

# High Efficiency Electric Motors: Economic and Energy Advantages

C. J. Verucchi, C. R. Ruschetti and G. E. Kazlauskas

**Abstract**— The energy crisis that is currently being faced by humanity has demanded the revision of the regulations applied to different energy consumers, including electrical machines. The minimum efficiency standards for electrical machines provided by the regulations have been increased. Different categories have been defined to identify the engine based on the level of losses. Regardless of the benefits of ecological nature imposed by recent regulations, the use of the new generations of high efficiency induction engines is attractive from an economic standpoint. The lower power consumption engines and its increasing life span can allow quickly recovering the additional cost of new units and achieving further gains. In this paper the current regulations in different countries of the world are reviewed. According to the energy cost in Argentina, a computation of the times of economic payback is also presented.

**Keywords**— Induction motor/machine, energetic efficiency, electric machine design.

## I. INTRODUCCIÓN

LOS MOTORES de inducción trifásicos de jaula de ardilla están presentes en la inmensa mayoría de los accionamientos empleados en procesos industriales. El bajo costo y la robustez convierten a este tipo de motor en una alternativa prácticamente excluyente. 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.

El empleo tan extendido de estos motores implica que una muy importante fracción de la energía eléctrica consumida por el sector industrial deba atribuirseles. En efecto, se estima que entre un 80 y un 90 % del total de energía eléctrica consumida por las industrias se emplea para accionar motores de inducción [1]. Si se toma en cuenta que una fracción importante de la energía eléctrica generada se destina al sector industrial, se concluye que los motores de inducción constituyen el consumidor de energía eléctrica por excelencia. Poner atención en su rendimiento, en consecuencia, se vuelve una necesidad imperiosa.

Si bien los porcentajes varían de un país a otro, a modo de ejemplo pueden tomarse los casos de Estados Unidos, China y Canadá. En estos países los porcentajes de energía eléctrica consumida por motores de inducción industriales son de 75, 60 y 80 % respectivamente [1]. Otros trabajos aseguran que el 70 % de toda la energía eléctrica generada en el planeta es

convertida en trabajo por medio de motores de inducción [2]. En Latinoamérica, por su parte, si bien estos porcentajes son menores debido al menor grado de industrialización, resultan igualmente importantes. En Brasil este porcentaje alcanza el 50 % [1], mientras que en Argentina llega a aproximadamente 47,5 % [3].

Los motores de inducción convencionales han funcionado, durante muchos años, con eficiencias que oscilaban entre un 83 y un 92 % aproximadamente [4]. Los valores más bajos corresponden a los motores de menor potencia y los más elevados a los motores de potencias mayores. Estos porcentajes, si bien están muy por encima de los niveles de eficiencia de las máquinas de corriente continua, no son comparables con los altos rendimientos que pueden obtenerse con, por ejemplo, máquinas sincrónicas de imanes permanentes [5].

Teniendo en cuenta la importante fracción de energía que estos motores consumen resulta evidente que un incremento en su eficiencia tendría un impacto significativo sobre el total de energía eléctrica demandada. De tal modo, una evolución paulatina hacia el empleo de motores de mayor eficiencia podría amortiguar el incremento en la energía eléctrica demandada que se espera para países cuyas economías se encuentran en crecimiento.

Los niveles de rendimiento de los motores de inducción jaula de ardilla están dados no sólo a partir de las características propias de este tipo de máquinas sino también a partir de los criterios de diseño imperantes en décadas pasadas. En efecto, los fabricantes de motores de inducción han privilegiado por muchos años aspectos económicos por encima de aspectos energéticos a la hora de diseñar sus máquinas. Máquinas más pequeñas y temperaturas de trabajo mayores permitieron reducir significativamente el costo de cada unidad. Desde hace algunos años, sin embargo, y en consonancia con los cambios en el enfoque con que se observa a nivel global el empleo de los recursos energéticos del planeta, las nuevas normativas han impuesto nuevos criterios de diseño de motores. Estos nuevos criterios privilegian el bajo consumo, es decir, optimizan el rendimiento. Este cambio de paradigma impulsó la comercialización de una nueva línea de motores denominados de alta eficiencia y posteriormente los de muy alta eficiencia o eficiencia Premium [2]. Los criterios para determinar los límites entre motores convencionales y de alta eficiencia fueron establecidos por distintas normas en distintos lugares del mundo. En 2009 la IEC (International Electrotechnical Commission) estableció niveles de rendimiento mínimos para cada categoría y para cada potencia nominal, intentando unificar los criterios

C. J. Verucchi, Universidad Nacional del Centro de la Prov. de Buenos Aires, Argentina, verucchi@fio.unicen.edu.ar

C. R. Ruschetti, Universidad Nacional del Centro de la Prov. de Buenos Aires, Argentina, cruschetti@ieee.org

G. E. Kazlauskas, Universidad Nacional del Centro de la Prov. de Buenos Aires, Argentina, gkazlaus@fio.unicen.edu.ar

imperantes en distintas regiones del mundo [6].

