

Análisis de eficiencia energética en una instalación agroganadera en la región Laguna de Durango



Colaboración

Luis Amado González Vargas; Armando José Cordero Escamilla; Arón Gámez Vargas; Víctor Edí Manqueros Avilés, Instituto Tecnológico Superior de Lerdo

RESUMEN: Se pretende proporcionar al sector ganadero una visión general sobre las medidas que pueden tomarse en los establos para mejorar la eficiencia energética y obtener así una reducción notable en los costos económicos que esta genera. Lo anterior al evaluar cuantitativa y cualitativamente el consumo de energía en equipos de alta demanda de energía en los ordeños mecánicos tales como los sistemas de refrigeración de la leche, las bombas de vacío y las bombas de trasiego de leche.

El control y administración de la demanda eléctrica son actividades encaminadas a optimizar el uso respecto a capacidades en equipo instalado, tanto para los usuarios como de los suministradores de energía eléctrica, buscando reducir o controlar la demanda en kW durante un período de tiempo, comúnmente en el horario de mayor costo de la energía, y optimizando la operación de los equipos eléctricos sin afectar el proceso de producción [1].

PALABRAS CLAVE: Control y administración de la demanda, eficiencia energética, evaluar cuantitativa y cualitativamente el consumo de energía, proceso de producción.

ABSTRACT: We aim to provide the livestock industry a general vision about the measures to take in the barns to improve energy efficiency to notably reduce costs caused by energy use. Also, to evaluate qualitatively and quantitatively the energy consumption of highly energy consuming equipment in the mechanical milking such as the milk cooling system, vacuum pumps, and milk transferring pumps.

Control and demand management are activities aiming to optimize the use of the installed equipment capacity, both for the users as well as the electric energy suppliers which consists in reducing and controlling the demand of Kw during a time period, commonly during the high energy cost time, then optimizing the electric equipment operation without affecting the production process.

KEYWORDS: Control and demand management, energy efficiency, evaluate qualitatively and quantitatively the energy consumption, production process.

INTRODUCCIÓN

La eficiencia energética es la reducción de la potencia y energía eléctrica demandada en la red sin que afecte a las actividades normales realizadas en un edificio, industria o proceso de transformación [5]. Los individuos y las organizaciones que son consumidores directos de la energía pueden desear ahorrar energía para reducir costos energéticos y promover la sostenibilidad económica, política y ambiental. Entre las preocupaciones actuales está el ahorro de energía y el efecto medio ambiental de la generación de energía eléctrica [2].

Eficiencia energética implica lograr un nivel de producción o servicios con los requisitos establecidos por el cliente, con el menor consumo y gasto energético posible, y la menor contaminación ambiental por este concepto. El impacto de los costos energéticos sobre los costos totales de producción depende del sector y tipo de empresa o entidad.

El ahorro de energía, si bien no representa una fuente de energía en sí, se acostumbra considerarla como tal, ya que ofrece la posibilidad de satisfacer más servicios energéticos, lo que es equivalente a disponer de más energía [2]. El uso eficiente de la energía constituye uno de los factores que encaminan a las naciones hacia el crecimiento económico y el desarrollo sostenible.

El presente estudio se inscribe en un marco de tecnologías limpias, y consiste en una etapa para la implantación de un sistema de gestión eficiente de la energía en los procesos de refrigeración, bombeo e iluminación de los ordeños mecánicos, así como en las bombas de pozo profundo de un establo lechero ubicado en la Región Laguna del Estado de Durango. Las actividades realizadas pueden contribuir a mejorar la eficiencia de estos sistemas de trabajo y mitigar el impacto ambiental que trae consigo el exceso de consumo de electricidad.

Etapa de diagnóstico técnico energético

El costo de la energía eléctrica representa un porcentaje elevado dentro de los gastos de operación de cualquier organización, motivo por el cual es de vital importancia el establecimiento de estrategias operativas para hacer uso eficiente de la energía, y obtener como consecuencia ahorros económicos.

Ventajas al administrar y controlar la demanda de energía eléctrica

Al establecer estrategias de cambio de hábitos de consumo de la energía eléctrica se obtienen los siguientes beneficios:

- Conocimiento de la estructura tarifaria por el personal operativo.
- Involucramiento del personal para conocer todas las etapas del proceso.
- Crecimiento de la cultura del ahorro en la organización.
- Disminución del consumo en el horario punta.
- Disminución de la demanda facturable.
- Disminución del cargo por demanda kW.
- Disminución del cargo por consumo kWh.
- Disminución del 20 al 30% en el importe de su facturación.
- Empresas más competitivas.

