

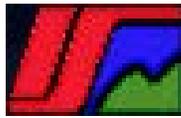
*Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa*  
*Dr. Antonio Núñez Jiménez*  
*Facultad Metalurgia-Electromecánica*

*Tesis presentada en opción al título de Master en*  
*Ciencias Técnicas*

*Evaluación de la eficiencia del motor de*  
*inducción a través de correcciones en el método*  
*del momento en el entrehierro*

*Bárbara M. Pérez Mena*

*Moa 2014*



*Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa*

*Dr. Antonio Núñez Jiménez*

*Facultad Metalurgia-Electromecánica*

*Tesis presentada en opción al título de Master en  
Ciencias Técnicas*

*Evaluación de la eficiencia del motor de  
inducción a través de correcciones en el método  
del momento en el entrehierro*

*Autor: Ing. Bárbara Magdalena Pérez Mena*

*Tutor: Dr. C. Ignacio Romero Rueda*

*Moa 2014*

# *Agradecimientos*

## *Agradecimientos*

*A Dios por permitirme llegar hasta aquí, a mi tutor y amigo Ignacio Romero Rueda por su dedicación e incondicionalidad.*

*Agradezco a mis compañeros del Departamento de Ingeniería Eléctrica del ISMM por permitirme disponer del tiempo necesario.*

*Por último a quienes colaboraron con el desarrollo de este trabajo y parecen estar ausentes.*

# *Dedicatoria*

# *Dedicatoria*

*A mi familia y en especial a mi mamá*

# *Resumen*

## **RESUMEN**

Los motores de inducción constituyen más del 70 % de la carga industrial y en más del 95 % de las ocasiones se exponen a un suministro eléctrico contaminado. Este trabajo determina la eficiencia del motor de inducción por el método del momento en el entrehierro con especificación de armónicos y desbalance en la fuente eléctrica, lo cual constituye una corrección del método que aparece en la literatura.

Se sustituye un motor de inducción por un conjunto de motores de diferentes frecuencias y secuencias, conectados a un eje común; se descomponen las ondas de tensiones y corrientes en armónicos y en sistemas trifásicos de secuencias, que posibilitan utilizar las ecuaciones analíticas para calcular el flujo en la expresión del método del momento en el entrehierro y prescindir de la integración numérica, necesaria en el método clásico.

Resultó un error promedio de 0,47 % en la eficiencia estimada por la vía propuesta, con respecto al valor obtenido experimentalmente, contra 0,85 % resultado de aplicar el método en su forma clásica; también se demostró mayor precisión en los resultados frente a diferentes niveles de desbalance y de armónicos en el suministro eléctrico, al mantenerse constante la potencia de salida para los valores de contaminación experimentados.

Se concluye que la variante del método del momento en el entrehierro con las correcciones por descomposición armónica de Fourier y transformaciones de Fortescue para el desbalance es efectiva en la determinación de la eficiencia de motores de inducción con un suministro eléctrico contaminado por armónicos y desbalance.

## **ABSTRACT**

The induction motors constitute more than 70 % of the industrial load and in more than 95 % of the occasions they are exposed to a polluted electric supply. This work determines the efficiency of the induction motor for the air gap torque method with specification of harmonic and unbalance at the source electric, that which makes a correction of the method that appears in literature.

An induction motor is substituted by a group of motors of different frequencies and sequences, connected to a common axis; they break down the waves of tensions and currents in harmonic and in three-phase systems of sequences that facilitate to use the analytic equations to calculate the magnetic flow in the expression of air gap torque method and to do without of the numeric integration, necessary in the classic method.

It was an error average of 0,47 % in the estimated efficiency for the method proposed, with regard to the obtained value experimentally, against 0,85 % result of applying the method in their classic form; bigger precision was also demonstrated in the results in front of different unbalance levels and of harmonic in the electric supply, when staying constant the exit power for the experienced securities of contamination.

Concludes that the variant of the air gap torque method with the corrections for harmonic decomposition of Fourier and transformations of Fortescue for the unbalance is effective in the determination of the efficiency of induction motors with an electric supply contaminated for harmonic and unbalance.

# *Tabla de contenido*

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	5
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL SOBRE LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN EL MOTOR DE INDUCCIÓN .....	11
Introducción .....	11
1.1. Métodos para estimar la eficiencia en motores de inducción .....	11
1.2. Evaluación energética de motores de inducción por el método del momento en el entrehierro .....	17
1.3. Modelo matemático del método del momento en el entrehierro.....	18
1.4. Conclusiones parciales .....	23
CAPÍTULO 2. CORRECCIÓN DEL MÉTODO DEL MOMENTO EN EL ENTREHIERRO CON ESPECIFICACIÓN DE ARMÓNICOS Y DESBALANCE .....	25
Introducción .....	25
2.1. Consideración de armónicos y el desbalance en los motores de inducción.....	25
2.2. Algoritmo para la evaluación energética del motor de inducción con las correcciones en el método del momento en el entrehierro .....	28
2.3. Conclusiones parciales.....	37
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES. CASOS DE ESTUDIO .....	39
Introducción .....	39
3.1. Consideraciones para la implementación del método del momento en el entrehierro en presencia de desbalance y armónicos .....	39
3.2. Comparación del método propuesto con respecto a los resultados experimentales .....	43

3.3. Respuestas del método del momento en el entrehierro en su versión clásica y corregida frente a los armónicos y el desbalance.....	46
3.4. Evaluación energética del Motor de Inducción .....	51
3.4.1. Resultados para el motor de inducción MI-ECG.....	52
3.4.2. Motor bomba del ISMM .....	57
3.5. Conclusiones parciales.....	61
CONCLUSIONES GENERALES.....	63
RECOMENDACIONES.....	64
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	66
ANEXOS .....	76

# *Introducción*

## INTRODUCCIÓN

De acuerdo con estudios realizados se ha podido comprobar que entre el 40 y el 60 % del consumo total de energía eléctrica a nivel mundial corresponde a los motores trifásicos de inducción. Según el Departamento de Energía de E.U. (DOE) en ese país constituyen el 70 % de la energía total consumida por las industrias (Department of Energy, 1998; Bin *et al.*, 2006c); y según de Almeida y Fonseca (2000) estos motores representan el 75 % para la Unión Europea.

En Cuba, según la Unión Nacional Eléctrica (UNE) el consumo de electricidad facturado ascendió a 12,8 TWh en el año 2010, donde el sector estatal fue responsable del 46,8 %; y dentro de este, la industria demandó el 86,4 %, en la cual los motores de inducción constituyen las causas principales de la energía total consumida (Oficina Nacional de Estadística, 2011).

Idealmente la fuente de potencia para un motor de inducción debe ser balanceada y sin armónicos. La realidad es, que en más del 95 % la misma está contaminada con armónicos de órdenes superiores y desbalance de tensión, aunque en ocasiones por debajo de lo establecido por las normas (Eguiluz *et al.*, 1999a; Romero *et al.*, 2012). La distorsión de la onda de tensión puede ser por la propia fuente o por las cargas de la planta en análisis, donde muchas de ellas pueden ser no balanceadas; en ocasiones las fuentes electrónicas no disponen de filtros para prevenir la contaminación de la tensión.