Asimismo, algunos países han establecido restricciones para la instalación y para la fabricación de motores con bajos niveles de rendimiento, de modo tal de privilegiar un consumo más eficiente de la energía. En Latinoamérica hay países que han fijado restricciones y otros que se encuentran aún estudiando tal posibilidad (Brasil, México [1]).

Este trabajo tiene como objetivo analizar la conveniencia de reemplazar motores convencionales por motores de alta eficiencia. Dicha conveniencia será analizada en términos de ahorro energético por un lado y desde un punto de vista económico por otro.

En la siguiente sección se presenta una revisión de las distintas normativas vigentes en el mundo en relación a la eficiencia energética de motores de inducción. En la sección III, por su parte, se repasan las distintas causas de pérdidas en los motores de inducción. En la sección IV se detallan las características más importantes de los motores de alta eficiencia y en la sección V se presentan cálculos de los tiempos de recuperación de la inversión adicional que implica instalar motores de alta eficiencia. Finalmente, en la sección VI se presentan las conclusiones extraídas de este trabajo.

## II. NORMATIVAS VIGENTES Y CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN EN BASE A SU EFICIENCIA

El primer paso en la normalización de niveles de eficiencia de motores de inducción fue dado en 1993 por la National Electrical Manufacturers Association (NEMA) al publicar el Standard MG-1-1993 (revisado posteriormente en 1998 y 2003) [7]. Esta iniciativa surgió a partir de las disposiciones de la United States Energy Policy Act (EPA) de 1992. En la normativa de la NEMA se establecen, junto con otros factores, niveles de eficiencia mínimos para motores de inducción de diferentes potencias y velocidades, distinguiéndose asimismo entre motores con carcasas abiertas y totalmente cerradas.

En 2001, la NEMA publicó el Premium Motors Standards, en el que introdujo por primera vez la categoría de Motores de alta eficiencia o alto rendimiento. En el mismo año, por otro lado, la European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics (CEMEP) estableció niveles de eficiencia denominados Eff1, Eff2 y Eff3, distinguiendo entre motores de eficiencia Premium, Alta y Estándar respectivamente [8].

Dada la diversidad de normativas para la clasificación de la eficiencia de motores, en 2008 la International Electrotechnical Commission (IEC) publicó la norma IEC 60034-30 (Máquinas eléctricas rotativas - Parte 30: Clases de eficiencia de los motores de inducción monofásicos, trifásicos y de jaula, código IE). De este modo se impuso un nuevo sistema de clasificación de eficiencia que unificó las definiciones de la CEMEP y NEMA. La clasificación IEC considera:

- Standard Efficiency (IE1)
- High-Efficiency (IE2)
- Premium Efficiency (IE3)

En la Fig. 1 se indica la eficiencia mínima establecida por

la norma IEC que deben tener los motores de cuatro polos, 50 Hz, para distintos niveles de potencia nominal. Del mismo modo, la normativa proporciona los niveles de eficiencia para motores de otras velocidades [6].

Tal como se desprende de la Fig. 1, los niveles de eficiencia mínima crecen con la potencia del motor, esto obedece a los criterios de diseño utilizados tradicionalmente, los cuales tienden a optimizar el rendimiento en la medida que crece la potencia nominal de una máquina.

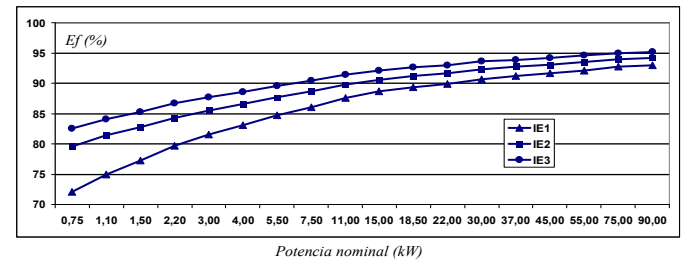


Figura 1. Eficiencia mínima para motores de inducción de 4 polos, 50 Hz para las categorías IE1, IE2 e IE3.

En 2009, la IEC publicó una nueva normativa que incluyó una categoría aún superior, la Super-Premium Efficiency (IE4). Esta nueva categoría, de acuerdo con la opinión de algunos fabricantes de máquinas eléctricas, exige niveles de eficiencia que no podrían garantizarse en motores de inducción con jaula de ardilla y sólo serían factibles de ser traducidas en diseños reales mediante el empleo de motores sincrónicos de imanes permanentes [9]. Estos motores tienen una combinación de jaula de ardilla y de imanes permanentes en el rotor. La jaula sólo cumple funciones durante el arranque, cuando el rotor alcanza la velocidad de sincronismo, los imanes proporcionan el par motor [10-12]. En estos casos las pérdidas en el cobre del rotor se eliminan por completo y la corriente de estator disminuye debido a que la magnetización de la máquina viene dada por el magnetismo remanente de los imanes. Esta nueva clasificación se presenta como una alternativa a futuro y hace presagiar un final cercano para la hegemonía del motor de inducción en su forma tradicional como alternativa más conveniente en aplicaciones industriales.

