

AHORRO DE ENERGÍA POR SUSTITUCIÓN DE MOTORES SUBCARGADOS QUE ACCIONAN CARGAS DE ALTA INERCIA

ENERGY SAVING BY REPLACEMENT OF OVERSIZED MOTORS DRIVING HIGH INERTIA LOADS

Gabriel de León García¹, Julio R. Gómez Sarduy² y Percy R. Viego Felipe^{2}*

¹ UEB Central Azucarero 14 de Julio, Batey Manuelita, CP Rodas, Cienfuegos, Cuba

² Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente. Universidad de Cienfuegos. Carretera a Rodas km. 2, Cuatro Caminos, Cienfuegos, Cuba.

Recibido: Abril 24, 2018; Revisado: Junio 14, 2018; Aceptado: Julio 11, 2018

RESUMEN

Los motores eléctricos son los principales productores de fuerza motriz en la industria. Son máquinas que trabajan con una eficiencia relativamente alta; sin embargo, su sobredimensionamiento por diversas causas provoca que trabajen en ocasiones con baja eficiencia. Por esta razón se considera como una oportunidad de ahorro la sustitución de motores de inducción sobredimensionados. Ahora bien, es necesario comprobar que este sobredimensionamiento no sea necesario, ya que en el caso de cargas de alta inercia puede ser preciso un motor de mayor potencia para satisfacer los requerimientos de arranque. En este trabajo se realiza el análisis de sustitución de motores de inducción sobredimensionados por otros de menor potencia y de clase de eficiencia superior, se analiza el régimen dinámico de arranque y se evalúa el potencial de ahorro económico y la reducción de emisiones de CO₂, tomando como caso de estudio el área de Generación de Vapor de la UEB Central Azucarero 14 de Julio.

Palabras clave: ahorro de energía; eficiencia; motores eléctricos; motores sobredimensionados; régimen de arranque dinámico de un motor.

Copyright © 2019. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Percy R. Viego, Email: pviego@ucf.edu.cu

ABSTRACT

Electric motors are the main producers of industry motive power. They are machines that work with a relatively high efficiency, however, their oversizing for various reasons causes them to work occasionally with low efficiency. For this reason, the replacement of oversized induction motors is considered as an opportunity to save energy. However, it is necessary to verify that its oversizing is not necessary, since in high inertia loads case a higher power motor may be required to satisfy the starting requirements. In this paper, the analysis of replacement of oversized motors by others of lower power and higher efficiency class is carried out. The dynamic starting regime is analyzed and potential for economic savings and reduction of CO₂ emissions are evaluated. The Steam Generation area of the UEB Central Azucarero 14 de Julio is taken as a study case.

Key words: energy saving; efficiency; electric motors; oversized motors; dynamic induction motor starting regime.

1. INTRODUCCIÓN

Los motores eléctricos asincrónicos trifásicos están presentes en la inmensa mayoría de los accionamientos empleados en procesos industriales. La industria azucarera no es una excepción. El bajo costo y la robustez convierten a este tipo de motor en una alternativa prácticamente exclusiva. Esta supremacía se ha acentuado, además, a partir del empleo de fuentes de frecuencia variable, con las que es posible disponer de velocidad controlada con excelentes prestaciones.

Las regulaciones vigentes adoptadas por los países desarrollados han empujado el desarrollo tecnológico de los motores eléctricos hacia máquinas de mayor eficiencia, lo que reduce las pérdidas y contribuye al ahorro energético (Sauer et al., 2015), (Hernández et al., 2015), (Lu, 2016). Muchos países ya han adoptado medidas para ir introduciendo en su mercado motores con clase de eficiencia superior y han puesto fechas límites para la prohibición de motores de eficiencia estándar.

El sector industrial ha probado que para desarrollar un plan de ahorro energético se debe prestar atención a las soluciones de carácter particular que llegan hasta la necesaria introducción del desarrollo tecnológico con su costo capital asociado.

En el caso de los motores de inducción, existen probadas soluciones en las cuales la sustitución de motores por otros de mayor eficiencia es una alternativa viable (Saidur, 2010), (Verucchi et al., 2013), (Habib et al., 2016).

