



APLICACIONES INDUSTRIALES

Evaluación energética de motores de inducción a través del modelo de motor agregado

Energy evaluation of induction motors through aggregate motor model

Ignacio - Romero Rueda
Miriam - Vilaragut Llanes

Bárbara - Pérez Mena
Oscar - Peña Guilarte

Recibido: Enero del 2012

Aprobado: Abril del 2012

Resumen/ Abstract

Este trabajo armoniza los datos nominales del motor agregado, mediciones de tensión y corriente en el suministro eléctrico al grupo de motores asincrónicos y el método del momento en el entrehierro para determinar el estado de carga, la eficiencia y demás magnitudes que caracterizan energéticamente al grupo de motores a través del equivalente. Se define el factor de incidencia como la relación entre la potencia demandada por el motor agregado y la demanda total. Los motores seleccionados tienen coeficientes de incidencias iguales o mayores que el coeficiente de incidencia medio del conjunto de agregados, garantizando que predominen los de mayor potencia, disminuyendo el número a considerar y definiendo la eficiencia como parámetro de decisión. Los resultados demuestran que el motor agregado determina el potencial de ahorro asociado a una barra de potencia con precisión, disminuyendo el volumen de cálculo, simplificando la búsqueda y en menor tiempo.

Palabras clave: evaluación energética, modelo de motor agregado, momento en el entrehierro, motor de inducción.

This work concurs the nominal data of the aggregate motor, voltage and current measurements in the asynchronous motors group electric supply and the air gap torque's method to determine the load state, the efficiency and other magnitudes that characterize energetically the group of motors by the equivalent one. The incidence factor is defined as the relationship between the aggregate motor's demanded power and the total demand. The designated motors have same or bigger incidence coefficients than the half incidence coefficient of the group of aggregate, ensuring that predominate the most powerful, reducing the number to consider and defining the efficiency as a decision parameter. The results demonstrate that the aggregate motor determines accurately the saving potential associated to a power bus, decreasing the calculation volume, simplifying the search and in smaller time.

Keywords: energy evaluation, aggregate motor model, air gap torque, induction motor.

INTRODUCCIÓN

El motor de inducción representa un alto por ciento en el consumo de energía eléctrica. Existen instalaciones que cuentan con alto número de motores inducción y se hace engorroso y largo analizar el comportamiento de los mismos individualmente, por ello surge el modelo de motor agregado [1-3]. Generalmente se trabaja con modelos obtenidos en base a los parámetros nominales y es frecuente utilizarlo en análisis dinámicos [4-5], no existe referencia al uso del mismo con fines energético. La combinación del método del momento en el entrehierro (MME) con mediciones en el punto de suministro eléctrico permite adaptar al motor agregado nominal a las condiciones reales y a partir del mismo determinar el comportamiento energético del grupo de motores de inducción.

La validación del método de agregación se realiza comparando los resultados obtenidos del motor agregado con la suma de los motores individuales, tomando como criterio básico para el análisis que la potencia de salida del motor agregado es igual a la potencia total desarrollada por el grupo de motores de inducción [2, 6, 7]. Este trabajo tiene como objetivo mostrar la validez y exactitud de utilizar el modelo de motor de inducción agregado combinado con el MME para evaluar el potencial de ahorro de energía asociado a una barra de potencia eléctrica en baja tensión formada por motores de inducción, logrando disminuir el volumen de cálculo comparado con un análisis exhaustivo del total de motores.

El trabajo se estructura en tres partes: en primer lugar se obtienen los diagramas monolineales equivalentes, definiendo los motores agregados de diferentes niveles; en segundo lugar se aplica el momento MME para determinar las características de servicios de todos los motores agregados y seleccionar el motor agregado a realizarle un análisis particular y en tercer lugar se selecciona de este último agregado el motor de inducción más significativo para el análisis del reemplazo.

En el desarrollo del trabajo se determina el comportamiento energético de todos los motores agregados y se realiza un pronóstico de energía asociada a la barra completa; se seleccionan los motores agregados más significativos de acuerdo al coeficiente de incidencia, realizando una valoración del porcentaje que representan con respecto al total de motores agregado; se selecciona uno de estos agregados para un análisis individual y por último se obtiene un comportamiento energético más específico del motor de inducción, más significativo, que integra este agregado y se realiza un análisis del comportamiento real y pronóstico de ahorro de energía por sustitución de este motor de inducción.

DESARROLLO

MOTORES DE INDUCCIÓN AGREGADOS POR BARRAS

Actualmente los motores de inducción se encuentran en las más diversas aplicaciones, industriales, sector residencial y los servicios [8]. Para ser agrupados en equivalentes, formando los agregados, y que sirvan con fines energéticos tienen que cumplir determinadas condiciones, las cuales se enumeran a continuación:

1. Motores de inducción en baja tensión.
2. Conexión directa a barra, sin que medie ningún elemento de fuerza y/o control, (variadores de velocidad, reactores y transformadores de potencia fundamentalmente).
3. Pertenecen a una misma barra, sin compensación individual de reactivo.
4. Están operando en régimen estable.
5. Se consideran despreciables los procesos transitorios normales de cambio en la carga.
6. La barra presenta un alimentador principal.
7. No se consideran los motores en reservas.