La legislación europea, asimismo, fijó los plazos para las restricciones en la comercialización de motores de bajos rendimientos, de modo tal de asegurar un paulatino avance hacia un uso más eficiente de la energía (CE N.640/2009 del 22 julio 2009) [6]:

- Desde junio de 2011 el rendimiento de los motores que se fabrican no puede ser inferior al IE2.
- Desde 2015 el rendimiento mínimo de los motores de 7,5 a 375 kW será el dado por IE3 y,
- Desde 2017 la obligación de los rendimientos IE3 se extenderá también a los motores de entre 0,75 kW y 5,5 kW.

En Estados Unidos, desde diciembre de 2010 resulta obligatorio cumplir con los niveles de alta eficiencia fijados por la norma NEMA.

En la Argentina, y a instancias de la Secretaría de Energía,

el IRAM publicó en 2010 la norma 62405 [13]. Esta norma obliga al etiquetado de los motores de inducción trifásicos, debiéndose indicar en cada motor puesto a la venta la categoría IEC a la cual pertenece. Por el momento, esta normativa sólo exige la identificación, sin hacer referencia a la prohibición de fabricar o comercializar motores de bajos niveles de rendimiento.

En Brasil, por su parte, desde el inicio de 2010, todos los motores de propósito general que se pongan a la venta deberán tener como mínimo la eficiencia estipulada por la categoría IE2 de la IEC. En Chile asimismo, desde 2011 rige la obligación de identificar los motores comercializados de acuerdo con las categorías establecidas por la normativa IEC 60034-30.

### III. CLASIFICACIÓN DE LAS PÉRDIDAS EN LOS MOTORES DE INDUCCIÓN

Comúnmente, las pérdidas en los motores de inducción se clasifican distinguiendo dos categorías: pérdidas fijas (o constantes) y pérdidas variables. Las primeras están dadas por las pérdidas que resultan aproximadamente independientes del estado de carga del motor, es decir, de la potencia de salida que transfiere a la carga accionada. Las pérdidas en el hierro y las pérdidas por roce y ventilación corresponden a este grupo. Las variables, por su parte, son aquellas pérdidas que están vinculadas con el nivel de carga del motor.

Otra clasificación, que hace referencia a las causas de cada pérdida de potencia, distingue cinco variantes [9]:

- Pérdidas en el cobre del estator. Vienen dadas por el calor disipado por efecto Joule en los devanados de estator al circular por ellos la corriente de estator. Se calculan como:

$$P_{cus} = 3 \cdot R_s \cdot I_s^2 \quad (1)$$

Donde  $I_s$  es la corriente de estator y  $R_s$  es la resistencia del devanado de estator por cada fase. Dado que la corriente de estator puede tomar valores que van desde el valor de vacío hasta el valor de plena carga de acuerdo con las condiciones de funcionamiento, estas pérdidas resultan aproximadamente proporcionales al cuadrado del nivel de carga.

- Pérdidas en el cobre del rotor. Del mismo modo que ocurre en el estator, los devanados del rotor (barras y anillos de cortocircuito), producen calor por disipación de potencia en sus resistencias. Estas pérdidas vienen dadas por:

$$P_{cur} = 3 \cdot R_r' \cdot I_r'^2 \quad (2)$$

Donde  $R_r'$  e  $I_r'$  son la resistencia y la corriente de rotor referidas al estator respectivamente. Del mismo modo que en el caso anterior, estas pérdidas resultan proporcionales al cuadrado del nivel de carga del motor.

- Pérdidas en el hierro. Son las debidas a la excitación alterna del núcleo magnético de la máquina.

Se subdividen en pérdidas por histéresis y por corrientes parásitas, las primeras vienen dadas por:

$$P_h = \alpha \cdot f \cdot \bar{B}^\gamma \quad (3)$$

donde  $\alpha$  y  $\gamma$  son coeficientes que dependen de las propiedades físicas de cada material,  $f$  es la frecuencia de la red de alimentación y  $\bar{B}$  el valor máximo de la inducción magnética en el circuito. Las pérdidas por corrientes parásitas, por su parte, están dadas por:

$$P_{cp} = \beta \cdot f^2 \cdot \bar{B}^2 \quad (4)$$

donde  $\beta$  es una constante del material.

Teniendo en cuenta que el valor de inducción magnética se mantiene aproximadamente constante para cualquier nivel de carga del motor, es posible asegurar que las pérdidas en el hierro son aproximadamente constantes.

- Pérdidas de roce y ventilación. Generalmente se las considera en forma asociada debido a que constituyen la potencia mecánica que debe disponerse para hacer girar al rotor libre (en vacío) y al ventilador. Dependen de la velocidad del rotor y, teniendo en cuenta que las variaciones de velocidad entre las condiciones de vacío y de plena carga no superan el 2 o 3 % de la velocidad de sincronismo, pueden considerarse constantes.