El *Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos* por su sigla en inglés (IEEE) en la norma IEEE-519 (IEEE Std. 519, 1993) ofrecen las recomendaciones prácticas y los requerimientos para el control de los armónicos en el sistema eléctrico de potencia. La *Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos* por su sigla en inglés (NEMA) (NEMA, 2004a) especifica los límites de variación para la tensión y frecuencia nominal; esto es  $\pm 10\%$  de la tensión nominal a frecuencia nominal y  $\pm 5\%$  de la frecuencia nominal con tensión nominal. El desbalance de tensión en los terminales del motor está limitado al 5 %. La IEEE-112 (IEEE Standard 112., 2004), estándar para el ensayo de motores de inducción especifica un límite gráfico. Sin embargo aun cuando el desbalance y el contenido de armónicos están dentro de los límites que establecen las normas influyen en la eficiencia del motor.

Los métodos que establecen las normas para la determinación de la eficiencia en motores de inducción no son aplicables en condiciones de campo (Ghai, 1999; IEEE Standard 112., 2004; Cao, 2009). En aras de dar solución a esta problemática se han desarrollado diferentes métodos

aplicables bajo condiciones industriales y con un nivel de precisión generalmente proporcional al grado de invasividad requerido (Van Roy & Belmans, 2002; Vilaragut *et al.*, 2004; Steele *et al.*, 2005; Bin *et al.*, 2006b; Gómez, 2006; Gharakhani, 2012). Los métodos de aplicación directa en el campo, presentan limitaciones cuando se está en presencia de armónicos y desbalance en la fuente de alimentación, ya que no contemplan las especificaciones de los métodos específicos de análisis de ambos aspectos.

Los mejores candidatos en la determinación de la eficiencia de los motores de inducción trifásicos, en condiciones de desbalance y en presencia de armónicos, resultan: el método del circuito equivalente, con el inconveniente de los parámetros que lo caracteriza para cada armónico, y para cada secuencia; y el método del momento en el entrehierro, conocida por sus siglas en inglés AGT, que utiliza las formas de ondas, constituyendo junto a la necesidad de la resolución de ecuaciones integrales sus principales inconvenientes.

En la era de la información digital, la adquisición de datos y el procesamiento es una técnica que ha devenido accesible para muchas personas, en ocasiones se puede adicionar una tarjeta de datos en el interior de la PC; existen otros dispositivos más sofisticados, tales como osciloscopios digitales y analizadores de redes, a través de los cuales se pueden obtener las formas de ondas de las tensiones y corrientes en los terminales del motor de inducción. Estas posibilidades ofrecen ventajas al método del momento en el entrehierro cuando se compara con el método del circuito equivalente, sin embargo son necesarias transformaciones adicionales.

El análisis por Fortescue y la descomposición de Fourier, especifican el trabajo con el desbalance y los armónicos en la fuente del suministro eléctrico, respectivamente. La presente investigación combina la utilización de ambas técnicas con la aplicación del método del momento en el entrehierro para obtener la eficiencia del motor de inducción.

Por lo anterior la determinación de la eficiencia de motores trifásicos de inducción en las industrias donde se consideren los armónicos y el desbalance, y la propuesta de mejora del desempeño energético de estos, constituyen aspectos de gran importancia en la actualidad. Por ello este trabajo propone descomponer las tensiones y corrientes en armónicos y en sistemas trifásicos de secuencias balanceadas para ser utilizadas por el método del momento en el entrehierro con esta finalidad, dando lugar a una corrección del método del entrehierro.

Sobre la base de esta realidad industrial se establece los elementos esenciales de la metodología de la investigación: el problema, la hipótesis y los objetivos.

*Problema de investigación:*

Limitaciones del método del momento en el entrehierro, en su concepción clásica, para evaluar con precisión la eficiencia del motor de inducción cuando el mismo se alimenta desde una fuente eléctrica contaminada por armónicos y desbalances.

*Hipótesis del trabajo:*

Si se utiliza la descomposición en serie de Fourier y el método de Fortescue en las tensiones y corrientes, cuando se aplica el método del momento en el entrehierro en presencia de armónicos y desbalance, es posible obtener un valor de eficiencia más preciso, que el resultante de la aplicación del método en su concepción clásica.

*Objeto de estudio:*

Motores trifásicos de inducción de rotor en cortocircuito.

*Campo de acción:*

Evaluación energética de motores trifásicos de inducción.

*Objetivo general:*

Determinar la eficiencia del motor de inducción a través de las correcciones del método del momento en el entrehierro con especificación de armónicos y desbalance en la fuente de suministro eléctrico.

*Objetivos específicos:*

1. Establecer sobre las bases de las limitaciones de los métodos de evaluación de la eficiencia de motores de inducción en presencia de armónicos y desbalance, el fundamento del método del momento en el entrehierro para esta finalidad.

2. Desarrollar el modelo matemático del método del momento en el entrehierro con las correcciones de armónicos y desbalance en la fuente de suministro eléctrico y el algoritmo para su implementación.
3. Aplicar el método del momento en el entrehierro con las correcciones propuestas y demostrar su efectividad en la evaluación energética.

*Aporte del trabajo:*

- Corrección en la aplicación del método del momento en el entrehierro para evaluar la eficiencia del motor, a través de la descomposición en armónico por Fourier y la presencia del desbalance por Fortescue, y la implementación de un algoritmo de cálculo computacional integral.

*Tareas de investigación a partir del diseño metodológico planteado:*

- Realizar un análisis del estado del arte del tema de método de la determinación de eficiencia en motores de inducción.
- Establecer el modelo matemático del momento en el entrehierro en presencia en redes contaminadas por armónicos y asimetría.
- Realizar el montaje experimental de motores en presencia de una red contaminada, demostrando la efectividad del método del momento en el entrehierro.
- Determinar la eficiencia en diferentes casos de estudio aplicando el método del AGT.
- Realizar la simulación del trabajo del nuevo motor seleccionado.
- Realizar la evaluación energética de la sustitución a través del análisis del ciclo de vida.

*Métodos de investigación*

Para llevar a cabo con éxito esta investigación se utilizaron diferentes métodos de investigación, del nivel teórico:

- Método Inductivo-Deductivo, para realizar el examen y evaluación de los trabajos científicos, objetos de estudio, hasta definir la base teórica del problema de la determinación de la

eficiencia en motores trifásicos de inducción y mediante un proceso de síntesis, emitir una opinión profesional.

- Histórico-Lógico, para desarrollar el análisis de las investigaciones anteriores y antecedentes que permitan continuar el estudio y la necesidad del mismo.
- Análisis-Síntesis, para lograr en forma resumida establecer las correcciones al método del momento en el entrehierro.

*Capítulo 1*  
*Marco teórico conceptual*  
*sobre la evaluación de la*  
*eficiencia en el motor de*  
*inducción*

# **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL SOBRE LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN EL MOTOR DE INDUCCIÓN**

## **Introducción**

Los motores trifásicos de inducción son ampliamente utilizados en aplicaciones de todo tipo. En general estas máquinas accionan bombas, ventiladores o compresores y en conjunto constituyen un consumidor importante de energía eléctrica con el cual se asocia aproximadamente el uso del 60 % de la energía eléctrica generada a nivel mundial.

Numerosas investigaciones sugieren procedimientos para la determinación de la eficiencia, la potencia desarrollada y el estado de carga (Hsu & Scoggins, 1995; Hsu & Sorenson, 1996; Hsu *et al.*, 1998; Bin *et al.*, 2006a; Bin *et al.*, 2006b; Ferreira & de Almeida, 2008; Gómez *et al.*, 2008; Herndler *et al.*, 2011b; Siraki & Pillay, 2012). Cada uno de ellos con sus ventajas y limitaciones, persiguen el objetivo de incrementar la eficiencia, optimizar el uso final de la energía eléctrica, reducir los costos y el impacto ambiental de este tipo de máquina universalmente empleada.