Sin embargo, el contraste que existe entre la industria azucarera cubana y la de otros países más desarrollados, y los esfuerzos por disminuir el ahondamiento de la brecha que los separa constituyen, sin dudas, uno de los elementos característicos de la realidad actual (Viego y col., 2015). La industria azucarera cubana presenta una elevada obsolescencia, que incluye los motores de inducción y en muchas de ellas más del 75% de los motores han sido rebobinados al menos una vez, son de eficiencia estándar y además exhiben varias décadas de operación con reparaciones y mantenimientos continuos.

Como es conocido, para este tipo de industria con cogeneración, en el balance de

ahorros producidos, la cesión de excedentes a la red nacional constituye una importante fuente de beneficios; y kWh que se deje de consumir es una unidad de energía que se puede entregar a la red con ingresos adicionales por este concepto. Por otra parte, al igual que en otras industrias, se encuentran motores sobredimensionados por diversas causas que operan con eficiencia, a cargas parciales, inferiores a las que comúnmente se pueden alcanzar a estados de carga elevados. Con un estudio realizado en el 2006 se identificó en una industria azucarera que el 11,4 % de los motores en operación tenía un factor de carga inferior al 60 % (Gómez et al., 2006). Por esta razón, es importante establecer programas de ahorro de energía que incluyan la evaluación y sustitución de motores ineficientes en los casos en que sea factible. El objetivo de este trabajo es realizar un análisis de sustitución de motores de inducción sobredimensionados por otros de menor potencia y de clase de eficiencia superior, tomando como caso de estudio el área de Generación de Vapor de la UEB Central Azucarero 14 de Julio.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Mediciones realizadas a motores de las áreas estudiadas

Para realizar el estudio se seleccionó el área de Generación de Vapor en la UEB Central Azucarero 14 de Julio. Se consideran solamente motores mayores de 30 kW para iniciar la evaluación, ya que son los que predominan en esta industria. Las mediciones se realizaron con un analizador de redes. Los datos obtenidos con el analizador permiten evaluar el factor de carga, del cual se parte para analizar la eficiencia operacional y el potencial de ahorro por sustitución del motor en caso de que se proponga.

Se necesita disponer, para cada aplicación, de la información siguiente:

- Capacidad instalada. Se corresponde con la potencia nominal del motor.
- Demanda promedio. Es el valor promedio de las potencias instantáneas medidas con el analizador de redes en un periodo tiempo específico, en kW.
- Eficiencia nominal. Es la eficiencia de placa del motor cuando entrega su potencia nominal.
- Factor de carga. En este caso el factor de carga se determinó a partir de mediciones de la potencia de entrada como:

$$FC = \frac{\text{Potencia eléctrica medida (kW)} \times 1000}{\text{Potencia nominal (kW)} / \eta_{nom}} \times 100\% \quad (\%) \quad (1)$$

donde: η_{nom} es la eficiencia nominal en pu.

- Tiempo de trabajo. Son las horas promedio de operación al año.

Las mediciones en motores de inducción de mayor potencia en esta área muestran que el factor de carga promedio de los motores es muy bajo. El factor de carga promedio entre todos los motores examinados fue estimado en un 57,1%.

Normalmente se recomienda que un motor trabaje al más alto factor de carga posible. Sin embargo, esto no siempre es así debido a que en ocasiones es preciso sobredimensionar el motor por requerimientos de la carga y, además, las pérdidas y costos asociados con una aplicación específica varían ampliamente en dependencia del tamaño del motor, y están relacionadas con la carga y las características mecánicas del motor. Por ejemplo, un motor de gran capacidad trabajando a un bajo factor de carga puede tener una eficiencia mejor y menores pérdidas que otro motor más pequeño ajustado a la carga. Por esto es que el diseño de las nuevas aplicaciones o sustitución de

motores siempre deberá basarse en cálculos específicos, evitando adoptar decisiones por reglas generales, ya que se puede obtener el efecto contrario y desperdiciar energía en lugar de ahorrar. Los ahorros potenciales de energía eléctrica, que se obtienen por el dimensionamiento cuidadoso de un motor, pueden ser al menos un 2% del consumo del motor (European Commission, 2009).

Para el caso de la gestión de motores de inducción, a partir de las mediciones realizadas, se enfoca el análisis a evaluar la sustitución de motores que trabajen con bajo nivel de carga por otros de potencia ajustada a la carga y de mayor clase de eficiencia. Para todos los casos, en esta investigación, los motores de clase de eficiencia superior se seleccionan del catálogo GE Motors Catalog (General Electric, 2012).