- Pérdidas adicionales. Existen en los motores de inducción una serie de pérdidas de origen variado que no están incluidas en la clasificación anterior. A estas pérdidas se las agrupa dentro de la categoría de pérdidas adicionales. Una componente de las pérdidas adicionales se presenta con el motor en vacío mientras que otras resultan dependientes de la carga. En [14] se presenta una clasificación de las principales pérdidas adicionales. Principalmente se deben a flujos armónicos producto de la permeancia de dientes y ranuras de estator y rotor, flujos armónicos originados en la geometría de los devanados, corrientes inducidas en distintas piezas del motor (carcasa, ejes, etc.) por acción de flujos de dispersión en las cabezas de bobinas, etc. En [15] asimismo, se presentan las conclusiones de distintos estudios al respecto, los cuales dan cuenta de niveles de pérdidas del orden del 1 al 4 % de la potencia nominal del motor aproximadamente.

TABLA 1: CLASIFICACIÓN PORCENTUAL DE LAS PÉRDIDAS EN MÁQUINAS DE INDUCCIÓN PARA TRES POTENCIAS TOMADAS COMO REFERENCIA.

P [kW]	$P_{cus}$	$P_{cur}$	$P_{ad}$	$P_{he}$	$P_{r+v}$
3	50	20	3	24	3
30	36	22	7	25	10
250	25	23	12	25	15

La distribución del total de pérdidas en motores de inducción trifásicos tiene una fuerte vinculación con la

potencia del motor. Para motores de potencias bajas y medianas prevalecen las pérdidas en el cobre de estator y rotor, mientras que, en la medida en que la potencia nominal aumenta, las pérdidas en el cobre disminuyen porcentualmente respecto del total y aumentan las pérdidas por roce y ventilación y adicionales. En la Tabla 1 puede verse una distribución aproximada para tres potencias tomadas arbitrariamente [9].

El rendimiento de un motor está dado por el cociente entre la potencia de salida y la potencia de entrada. Se calcula de la manera siguiente:

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{sal} + P_{cus} + P_{cur} + P_{fe} + P_{r+v} + P_{ad}} \cdot 100[\%] \quad (5)$$

Donde  $P_{sal}$  es la potencia transmitida en el eje del motor,  $P_{fe}$  es la potencia de pérdidas en el hierro del núcleo magnético,  $P_{r+v}$  es la pérdida por roce y ventilación y  $P_{ad}$  agrupa a todas las pérdidas adicionales. La determinación de la eficiencia de un motor en forma experimental reviste una serie de dificultades. Estas dificultades están dadas por la imposibilidad de controlar las condiciones ambientales durante el ensayo, por las limitaciones en la exactitud de los instrumentos de medición utilizados y por la imposibilidad de medir las pérdidas adicionales en forma directa. Existen distintas normativas que establecen procedimientos sistematizados para tal fin, una de las más utilizadas es la conocida como Standard IEEE 112 B [16].

#### IV. CARACTERÍSTICAS DE DISEÑO DE LOS MOTORES DE ALTA EFICIENCIA

Tal como ha sido indicado anteriormente, las nuevas tendencias en el diseño de máquinas eléctricas privilegian la alta eficiencia en lugar del bajo costo. Los motores actuales funcionan a menor temperatura debido a que las densidades de corriente en sus devanados son menores, de este modo, las resistencias de estator y rotor disminuyen y con ellas las pérdidas. Por otra parte, esta disminución de temperatura asegura un incremento en la vida útil de los devanados.

En [17] se presenta una serie de alternativas de diseño para aumentar la eficiencia de un motor. Una de las posibilidades más inmediatas consiste en aumentar el volumen de cobre. De este modo es posible disminuir la resistencia de los devanados y en la misma proporción las pérdidas por efecto Joule. Esta posibilidad puede darse, inclusive, sin cambiar la geometría de las ranuras. Tal como se desprende del estudio presentado en [17], los motores de eficiencia estándar utilizan factores de relleno de las ranuras muy por debajo de los niveles óptimos. A partir de un estudio efectuado sobre un total de 94 motores de inducción de variadas potencias, velocidades y voltajes, se llegó a la conclusión de que podía incrementarse el factor de relleno de las ranuras (en promedio) en un 21,7 %. Con esta sencilla variante resulta posible mejorar la eficiencia y, debido a la menor densidad de corriente utilizada, disminuir la temperatura de funcionamiento y aumentarla vida útil de la máquina.

Otra posibilidad para reducir el valor de las resistencias de estator consiste en disminuir las longitudes de las cabezas de bobina. Tal como se desprende del estudio presentado en [17], reduciendo un 10 % la longitud de la cabeza de bobina es posible disminuir entre un 2 y un 3 % el total de pérdidas del motor.