Bajo estas circunstancias es importante conducir la evaluación energética de motores con una precisión adecuada, sin la necesidad de conocer los parámetros de sus circuitos equivalentes, algo en ocasiones difícil industrialmente, y determinar las potencialidades de ahorro de energía.

Como se conoce, la eficiencia de los motores varía con el diseño, la velocidad, la potencia, el coeficiente de carga y una complicación adicional es su dependencia de la calidad de la energía del sistema, por tanto, son varios los factores que actúan sobre estas máquinas.

### **1.1.Métodos para estimar la eficiencia en motores de inducción**

Es posible clasificar en dos grandes grupos los métodos empleados en determinar la eficiencia del motor de inducción: métodos normalizados y métodos diseñados para condiciones de campo.

#### ***Métodos normalizados en la evaluación de la eficiencia***

Los valores de la eficiencia se deben determinar de acuerdo con las normas internacionales vigentes (Cummings *et al.*, 1981; Bonnett, 1994; Hsu *et al.*, 1995). Estas normas establecen consideraciones para las pérdidas, tipos de mediciones e instrumentos requeridos, valores de corrección de temperatura para las resistencias, etc. De estas normas, las principales que han sido

objeto de muchos análisis comparativos son: la americana **IEEE-112-2004**, la europea **IEC 34-2-1** y la japonesa **JEC 37** (Gray & Martiny, 1996; Nilsson, 1996; Ghai, 1999; Renier, 1999; de Almeida & Ferreira, 2000; de Almeida & col., 2002; Cao, 2009).

La norma **IEC 60034-2-1** editada en el año 2007 presenta diferencia con la **IEEE-112-2004**, principalmente en la forma de determinar las pérdidas adicionales (IEC 60034-2-1, 2007; Martinez & Torrent, 2009). La norma **JEC-37** empleada en Japón y otros países asiáticos se caracteriza por desprestigiar totalmente las pérdidas adicionales. Según de Almeida (de Almeida & Ferreira, 2000) los valores de eficiencia que se determinan bajo esta norma, son superiores a los obtenidos por las normas **IEEE-112-2004** y la **IEC-34-2-1**.

La norma **IEEE-112-2004** es la de mayor exigencia y en ella se establecen cinco métodos denominados **A, B, C, E** y **F** con las variantes **E1, F1, C/F, E/F** y **E1/F1** (IEEE Standard 112., 2004). Con esta norma armonizan algunas normas nacionales como la **NEMA, MG1** y la **CS-390** aplicadas en EEUU y Canadá, respectivamente (NEMA, 2004a). En el caso de las variantes **E1** y **F1**, las pérdidas adicionales son asumidas como un porcentaje de la potencia de salida nominal.

*Las normas existentes en la determinación de la eficiencia de los motores son más bien para los fabricantes o para casos muy especiales. Estos métodos no son aplicables en la industria ya que las condiciones exigidas por las normas no existen en el campo directo de la aplicación.*

Lo anterior implica el desarrollo de muchos métodos para la evaluación de la eficiencia en condiciones de campo y la continuidad de la investigación en este sentido (Douglas, 1997; de la Rosa, 1998; Hsu *et al.*, 1998; Motor Challenge, 1999; Costa M & Vilaragut, 2004; Holmquist *et al.*, 2004; Vilaragut *et al.*, 2004; Bin *et al.*, 2006b; Gharakhani, 2012).

### ***Métodos de evaluación de la eficiencia en condiciones de campo***

Los métodos básicos más utilizados en la evaluación de la eficiencia de los motores trifásicos de inducción, en condiciones de campo son: a) método de la potencia de entrada b) método de los datos de chapa, c) método del deslizamiento, d) método de la corriente, e) método del circuito equivalente, f) método de segregación de pérdidas, g) métodos estadísticos, h) método del momento en el entrehierro, i) método del momento en el eje o método directo (Becnel & al., 1987; Hsu *et al.*, 1998; Steele *et al.*, 2005; Ferreira & de Almeida, 2008). En la evaluación de la eficiencia con frecuencia se utiliza la combinación de algunos de ellos.

Las mediciones y adquisición de los datos necesarios requieren de instrumentos con errores individuales menores del 0,5 % a plena escala, incluyendo los efectos de la amplitud y fase según la norma **IEEE-112-2004**. Este requisito lo cumplen diferentes tipos de analizadores de redes existentes en el mercado. En particular, la medición de la velocidad debe realizarse con tacómetros ópticos y el deslizamiento debe medirse con instrumentos estroboscópicos.

Los métodos más simples: datos de chapa, deslizamiento, corriente y potencia de entrada son fáciles de aplicar pero pueden conducir a errores apreciables si se considera que la eficiencia de chapa, además de ser el resultado del tratamiento estadístico de un lote de motores, no se mantiene constante en todo el rango de operación; que el deslizamiento correspondiente a los valores nominales puede presentar un 20 % de desviación según los fabricantes (Rubin *et al.*, 1992) y que tanto la corriente como la potencia de entrada poseen un comportamiento no lineal versus la potencia en el eje del motor.

El método del circuito equivalente (basado en el método **F** de la norma **IEEE-112-2004**) necesita de los parámetros del circuito que modela el comportamiento en régimen estacionario del motor de inducción, lo cual constituye su principal inconveniente en un ambiente industrial. Este método permite determinar las pérdidas, las características operacionales y la eficiencia del motor asíncrono trifásico, y tiene como ventaja la posibilidad de predecir el comportamiento para cualquier estado de carga (Boglietti *et al.*, 1993; Kueck *et al.*, 1996; de Almeida *et al.*, 2000; Cathey, 2003; NEMA, 2004a; Costa M & otros., 2005).

El método del momento en el entrehierro (MME) requiere de los valores instantáneos de dos tensiones de líneas y dos corrientes de fase para determinar el momento y la potencia de salida en el eje; a diferencia de otros métodos considera las condiciones de calidad del suministro eléctrico (Hsu & Scoggins, 1995; Hsu & Sorenson, 1996; Kueck *et al.*, 1996; Hsu *et al.*, 1998; Van Roy & Belmans, 2002; Figura *et al.*, 2011; Herndler *et al.*, 2011a; Zhang *et al.*, 2011). Sus ventajas son: a) supera al método **EI** de la **IEEE-112-2004** cuando la tensión de alimentación está desbalanceada y contiene armónicos; b) puede aplicarse mientras el motor está en servicio; sus principales desventajas están dadas por las exigencias de ganar en precisión: a) requiere del ensayo en vacío, y b) requiere de sensores especializados.

En la literatura se reportan varios métodos, los cuales requieren de programas de computación o instrumentos especiales para su aplicación en las industrias (Douglas, 1997; Wallance *et al.*,

2001; de Almeida & col., 2002; Cao, 2009). Gómez (Gómez, 2006) resume eficazmente estas técnicas y métodos computarizados de estimación de la eficiencia en motores de inducción.

*Los métodos anteriores representan herramientas valiosas para los especialistas que llevan a cabo programas de ahorro de energía en las industrias o participan en la toma de decisiones, donde es necesario estimar la eficiencia operacional de los motores en servicio, sin embargo, están destinados a la evaluación de la eficiencia en condiciones normales, sin precisar las condiciones de desbalance y armónicos.*

### ***Aplicaciones de los métodos de evaluación de la eficiencia en condiciones de campo***

La clave en la evaluación de la energía usada por las máquinas eléctricas es poder estimar la eficiencia por un método de bajo nivel de intrusión. De los métodos de determinación de la eficiencia en condiciones de campo se proponen como mejores candidatos, claramente definidos, los métodos ORMEL96, OHME y el del momento en el entrehierro (Bin *et al.*, 2006d). De acuerdo con lo reportado los errores de estos métodos son del 4, 2 a 3 y 0.5 % respectivamente. Los tres arrojan resultados más precisos cuando el estado de carga del motor supera el 50 %.