2.2. Oportunidades de ahorro

Para la evaluación de ahorros potenciales se calcula la eficiencia al factor de carga especificado según la metodología descrita en (Viego y col., 2014). Para la evaluación de los ahorros potenciales con la sustitución de motores, se siguió la metodología de la Comunidad Europea (European Commission, 2009). Se consideran dos condiciones: el potencial de ahorros técnicos y el potencial de ahorros económicos.

2.2.1. Potencial de ahorro técnico

El potencial técnico representa los ahorros de energía (ΔE) que pueden ser alcanzados por la sustitución de motores para todas las oportunidades disponibles, independientemente de la efectividad económica de la medida. Se calcula como:

$$\Delta E = \left(\frac{P_{n1} \times \frac{FC_1}{100}}{(\eta_1)} - \frac{P_{n2} \times \frac{FC_2}{100}}{(\eta_2)} \right) \times t \text{ (kWh)} \quad (2)$$

donde: P_{n1} y P_{n2} son las potencias nominales del motor original y el propuesto respectivamente, en kW; FC_1 y FC_2 son los factores de carga del motor original y el propuesto, respectivamente, en %; η_1 ; y η_2 son las eficiencias del motor original y el propuesto respectivamente, a los factores de carga especificados, en pu; y t es el tiempo de operación anual, en h.

2.2.2. Potencial de ahorro económico

El potencial económico es el potencial por los ahorros energéticos que pueden alcanzarse al emplear tecnologías eficientes y son solamente aplicados a las medidas factibles económicamente. Uno de los factores más influyentes en la efectividad económica de una medida es el tiempo de operación anual (horas de trabajo al año). En este estudio preliminar, el análisis económico se basa en el costo de la energía ahorrada (CSE, por sus siglas en inglés), el cual tiene que ser menor que el precio promedio del kWh vendido al SEN, y que para este caso es de 0,153 \$/kWh. El CSE se calcula como:

$$CSE = \frac{I_0 \cdot r}{\Delta E \times (1 - (1+r)^{-n})} \text{ (\$/kWh)} \quad (3)$$

donde: I_0 es la inversión inicial o costo de implementación, en \$, dado por la diferencia de precios entre el motor que se propone y el existente, más el costo de instalación; ΔE es la energía ahorrada, en kWh; r es la tasa de interés bancario (igual a 8% en este caso), establecida por la Dirección General de Tesorería del Banco Central de Cuba en las

Circulares 5/2011 y 2/2012; y n es la vida útil de la inversión, en años. Se considera 15 años para este estudio (Saidur y Mahlia, 2010).

2.3. Metodología para el análisis dinámico

El sobredimensionamiento de los motores puede ocurrir durante la operación normal del sistema, después de que un motor se averíe y sea reemplazado por uno de mayor potencia. También puede ocurrir durante una nueva especificación de los datos del motor debido a la falta de información confiable concerniente a ambos equipos y el comportamiento dinámico de la carga. Aunque a veces, un motor sobredimensionado se necesita realmente para la puesta en marcha de cargas de alta inercia.

Por esta razón, es necesario comprobar si los motores identificados con oportunidades técnicas y económicas de ser sustituidos, se encuentran realmente sobredimensionados o no y si el nuevo motor propuesto, de menor potencia, estará acorde con las necesidades del proceso. En otras palabras, hay que calcular el tiempo de arranque y ver si es menor que el tiempo permisible para el motor. Para ello se necesita conocer las características dinámicas de la carga, las cuales son el momento como una función de la velocidad y el momento de inercia (da Costa, 2009).

El método para determinar las características de la carga se basa en el registro del comportamiento la velocidad en el tiempo después de que el motor se desconecta. El método hace uso del motor existente para obtener las características dinámicas de la carga. Para determinar estas características se parte de la segunda ley de Newton para el movimiento de rotación:

$$M - L = \frac{2\pi}{60} \cdot J \cdot \frac{dn}{dt} \quad (\text{Nm}) \quad (4)$$

donde: M y L son el momento del motor y la carga respectivamente, en Nm; J es el momento de inercia del conjunto motor-carga, en $\text{kg}\cdot\text{m}^2$; y dn/dt es la razón de cambio de la velocidad, en $\text{rpm}\cdot\text{s}^{-1}$.