También pueden emplearse devanados de paso acortado en lugar de devanados concéntricos. La ventaja en este caso es doble, ya que, por un lado se logra reducir la longitud de bobina y de tal modo la resistencia total del devanado, y por otro, se logra una distribución más sinusoidal del flujo en el entrehierro y por consiguiente una menor pérdida adicional.

En máquinas de media tensión, asimismo, es posible emplear materiales aislantes con mayor capacidad dieléctrica, de modo tal de reducir la sección de aislante, aumentando el área transversal de la ranura que puede ocuparse con cobre.

Otra posibilidad consiste en incrementar el volumen de hierro del motor, de manera tal de reducir los niveles de densidad de flujo en las distintas partes del circuito magnético. Esta posibilidad se encuentra con la limitación impuesta por los tamaños normalizados de carcasas establecidos para cada potencia y velocidad.

Otras alternativas giran en torno a la elección de rodamientos de alto rendimiento, los cuales utilizan grasas con viscosidades adecuadas a las temperaturas de trabajo normales, mejorar la eficiencia del sistema de ventilación (algunos fabricantes ofrecen motores con muy bajas pérdidas por ventilación con motores que sólo pueden funcionar en un único sentido de giro determinado).

En varios trabajos, asimismo, se presentan ejemplos de rebobinados de motores. Tales trabajos demuestran que a partir de las modificaciones de diseño enumeradas en esta sección, se logran mejoras en la eficiencia [18-20].

#### V. CÁLCULO DEL RETORNO DE LA INVERSIÓN

Los motores de categorías IE2 e IE3 presentan mayores costos que los tradicionales de categoría IE1. Esto se debe a que la disminución de las pérdidas se logra a partir del empleo de materiales magnéticos de mejor calidad (y por ende mayor costo), de una depuración muy exhaustiva de los criterios de diseño, del empleo de materiales aislantes de mayor rigidez dieléctrica en máquinas de media tensión, en algunos casos de emplear cobre en lugar de aluminio en la jaula de ardilla, etc. Este mayor costo, que para el caso de motores IE2 supera en aproximadamente un 30 % el costo de un motor IE1, se compensa con la disminución de energía consumida por el motor ante idénticas condiciones de empleo. Los estudios que se presentan a continuación consisten en determinar si los tiempos de recuperación de la inversión adicional justifican el empleo de motores de mejor eficiencia.

Por otro lado es importante destacar que un incremento en los niveles de eficiencia de los motores instalados podría tener un importante impacto sobre el sistema interconectado. En efecto, el menor consumo para iguales prestaciones redundaría en un ahorro energético. A continuación se presenta un cálculo aproximado que permite ponderar este beneficio.

La energía eléctrica demandada durante el 2010 en Argentina fue de 116.000 GW-h. El 47,5 % de esa energía (es decir 55.100 GW-h) fue consumida por el sector industrial [3]. Suponiendo que el 90 % de esta fracción fue empleada en fuerza motriz, es posible afirmar que el consumo de energía eléctrica por parte de todos los motores de inducción instalados en el país sería de 49.600 GW-h. Suponiendo ahora que todos los motores instalados fueran de eficiencia IE1 (suposición que se encuentra justificada a partir de relevamientos informales), y tomando aproximadamente como rendimiento medio de tales motores un 88 % y de los motores clase IE3 un 92 %, podría afirmarse que el ahorro de energía alcanzado al reemplazar el total de los motores actuales por nuevos motores de categoría IE3 sería de aproximadamente 2.000 GW-h, esto es, algo más del 1,7 % del total generado. Dicho en otras palabras, el impacto en el sistema interconectado sería semejante al de instalar una nueva central nuclear de características similares a las que se hallan en funcionamiento en la actualidad. Otro modo de medir este impacto es comparándolo con los aportes que se esperan para los próximos años en incorporación de energías alternativas. A partir de los programas de fomento a la explotación de energías alternativas que implementa el estado, se espera incorporar al sistema unos 120 MW para el año 2012 y otros 750 MW para 2013 de energía eólica, con lo cual, la potencia instalada total en la Argentina se vería beneficiada con un incremento de aproximadamente un 2 % de energía "limpia", porcentaje similar al que quedaría liberado si se mejorara la eficiencia de los motores instalados [21].

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo del ahorro de energía alcanzado a partir del empleo de motores de alta eficiencia en lugar de los de eficiencia estándar. Se toman tres potencias de modo tal de cubrir aplicaciones de distinta índole. En este caso las potencias fueron de 3, 75 y 160 kW. En todos los casos se trata de motores de 4 polos, 50 Hz y 380 V.

En la Tabla II se presenta el ahorro de energía por año, el ahorro monetario en el mismo período y el tiempo de recuperación del gasto adicional que implica instalar un motor IE2 e IE3 en lugar de un motor IE1. Los precios de cada unidad fueron consultados a una de las empresas más reconocidas en el rubro. Aproximadamente los motores de clase IE2 resultan un 30 % más costosos que los IE1, mientras que los clase IE3 resultan un 45 % más costosos. El valor de la energía que se toma para los cálculos es de 20 centavos de dólar por kW-h, valor que coincide aproximadamente con el costo de la energía en el mercado mayorista argentino.

