas en la última década y un número de ellas más desarrolladas, la industria azucarera muestra retraso en la implementación de sistemas de I&C en relación con otras industrias de diferentes ramas. En una parte considerable el mantenimiento sigue los patrones preventivos tradicionales y en los peores casos actúa en las fronteras de las averías. Como resultado se incrementan los costos de operación y mantenimiento y crece el consumo energético. La introducción de los sistemas modernos de I&C y M requieren una inversión inicial más o menos costosa, y son un reto tecnológico y humano en las diferentes etapas de implementación. Son fundamentales, además, para la administración de la energía. Con su aplicación puede esperarse 5 % de reducción del consumo de energía eléctrica y reducción superior a 10 % del portador energético primario. A manera de resumen se muestra en la figura 3 un esquema aproximado de las potencialidades de reducción del consumo en la industria azucarera a partir de la molienda de la caña de azúcar.

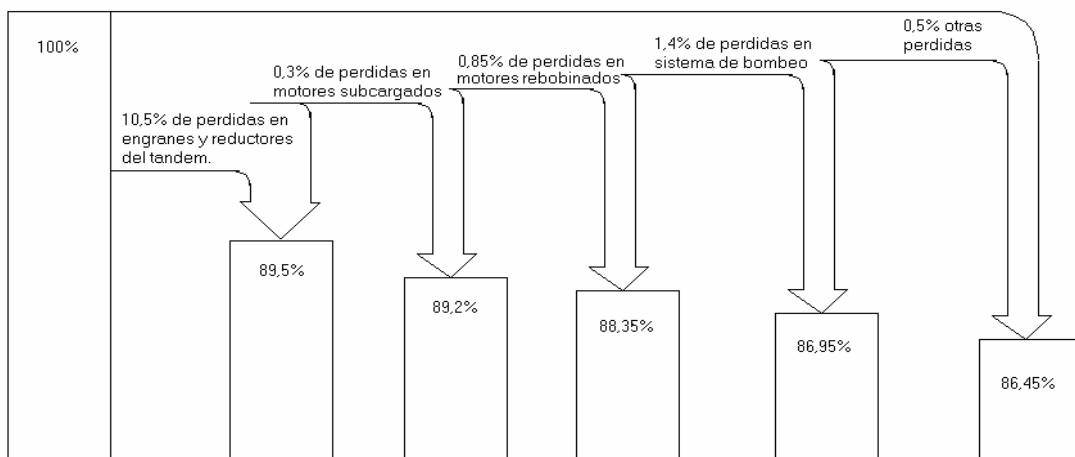


Figura 3. Potencialidades de ahorro de energía eléctrica en la industria azucarera

CONCLUSIONES

1. A partir de procedimientos de gestión eficiente de la energía es posible identificar las oportu-

nidades de ahorro de energía eléctrica existentes como un primer paso para la toma de decisiones que lleven a incrementar la eficiencia en el consumo de los equipos y sistemas.

2. Para desarrollar un plan de ahorro energético se debe prestar atención a las soluciones de carácter particular que abarcan desde simples medidas organizativas y el comprometimiento de los recursos humanos, hasta la necesaria introducción del desarrollo tecnológico con su costo capital asociado.
3. Tal vez para la empresa, la gestión de la energía no sea su actividad principal, pero en la gestión de los activos energéticos está una buena parte de la reducción del costo y aumento de los ingresos en empresas cogeneradoras con posibilidades de venta de energía, por lo que debe prestarse especial atención a los programas de administración de la demanda en todas sus manifestaciones.
4. Este trabajo es una plataforma estratégica a partir de la cual en la industria azucarera pueden diseñarse programas específicos, como es el caso de la aplicación de motores eficientes y accionamientos de velocidad variable en los sistemas de bombeo y ventilación utilizados en todas las fábricas.
5. El caso de estudio presentado, muestra que el consumo puede reducirse en un 13 %, aproximadamente, desde 32,7 kWh/Tc hasta 28,3 kWh/Tcm, si se ejecuta un sistema de gestión energética bien estructurado con objetivos y metas hacia la disminución del consumo de electricidad.
5. Pillay, P. *et al.*: "In Situ Induction Motor Efficiency Determination Using the Genetic Algorithm", *IEEE Transaction on Energy Conversion* 13(4), December, 1998.
6. Renier, B. *et al.*: "Comparison of Standars for Determining Efficiency of Three Phase Induction Motors", *IEEE Transaction on Energy Conversion* 14(3), September, 1999.

BIBLIOGRAFIA

1. Anónimo: "Replacing an Oversized and Underloaded Electric Motor", Fact Sheet a Program of the USA Department of Energy, 1999.
2. _____: Buying an Energy Efficient Electric Motor, Program of the US Department of Energy, USA, 2000.
3. _____: *Manual del Usuario MOTOR MASTER +*, 2000.
4. Hsu, H. *et al.*: "Induction Motor Fields Evaluation Methods", *IEEE Transaction on Industgry Application* 34 (1), Jan.-Feb., 1998.