Demanda máxima

Se puede definir como la máxima coincidencia de cargas en un intervalo de tiempo. El medidor de energía almacena la lectura correspondiente al máximo valor registrado de demanda (kW) en intervalos de 15 minutos del periodo de facturación.

Las tarifas eléctricas de uso general de baja y media tensión de más de 25 kW contratadas, incluyen además del cargo por consumo (kWh), un cargo por demanda máxima (kW); siendo este último un aspecto de suma importancia y que requiere un debido control del proceso. El cargo directo por demanda puede representar del 20% al 30% de su facturación [2].

Demanda de energía eléctrica

El control y administración de la demanda son las actividades encaminadas a optimizar el uso del equipo instalado, y consiste en reducir o controlar la demanda en kW durante un periodo de tiempo, comúnmente en el horario de mayor costo de la energía, optimizando la operación de los equipos eléctricos sin afectar el proceso de producción. En términos generales es la acción de interrumpir por intervalos de tiempo la operación de cargas eléctricas que inciden directamente sobre la demanda facturable, a fin de reducir o limitar los niveles de consumo en razón de los precios tarifarios [11]; lo anterior es comúnmente conocido como cambio de hábito de consumo. Es importante señalar que el cambio de hábito de consumo, se plantea como una alternativa de ahorro económico en sistemas eficientes, ya que actualmente el cargo por demanda representa entre un 20 a un 30% de la facturación eléctrica. También la reducción en el cargo se verá reflejado por el consumo en el horario punta.

El cambio de hábito no es disminuir el consumo de energía, se trata de hacer un uso más eficiente y efectivo de la potencia que se demanda; sin embargo en el proceso de análisis y control de cargas, se encontrarán innumerables vicios ocultos que podrán ser evaluados por los expertos de cada proceso para erradicarlos y de esta manera reducir significativamente el uso de energía eléctrica.

Por lo anterior, se requiere que las personas que están aplicando este tipo de programas tengan un amplio conocimiento del proceso productivo de la empresa y su capacidad de flexibilidad. Así mismo tener conocimientos sobre los consumos horarios, particulares y totales, además de los costos de producción y su balance.

Métodos para administrar y controlar la demanda máxima

La demanda máxima puede ser administrada y controlada manualmente o con ayuda de dispositivos automáticos [5].

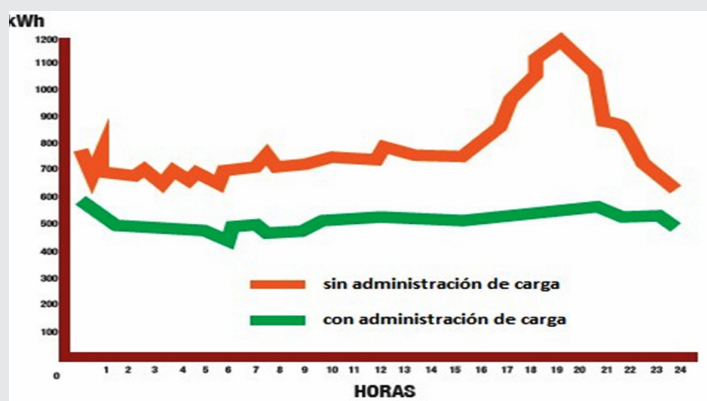


Fig. 1. Gráfica de la demanda máxima

La figura 1 muestra el comportamiento general de la demanda cuando se administran las cargas y cuando no se hace, observándose un mayor consumo en kWh.

Control manual: El personal coordina la operación de los equipos en función del proceso de producción a fin de evitar los picos de cargas innecesarias. Tiene limitaciones en cuanto a rapidez y precisión por el factor humano.

Control automático: Se programan los equipos a través de dispositivos electrónicos o mecánicos para controlar los picos de demanda.

Sin importar el tipo de control que se utilice debe conocerse el proceso de producción perfectamente, ya que de ahí se toman los datos para realizar la optimización, tales como [9]:

- Información de valores de producción y energía necesarios.
- La identificación del día y la hora en que ocurre la demanda máxima y las cargas que contribuyen a la misma.
- La identificación de los equipos que pueden sacarse de operación sin afectar el proceso de producción.

Es recomendable comenzar con un método manual de control de demandas antes de automatizar este proceso, así como tener un amplio conocimiento del proceso para priorizar por tiempos las cargas que se desconectarán y reconectarán, antes de instalar los equipos que controlarán de forma automática la demanda.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se analizaron los procesos y los equipos que demandan mayor consumo de energía eléctrica, obteniendo los siguientes resultados.