La existencia de motores de diferentes potencias, tipos de cargas que accionan, velocidades, etc., conectados a una misma barra de potencia hace difícil emitir un criterio único de agrupamiento, se parte de la existencia de un alimentador común que permita las mediciones generales para obtener el modelo agregado ajustados a las condiciones reales, lo cual servirá para realizar una valoración sobre el uso de la energía en ese alimentador o barra. Se tomó como objeto de estudio la barra de potencia 5TP4 con tensión de 0,48 kV, la misma constituye una subestación con dos transformadores de 1000 kVA formada por seis

barras secundarias a las cuales se conectan 37 motores de inducción, pertenecientes a la planta de secaderos de la empresa niquelífera Ernesto Che Guevara de Moa.

Composición de motores agregados

La figura 1, se obtiene agrupando los motores de inducción por cada barra secundaria de la subestación 5TP4, donde M1 hasta M29 representan motores agregados. La nomenclatura asociada a cada motor representa la función que realiza en el proceso industrial.

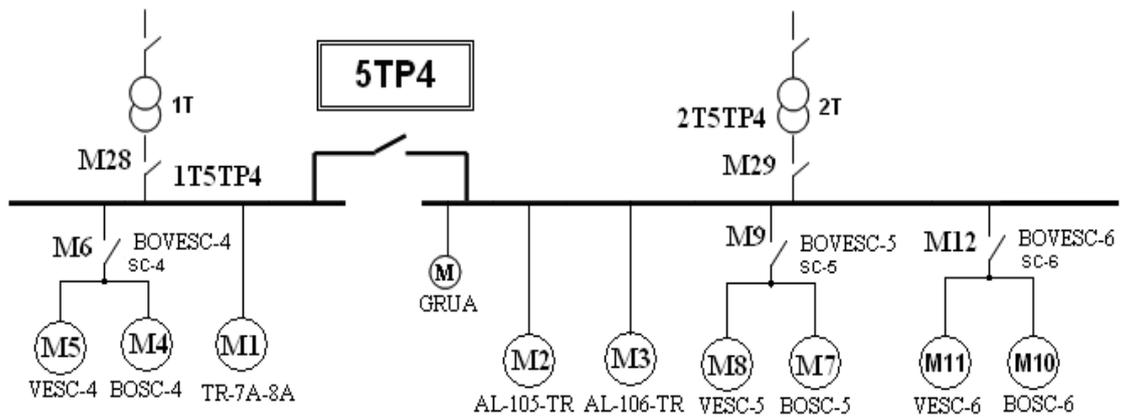


Fig. 1. Monolineal de 5TP4 con modelos agregados individuales por barras.

Los puntos a efectuar las mediciones para formar los motores agregados se corresponden con cada barra secundaria. Ahora existen motores que corresponden a la carga que existían por barras secundarias, en lo delante agregados de primer nivel. La posibilidad de obtener motores agregados no se limitan a las barras secundarias, se puede realizar a través de las barras principales, al tener presente que siempre exista un alimentador común. Los motores agregados de segundo nivel se obtienen por unión de agregados de primer nivel según la figura 2, resultando $M6 = [M4 M5]$, $M9 = [M7 M8]$ y $M12 = [M10 M11]$.

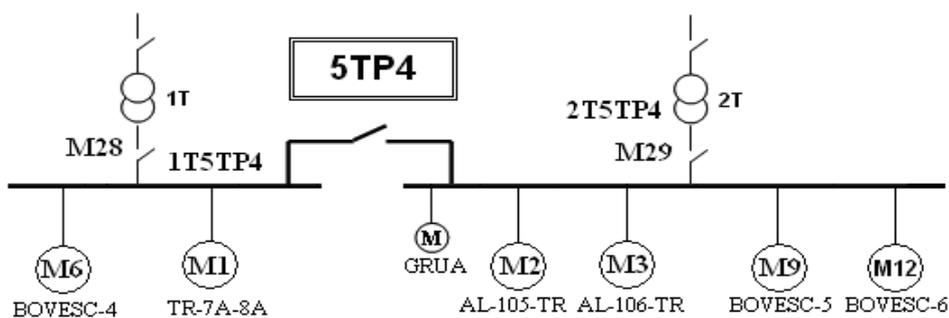


Fig. 2. Monolineal de 5TP4 con modelos agregados de segundo nivel.

Para obtener los motores agregados de tercer nivel (1T5TP4 y 2T5TP4) se consideran los motores agregados resultantes de cada barra secundaria, resultando $M28 = [M1 M6]$ y $M29 = [M2 M3 M9 M12]$. Luego el monolineal se modifica nuevamente para la subestación 5TP4 según la figura 3.

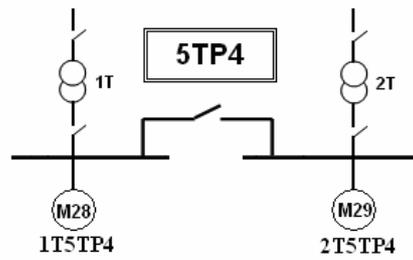


Fig. 3. Monolineal de 5TP4 con modelos agregados por barras principales.