(Pérez & Rodríguez, 2005; Pérez *et al.*, 2007), sintetizan un procedimiento que determina, con mínimos recursos de medición, los parámetros de operación de un motor de inducción bajo carga arbitraria a partir de los datos nominales y sin necesidad de realizarle pruebas.

de la Rosa *et al.* (2007), analizan la influencia de la incertidumbre de las mediciones y de la especificación de la eficiencia de un motor en la evaluación del potencial de ahorro de energía por la sustitución de motores eléctricos. Se establece que la simple acción de sustituir un motor de baja eficiencia por uno aparentemente más eficiente no garantiza un ahorro real de energía y, por tanto, debe hacerse un análisis de la probabilidad de la dispersión de la eficiencia para la toma de decisión.

De forma general, algunos trabajos abordan la temática energética de motores de inducción desde el punto de vista de obtener un método que determine la eficiencia con precisión y con el menor número de variables (Pérez & Rodríguez, 2005; de la Rosa *et al.*, 2007; Pérez *et al.*, 2007). Otras investigaciones se enfocan en obtener métodos no invasivos en la determinación de la eficiencia en motores de inducción (Cummings *et al.*, 1981; Becnel & al., 1987; Douglas, 1997; de Almeida

& Ferreira, 2000; Costa M & Vilaragut, 2004; Bin *et al.*, 2006a; Bin *et al.*, 2007; Sakthivel & Subramanian, 2010; Zhang *et al.*, 2010; Gharakhani & Pillay, 2011).

Uno de los trabajos de mayor repercusión a nivel mundial lo constituye el programa computacional “Software Internacional para Selección de Motores y Análisis de Ahorros” (IMSSA) (Washington State University (WSU), 2004), herramienta diseñada para apoyar a consultores en el área energética, distribuidores de motores, y usuarios industriales en la planeación y manejo de la energía, como también en las acciones encaminadas a mejorar la eficiencia del parque de motores.

El IMSSA muestra los parámetros de operación y las especificaciones de los motores **NEMA** e **IEC**. Esta versión de IMSSA contiene una base de datos superior a los 25000 motores (recopilada para el programa **MotorMaster+ 4.0** del **U.S. Department of Energy**) y una base de datos de más de 5000 motores IEC (recopilada para el uso del programa **Eurodeem 2000**). La plataforma del software es capaz de aceptar y usar datos de diferentes fabricantes que contienen valores de eficiencia a plena carga y a fracciones de ésta, tomados de acuerdo con lo especificado en los protocolos de prueba **NEMA IEEE 112** o **IEC 60034-2**.

Los valores por defecto de la eficiencia en motores de 1 a 200 hp se refieren a la norma NEMA MG-1, y *se asume que los mismos representan el funcionamiento de los motores “en el campo”* (NEMA, 2004a). *El software solo contempla el remplazo de motores viejos por otro de mayor eficiencia, sin tener en cuenta las condiciones reales de funcionamiento del motor. Cuando se quiere un análisis más cercano a la realidad se recomiendan la determinación del coeficiente de carga y factores influyentes en la eficiencia por mediciones directas en el campo.*

*Todos concluyen con las ventajas de los métodos propuestos, sin embargo, ninguno consideran la presencia de armónicos y desbalance.*

Gómez (2006), demuestra la efectividad de un procedimiento que determina la eficiencia y otros parámetros operacionales de los motores asincrónicos, en condiciones de campo, mediante la aplicación de algoritmos genéticos (AG) en presencia de desbalances de tensión, *en un ambiente no contaminado con armónicos superiores*. Constituye una herramienta para el análisis técnico y económico de proyectos de mejoramiento de la eficiencia energética y de desarrollo de programas de motores de alta eficiencia en la industria y los servicios en Cuba.

Gharakhani (2012), sintetiza y amplía con gran precisión las particularidades de los diferentes métodos de evaluación de la eficiencia en el campo, incluyendo aquellos que utilizan algoritmos

evolutivos, bajo condiciones de tensión diferente a la nominal, desbalance y armónicos, aunque nunca se consideran al unísono.

En el trabajo (Sousa *et al.*, 2013) se presenta un procedimiento basado en los circuitos equivalentes, con segregación de pérdidas y empleando un Algoritmo de Forraje Bacterial (AFB), que permite determinar en condiciones de campo y con baja invasividad, la eficiencia energética de motores asincrónicos trabajando en condiciones de armónicos, desviaciones y desbalance de tensión. El método se probó satisfactoriamente en un motor de 1,5 kW alimentado con niveles significativos de desbalance y armónicos de tensión.

Se puede apreciar en las últimas investigaciones referidas, la inclusión de las condiciones de armónicos, desviaciones y desbalance de tensión para determinar la eficiencia del motor de inducción, esto habla por sí solo de la importancia que se le atribuye a tales efectos, no solo porque constituyen aspectos que afectan el tiempo de vida útil del motor, sino también porque constituyen pérdidas que disminuyen la eficiencia y, sin embargo los métodos en sus formas originales no lo contemplan.

*Dos de las principales dificultades que presentan los métodos de evaluación de la eficiencia en el campo, están en determinar la velocidad del rotor y el valor de la resistencia del estator.*

Una de las vías utilizadas en solucionar estos problemas es utilizar tacómetros ópticos para determinar la velocidad y medir la resistencia del motor cuando el mismo no esté en servicio; si no es posible, existen otros procedimientos que estiman la velocidad según el contenido de armónico de la corriente del estator con precisión de hasta cinco revoluciones por minutos a altas velocidades y 0,005 p.u. de deslizamiento a bajas velocidades (Hurst & Habetler, 1996; Henao *et al.*, 2005; Bensalem *et al.*, 2008).

Sobre la base de los métodos existentes para determinar la eficiencia en condiciones de campo se presentan diferentes investigaciones en forma de procedimientos que intentan reducir la extensión en tiempo y esfuerzo en la evaluación energética de motores de inducción a nivel industrial.

Los trabajos más recientes en el campo de la evaluación energética de motores de inducción, hacen énfasis en la búsqueda de métodos poco invasivos en la estimación de la eficiencia.

## **1.2. Evaluación energética de motores de inducción por el método del momento en el entrehierro**

A partir de las ventajas del método del momento en el entrehierro se han desarrollado modificaciones que resuelven algunas de sus desventajas con aproximaciones, las cuales afectan la exactitud del método. No obstante, es necesario tener presente que la exactitud para determinados estudios en condiciones industriales posee un valor útil dado en el porcentaje de error permisible según las posibilidades reales proporcionadas por los estándares de fabricación de máquinas eléctricas (Bin *et al.*, 2006a; Bin *et al.*, 2007).

Bin (2006), realiza tres modificaciones al método del momento en el entrehierro, para eliminar las desventajas del mismo y convertirlo en una vía poco invasiva y de amplia posibilidades industriales en la determinación de la eficiencia. Sobre la base de este método desarrolla un sistema inalámbrico para la evaluación energética de motores trifásicos de inducción, el cual posibilita la obtención de ahorro de energías globales en las industrias. Esta investigación considera los desbalances de tensiones y corrientes despreciables.

La aplicación del sistema de evaluación energética necesita de una red inalámbrica con tres nodos: el transmisor, el receptor y el de conmutación. Cada motor está conectado a un nodo transmisor que envía las señales a la central supervisora, la cual presenta un nodo receptor.