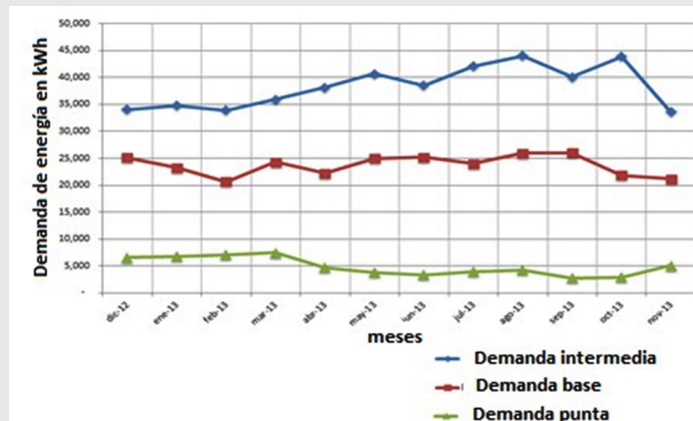


Fig 2. Demanda de energía eléctrica base, intermedia y punta en kWh.

La figura 2 muestra el comportamiento del consumo de energía (kWh) (base, intermedia y punta) del establo, en 12 meses (dic 2012 a nov 2013).

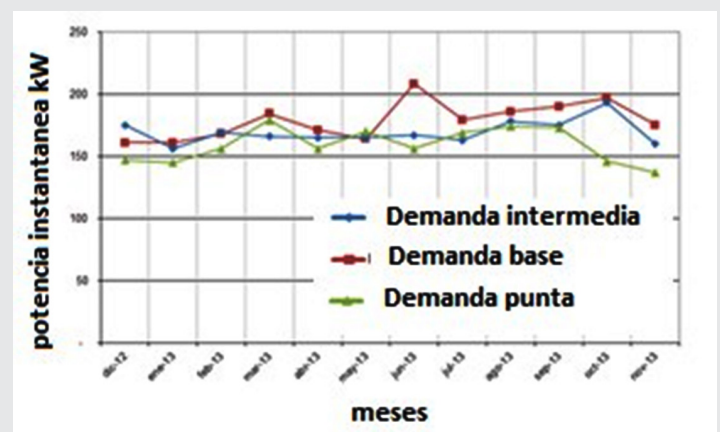


Fig. 3. Consumo de potencia instantánea base intermedia y punta (kW)

Como se observa en la figura 3, se muestra el comportamiento del consumo de potencia eléctrica instantánea (kW), en los periodos base (0:00-6:00), intermedia (6:00-18:00, 22:00-24:00), y punta (18:00-22:00) que obtuvo el establo durante 12 meses (dic 2012 a nov 2013).



Fig. 4. Demanda facturable (kW)

En la figura 4 se observa el comportamiento de la demanda facturable que obtuvo el establo. Como se observa tiene una demanda muy alta durante todo el año, esto indica y según se observó que el arranque del sistema enfriador de agua (refrigeración chiller) es muy variable e inestable, produciendo picos de consumo de potencia muy altos, viéndose esto reflejado en la facturación.

El Factor de Carga es un indicativo del aprovechamiento de la capacidad instalada, y es útil para determinar el efecto relativo de la demanda máxima sobre la factura eléctrica, ayudando a evaluar la oportunidad de reducción de deman-

da. Es la razón entre el consumo eléctrico de un período y el producto de la demanda máxima medida por el número de horas del período de facturación [5].

$$FC = \frac{\text{Energía del período de facturación (kwh)}}{(\text{Demanda max.})(\text{hrs del mismo período})} \quad (1)$$

El Factor de Carga se puede incrementar aumentando el consumo a demanda constante, o reduciendo la demanda a consumo constante.

Al pasar de un Factor de Carga de:
 - 55 a 65%, aproximadamente corresponde a 15% de ahorro en la facturación.
 - 25 a 35%, corresponde a 29% de ahorro en la facturación.

Es deseable alcanzar el más alto factor de carga posible para que el costo promedio de la energía disminuya.