La característica del momento de la carga es aproximada a la expresión siguiente:

$$L = K_1 + K_2 \cdot n^x \quad (\text{Nm}) \quad (5)$$

donde: K_1 y K_2 son coeficientes de la ecuación; x es el exponente que describe la dependencia del momento de la carga con la velocidad y que para el caso de ventiladores se toma $x=2$.

2.3.1. Determinación del momento de inercia del conjunto motor-carga

El momento de inercia se determina resolviendo la ecuación (4) en el instante t_0^+ en que se desconecta el motor. En este instante se considera que el momento de la carga es igual al momento que desarrollaba el motor en el instante t_0^- , antes de la desconexión.

La expresión quedará como:

$$J = - \left(\frac{60}{2\pi} \right)^2 \frac{Pn \cdot FC \cdot 10^3}{n_w} \cdot \left(\frac{dn}{dt} \Big|_{t=t_0^+} \right)^{-1} \quad (\text{kg}\cdot\text{m}^2) \quad (6)$$

donde: Pn es la potencia nominal del motor, en kW; FC es el factor de carga al cual se encuentra trabajando y n_w es la velocidad de trabajo en el momento antes de la desconexión, en rpm.

La derivada de la velocidad con respecto al tiempo en el instante t_0^+ se determina gráficamente o analíticamente de la curva de desaceleración, como se muestra en la

Figura 1. De manera analítica se puede determinar ajustando las mediciones de velocidad a una curva del tipo exponencial de dos términos y derivando y evaluando la misma para $t = t_0$.

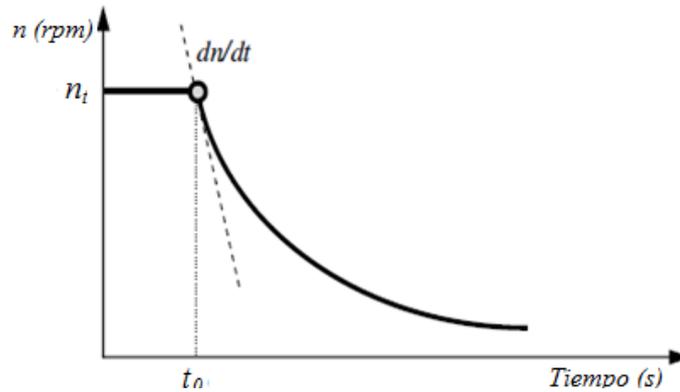


Figura 1. Comportamiento de la velocidad del motor después de la desconexión

2.3.2. Determinación de los coeficientes de la expresión del momento de la carga

El tercer paso es determinar los coeficientes K_1 y K_2 de la curva del momento de la carga. Esto se hace usando la misma curva de tiempo contra velocidad obtenida después que el motor ha sido apagado.

Las ecuaciones (4) y (5) se pueden escribir para cada punto de la curva de desaceleración y como el motor está desconectado, su momento es cero, por lo que se cumple para cada instante que:

$$K_1 + K_2 \cdot n^x = -\frac{2\pi}{60} \cdot J \cdot \frac{dn}{dt} \quad (7)$$

Evaluando la expresión (7) para varios puntos de la curva, se tiene un conjunto de valores del momento dinámico para cada valor de n^x . Estos pares de puntos se pueden ajustar por mínimos cuadrados para obtener los coeficientes K_1 y K_2 , que definen la característica del momento de la carga.

Una vez que se conoce el comportamiento del momento resistivo de la carga con la velocidad, se puede simular el comportamiento del conjunto motor carga dado por la expresión (4), desde el momento de conexión del motor y determinar el tiempo que toma en acelerar la carga hasta la velocidad de trabajo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo a la metodología descrita en la sección 2, se calcularon los potenciales de ahorro para los motores del área de generación de vapor trabajando a factores de carga menores al 75%. Las propuestas de sustitución, así como los resultados del cálculo de los potenciales de ahorro para cada caso se muestran en la Tabla 1.