*Este sistema de evaluación energética de motores de inducción es efectivo, sin embargo, lleva implícito una alta tecnología lo cual es imposible en países subdesarrollados como Cuba por el alto costo asociado.*

Gharakhani (2012), desarrolla una técnica no invasiva que evalúa la eficiencia de los motores de inducción en el campo de aplicación, válida en condiciones de desbalance y sobretensión en el suministro eléctrico. Para lograr el más bajo nivel de invasividad utiliza solamente las mediciones eléctricas en los terminales; las potencias de entrada y de salida, la velocidad y los parámetros del motor se calculan sobre estas mediciones. *Aunque demuestra la efectividad de la técnica propuesta en la determinación de la eficiencia, no contempla su aplicación en redes contaminadas por desbalance y armónicos.*

de Armas *et al.* (2011b), desarrollan un método para graficar la potencia en el eje del motor, evaluar la eficiencia y otros parámetros operacionales y, en adición, verificar si la selección ha sido la correcta para el mecanismo que acciona. El procedimiento se fundamenta en el método

del momento en el entrehierro con un algoritmo incorporado, el cual facilita la información necesaria, y evita el uso de costosos y complejos sensores en condiciones de campo.

### **1.3. Modelo matemático del método del momento en el entrehierro**

En la industria los motores son conectados a centros de control, donde existen los transformadores de tensión (PTs) y de corrientes (CTs) instalados para propósitos de protección y/o mediciones, lo cual permite la recolección de los datos desde el centro de control de motores, sin costo alguno. El método propone estimar la eficiencia completamente en base a las tensiones y corrientes en los terminales, sin requerir las mediciones de velocidad y momento en el eje.

En la última década muchos autores coinciden que el método del momento en el entrehierro es uno de los métodos existentes para estimar la eficiencia con bajo nivel de intrusión, cuando se consideran los avances en la estimación de la velocidad sin el uso de sensores y el estimado de la resistencia del estator del motor en servicio (Bin *et al.*, 2006d).

El flujo en el entrehierro es calculado por la integral de las corrientes y tensiones, sustrayendo la caída en la resistencia del estator. El momento en el eje es obtenido restando del momento en el entrehierro las pérdidas de momento asociada con las pérdidas por fricción y batimiento del aire  $p_{fw}$  y las pérdidas adicionales con la carga del rotor  $p_{adr}$ .

Varios experimentos a lo largo del tiempo han verificado el método del momento en el entrehierro (MME) y han concluido que el mismo es efectivo para estimar la eficiencia (Hsu *et al.*, 1992; Hsu, 1995; Hsu & Scoggins, 1995; Kueck *et al.*, 1996). La potencia de entrada del motor es calculada por la tensión y la corriente de línea, y la potencia de salida por la velocidad y el momento en el eje, por tanto, requiere de las mediciones de tensiones de líneas, corrientes de fases, velocidad del rotor y resistencia del devanado del estator. Adicionalmente, para medir las pérdidas en el acero  $p_{acero}$  y las pérdidas por fricción y batimiento del aire  $p_{fw}$ , es necesario un ensayo en vacío, lo cual constituye una de las dificultades de este método.

Para minimizar estas dificultades y convertir el MME en una técnica no invasiva, la ecuación se desarrolla con transformaciones en la concepción original, de donde surge el método del momento en el entrehierro modificado, que mantiene una precisión satisfactoria y reduce grandemente el nivel de intrusión (Bin *et al.*, 2006a). Las transformaciones que se proponen, para su aplicación a un motor en condiciones de campo, son las siguientes:

1. Las pérdidas por fricción y batimiento del aire  $p_{fw}$ , se expresan como una fracción de la capacidad de la máquina  $k_{fw}$  y varían con la velocidad al cuadrado, y según Gómez (2006) se calculan por la ecuación (1.1); las pérdidas adicionales con la carga se estiman por la norma IEC 60034-2-1 del 2007, (IEC 60034-2-1, 2007).

$$k_{fw} = 0.052 \cdot P_n^{-0.3296}, \quad [\text{pu}] \quad p_{fw} = k_{fw} P_n \left( \frac{n}{n_n} \right)^2, \quad [\text{W}] \quad (1.1)$$

donde:  $P_n$  y  $n_n$  son la potencia en **W** y la velocidad nominal en **rev/min** del motor de inducción, respectivamente;  $n$  la velocidad del motor a cualquier nivel de carga, en **rev/min**.

Tabla 1.1. Valores asumidos de las pérdidas adicionales  $p_{ad}$  en la norma **IEC 60034-2**

Rango de potencia de salida nominal	Pérdidas en % de la potencia de entrada
$P_n \leq 1 \text{ kW}$	$p_{ad} = 2,5\% P_{ent}$
$1 \text{ kW} < P_n < 10 \text{ 000 kW}$	$p_{ad} = [2,5\% - 0,5\% \log_{10} P_n] P_{ent}$
$P_n \geq 10 \text{ 000 kW}$	$p_{ad} = 0,5\% P_{ent}$

Fuente: IEC 60034-2-1 (2007)

donde:  $P_n$  es la potencia nominal y  $P_{ent}$  la que demanda el motor de la red, en **kW**

2. La resistencia del estator se estima por los datos nominales (Romero & Pérez, 2008).
3. La velocidad del rotor se estima por el análisis espectral de la corriente del motor (Velez-Reyes *et al.*, 1989; Atkinson *et al.*, 1991; Ferrah *et al.*, 1992; Blasco *et al.*, 1994; Kim *et al.*, 1994; Blasco *et al.*, 1996; Hurst & Habetler, 1996; Ferrah *et al.*, 1997; Inanc *et al.*, 2000; Velez-Reyes *et al.*, 2001; Aiello *et al.*, 2005; da Silva, 2006; Stocks, 2006), o por otras alternativas resumidas en el **Anexo A**.

Es común determinar el comportamiento del motor de inducción por el método del circuito equivalente, con la dificultad principal en la necesidad de disponer de los parámetros del mismo (Eguiluz *et al.*, 1999b), sin embargo, si se aplica el método del momento en el entrehierro modificado es posible determinar el comportamiento del mismo bajo condiciones reales, con solo requerir de la resistencia del devanado del estator (Romero *et al.*, 2012); este aspecto ofrece ventaja al método, además de su precisión, en un ambiente industrial.

*Las transformaciones esenciales en la aplicación del método del momento en el entrehierro no contemplan especificaciones para la presencia de armónicos y desbalance en las ondas de tensiones y corrientes, así como las desviaciones en la tensión de alimentación.*

Lo más importante del método del momento en el entrehierro es su sencillez, dado que solo depende de las magnitudes en los terminales del estator y la información de los datos de placas para la estimar la eficiencia, mientras el motor está en servicio.

Para la conexión en estrella, se obtienen las corrientes de líneas y fases directamente y las tensiones de líneas por mediciones directas (método de los dos vatímetros) o por transformaciones si se dispone de las tensiones de fases. Para la conexión en delta, se obtiene las tensiones y corrientes de líneas directamente y las corrientes de fases por transformaciones.

La potencia ( $p_{ent}$ ) en términos de tensiones de líneas y corrientes de fases se calcula por (1.2):

$$P_{ent} = -u_{ab}i_b - u_{ca}(i_a + i_b) = u_{ca}i_c - u_{ab}i_b, \quad [\text{VA}] \quad (1.2)$$

Lo anterior es válido siempre que las componentes de corriente directa no estén presentes en las señales de tensión y corriente. Bin *et al.* (2006a), presentan un resumen de las transformaciones de potencia en el motor de inducción y el sistema de referencia en los ejes  $dq$  en la aplicación del método del momento en el entrehierro.