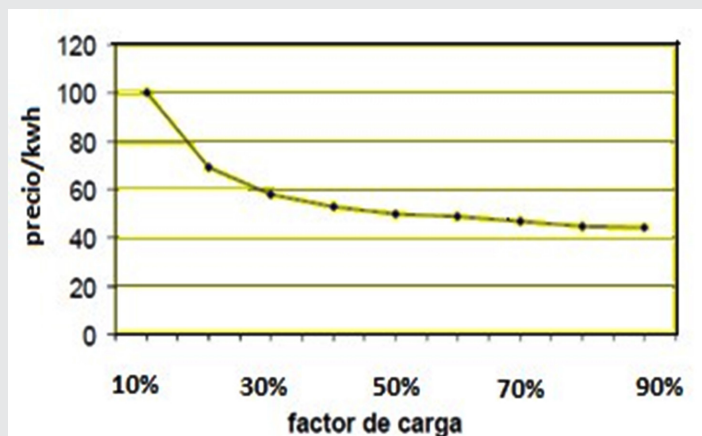


Fig. 5. Relación del precio/kwh y el factor de carga

Un bajo Factor de Potencia (FP) significa energía desperdiciada y afecta la adecuada utilización del sistema eléctrico, y se incrementan las pérdidas por efecto Joule en conductores y transformadores.

Fórmula de Recargo cuando $FP < 90\%$
 $\% \text{ de Recargo} = 3/5 \times ((90 / FP) - 1) \times 100 \quad (2)$

Fórmula de Bonificación cuando $FP \geq 90\%$
 $\% \text{ de Bonificación} = 1/4 \times (1 - (90 / FP)) \times 100 \quad (3)$

Los valores resultantes de la aplicación de éstas fórmulas se redondean a un solo decimal, por defecto o por exceso, según sea o no menor que 5 (cinco) el segundo decimal. En ningún caso se aplican porcentajes de recargo superiores a 120% (ciento veinte por ciento), ni porcentajes de bonificación superiores a 2.5% (dos punto cinco por ciento) [5].

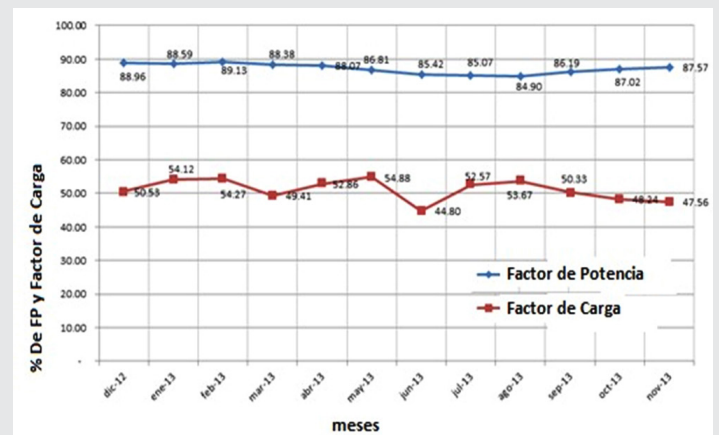


Fig. 6. Factor de potencia y factor de carga en %

La figura 6 nos muestra el factor de carga y el factor de potencia que el estable ha generado en sus instalaciones en los últimos 12 meses. Como se observa el factor de potencia oscila en un 85 % y el factor de carga en un 50% lo que representan oportunidades de ahorro latentes.

Tabla 1. Porcentajes de ahorro de energía

	COSφ ₁					
	0.70	0.75	0.80	0.85	90	95
de COSφ ₁ a 0.90	39.5	30.55	20.9	10.80	-----	-----
de COSφ ₁ a 0.95	45.7	37.67	29.1	19.94	10.9	-----
de COSφ ₁ a 0.97	47.92	40.2	31.1	23.21	13.9	4.09

La tabla 1 estima los porcentajes de ahorro de energía por pérdidas en potencia para distintos valores del FP una vez que se ha corregido [4].

La figura 7 describe el comportamiento del consumo de energía eléctrica en kWh y kVarh (kilo-Watts Hora, kilo-Volts-Amper-Reactivos Hora) durante el período a analizar. La figura muestra un consumo considerable de energía reactiva (kVarh) lo cual se traduce en un factor de potencia bajo (85% en promedio), dichos reactivos pueden suplirse mediante un banco de capacitores y no tomarlos de la red.

Esto como ya se explicó anteriormente mejora el FP con sus consecuencias favorables [8].

En la fórmula que definen las “Demandas facturables”, el símbolo “máx” significa máximo, es decir, que cuando la diferencia de demandas entre paréntesis sea negativa, ésta tomará el valor cero.

Precio Unitario:

$$PU (\$/kWh) = F / (EP + EI + EB) \quad (6)$$

El cliente busca reducir su factura, para lo cual debe tratar de disminuir DF (demanda facturable kW) y la energía consumida total kWh. También puede buscar la reducción de su precio unitario, aumentando FC (factor de carga), y mejorando el factor de potencia del sistema eléctrico [9].