La obtención de los modelos agregados nominales por barra se realiza por la metodología que aparece en [2, 9], implementada a través del software Matlab. En primer lugar se obtienen los nueve motores agregados del primer nivel ver figura 1, en segundo lugar los agregados del segundo nivel ver figura 2, y finalmente se obtienen los agregados de tercer nivel o directo a barra ver figura 3. Los datos nominales de cada motor agregado se presentan en el anexo A, tabla A.1 y tabla A.2. Aplicando la metodología desarrollada en Romero y Perez (2008) se obtienen los parámetros nominales del circuito equivalente para cada motor agregado. Combinando las mediciones y los datos nominales en el MME se determinan las características de funcionamiento del agregado, que permite seleccionar el o los agregados al análisis individual, y obtener el comportamiento energético de los motores de inducción reales valorando las posibilidades de ahorro de energía en menor tiempo que un análisis exhaustivo de todos los motores que integran la barra. El esquema general aplicado se muestra en el anexo B.

Criterios de selección del motor agregado al análisis individual

Cuando se analiza el comportamiento energético de motores agregados el coeficiente de carga y la eficiencia se refieren a grupos de motores y tienen en cuenta la carga real de cada motor en barra. Se adiciona a la toma de decisión el factor de incidencia individual (k_{inc}), definido como la relación entre la potencia demandada por el motor agregado individual y la demanda total de la barra de potencia eléctrica en baja tensión, ecuación (1) en %.

$$k_{inc} = \frac{P_{li}}{\sum_{i=1}^n P_{li}} \cdot 100, \quad [\%] \tag{1}$$

donde: n es el número de motores y P_{li} la potencia demandada por cada motor agregado, [W].

Se define el coeficiente de incidencia medio ($k_{inc,m}$), como la relación entre la potencia media demandada por el conjunto de motores agregados y la demanda total de la barra (2), en %.

$$k_{inc,m} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{li}}{\sum_{i=1}^n P_{li}} \cdot 100, \quad [\%] \tag{2}$$

Los motores a seleccionar, para la investigación individual, son aquellos que sus coeficientes de incidencias sean iguales o mayores que el factor de incidencia medio del conjunto de motores agregados. La ecuación (1) garantiza que predominen los motores agregados de mayor potencia, disminuye el número a considerar

y permite definir la eficiencia como parámetro de decisión. Este trabajo utiliza el método del costo del ciclo de vida para evaluar las opciones de ahorro de energía a lo largo de la vida útil del motor seleccionado [11]. Cuando se calcula el consumo de energía, las pérdidas y sus costos, el procedimiento es someter al motor seleccionado al mismo diagrama de carga que el desarrollado por el motor original en servicio [12]. Este proceso considera el estado de carga real del nuevo motor y encuentra su eficiencia operacional interpolando entre los valores de eficiencia declarada por el fabricante para éste en el 50, 75 y 100 % de estado de carga.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Las mediciones básicas para determinar el comportamiento de las cargas con motores de inducción en régimen estacionario lo constituyen las formas de ondas de tensiones y corrientes. A partir de la ecuación de momento electromagnético sólo se necesitan las corrientes de dos fases i_a y i_b , y las tensiones de líneas V_{ab} y V_{ca} [13-15]. El registro de las mediciones, atendiendo a que se necesita para estudios energéticos, se toma a un intervalo de 10 minutos durante las 24 horas; las formas de ondas toman 128 muestra por ciclo garantizando que se mantengan las propiedades de las magnitudes medidas con gran exactitud. La base de datos se elabora en formato de estructura (3) para ser interpretada por la aplicación computacional,

$$DE1 = struct('DO',[DO], 'Df',[Df], 'Dnr',[Dv], 'DN', [def]); \quad (3)$$

donde: [DO] = matriz formas de ondas de tensiones y corrientes; [Df] = matriz frecuencia; [Dv] = matriz velocidad; [def] = celda de datos nominales de los motores agregados e individuales.

Aplicación del MME y selección del motor agregado para el análisis individual

Las características de funcionamiento de cada motor agregado del primer nivel de integración perteneciente a la barra 5TP4 obtenidas a través del MME se muestran en la tabla 1, ordenada por el coeficiente de incidencia k_{inc} en forma ascendente.

Tabla 1. Características de servicio de los motores agregados del primer nivel para la barra 5TP4.									
<i>Magg</i>	$P_1(kW)$	$P_2(kW)$	$T_{ag}(Nm)$	$n_r(rpm)$	$I_m(A)$	$V_m(V)$	$k_c(pu)$	$\eta(pu)$	$k_{inc} \%$
M4	5,25	4,61	27,33	1754,62	8,42	437,62	0,369	0,875	0,981
M7	5,66	4,94	29,21	1754,5	10,87	453,47	0,395	0,873	1,057
M10	5,94	5,18	30,61	1750,41	11,74	445,86	0,414	0,869	1,111
M3	14,84	13,34	77,83	1787,15	23,56	455,85	0,351	0,899	2,773
M2	34,28	30,2	180,23	1787,56	62,27	452,58	0,267	0,881	6,405
M1	108,53	96,88	570,63	1783,56	199,05	446,11	0,324	0,893	20,277
M5	114,40	103,14	890,17	1184,22	229,38	437,62	0,534	0,902	21,374
M8	122,79	111,2	955,75	1184,27	235,69	453,47	0,576	0,906	22,941
M11	123,54	111,65	960,62	1183,58	241,94	445,86	0,578	0,904	23,082

En la tabla 1, k_{inc} = factor de incidencia; P_n = potencia nominal del motor agregado; P_1 = potencia real medida en el alimentador común de la barra; I_1 = corriente por el estator; P_2 = potencia de salida y η la eficiencia, para el estado de carga (kc) actual del motor agregado.