### ***Ecuaciones fundamentales del momento en el entrehierro y la eficiencia***

El sistema de ecuaciones para el estator en el sistema  $dq$  está dado por (1.3) en (Fitzgerald *et al.*, 2003; Bin *et al.*, 2006a),

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_{me} \lambda_{qs} \\ v_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_{me} \lambda_{ds} \end{aligned}, \quad [\text{V}] \quad (1.3)$$

donde:  $\lambda_{ds}$ ,  $\lambda_{qs}$  son los vectores de flujo concatenado del estator por los ejes  $d$  y  $q$  en  $\mathbf{Wb}$ ;  $R_s$  es el valor medio de la resistencia de las tres fases del estator en  $\Omega$  y  $\omega_{me}$  la velocidad angular eléctrica del rotor en  $\text{rad/s}$  y expresada por  $\omega_{me} = d\theta_{me}/dt$ , donde  $\theta_{me}$  es el ángulo eléctrico entre el eje directo del rotor y el eje de la fase  $a$  del estator.

Para el sistema de referencia estacionario  $\omega_{me} = 0$  y el flujo mutuo del estator, está dado por la integral de la tensión de entrada menos la caída en la resistencia del estator (1.4).

$$\begin{aligned}\lambda_{ds}^e &= \int (v_{ds}^e - R_s i_{ds}^e) dt \\ \lambda_{qs}^e &= \int (v_{qs}^e - R_s i_{qs}^e) dt\end{aligned}, \quad [\text{Wb}] \quad (1.4)$$

donde:  $\lambda_{ds}^e$  y  $\lambda_{qs}^e$  son los flujos mutuos por los ejes  $d$  y  $q$  en **Wb**;  $v_{ds}^e$  y  $v_{qs}^e$  las tensiones del estator por los ejes  $d$  y  $q$  en **V**;  $i_{ds}^e$  y  $i_{qs}^e$  las corrientes del estator por los ejes  $d$  y  $q$  en **A**.

El momento en el entrehierro se expresa en el sistema  $dq$  por (1.5).

$$M_{em} = \frac{3}{2} \frac{p}{2} (\lambda_{ds}^e i_{qs}^e - \lambda_{qs}^e i_{ds}^e), \quad [\text{Nm}] \quad (1.5)$$

Cuando se desarrolla (1.5) para un sistema de referencia estacionario por las magnitudes trifásicas se obtiene (1.6), ecuación ampliamente utilizada en la literatura (Hsu & Scoggins, 1995; Hsu & Sorenson, 1996; Bin *et al.*, 2006a; de Armas *et al.*, 2011b).

$$M_{em} = \frac{\sqrt{3} p}{6} \left\{ \begin{aligned} &(2i_a + i_b) \int [v_{ab} - R_s (i_a - i_b)] dt \\ &+ (i_a - i_b) \int [v_{ca} + R_s (2i_a + i_b)] dt \end{aligned} \right\}, \quad [\text{Nm}] \quad (1.6)$$

donde:  $p$  es el número de polos del motor;  $i_a$ ,  $i_b$  las corrientes instantáneas de las fases A y B en **A**;  $R_s$  resistencia del devanado del estator en  $\Omega$ ; y  $v_{ab}$ ,  $v_{ca}$  tensión de líneas AB y CA en **V**.

La eficiencia  $\eta$  está dada por (1.7) donde:  $P_{eje}$  - potencia de salida en el eje en **W**,  $M_{eje}$  - momento en el eje en **Nm**,  $\omega_r$  - velocidad del rotor en **rad/s**,  $p_{fwn}$  - pérdidas mecánicas y del núcleo en **W** y  $p_{adr}$  - pérdidas adicionales del rotor con la carga en **W**.

$$\eta = \frac{P_{eje}}{P_{ent}} = \frac{M_{eje} \omega_r}{P_{ent}} = \frac{M_{em} \omega_r - p_{fwn} - p_{adr}}{P_{ent}}, \quad [\text{pu}] \quad (1.7)$$

Cuando se aplica el método en su forma clásica son necesarias dos integrales indefinidas ecuación (1.6), las cuales se calculan por algún método numérico conocido (Trapezoidal, de Simpson, entre otros) y necesitan de parámetros iniciales que se desconocen, los cuales influyen en los resultados.

La primera integral

$$\phi_{ab} = \int v_{ab} - R_s (i_a - i_b) dt \quad (1.8)$$

La segunda integral

$$\phi_{ca} = \int v_{ca} + R_s (2i_a + i_b) dt \quad (1.9)$$

Un algoritmo para resolver las integrales se describe en (Otto & Denier, 2005) como sigue:

1. Tomando un paso de integración

$$h = t_{(2)} - t_{(1)} \quad (1.10)$$

2. Condiciones iniciales (se desconocen los valores reales iniciales)

$$\begin{aligned} \phi_{ab(1)} &= 0; \\ \phi_{ca(1)} &= 0; \end{aligned} \quad (1.11)$$

3. Lazo para el cálculo desde 2 hasta el total de intervalo N

*for J = 2 : N*

$$\begin{aligned} \phi_{ab(J)} &= \phi_{ab(J-1)} + \frac{h}{2} (\phi_{ab(J)} + \phi_{ab(J-1)}) \\ \phi_{ca(J)} &= \phi_{ca(J-1)} + \frac{h}{2} (\phi_{ca(J)} + \phi_{ca(J-1)}) \end{aligned} \quad (1.12)$$

*end*

4. Cálculo del TAG instantáneo ( $NC$  ciclos;  $N$  número de muestra por ciclo)

$$M_{em(NC,N)} = \frac{P}{\sqrt{3}} (\phi_{ab} (2i_a + i_b) + \phi_{ca} (i_a - i_b)), \quad [\text{Nm}] \quad (1.13)$$

5. Momento electromagnético por ciclos

$$M_{em(k)} = \frac{1}{N-1} \sum_{l=1}^{N-1} M_{em}, \quad [\text{Nm}] \quad (1.14)$$

Cuando se aplica el método en su forma corregida, a través de la transformada rápida de Fourier, se generan ondas sinusoidales de diferentes frecuencias, las cuales tienen una expresión analítica genérica:

$$x_k = x_{mk} \text{sen}(2k\pi f \cdot t + \varphi_k) \quad (1.15)$$

La integral de esta expresión resulta

$$\int x_k = -\frac{x_{mk}}{2k\pi f} \cos(2k\pi f \cdot t + \varphi) \quad (1.16)$$

Evaluando en (1.16) para el tiempo se obtiene un valor preciso.

Como se observa el método del momento en el entrehierro, aunque considera la calidad de la energía en la evaluación de la eficiencia por su naturalidad, no contempla las vías de su implementación y la determinación de la influencia de los armónicos superiores.

#### **1.4. Conclusiones parciales**

Los métodos desarrollados para determinar la eficiencia de los motores de inducción no contemplan la especificación de la influencia de los armónicos y el desbalance de la fuente de alimentación en la evaluación del comportamiento energético de éstas máquinas.

La solución numérica de las integrales presente en la ecuación del momento en el entrehierro necesita de parámetros iniciales desconocidos, lo cual introduce un error de cuantificación de la potencia de entrada, el flujo magnético y de la eficiencia estimada por el método en su forma clásica.