El impacto de sustituir los 8 motores considerados a partir de las potencialidades técnicas y económicas conlleva a ahorros de energía potenciales de 58,5 MWh/año. Ahora bien, los únicos motores con potencialidades de ahorro económico son los motores de los ventiladores de tiro forzado VTF C#1, VTF C#2 y VTF C#3, los cuales tienen un CSE menor que el precio promedio del kWh vendido al SEN, y que para el caso aquí tratado es de 0,153 \$/kWh. El resto de las variantes analizadas, aunque son oportunidades con potenciales técnicos, no representan ahorros económicos. Esto se

debe a los precios poco estimulantes que fijan las tarifas de compra de electricidad a empresas cogeneradoras.

Tabla 1. Potenciales de ahorro técnico-económico

		VTF C#1	VTF C#2	VTF C#3	VTI C#1	VTI C#2	VAS #2	Bba #1	Bba #2
Motor actual clase de eficiencia IE1	P _n (kW)	110	75	86	150	150	75	185	190
	η _n (%)	93,5	92,0	93,3	94,0	94,0	94,0	94,3	94,4
	n _n (%)	1780	1785	1785	885	885	1190	1790	1780
	FC _{real} (%)	25,5	48,9	32,1	65,7	54,7	60,4	67,7	72,9
	η a FC _{real} (%)	84,0	86,8	85,0	93,6	93,2	91,9	92,6	93,7
	t (h/año)	3258	3246	3215	3368	3257	3278	1702	1625
	Precio (\$)	4600	3009	3486	14853	14853	6055	8749	9062
Sustitución motor por otro de potencia ajustada y eficiencia IE3	P _n (kW)	37	45	37	110	90	55	132	160
	η _n (%)	94,5	95,0	94,5	95,0	94,5	94,5	96,2	96,2
	n _n (rpm)	1780	1785	1780	890	890	1195	1785	1785
	FC _{real} (%)	75,8	81,4	74,7	89,6	91,1	82,3	95,0	86,5
	η a FC _{real} (%)	94,0	94,5	93,9	94,9	94,4	93,7	96,2	96,1
	t (h/año)	3258	3246	3215	3368	3257	3278	1702	1625
	Precio (\$)	7069	8329	7069	26240	24100	14496	19437	22000
	ΔE (MWh/año)	11,52	11,19	9,95	4,66	3,63	3,05	8,63	5,89
	CSE (\$/kWh)	0,03	0,06	0,04	0,29	0,30	0,28	0,14	0,26

En el caso de los motores de los ventiladores de tiro forzado, hay que hacer un análisis más profundo, ya que generalmente los estudios que se realizan son para estado estacionario y es posible que el motor se encuentre sobredimensionado para poder acelerar una carga de alta inercia.

Por otro lado, en todos los casos en que la medida constituye una oportunidad de ahorro económico, el cálculo de CSE no da una idea del periodo de recuperación y es necesario entonces, una vez demostrado que el motor está sobredimensionado, y que el motor propuesto ha sido comprobado para las condiciones de arranque, realizar un análisis económico completo para verificar la rentabilidad de la inversión.

3.1 Ejemplo de análisis dinámico para carga de alta inercia

A modo de ilustrar el procedimiento de análisis dinámico descrito en la sección 2.3, se realizarán los cálculos para el caso del VTF C#1. A partir del ensayo de desaceleración, desconectando el motor y registrando la velocidad en función del tiempo (Figura 2), se ajustan los datos a la función exponencial de dos términos siguiente:

$$n = 1081 \cdot e^{-0,05583 \cdot t} + 678,8 \cdot e^{-0,007912 \cdot t} \quad (\text{rpm}) \quad (8)$$

Se deriva la ecuación (8) con respecto al tiempo, se evalúa para t=0 y se sustituye en (6) para FC=25,5%, según Tabla 1, P_n=110 kW y n_w=1796 rpm. De esta manera se

obtiene el momento de inercia para el conjunto motor carga (J) igual a 21,661 kgm². Conociendo que el momento de inercia del motor es 2,57 kgm², el momento de inercia de la carga será: $J_L = 21,661 - 2,57 = 19,091 \text{ kgm}^2$