El coeficiente de incidencia medio es $k_{inc,m} = 11 \%$ cuando se analizan los agregados del primer escalón, reduciendo el trabajo del análisis particularizado a cuatro motores (M1, M5, M8 y M11) simplificando el volumen de mediciones y cálculo a realizar. Cuando se consideran todos los motores agregados el coeficiente de incidencia medio es $k_{inc,m} = 7,14 \%$, ahora existen nueve motores agregados a seleccionar para la investigación individual y se observa la correspondencia siguiente: M5 pertenece a M6, M8 a M9 y M11 a M12, al mismo tiempo, todos a M28 y M29, El orden de análisis personalizado en este caso será M1, M5, M11 y M8 dado por la eficiencia y el factor de carga como criterios de definición.

Potencial de ahorro en la barra de potencia eléctrica 5TP4

Aplicando el MME se obtiene el gráfico de carga del motor agregado del primer nivel, seleccionado previamente para un análisis individual, que permite la selección de un motor de inducción por el método de la potencia equivalente. El potencial de ahorro asociado al motor agregado se obtiene por diferencia entre la energía consumida por el motor agregado en funcionamiento y el consumo de energía pronosticada para el nuevo motor de inducción seleccionado, bajo los siguientes datos para el cálculo económico:

- Vida útil del motor 12 años
- Tasa de Descuento 0,12 pu
- Costo de la Energía 0,08 USD/kWh
- Horas de Trabajo Diario 24 horas
- Días de Trabajo Anuales 360 días

La tabla 2, muestra el resumen para la barra 5TP4 con nueve motores agregados del primer nivel de integración del pronóstico de energía consumida por el motor en funcionamiento actual y el nuevo seleccionado, por año y por día, además aparece el ahorro de energía por diferencia de consumo entre estos motores sometiendo a ambos al mismo gráfico de carga obtenido por el MME [12].

Tabla 2. Resumen de energía anual y por día para la barra 5TP4.						
<i>Motores agregados</i> <i>Barra 5TP4</i>	<i>MOaño</i> <i>(kWh)</i>	<i>MNaño</i> <i>(kWh)</i>	<i>MOdía</i> <i>(kWh)</i>	<i>MNdía</i> <i>(kWh)</i>	<i>Aaño</i> <i>(kWh)</i>	<i>Adía</i> <i>(kWh)</i>
M(1-5-8-11)	4054397,82	3833952,54	11262,22	10649,87	220445,28	612,35
Total	4624437,27	4378339,81	12845,66	12162,06	246097,46	683,60
% del total	87,67	87,57	87,68	87,57	89,58	89,58

En la tabla 2, se sigue la siguiente nomenclatura: MOaño, MOdía = consumo de energía del motor original al año, y al día respectivamente [kW]; MNaño, MNdía = consumo de energía del motor seleccionado al año, y al día respectivamente [kW]; Aaño, Adía = ahorro de energía anual y al día respectivamente, [kWh].

La fila "M(1-5-8-11)" en la tabla 2, representa la suma de la energía correspondientes a los motores agregados M1, M5, M8 y M11 seleccionados previamente como los de mayores incidencias dentro de la barra 5TP4 precisando que este factor se obtiene por la demanda de potencia real y no la nominal, La fila "Total" es la suma de la energía para todos los agregados de la barra y la fila "% del total" muestra el porcentaje que representan los motores seleccionados dentro del total en barra, observando que constituyen el 87 % de la energía total, esto significa que se puede estimar el ahorro de energía en barra sin necesidad del análisis individual de todos los motores,

Características de funcionamiento para el motor agregado del primer nivel, M8

Se ha seleccionado el motor agregado M8 para un análisis detallado: El motor M8 corresponde al VESEC5, formado por tres motores (18; 85 y 90 kW) y uno en reserva de 90 kW, Las mediciones de cada motor de inducción individual y del agregado están almacenadas en la base de datos "M8_con_agg.mat" de Matlab, contiene información de las formas de ondas de tensiones y corrientes, de los datos nominales y de la frecuencia según la estructura en MATLAB:

DE1 =

Estructura [1x4] con cuatro campos: [Motor agregado (1) y motores de inducción (2, 3 y 4)]

DE1(3) = (el número (3) corresponde al segundo motor de inducción)

DO: (Matriz de [3072x6] de las formas de ondas de tensión y corrientes)

Df: (Matriz de [24 filas] correspondiente al resumen de frecuencia por mediciones)

Dnr: (Matriz de velocidad [] vacía)

DN: (Celda de [1x13] que contiene los datos nominales del motor)

La tabla 3, presenta el resumen de los resultados obtenido para el motor agregado M8, después de aplicar el MME donde se destaca un bajo coeficiente de carga $k_c = 0,58$ en valores reales.