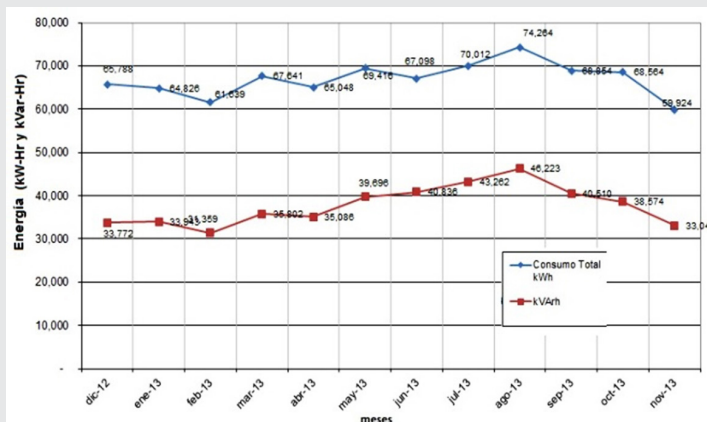


Fig. 7. Consumo histórico de energía eléctrica (Kwh, Kvarh)

Oportunidades de ahorro en la facturación

Se muestra la fórmula de la factura en la tarifa HM de media tensión que utiliza CFE para facturar los recibos de pago [10]:

$$F = CD * DF + CEP * EP + CEI * EI + CEB * EB + CBFP \quad (4)$$

- CD= Cargo por Demanda (\$/Kw)
- CEP= Cargo por Energía de Punta (\$/kWh)
- CEI= Cargo por Energía Intermedia (\$/kWh)
- CEB= Cargo por Energía de Base (\$/kWh)
- DF= Demanda Facturable (KW)
- EP= Energía consumida de punta (kWh)
- EI= Energía consumida Intermedia (kWh)
- EB= Energía consumida de Base (kWh)
- CBFP= Cargo por bajo Factor de Potencia
- F= Factura

Demanda Facturable.- Se define como se establece a continuación:

$$DF = DP + FRI * \max(DI - DP, 0) + FRB * \max(DB - DPI, 0) \quad (5)$$

- DP= Demanda máxima medida en el periodo de punta.
- DI= Demanda máxima medida en el periodo intermedio.
- DB= Demanda máxima medida en el periodo de base.
- DPI= Demanda máxima medida en los periodos de punta e intermedio.
- FRI, FRB= factores de reducción que tendrán los siguientes valores:

$$FRI = 0.300 \quad FRB = 0.150$$

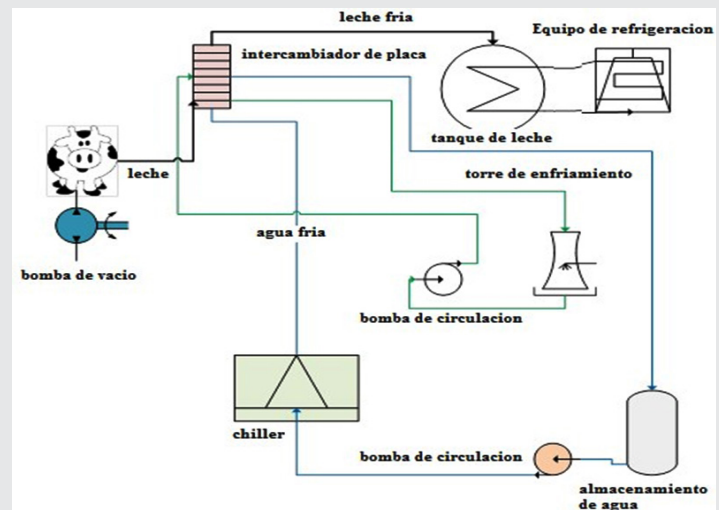


Fig. 8. Proceso de ordeña, enfriamiento y almacenaje de leche

Proceso de ordeño, enfriamiento y almacenamiento de la leche en establo

En la figura 8 se muestra el proceso de enfriamiento y almacenaje de la leche. Para el enfriamiento de la leche se utiliza un intercambiador de calor de placa que realiza el enfriamiento en dos etapas, la primera utilizando una torre de enfriamiento lleva a la leche de una temperatura de 37°C a 16°C, y para la segunda etapa se utiliza un sistema de enfriamiento tipo chiller para llevar a la leche a la temperatura de 2°C. La leche es almacenada en tanques de enfriamiento los cuales utilizan un sistema de refrigeración para mantener la temperatura de la leche. El agua procedente del intercambiador de calor es enviada a la torre de enfriamiento y al tanque de inicio en ciclos separados.