Los valores registrados en la Tabla II consideran que el motor a instalar funciona durante 24 hs. por día, 365 días por año y con un factor de carga igual a 1, es decir, a carga nominal. Para el caso del motor de 75 kW, por ejemplo, se observa que un motor clase IE2 permite un ahorro de 9,8 MW-h por año, esto es equivalente a 1960 U\$S. De este modo, el adicional de 30 % en el costo inicial que implica adquirir un motor de clase IE2 se ve recuperado en aproximadamente 9 meses en función del ahorro energético

alcanzado. En caso de reemplazar por un motor clase IE3 el ahorro de energía por año es mayor y los tiempos de recuperación de la inversión son aproximadamente similares a los del caso anterior, tal como se desprende de la Tabla II.

Cabe aclarar que el cálculo del tiempo de retorno de la inversión se efectuó de manera simple, sin tomar en cuenta la tasa de interés anual, es decir, acumulando el ahorro de energía por año hasta cubrir el valor adicional de la inversión. La ecuación 6 fue utilizada para dichos cálculos [22].

$$TRI = \frac{Ia}{Aa} \quad (6)$$

Donde TRI es el tiempo de retorno de la inversión, en años, Ia es la inversión adicional que corresponde a la adquisición de motores clase IE2 o IE3 y Aa es el ahorro anual en dólares producto del menor consumo.

Esta simplificación en el cálculo de los tiempos de retorno se justifica teniendo en cuenta que, tal como se observa en la tabla II, dichos tiempos resultan breves en comparación con la vida útil de un motor y por ende el error cometido no es considerable.

En la tabla III, por otra parte, se repite el cálculo anterior pero suponiendo que los motores funcionan con un 75 % de la carga nominal. De este modo se pretende representar una situación que se da comúnmente en plantas industriales. Los resultados indican que, si bien menores a los de la tabla II, los tiempos de recuperación de la inversión son breves.

En la tabla IV se presenta un caso alternativo en el que se considera una marcha de 12 horas por día para los motores, durante 300 días por año y con un factor de carga del 75 %. En la tabla V, asimismo, se presenta un caso con factor de carga de 50 %. Si bien todos estos casos son más desfavorables que el presentado en la tabla II, puede apreciarse que los tiempos de recuperación de las inversiones y el ahorro energético justifican plenamente la decisión de instalar motores de eficiencia elevada.

En la tabla VI, por último, se presentan los cálculos correspondientes al caso de reemplazar, en una instalación que se encuentra funcionando, un motor de eficiencia estándar por uno de alta eficiencia. Aún considerando que el motor reemplazado no presenta valor económico residual y es descartado o mantenido como repuesto. En este caso se observa que la opción es también válida, dado que todos los tiempos de recuperación del costo del nuevo motor están muy por debajo de la vida útil que se espera de una unidad, la cual es de aproximadamente 20 a 25 años con funcionamiento pleno e ininterrumpido.

## VI. CONCLUSIONES

Las ventajas económicas obtenidas a partir del empleo de motores de alta eficiencia han quedado en evidencia a partir de los ejemplos de cálculo presentados en la sección anterior. Los tiempos de recuperación de la inversión original resultan dependientes de las condiciones de empleo de los motores y presentan variaciones en función de la potencia del motor y del costo de la energía eléctrica en el país en el que se

instalen. En todos los casos, dichos tiempos resultan tipo de máquina. significativamente menores a la vida útil esperada para este

TABLA II  
TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE INVERSIÓN PARA EMPLEO DE MOTORES IE2 E IE3.  
FUNCIONAMIENTO A PLENA CARGA, 24 HS. POR DÍA, 365 DÍAS POR AÑO.

Pnom kW	IE2			IE3		
	Ahorro de Energía por año	Ahorro de Energía por año	Tiempo de recuperación de la inversión	Ahorro de Energía por año	Ahorro de Energía por año	Tiempo de recuperación del costo
	MW-h	US\$	Años	MW-h	US\$	Años
3	1,51	301,70	0,24	2,28	455,90	0,24
75	9,8	1960,23	0,74	17,16	3431,78	0,64
160	33,28	6655	0,35	47,10	9419	0,37

TABLA III  
TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE INVERSIÓN PARA EMPLEO DE MOTORES IE2 E IE3.  
FUNCIONAMIENTO AL 75 % DE CARGA, 24 HS. POR DÍA, 365 DÍAS POR AÑO.