Tabla 3. Resumen de los datos operacionales y nominales del motor agregado M8.				
<i>Parámetros</i>	<i>Simbología</i>	<i>UM</i>	<i>Actual</i>	<i>Nominal</i>
Tensión valor promedio	V_1	V	453,47	440,00
Corriente valor promedio	I_s	A	235,69	323,83
Potencia activa entrada	P_1	kW	122,79	211,99
Potencia promedio en el eje	P_2	kW	111,13	193,00
Perdidas medias totales	Z_p	kW	11,65	18,99
Eficiencia media	E_f	-	0,91	0,91
Factor de potencia medio	F_p	-	0,66	0,86
Velocidad media del rotor	N_r	rpm	1184	1176
Momento medio en el eje	M_2	Nm	896,66	1567,42
Coeficiente de carga	k_c	-	0,58	

Las prioridades en el análisis de los motores individuales correspondiente al agregado M8 lo ofrece el coeficiente de incidencia de cada motor comparado con su valor medio. El coeficiente de incidencia medio para estos motores es $k_{inc,m} = 33,33\%$, entonces se prioriza el motor de inducción MI-2 dado su menor valor de eficiencia según muestra la tabla 4, junto a otras magnitudes que caracterizan el funcionamiento del mismo.

$M, Ind,$	$P_1(kW)$	$P_2(kW)$	$T_{ag}(Nm)$	$n_r(rpm)$	$I_m(A)$	$V_m(V)$	$k_c(pu)$	$\eta(pu)$	$k_{incd} \%$
MI 1	17,38	15,58	133,26	1173,36	28,12	453,47	0,866	0,896	14,109
MI 3	50,41	46,20	397,95	1185,60	84,27	453,47	0,513	0,916	40,915
MI 2	55,41	50,43	435,19	1183,49	110,96	453,47	0,593	0,910	44,976

Potencial de ahorro para el motor agregado M8

La evaluación del potencial de ahorro de energía asociado al motor M8 se obtiene de forma similar a como se realizó para la barra 5TP4 en el apartado b). La tabla 5, muestra los resultados de la energía consumida por el motor en funcionamiento y estimada para el motor seleccionado, de la energía ahorrada al año y diaria del motor agregado M8 con respecto a la suma de los motores, Se aprecia que el error (err(%)) es menor del 6% en todos los casos, justificando una vez más la efectividad del motor agregado como equivalente del grupo de motores.

	$MOaño$ (kWh)	$MNaño$ (kWh)	$MOdía$ (kWh)	$MNdía$ (kWh)	$Aaño$ (kWh)	$Adía$ (kWh)	PRI (años)
Magg	1060874,82	1010453,24	2946,88	2806,82	50421,58	140,06	
MI-1	150192,243	145254,316	417,201	403,484	4937,927	13,716	5,54
MI-2	478763,350	454900,776	1329,898	1263,613	23862,574	66,285	3,36
MI-3	435537,211	416747,749	1209,826	1157,633	18789,461	52,193	4,26
Suma	1064492,80	1016902,84	2956,93	2824,73	47589,96	132,19	
err(%)	0,34	0,64	0,34	0,64	5,62	5,62	

donde: PRI = período de recuperación de la inversión, [años].

Además de la influencia de la eficiencia y el factor de carga se puede considerar el período de recuperación de la inversión (PRI) en la selección de motores de inducción, en este caso el motor MI-2 presenta el menor valor con 3,36 años. Dado que la evaluación energética se hace realidad para motores de inducción y no en agregados se realiza el análisis para el motor de inducción número dos (MI-2) utilizando el MME, seleccionando el motor sustituto al cual se le aplica el mismo gráfico de carga del motor en funcionamiento para pronosticar el comportamiento y consumo de energía.

Resultados de la evaluación energética para el motor de inducción MI-2

El motor MI-2 tiene potencia nominal 85 kW, Las mediciones de las formas de ondas de tensión y corriente están contenidas en la base de datos "M8_2.mat" de Matlab con la información de la estructura referida al motor de inducción MI-2. La tabla 6, presenta los resultados para el motor MI-2 después de aplicar el MME donde se destaca el bajo coeficiente de carga $k_c = 0,59$ Junto a los datos operacionales se presentan los nominales del motor MI-2 que permite comparar los diferentes parámetros promedio reales del mismo. La potencia nominal se reduce a 55,95 kW de 85 kW el motor en funcionamiento. En la tabla 6, aparece el

resumen de los resultados para la evaluación del potencial de ahorro de energía a través del motor de inducción MI-2.

Tabla 6. Datos operacionales y nominales del motor MI-2 y del seleccionado.						
Parámetros	Simbología	UM	Motor actual		Motor seleccionado	
			Real	Nominal	Estimado	Nominal
Tensión valor promedio	V_1	V	453,47	440,00	453,47	440,00
Corriente valor promedio	I_s	A	110,96	140,97	84,29	97,00
Potencia activa entrada	P_1	kW	55,41	92,39	52,65	59,21
Potencia promedio en el eje	P_2	kW	50,43	85,00	50,43	55,95
Perdidas medias totales	Z_p	kW	4,98	7,39	2,22	3,26
Eficiencia media	E_f	-	0,91	0,92	0,96	0,94
Factor de potencia medio	F_p	-	0,64	0,86	0,80	0,80
Velocidad media del rotor	N_r	rpm	1183	1176	1193	1185
Momento medio en el eje	M_2	Nm	406,97	690,26	403,88	450,87
Coeficiente de carga	k_c	-	0,59		0,90	

La tabla 7, recoge los datos iniciales del cálculo económico y los resultados referidos al costo del ciclo de vida obtenido para el motor MI-2, También se presenta el tiempo de recuperación de la inversión de 3,36 años y un CCV diferencial de 2514,97 USD.