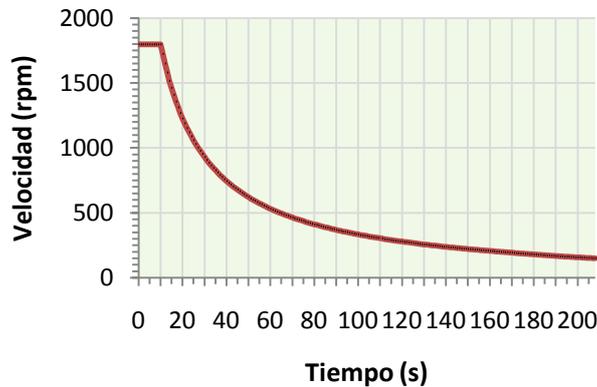


Figura 2. Curva de desaceleración del motor de 110 kW del VTF C#1

La característica del momento de la carga se corresponde con la ecuación (5), considerando $x=2$ por ser una carga tipo ventilador. A partir de la curva de desaceleración se construye la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de los cálculos para hallar el valor de K_1 y K_2

t (s)	n (rpm)	n^2 (rpm ²)	dn/dt (rpm.s ⁻¹)	L (Nm)
0	1796	3225616	-65,723	134,0
1	1723	2968729	-62,403	127,2
2	1649	2719201	-59,262	120,8
3	1581	2499561	-56,290	114,7
4	1518	2304324	-53,477	109,0
5	1462	2137444	-50,814	103,6
6	1408	1982464	-48,295	98,4
7	1358	1844164	-45,910	93,6
8	1312	1721344	-43,653	89,0
9	1269	1610361	-41,517	84,6

Si se realiza un ajuste lineal de L en función de n^2 , entonces $K_1=38$ y $K_2=0,3 \cdot 10^{-4}$ y por lo tanto el momento de la carga responde a la expresión siguiente:

$$L = 38 + 0,3 \cdot 10^{-4} \cdot n^2 \text{ (Nm)} \quad (9)$$

Con la ecuación de la carga (9) y los parámetros del motor, se simula el arranque en un modelo en MATLAB/SIMULINK. La simulación del arranque se muestra en la Figura 3, donde se observa que el motor original acelera la carga desde velocidad cero hasta la velocidad de trabajo en 5,2 s, lo que está en conformidad con lo observado en el campo. Para la simulación del arranque con el motor propuesto es necesario recalculer el momento de inercia del conjunto motor carga, adicionando el momento de inercia del motor propuesto ($J_M=0,36 \text{ kgm}^2$) al momento de inercia de la carga J_L , de manera que:

$$J = J_M + J_L = 0,36 + 19,091 = 19,451 \text{ Nm (kgm}^2) \quad (10)$$

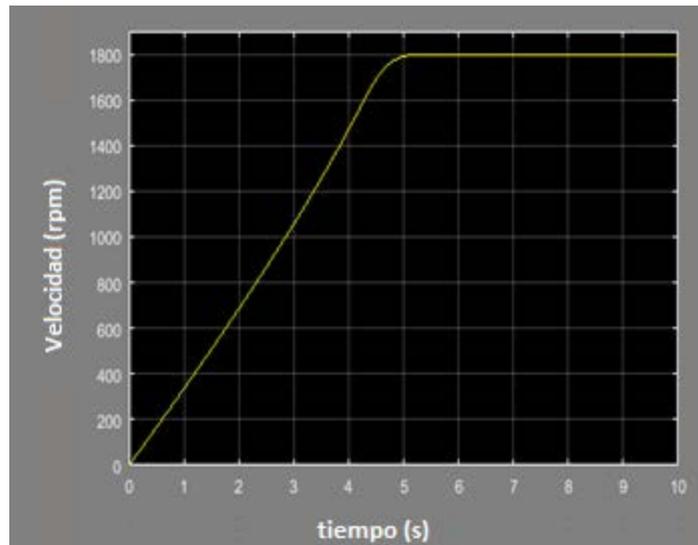


Figura 3. Simulación del arranque motor de 110 kW del V.T.F. C#1

Los resultados de la simulación del arranque para el motor de 37 kW propuesto se muestran en la Figura 4. La corriente máxima de rotor bloqueado alcanza los 312 A, o sea, 5,17 en pu. De acuerdo con la curva de calentamiento contra tiempo para este fabricante, el tiempo permisible para esta corriente es de 22 s si el motor arranca desde el estado caliente y 40 s si se encuentra a temperatura ambiente. El tiempo de arranque estimado por la simulación que es de 11,5 s es inferior a estos tiempos de rotor bloqueado por lo que el motor propuesto es adecuado para esta aplicación. Para los casos del VTF C#2 y VTF C#3 también se comprueba que los motores propuestos pueden acelerar la carga satisfactoriamente.