Pnom kW	IE2			IE3		
	Ahorro de Energía por año	Ahorro de Energía por año	Tiempo de recuperación de la inversión	Ahorro de Energía por año	Ahorro de Energía por año	Tiempo de recuperación del costo
	MW-h	US\$	Años	MW-h	US\$	Años
3	1,13	226,30	0,33	1,71	241,90	0,32
75	7,35	1470,25	1	12,87	2574,87	0,85
160	24,90	4992	0,47	35,32	7064	0,5

TABLA IV  
TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE INVERSIÓN PARA EMPLEO DE MOTORES IE2 E IE3.  
FUNCIONAMIENTO AL 75 % DE CARGA, 12 HS. POR DÍA, 300 DÍAS POR AÑO.

Pnom kW	IE2			IE3		
	Ahorro de Energía por año	Ahorro de Energía por año	Tiempo de recuperación de la inversión	Ahorro de Energía por año	Ahorro de Energía por año	Tiempo de recuperación del costo
	MW-h	US\$	Años	MW-h	US\$	Años
3	0,46	93	0,78	0,70	140,50	0,77
75	3,02	604,21	2,4	5,29	1057,74	2,06
160	10,26	2051,90	1,14	14,52	2903,20	1,21

TABLA V  
TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE INVERSIÓN PARA EMPLEO DE MOTORES IE2 E IE3.  
FUNCIONAMIENTO AL 50 % DE CARGA, 8 HS. POR DÍA, 300 DÍAS POR AÑO.

Pnom kW	IE2			IE3		
	Ahorro de Energía por año	Ahorro de Energía por año	Tiempo de recuperación de la inversión	Ahorro de Energía por año	Ahorro de Energía por año	Tiempo de recuperación del costo
	MW-h	US\$	Años	MW-h	US\$	Años
3	0,21	41,33	1,76	0,31	62,45	1,74
75	1,34	268,54	5,42	2,35	470,10	4,64
160	4,56	911,75	2,57	6,45	1290,90	2,72

TABLA VI  
TIEMPO DE RECUPERACIÓN DE INVERSIÓN DE REEMPLAZO DE MOTORES IE1 POR IE2 E IE3 (CONSIDERANDO COSTO REMANENTE NULO PARA LA UNIDAD REEMPLAZADA). FUNCIONAMIENTO AL 75 % DE CARGA, 12 HS. POR DÍA, 300 DÍAS POR AÑO.

Pnom kW	IE2			IE3		
	Ahorro de Energía por año	Ahorro de Energía por año	Tiempo de recuperación de la inversión	Ahorro de Energía por año	Ahorro de Energía por año	Tiempo de recuperación del costo
	MW-h	US\$	Años	MW-h	US\$	Años
3	0,46	93,33	3,4	0,7	140	2,5
75	3	604	10,4	5,29	1057,75	6,65
160	10,2	2051,5	4,94	14,5	2903,2	3,89

No debe dejarse de lado el beneficio que la instalación de los nuevos motores de alta eficiencia tiene sobre el sistema interconectado. En efecto, un avance paulatino hacia el empleo de estas nuevas líneas de motores permitiría atenuar el incremento de energía eléctrica asociado al crecimiento industrial.

En el caso particular de Argentina, resulta apremiante la necesidad de aplicar restricciones al empleo de motores de rendimientos bajos, tal como se ha realizado ya en Europa, Estados Unidos y varios países de Latinoamérica.

Algunos autores proponen, como una instancia intermedia, emplear el rebobinado de los motores para introducir mejoras de diseño que tiendan hacia mejores eficiencias.

No puede dejarse de resaltar que además de proporcionar beneficios económicos, el empleo de motores de alto rendimiento incrementa la vida útil de las unidades, esto se debe a que dichos motores presentan temperaturas de trabajo menores a las de los motores convencionales.