Tabla 7. Datos para el cálculo económico y costos del ciclo de vida.					
Datos de entrada para el cálculo económico			Resultados del costo del ciclo de vida		
Vida útil del motor	12	años	Costo de la Energía MV	3191,76	USD
Tasa de Descuento	0,12	pu	Costo de la Energía MN	3032,67	USD
Costo de la Energía	0,08	USD/kWh	CCV del motor Viejo	11955,64	USD
Horas de Trabajo Diario	24	horas	CCV del motor Nuevo	9440,67	USD
Días de Trabajo Anuales	360	días	CCV Diferencial	2514,97	USD
Precio del Motor Nuevo	6408,00	USD	PRI	3,36	años
Precio del Motor Viejo	8763,88	USD	Ahorro por sustitución	2,76	kW

Las principales características que determinan el comportamiento energético del motor de inducción MI-2, se presentan desde figura 4, hasta la figura 9.

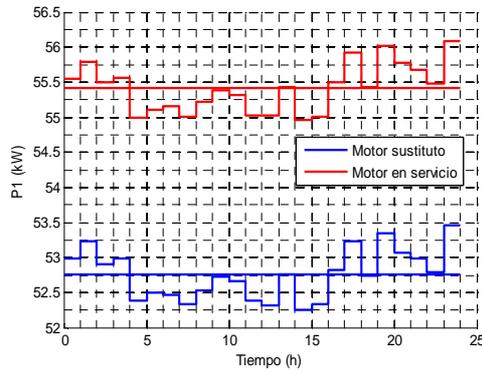


Fig. 4. Potencia de entrada para el motor original y el seleccionado.

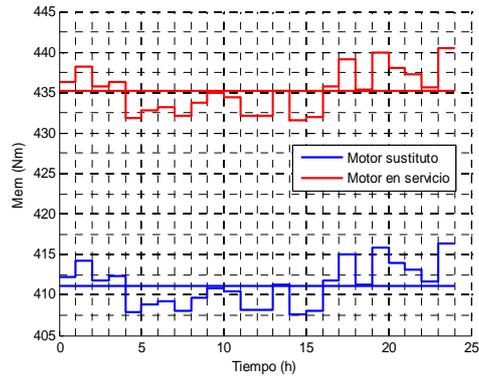


Fig. 5. Momento en el entrehierro para el motor original y el seleccionado.

La figura 4, muestra el comportamiento de la potencia de entrada para el motor en funcionamiento con valor promedio de 55,41 kW y el estimado para el motor seleccionado con 52,65 kW con diferencia de 2,76 kW visto en la tabla 7, como ahorro por sustitución. El momento electromagnético figura 5, también muestra la diferencia entre ambos motores (435,19 Nm vs 412,04 Nm), debido a la reducción de corriente del motor por disminución de potencia nominal.

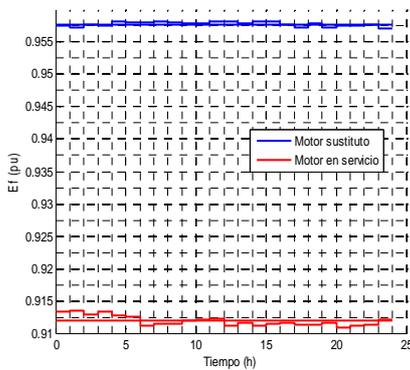


Fig. 6. Eficiencia para el motor original y el seleccionado.

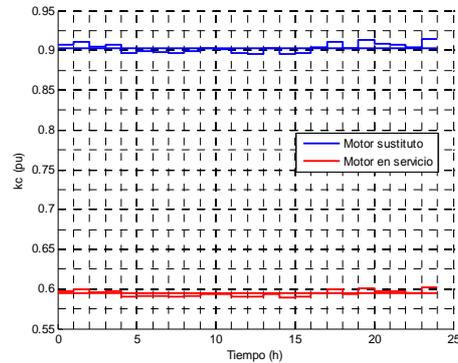


Fig. 7. Factor de carga para el motor original y el seleccionado.

La figura 6, muestra el comportamiento de la eficiencia para el motor en funcionamiento con valor medio de 0,91 y el estimado para el motor seleccionado de 0,958 con diferencia de 0,048 a favor de este último. El factor de carga figura 7, también muestra la diferencia entre ambos motores (0,593 vs 0,901) debido a la reducción de la potencia nominal del motor seleccionado.

La figura 8, muestra el comportamiento anual de la energía consumida en 8760 hs para el motor en funcionamiento con valor promedio de 19948,473 kWh y total 478763,35 kWh y para el motor seleccionado se estima un valor de 18954,2 kWh y total 454900,776 kWh con diferencia de 994,274 kWh y ahorro total de 23862,574 kWh representado en la figura 9, como ahorro de energía por sustitución. Diariamente la energía consumida en 24 hs para el motor en funcionamiento tiene valor promedio 55,412 kWh y total 1329,90 kWh

y el pronóstico para el seleccionado de 52,651 kWh y total 1263,613 kWh para una diferencia de 2,762 kWh y ahorro total de 66,285 kWh.