Equipos con alto consumo de energía y Mediciones eléctricas

A continuación se muestran los equipos altos consumidores de energía que se reconocieron en el establo, entre los cuales se encuentran las bombas de pozo profundo (3 bombas), las bombas de vacío (2 bombas), las bombas de agua para el chiller (2 bombas), el chiller, el intercambiador de calor, el compresor y los enfriadores (12 enfriadores).



Fig. 9. Bomba No.1 de pozo profundo de 100 HP



Fig. 12. Compresor del Chiller 30 HP



Fig. 10. Bombas de vacío 30 HP cada una



Fig.13. Compresor de 10 HP



Fig. 11. Bombas de agua para el chiller

En las visitas que se realizaron al estable se registró y midió el consumo de energía eléctrica en los equipos que se determinaron como mayores consumidores de energía, los cuales fueron: el chiller, la bomba de pozo profundo, las bombas de vacío, los enfriadores, el compresor, y las bombas de agua para el chiller.

Se realizaron las mediciones de consumo de energía así como las variaciones de voltaje, mediciones de potencia y presencia de armónicos en el sistema eléctrico. Se tomó una medición en el centro de carga principal para comparar los datos del último recibo contra los datos del analizador de la calidad de la energía. Fig. 14.

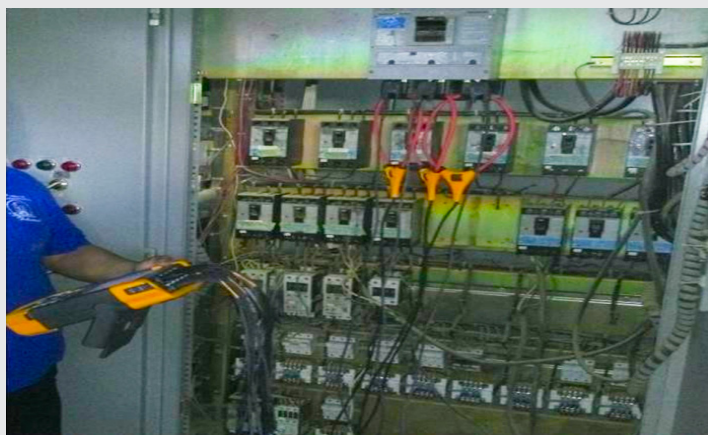


Fig. 14. Mediciones en el centro de carga general

En la figura 15 se muestra el factor de potencia en cada una de las fases así como el factor de potencia total, medido en el centro de carga general. Como se observa el FP (factor de potencia) es de 0.88 lo que representa además de una penalización por parte de CFE, una baja eficiencia del sistema debido a las pérdidas de potencia que el bajo FP representa. También se muestran los consumos de potencia instantáneos.

POTENCIA Y ENERGÍA				
	A	B	C	Total
kW	19.36	21.31	26.78	67.45
kVA	20.97	26.60	28.78	76.97
kvar	8.05	16.08	10.71	34.78
PF	0.92	0.80	0.93	0.88

12/18/13 11:29:52 230V 60Hz 3Ø WYE ENS0160

Fig. 15. Valores de las mediciones

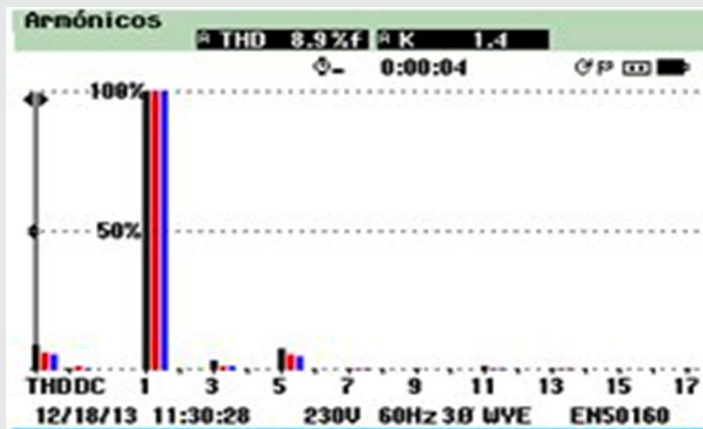


Fig. 16. Armónicos de corrientes registrados

La figura 16 ilustra los armónicos presentes en el sistema de potencia. Como se observa, la distorsión armónica total de corriente es del 8.9 %, el cual es un porcentaje no significativo considerando el estándar IEEE 519 [6], el cual establece criterios sobre la medida de la calidad de la energía eléctrica ante diferentes fenómenos que la degradan, siendo el THDI del 5%. Se descarta por lo tanto contaminación grave del sistema por corrientes armónicas generadas por cargas no lineales.