#### REFERENCIAS

- [1] R. Saidur, "A Review on Electrical Motors Energy Use and Energy Savings", Elsevier. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 877-898, 2010.
- [2] H. Li and R. Curiaç, "Motor efficiency, efficiency tolerances and the factors that influence them", in Proc. Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC), 2010 Record of Conference Papers Industry Applications Society 57th Annual, pp. 1-6, 2010.
- [3] CAMMESA, "Informe anual 2010, Datos relevantes del Mercado Eléctrico Mayorista", CAMMESA 2011, pp. 1-48, www.cammesa.gov.ar; 2011.
- [4] A. Zabardast y H. Mokhtari, "Effect of high-efficient electric motors on efficiency improvement and electric energy saving". Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies. DRPT 2008, pp 533-538, 2008.
- [5] M. Melfi, S. Evon and R. Mcelveen; "Induction versus permanent magnet motor"; IEEE Industry Applications Magazine. Nov/Dec 2009, pp. 28-35, 2009.
- [6] Official Journal of the European Union; "Commission Regulation (EC) No. 640/2009; [http://www.eupnetwork.de/fileadmin/user\\_upload/Produktgruppen/Lots/IM/Adopted\\_IM/SSTB/Regulation\\_sstb\\_090204.pdf](http://www.eupnetwork.de/fileadmin/user_upload/Produktgruppen/Lots/IM/Adopted_IM/SSTB/Regulation_sstb_090204.pdf)
- [7] National Electrical Manufacturers Association; NEMA Standards Publication MG 1-2003 Motors and Generators, 2003.
- [8] European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics (CEMPED); <http://www.cemep.org/>
- [9] J. Fuchsloch, W. Finley and R. Walter, "The Next Generation Motor", IEEE Industry Applications Magazine. Jan/Feb 2008, pp. 37-43, 2008.
- [10] Z. Xiaochen, C. Shukang and L. Weili, "Development of line-start PMSM with solid rotor for electric vehicles"; Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC '08. IEEE, pp: 1-5, 2008.
- [11] R. Ugale, A. Bhanuji, and A. Chaudhari, "Novel line start permanent magnet synchronous motor using two-part rotor"; Conference TENCON 2009, IEEE Region 10, pp: 1-5, 2009.
- [12] F. Kalluf, C. Pompermaier, M. da Luz, and N. Sadowski; "Magnet flux optimization method for Line-Start Permanent Magnet motors"; Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International pp. 953-957, 2009.
- [13] IRAM. Etiquetado de eficiencia energética para motores de inducción trifásicos. IRAM de Emergencia 62405:2010.
- [14] K. Schwarz. "Survey of Basic Stray Losses in Squirrel-cage Induction Motors". Proceedings of The Institution of Electrical Engineers, Nro. 11, pp. 1565-1574, 1964.
- [15] C. Glew. "Stray Load Losses in Induction Motors: a Challenge to Academia". Power Engineering Journal, Nro. Febrero 1998, pp 27-32, 1998.
- [16] E. Agamloh ; "The repeatability of IEEE standard 112B induction motor efficiency tests"; Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International; pp. 1119 – 1126; 2009.
- [17] C. Yung, "Tips for Improving Motor Efficiency, IEEE Industry App. Magazine. Nov./Dec. 2007, 12-20, 2007.
- [18] C. Yung, "Opportunities to Improve Reliability and Efficiency of Existing Medium-Voltage Electric Motors", Petroleum and Chemical Industry Conference, 2005. Industry Applications Society 52nd Annual, 199 – 208, 2005.
- [19] W. Cao and K. Bradley, "Assessing the Impacts of Rewind and Repeated Rewinds on Induction Motors: is an Opportunity for Re-designing the Machine Being Wasted?"; IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 42, no. 4, pp 958 - 964 , 2006.
- [20] A. Bonnett and B. Gibbon. "The Results are in: Motor Repair's Impact on Efficiency". Electrical Apparatus Service Association. [http://eemsc.com/Documents/Motor Repair Efficiency Results.pdf](http://eemsc.com/Documents/Motor%20Repair%20Efficiency%20Results.pdf)
- [21] R. Molina; "Proyectos de Parques Eólicos en el SADI"; Seminario sobre Desafíos técnicos para la conexión de generación eólica al SADI y a microrredes eléctricas; CIGRE; Buenos Aires, 18 y 19 de Agosto de 2011.
- [22] J. Hickiewicz; K. Macek-Kaminska; M. Kaminski and A. Gardecki; "The application of high-efficiency motors for fan mill drives"; Conference on Electrical Machines (ICEM), 2010 XIX International 2010; pp. 1-5; 2010.



**Carlos Verucchi** obtuvo el título de Ing. Electromecánico en 1994 en la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires y de Magister en Ciencias de la Ingeniería en la Universidad de Concepción, Chile, en 2000. Actualmente se desempeña como docente e investigador en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires y en el grupo de investigación en INTELyMEC (Investigación aplicada en electricidad y mecatrónica).



**Cristian R. Ruschetti** (S'11 - M'13) recibió el título de Ing. Electromecánico (2006) de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires (UNCPBA) y el de Doctor en Ciencias de la Ingeniería (2012) de la Universidad Nacional de Río Cuarto (UNRC), Argentina. Actualmente se desempeña como Becario Postdoctoral del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Es miembro del Grupo INTELyMEC, de la UNCPBA y del Grupo de Electrónica Aplicada, de la UNRC. Sus temas de interés técnico son: el diseño de máquinas eléctricas y el análisis de dispositivos electromagnéticos utilizando el método de los Elementos Finitos.



**Gustavo Kazlauskas** (S'97, A'98, M'03) nació en Salliqueló, Pcia. de Buenos Aires, Argentina el 13 de Diciembre de 1962. Se graduó en la Universidad Nacional del Centro de la Pcia. de Buenos Aires como Ingeniero Electromecánico y en la Universidad de Concepción, Chile, de Magister en Ciencias de la Ing.

con mención en Ing. Eléctrica en 1992 y 1998 respectivamente. Sus áreas de interés son optimización de las instalaciones eléctricas, calidad de servicio y formas de compensación en sistemas industriales y urbanos de energía. Actualmente se desempeña como docente e investigador en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires y en el grupo de investigación en INTELyMEC (Investigación aplicada en electricidad y mecatrónica).