*Capítulo 2*  
*Corrección del método del*  
*momento en el entrehierro*  
*con especificación de*  
*armónicos y desbalance*

## **CAPÍTULO 2. CORRECCIÓN DEL MÉTODO DEL MOMENTO EN EL ENTREHIERRO CON ESPECIFICACIÓN DE ARMÓNICOS Y DESBALANCE**

### **Introducción**

La implementación del método del momento en el entrehierro en presencia de armónicos y asimetrías y, que posibilite su evaluación consecuente necesita de correcciones en la resistencia del devanado del estator para el nivel de armónico y la aplicación de las componentes simétricas para el desbalance.

La presencia de un sistema de secuencia negativa provoca en el motor de inducción el incremento de las pérdidas y, por consiguiente, la disminución de la eficiencia, como se refleja en la tesis doctoral (Gómez, 2006). También incide en la reducción del momento electromagnético que se transmite al rotor por el entrehierro.

Si se toma el devanado trifásico de una máquina rotatoria suponiendo un entrehierro constante y la ausencia de saturación del acero, en un análisis de Fourier de la distribución de la fuerzas magnetomotrices (f.m.m.s) se observa que la f.m.m fundamental es una onda viajera moviéndose en la dirección positiva, las armónicas triples están ausentes; y la quinta armónica es una onda viajera en la dirección negativa, la 7a. armónica viaja en la dirección positiva, etc.

Como resultado del contenido armónico de la distribución de la f.m.m se producen armónicas en el tiempo que son dependientes de la velocidad. Estas armónicas inducen fuerza electromotriz en el estator a una frecuencia igual al cociente de la velocidad entre la longitud de onda.

### **2.1. Consideración de armónicos y el desbalance en los motores de inducción**

En (de Abreu & Emanuel, 2002) se plantea que para los espectros de tensión típicos en sistemas eléctricos de 60 o 50 Hz, donde la distorsión de los armónicos superiores es menor del 5 % tienen un efecto insignificante sobre las pérdidas del acero.

Bajo distorsión armónica de la tensión, las pérdidas mecánicas por fricción y batimiento del aire no son afectadas (Sen & Landa, 1990), y son proporcionales al cuadrado de la velocidad y al área de la superficie de contacto. Se incrementarán las pérdidas por efecto joule, las pérdidas del acero y las pérdidas adicionales. También disminuye el momento desarrollado.

Según IEEE Std. 519 (1993), las pérdidas en el estator son determinadas utilizando la resistencia a corriente directa de la máquina, corregida a la temperatura especificada. Al operar la máquina de inducción con voltajes con contenido armónico no sólo aumentan estas pérdidas por el efecto pelicular que incrementa el valor de la resistencia efectiva, sino que también aumenta el valor de la corriente de magnetización, incrementándose aún más las pérdidas  $I^2R$ .

La resistencia del estator considerando el efecto pelicular puede aproximarse según (Masi & Chassande, 1996) como:

$$R_{sk} = R_s (0,4 + 0,6\sqrt{k}) \quad (2.1)$$

donde  $k$  es el orden del armónico.

Las pérdidas por efecto joule en el rotor aumentan de manera más significativa que las anteriores, por el diseño de la jaula en los motores de inducción que se basa en el aprovechamiento del efecto piel para el arranque. Esta resistencia aumenta en forma proporcional a la raíz cuadrada de la frecuencia y por ende las pérdidas. Cuando se aplica el método del momento en el entrehierro quedan implícita como una de las ventajas del mismo.

Las armónicas de secuencia positiva producen en el motor de inducción un momento en el mismo sentido de la dirección de rotación, en tanto que las de secuencia negativa tienen el efecto opuesto. Dependiendo del contenido armónico del voltaje aplicado, el momento promedio de operación puede verse disminuido considerablemente (Jain, 1964), sin embargo en la mayoría de los casos el efecto producido por las armónicas de secuencia negativa se cancela con el efecto de las de secuencia positiva, por lo que su efecto neto en el momento promedio puede despreciarse.

La interacción de las corrientes armónicas del rotor con el flujo en el entrehierro de otra armónica resultan momentos pulsantes en los motores, los que pueden afectar la calidad del producto donde las cargas de los motores son sensibles a estas variaciones (IEEE Std. 519, 1993). Estos momentos pulsantes también pueden excitar una frecuencia de resonancia mecánica lo que resultaría en oscilaciones que pueden causar fatiga del eje y otras partes mecánicas conectadas. Por lo general la magnitud de estos momentos es generalmente pequeña y su valor promedio es cero (Klingshirn & Jordan, 1968).

En el análisis de no sinusoidalidad y el desbalance en un motor asincrónico, el mismo se puede sustituir por un grupo de motores ubicados en un eje común (Figura 2.1). Cada uno de estos motores debe ser conectado a una tensión que corresponda a la frecuencia  $f_h$  y a la secuencia de

fases  $k$ . Los parámetros de cada motor deben corresponder a ciertas frecuencias. El deslizamiento del rotor de cada motor (1, 2,... m) asentado en el eje común (motor unificado) se determina de la expresión

$$s_{un} = \frac{(kn_1 \mp n_{un})}{kn_1} \quad (2.2)$$

donde  $kn_1$  es la frecuencia de rotación sincrónica de cualquier armónico;  $n_1$ , la frecuencia sincrónica de rotación del vector de la f.e.m. del sistema (armónico fundamental).

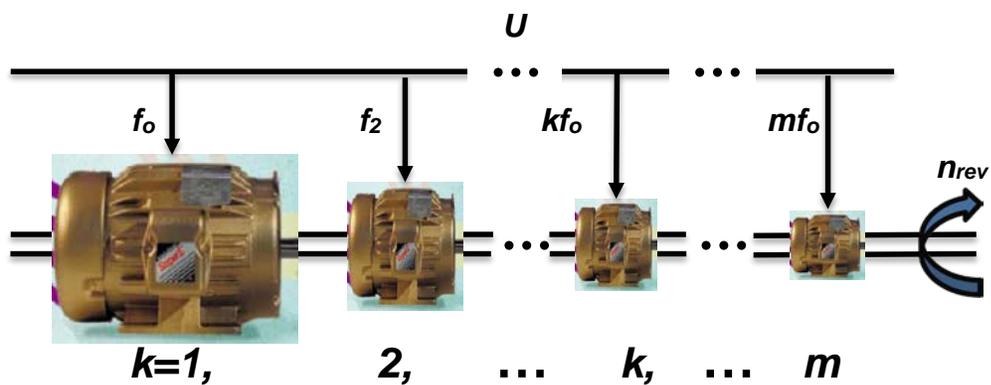


Figura 2.1. Motor asincrónico representado como la suma de los motores 1, 2,..., k,..., m alimentados por las tensiones armónicos de frecuencias  $f_0, f_2, \dots, k f_0, \dots, m f_0$  y montado sobre un eje que gira con la velocidad  $n_{rev}$ .

La frecuencia de rotación del motor asincrónico unificado, designada por  $n_{un}$ , puede determinarse de la expresión.

$$s_{un} = \frac{(n_1 - n_{un})}{n_1} \quad (2.3)$$

donde  $s_{un}$  es el deslizamiento del eje del motor unificado respecto de la frecuencia de sincronismo, o sea, a la frecuencia condicionada por el primer armónico.

El deslizamiento del eje unificado respecto del armónico  $k$  (expresado mediante el deslizamiento del 1er armónico), será.

$$s_k = 1 \mp \frac{(1 - s_{un})}{k} \quad (2.4)$$

En las expresiones arriba presentadas el signo “+” corresponde a las componentes simétricas de los armónicos, las cuales crean un campo giratorio contrario al campo del armónico fundamental; el signo “-” corresponde a las componentes simétricas que crean un campo que gira en el mismo sentido que el campo fundamental del estator.