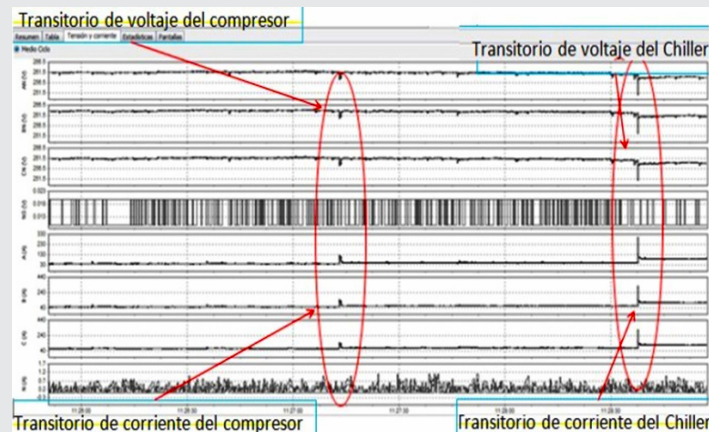


Fig. 17 Transitorios de voltaje y de corriente del compresor y chiller

La figura 17 ilustra los transitorios de voltaje y de corriente del motor del compresor neumático (10 HP) y del compresor del chiller (30 HP) en la que se observan los picos de corriente de cada uno de ellos (130 A y 270 A respectivamente) siendo considerablemente altos principalmente el del chiller, equipo en el que por su elevada frecuencia de arranque y paro (períodos aproximados de arranque de 3 minutos y paro de 7 minutos), se presentan picos de potencia que se reflejan en la demanda facturable.

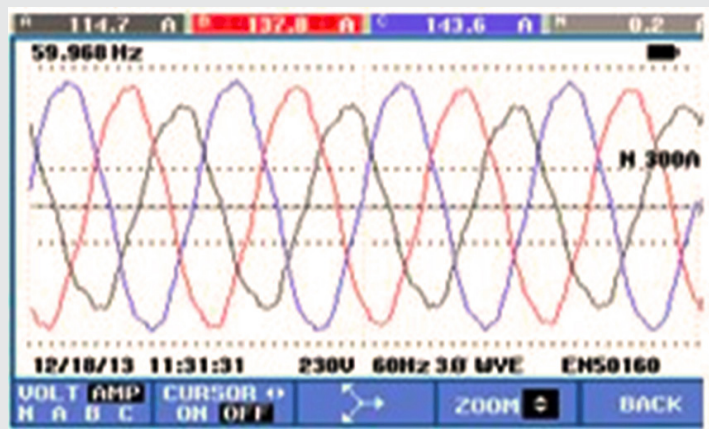


Fig. 18. Forma de onda de la corriente en el centro de carga principal

La figura 18 muestra la forma de onda de la corriente medida en el centro de carga principal, en la que se observa poca distorsión (como se comprobó en la figura 16 donde se registran los armónicos de corriente). Estas distorsiones son de poca magnitud y no ocasionan una gran distorsión en la forma de onda senoidal.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se analizó el sistema eléctrico de potencia de un establo de producción lechera, identificando los principales equipos de mayor consumo de potencia eléctrica, siendo estos: tres bombas de pozo profundo con motores eléctricos de 125 HP cada una, siendo independientes entre sí ya que cada una cuenta con su propio transformador y están ubicadas en un radio de 1.5 km. Respecto a las tres bombas, el problema detectado es el bajo factor de potencia en cada una de ellas (0.75 aproximadamente), sin embargo las bombas están extrayendo en promedio 6 litros por segundo de agua, aunque se corrigiera el factor de potencia la ineficiencia y desperdicio de energía no se podría compensar en estos gigantescos motores de 125 HP cada uno.

Por otro lado en el sistema eléctrico de potencia (SEP) del establo, se detectó equipo alto consumidor de energía y aunque el sistema no tiene problemas de distorsión armónica, si tiene un bajo factor de potencia (0.85) en promedio, y un factor de carga que no supera el 55 %, aunado al problema de la alta e intermitente demanda de potencia que requiere el equipo del chiller para enfriar la leche antes de almacenarla.

La conexión continua en periodos cortos de los principales equipos consumidores en este caso el chiller, representa una variación muy fuerte de la demanda eléctrica, además como se mencionó, el bajo factor de potencia son dos de los principales problemas de facturación por energía eléctrica.

El control de la demanda eléctrica es una oportunidad de ahorro económico muy rentable [5], ya que actualmente el cargo por demanda es de un 20 a un 30% de la facturación de energía eléctrica.