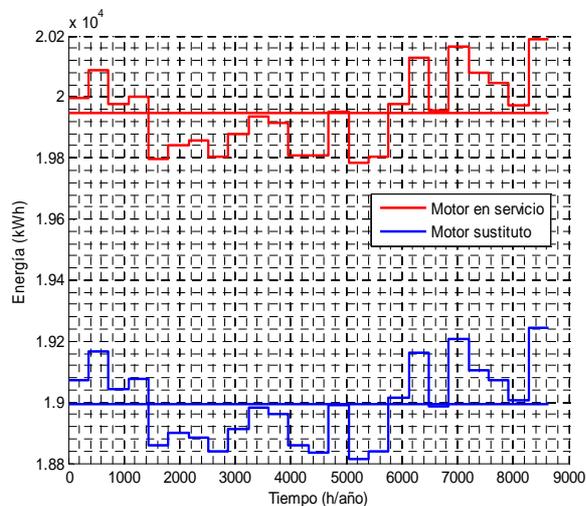


Fig. 8. Energía anual para el motor original y el seleccionado.

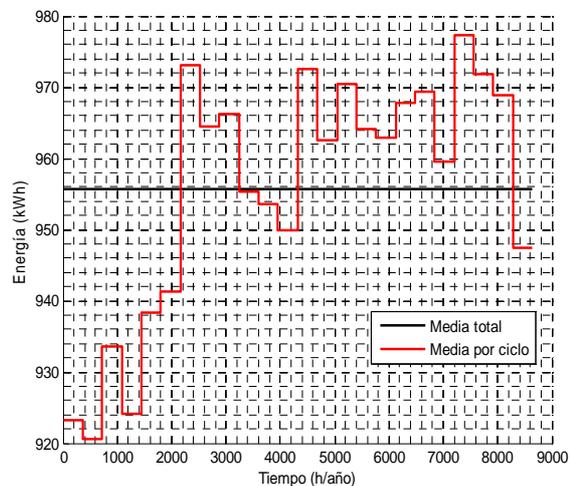


Fig. 9. Ahorro de energía anual por sustitución de MI-2.

Como resultado de la sustitución del motor en funcionamiento de 85 kW por otro de 55,95 kW, se reduce la corriente demandada desde la red (110,96 vs 84,29 A), disminuyen las pérdidas totales (4,98 vs 2,22 kW), mejora la eficiencia (0,91 vs 0,96) y el factor de potencia (0,64 vs 0,80) considerando que existe un nivel de incertidumbre en el pronóstico [16]. La velocidad prácticamente permanece constante por tanto el momento no tiene variación significativa.

CONCLUSIONES

- La combinación de las mediciones en barras, los parámetros del motor agregado y el algoritmo del método del momento en el entrehierro permiten adaptar el motor agregado a las condiciones reales de operación en barras, obteniendo las características que determinan su comportamiento energético a cualquier estado de carga.
- El factor de incidencia establece la simplificación de la cantidad de motores a realizar el análisis energético individual, al mismo tiempo que selecciona el de mayor peso en la carga real, Su valor aumenta cuando sólo se consideran los agregados del primer escalón de integración (7,14% y 11% para la barra 5TP4; 33,33% para M8). El porcentaje de los motores agregados seleccionado a través de este factor representa un alto valor en la potencia demandada y energía consumida por la barra eléctrica que caracterizan (87% para 5TP4).
- Las diferencias relativas entre la energía consumida y la potencia demandada por el motor agregado con la suma de los motores de inducción individuales no alcanzan el 10%, demostrando que el motor agregado puede representar el comportamiento energético del conjunto de motores ubicados en una misma barra de potencia eléctrica (<6% para el agregado M8) y junto al método del momento en el entrehierro ofrece la posibilidad de identificar potenciales de ahorro en cargas con motores de inducción sin la necesidad de analizar individualmente cada uno de ellos, disminuyendo el tiempo de trabajo y el volumen de cálculo a realizar.