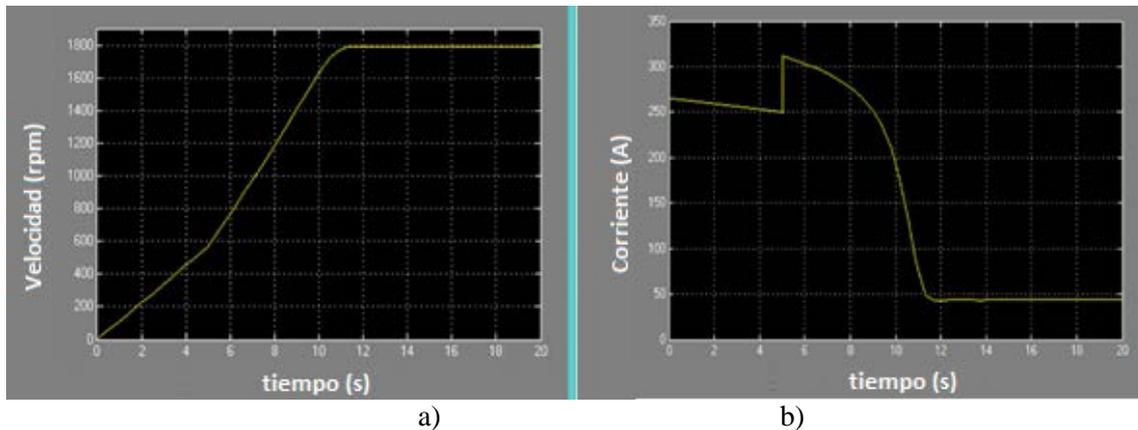


Figura 4. Simulación del arranque motor de 37 kW propuesto para el Ventilador T.F. C#1.
a) Velocidad, en rpm, b) Corriente de línea, en A

3.2 Análisis económico

El análisis económico definitivo se lleva a cabo por métodos de flujo descontado. Un resumen de los resultados, que muestran el Valor Presente Neto (VPN) y el Periodo de Recuperación de la Inversión (PRI), se observan en la Tabla 3. Se incluye el costo de la energía ahorrada con propósitos de comparación y se aprecia que todas las opciones son válidas con periodos de recuperación del costo del nuevo motor muy por debajo de la vida útil que se espera para un motor (Verucchi et al., 2013).

Tabla 3. Resultados del análisis económico de las propuestas

<i>Propuesta evaluada</i>			ΔE (MWh/año)	<i>CSE</i> (\$/kWh)	<i>VPN</i> (\$)	<i>PRI</i> (años)
<i>Posición</i>	<i>Motor actual</i>	<i>Motor Propuesto</i>				
VTF C#1	110 kW (IE1)	37 kW (IE3)	11521,21	0,03	11003,47	2,2
VTF C#2	75 kW (IE1)	45 kW (IE3)	11193,89	0,06	8433,14	5
VTF C#3	86 kW (IE1)	37 kW (IE3)	9946,23	0,04	8091,06	4

El impacto ambiental de las propuestas de sustitución de motores por otros que operen con mayor eficiencia es la reducción potencial de gases de efecto invernadero u otros elementos que causen impacto negativo al medioambiente. El incremento de la eficiencia energética en la industria azucarera tiene un beneficio ambiental inmediato y directo debido a que se está sustituyendo energía generada con combustible fósil por una energía producida a partir de la biomasa.

El impacto puede considerarse como un beneficio para toda la sociedad. La mitigación potencial de emisiones de CO₂ para proyectos de ahorro de energía se calcula en este estudio con el índice de emisiones estimado por la metodología propuesta por Salazar y colaboradores (Salazar y col., 2010). El potencial de ahorro de energía anual de 32,66 MWh/año representa aproximadamente una reducción potencial de emisiones de 25,9 t de CO₂ anualmente.