Se recomienda coordinar la operación de los equipos en función del proceso de producción, es decir, tener un arranque escalonado de los equipos a fin de evitar los picos de cargas innecesarias por el hecho de arrancar varios equipos al mismo tiempo. De manera automática, programar los equipos a través de dispositivos electrónicos o mecánicos para controlar los picos de demanda.

Revisar el estado físico de los equipos de ordeño, tanto en el aspecto eléctrico como mecánico, ya que la revisión periódica por los trabajadores o por

personal calificado a motores, máquinas y otros elementos mecánicos, son tareas que quedan relegadas a un segundo plano o sencillamente olvidadas. Se trata de acciones que parecen poco rentables y no ausentes de una sensación de pérdida de tiempo, pero cuando los equipos comienzan a dar problemas, generan siempre una interrupción de la producción y reparaciones mucho más costosas.

Además se recomienda aislar las tuberías que conduzcan los fluidos fríos (tanto de refrigerante como de agua), para disminuir las pérdidas de energía sobre todo en la temporada de calor.

La instalación de un banco de capacitores para compensar los reactivos puede tener un retorno de inversión muy corto, debido al ahorro que se obtiene al evitar los cargos por bajo factor de potencia en el recibo de energía eléctrica.

La última recomendación, y no menos importante, es darle seguimiento al sistema de eficiencia energética, es decir, programar revisiones, estudios y análisis no solo a los equipos de ordeña y bombeo, sino a todo lo que requiera de energía en el establo.

El presente trabajo muestra los resultados de la auditoría energética realizada al establo, sin embargo debido al convenio de colaboración con las diferentes empresas participantes, los autores no tuvieron la posibilidad de verificar los cambios y resultados obtenidos con las recomendaciones señaladas. Tómese en cuenta que el trabajo se realiza dentro de un proyecto vinculado con diferentes empresas de la región, siendo definidas las responsabilidades de cada participante con anterioridad.

REFERENCIAS

[1] *Power Quality in Power Systems and Electrical Machines (Second Edition)*, 2015, Pages 1-104 **Mohammad A.S. Masoum, Ewald F. Fuchs**

[2] *Ingeniería, Investigación y Tecnología Volume 16, Issue 2, April-June 2015, Pages 239-251, Livas-García Adrián*

[3] *Francisco C. de la Rosa, Harmonics and Power Systems. Taylor and Francis Group, 2006, ISBN: 0-8493-3016-5.*

[4] *Simple indicators for an effective Power Quality monitoring and analysis, Ignatova, V. Schneider Electr., Grenoble, France Villard, D. ; Hypolite, J.-M. June 2015, ISBN: 978-1-4799-7992-9*

[5] *CFE Especificación CFE L0000-45: "Desviaciones Permisibles en las Formas de Onda de Tensión y Corriente en el Suministro y Consumo de Energía Eléctrica", CFE México, Enero 2005.*

[6] *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*, IEEE std 519-1992, IEEE Press.

[7] Gómez, G. A., Carreño, J. C., & Zambrano Caviedes, J. (2011). *Herramienta de software para el pronóstico de demanda horaria de potencia eléctrica en el sistema eléctrico de codensa S.A. ESP*. *Revista Tecnura*, 15(28).

[8] Gómez, V.A., Pena, R.A. & Hernández, C. 2012, "Identificación y localización de fallas en sistemas de distribución con medidores de calidad del servicio de energía eléctrica", *Información Tecnológica*, vol. 23, no. 2, pp. 109.

[9] Rodríguez Ibáñez, M.Á., sustentante, Cortés Rosas, J.J., asesor, institución que otorga el título & Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. (2009). *Administración de la demanda eléctrica: propuesta de tarifas horarias*.

[10] Velasco Fuentes, E.A., sustentante, Reyes Mejía, I., sustentante, Barranco Castellanos, B., asesor, entidad participante, institución que otorga el título, Universidad Nacional Autónoma de México Facultad de Estudios Superiores Aragón & Universidad Nacional Autónoma de México.(agosto 2013) *Diagnóstico energético para aumentar el factor de potencia y elaboración de propuesta de cambio de tarifa de OM a HM, con demanda media mensual de 122 kw para reducir el cobro en la facturación de energía eléctrica*.

[11] Hernández, Joel (10/2010). *Eficiencia energética, potencial de negocio: Según APC by Schneider, el manejo adecuado de la energía por medio de políticas adecuadas y soluciones robustas es una opción para los integradores de TIC*. Informe Académico no. 913. Know-How Editores SA de CV.