REFERENCIAS

- [1] PILLAY, P.; SABUR, S., *et al.*, "A model for induction motor aggregation for power system studies". *Electric Power System Research*. 1997, vol.42, p, 225-228.
- [2] KWOK-WAI, Louie, "A New Way to Represent the Aggregate Effects of Induction Motors at a Same Bus in a Power System". *International Journal of Applied Science and Engineering*. 2006, vol.4, n.1, p. 91-102.
- [3] ZHANG, Hongbin; LIU, Qiyu, *et al.*, "The aggregation method of induction motors with distribution network". In: *Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE), 2010 International Conference on*. 2010, p, 445-449.
- [4] PEDRA, J.; SAINZ, L., *et a.*, "Study of Aggregate Models for Squirrel-Cage Induction Motors". *IEEE Transactions on Power Systems*. August 2005, vol.20, n.3, p. 1519-1527.
- [5] KWOK-WAI, Louie, MARTI, J.R., *et al.*, "Aggregation of Induction Motors in a Power System Based on Some Special Operating Conditions". In: *Electrical and Computer Engineering, 2007, CCECE 2007, Canadian Conference on*, Vancouver, BC, 2007.
- [6] LEM, T. Y. J.; ALDEN, R. T. H., "Comparison of experimental and aggregate induction motor responses". *IEEE Trans, Power Syst.*, Nov. 1994, vol.9, n.4, p. 1895–1900.
- [7] KARAKAS, A.; LI, Fangxing, *et al.*, "Aggregation of multiple induction motors using MATLAB-based software package". In: *Power Systems Conference and Exposition, PSCE'09, IEEE/PES*, Seattle, WA.; 2009, p. 1-6, ISBN 978-1-4244-3810-5.
- [8] DE ALMEIDA, A.I., "Characterization of Motor Systems in the EU, Improving the Penetration of Energy Efficient, Motors and Drives, SAVE II Study". 2006, Available from Internet:<<http://www.iea.org/textbase/work/2006/motor/De%20ALMEIDA%20IEA-Motor-Part-I-15-May-06-Final.pdf>>.
- [9] ROMERO, R. Ignacio; COSTA, M. Angel, *et al.*, "Marcos, Modelo de motor agregado asociado a una barra de potencia". In: *5ta Conferencia Internacional de la Facultad de Ingeniería Eléctrica (FIE 2008)*, Santiago de Cuba, 2008.
- [10] ROMERO, R. Ignacio; PEREZ, M. Bárbara, "Algoritmo para la determinación de los parámetros del motor de inducción por datos nominales". *Ingeniería Energética*, 2008, vol.29, n.3, p.10-17, ISSN 1815-5901.
- [11] ANIBAL BORROTO NORDELO, "GESTIÓN ENERGÉTICA EMPRESARIAL". Cuba, Cienfuegos: Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Editorial Universidad de Cienfuegos, 2002, 98p., ISBN 959-257-040-X.
- [12] DE ARMAS, Marcos; GOMEZ, Julio, *et al.*, "Evaluación de Motores en Servicio". In: *Convención de Ingeniería Eléctrica CIE2011*, Santa Clara, Cuba, 2011.
- [13] BIN, Lu; THOMAS, G. Habetler, *et al.*, "A Nonintrusive and In Service Motor Efficiency Estimation Method Using Air Gap Momento with Considerations of Condition Monitoring". In: *Proc, IEEE Ind, Appl, Annu, Meeting*, 2006a.
- [14] FIGURA, R.; SZYCHTA, E.; SZYCHTA, L., "In-Service Efficiency Estimation with the use Modified Air-Gap Torque Method for Squirrel-Cage Induction Motor". *Electronics and Electrical Engineering*. 15 de febrero del 2011, vol.8, n.114, p. 51– 56.
- [15] HERNDLER, B.; BARENDSE, P., *et al.*, "Considerations for improving the non-intrusive efficiency estimation of induction machines using the air gap torque method". In: *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International*. 2011, p. 1516-1521.
- [16] DE LA ROSA, M. Elías; VIEGO, F. Percy, *et al.*, "Incertidumbre en la evaluación del ahorro de energía por sustitución de motores eléctricos". *Ingenierías*, Abril-Junio 2007, vol.10, n.35, p. 27-31.

AUTORES

Ignacio Romero Rueda

Ingeniero Eléctrico, Master en Ciencia, Profesor Auxiliar, Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM), Las Coloradas, Holguín, Cuba.

e-mail: irromo@ismm.edu.cu, irromo66@hotmail.es

Miriam Vilaragut Llanes

Ingeniera Eléctrica, Profesora Auxiliar, Doctora en Ciencia, Centro de Investigaciones y Pruebas Electroenergéticas (CIPEL), CUJAE, la Habana, Cuba.

e-mail: miriamv@electrica.cujae.edu.cu

Bárbara M, Pérez Mena

Ingeniera Eléctrica, Profesora Instructora, Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM), Las Coloradas, Holguín, Cuba.

e-mail: bperez@ismm.edu.cu

Oscar W, Peña Guilarte

Ingeniera Eléctrica, Profesor Asistente, Instituto Superior Minero Metalúrgico (ISMM), Las Coloradas, Holguín, Cuba.

e-mail: oguilarte@ismm.edu.cu

Anexo A, Datos nominales de motores agregados.

Tabla A.1. Datos nominales de los motores agregados del primer nivel.								
<i>M, Agg</i>	<i>Barras</i>	P_n (kW)	I_n (A)	n_n (rev/min)	$\cos\varphi$ (pu)	η (pu)	J (kg,m ²)	R_s (Ohm)
M1	TR7Ay8A	299	495,60	1761,33	0,863	0,9157	1,7378	0,0077
M2	2WPPD22	113	208,53	1760,22	0,841	0,843	0,5740	0,0261
M3	AL105TR	38	67,53	1770,61	0,842	0,8702	0,1923	0,1031
BOSEC4 BOSEC5 BOSEC6								
M4 M7 M10		12,5	23,73	1712,41	0,848	0,8179	0,0747	0,4186
VESEC4 VESEC5 VESEC6								
M5 M8 M11		193	322,99	1175,91	0,859	0,9104	5,1768	0,0164

Tabla A.2. Datos nominales de los motores agregados de segundo y tercer nivel.								
<i>M, Agg</i>	<i>Barras</i>	P_n (kW)	I_n (A)	n_n (rev/min)	$\cos\varphi$ (pu)	η (pu)	J (kg,m ²)	R_s (Ohm)
M28	1T5TP4	504,5	842,3	1761,05	0,8607	0,9110	4,1172	0,0040
M29	2T5TP4	524,0	901,9	1760,55	0,8542	0,8903	5,3341	0,0038
VEBOSEC4 VEBOSEC5 BOVESEC6								
M6 M9 M12		205,5	346,72	1173,76	0,858	0,9042	5,3548	0,0152

Anexo B. Esquema en bloques para la evaluación energética en barra de potencia eléctrica a través del modelo de motor agregado.