4. CONCLUSIONES

1. Se llevó a cabo un estudio del estado de carga y la eficiencia de los motores del área de generación de Vapor de la UEB Central Azucarero 14 de Julio y se propone la sustitución de los motores con bajo factor de carga por otros más ajustados a los requerimientos de potencia y de clase de eficiencia IE3. El cálculo del potencial de ahorro económico a partir del costo de la energía ahorrada, indicó que las propuestas son factibles sólo para el caso de los ventiladores de tiro forzado de las tres calderas. Se realizó un análisis dinámico y se verificó que los motores propuestos son capaces de acelerar satisfactoriamente la carga que accionan.
2. El potencial de ahorro de energía a partir de la sustitución de los motores de estos tres ventiladores es de 32,66 MWh/año, con un potencial de reducción de emisiones de 25,9 t de CO₂ por año, lo que corrobora la importancia de gestionar adecuadamente estas máquinas en la industria azucarera, donde la energía que se ahorre ha sido generada a partir de la biomasa cañera y sustituye energía generada por combustibles fósiles.
3. Se evidenció que a pesar del bajo precio de venta de la energía a la red y del poco tiempo anual de operación de estas fábricas, las propuestas de sustitución que son factibles se recuperan en periodos inferiores a 5 años.

REFERENCIAS

da Costa, E., Are my motors oversized?, Energy Conversion and Management, Vol. 50, No. 9, 2009, pp. 2282-2287.

- European Commission., Directorate-General for Transport and Energy., Improving the penetration of energy-efficient motors and drives., 2000, pp. 1-123. Recuperado de: https://scholar.google.com/cu/scholar?q=Improving+the+penetration+of+energy-efficient+motors+and+drives&hl=es&as_sdt=0&as_vis=1&oi=scholart&sa=X&ved=0ahUKEwj_52T1abaAhWR7VMKHYB3Cq8QgQMIIzAA.
- General Electric, GE Motors Catalog., 2012, pp. 1-6. Recuperado de: <http://www.gepowerconversion.com/product-solutions/lv-motors>
- Gómez, J.R., de Armas, M.A., y Gil, A., Competitividad y eficiencia en las oportunidades de ahorro de energía eléctrica en la industria azucarera., Centro Azúcar, Vol. 33, No. 1, 2006, pp. 75-82.
- Habib, M.A., Hasanuzzaman, M., Hosenuzzaman, M., and Salman, A., Energy consumption, energy saving and emission reduction of a garment industrial building in Bangladesh., Energy, Vol. 112, 2016. pp. 91-100.
- Hernández, C., Letschert, V., Hasanbeigi, A., Karali, N., Padilla, M., y Pavon, M., Estudio preparatorio para la implementación en Chile de estándares mínimos de eficiencia energética en motores industriales., Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory., 2015 pp. 1-21. Recuperado de: <https://ies.lbl.gov/publications/estudio-preparatorio-para-la>
- Lu, S.M., A review of high-efficiency motors: specification, policy, and technology., Renewable and Sustainable Energy Reviews., Vol. 59, 2016, pp. 1-12.
- Saidur, R.A., Review on electrical motors energy. Use and energy savings., Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, 2010, pp. 877-898.
- Saidur, R., and Mahlia, T., Energy, economic and environmental benefits of using high-efficiency motors to replace standard motors for the Malaysian industries., Energy Policy, Vol. 38, 2010, pp. 4617-4625.
- Salazar, I., Mockey, I. O., y Canal, M., Estimado de la reducción de la emisión de CO₂ por acciones de ahorro de electricidad en las condiciones de Cuba., Ingeniería Energética, Vol. XXXI, No. 3, 2010, pp. 1-5.
- Sauer, I. L., Tatizawa, H., Salotti, F. A., and Mercedes, S.S., A comparative assessment of Brazilian electric motors performance with minimum efficiency standards., Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 41, 2015, pp. 308-318.
- Verucchi, C. J., Ruschetti, C. R., and Kazlauskas, G. E., High efficiency electric motors: economic and energy advantages., IEEE Latin America Transactions, Vol. 11, No. 6, 2013, pp. 1325-1331.
- Viego, P. R., Gómez, J. R., de Armas, M. A., y Reyes, R., Determinación in-situ del factor de potencia y la eficiencia de motores asincrónicos a cargas parciales., Ingeniería Energética, Vol. XXXV, No. 1, 2014, pp. 15-26.
- Viego, P.R., Borroto, A., y Gómez, J.R., Barreras para incrementar la eficiencia de sistemas accionados por motores eléctricos., Universidad y Sociedad, Vol. 7, No. 3, 2015, pp. 63-73.