En la investigación que se presenta, las ondas de tensiones y corrientes son convertidas en una sucesión de armónicos. Para cada sistema trifásico armónico, se separan las componentes de secuencia cero que puedan contener según (Ivanon-Smolenski, 1984) y son divididos en secuencia positiva y negativa según la teoría de la componente simétrica de Fortescue (Grainger & William D. Stevenson, 1996). De esta forma se analiza un motor de inducción con un sistema de tensión simétrico de secuencia positivo para cada armónico y de forma semejante para secuencia negativa; el resultado final es la suma de ambos efectos.

La ecuación del momento en el entrehierro se realiza para ambas secuencias y se evalúa cada armónico. La implementación del método se realiza con una aplicación auxiliar en Matlab.

## **2.2. Algoritmo para la evaluación energética del motor de inducción con las correcciones en el método del momento en el entrehierro**

Para implementar el algoritmo de cálculo basado en el método del momento en el entrehierro se requiere de un trabajo previo con vista a establecer las bases de datos en el formato adecuado para ser interpretado por la aplicación realizada al respecto sobre Matlab.

1. Realizar las mediciones de las formas de ondas de tensión y corriente, y frecuencia.
2. Tomar los datos nominales característicos de los motores de inducción.
3. Tomar las mediciones de velocidad, si está disponible.
4. Salvar en un fichero, *\*.mat*, los valores medidos de tensión y corriente (DO), frecuencia (Df) y velocidad (Dv), en dependencia de la cantidad de ciclos a analizar, junto a los datos nominales [def], en forma de estructura;

**DE1 = struct('DO',[DO],'Df',[Df],'Dnr',[Dv],'DN',[def]);**

El procedimiento se realiza aplicando la transformada rápida de Fourier, descomponiendo las ondas resultantes en una suma de componentes de diferentes frecuencias y magnitudes, además se descompone cada armónica en secuencias positiva y negativa, evitando la presencia de secuencia cero en las formas de ondas.

El algoritmo de cálculo del momento en el entrehierro, con especificación de armónicos y desbalance en la tensión, sigue los siguientes pasos para su ejecución:

1. Se realiza una repetición de procedimiento para cada ciclo registrado, subdividiendo el tiempo y las magnitudes. En el caso del analizador INTERLOGGER se toman  $N = 128$  muestras por ciclos, período  $T = 1/60$  s, e intervalo entre muestras  $h = T/(N-1)$ .
2. Se aplica la Transformada Rápida de Fourier (FFT) (Oppenheim & Schaffer, 1999) a cada ondas de corriente y tensión de línea, obteniendo las componentes de CD, y de armónicos desde el primero hasta  $N/2$ . La ecuación general de la transformada directa tiene la forma dada por (2.5), donde  $N$  es el número de puntos igualmente espaciado en el intervalo de  $0$  a  $\pi$ , Para  $m = 0, 1, 2, \dots, N-1$ .

$$X[m] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j2\pi \frac{mn}{N}} \quad (2.5)$$

Al aplicar la transformada rápida de Fourier se obtienen la componente de directa (CD),  $N/2$  elementos válidos, un elemento correspondiente a la frecuencia de Nyquist y  $N/2$  elementos redundantes, a través de Matlab por la instrucción dada en (2.6).

$$F = \text{fft}(f(t)) \quad (2.6)$$

Componente continua (media del conjunto de datos)

$$A_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{F(1,:)}{N} \quad (2.7)$$

Componente del coseno.

$$A_q = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(q \omega_o t) dt = \frac{2 \text{real}(F(2:N/2,:))}{N} \quad (2.8)$$

Componente seno.

$$B_q = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(q \omega_o t) dt = \frac{-2 \text{imag}(F(2:N/2,:))}{N} \quad (2.9)$$

Formar un complejo (real, imaginario)

$$C_{q-cplx} = \text{complex}(B_q, A_q) \quad (2.10)$$

Se obtiene el módulo o valor absoluto

$$C_q = \sqrt{A_q^2 + B_q^2} = \text{abs}(C_{q\text{-cplx}}) \quad (2.11)$$

Y por último el ángulo de cada componente

$$\varphi_q = \tan^{-1}(A_q/B_q) = \text{angle}(C_{q\text{-cplx}}) \quad (2.12)$$

3. La presencia del desbalance complica la no sinusoidalidad (de Armas & otros., 2006), por ello cada armónico se divide en secuencia positiva y negativa. Esto será analizar un grupo de motores de diferentes frecuencias en régimen de desbalance conectado a un mismo eje.

$$a = e^{(j2\pi/3)}$$

Para las tensiones se determinan los componentes de sec (0), sec(+) y sec(-), (2.13).

$$\begin{aligned} \underline{V}_{abo} &= (1/3)(\underline{V}_{ab} + \underline{V}_{bc} + \underline{V}_{ca}) & V_{abo} &= |\underline{V}_{abo}| & \varphi_{abo} &= \text{angle}(\underline{V}_{abo}) \\ \underline{V}_{ab1} &= (1/3)(\underline{V}_{ab} + a\underline{V}_{bc} + a^2\underline{V}_{ca}) & V_{ab1} &= |\underline{V}_{ab1}| & \varphi_{ab1} &= \text{angle}(\underline{V}_{ab1}) \\ \underline{V}_{ab2} &= (1/3)(\underline{V}_{ab} + a^2\underline{V}_{bc} + a\underline{V}_{ca}) & V_{ab2} &= |\underline{V}_{ab2}| & \varphi_{ab2} &= \text{angle}(\underline{V}_{ab2}) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Se expresan las fases B y C a través de la fase A, (2.14).

$$\begin{aligned} \underline{V}_{bc1} &= a^2\underline{V}_{ab1} & V_{bc1} &= |\underline{V}_{bc1}| & \varphi_{bc1} &= \text{angle}(\underline{V}_{bc1}) \\ \underline{V}_{bc2} &= a\underline{V}_{ab2} & V_{bc2} &= |\underline{V}_{bc2}| & \varphi_{bc2} &= \text{angle}(\underline{V}_{bc2}) \\ \underline{V}_{ca1} &= a\underline{V}_{ab1} & V_{ca1} &= |\underline{V}_{ca1}| & \varphi_{ca1} &= \text{angle}(\underline{V}_{ca1}) \\ \underline{V}_{ca2} &= a^2\underline{V}_{ab2} & V_{ca2} &= |\underline{V}_{ca2}| & \varphi_{ca2} &= \text{angle}(\underline{V}_{ca2}) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Igual procedimiento para las corrientes, (2.15)

$$\begin{aligned} \underline{I}_{ao} &= (1/3)(\underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c) & I_{ao} &= |\underline{I}_{ao}| & \varphi_{ao} &= \text{angle}(\underline{I}_{ao}) \\ \underline{I}_{a1} &= (1/3)(\underline{I}_a + a\underline{I}_b + a^2\underline{I}_c) & I_{a1} &= |\underline{I}_{a1}| & \varphi_{a1} &= \text{angle}(\underline{I}_{a1}) \\ \underline{I}_{a2} &= (1/3)(\underline{I}_a + a^2\underline{I}_b + a\underline{I}_c) & I_{a2} &= |\underline{I}_{a2}| & \varphi_{a2} &= \text{angle}(\underline{I}_{a2}) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Expresando las corrientes de las fases B y C a través de la fase A,

$$\begin{aligned} \underline{I}_{b1} &= a^2\underline{I}_{a1} & I_{b1} &= |\underline{I}_{b1}| & \varphi_{b1} &= \text{angle}(\underline{I}_{b1}) \\ \underline{I}_{b2} &= a\underline{I}_{a2} & I_{b2} &= |\underline{I}_{b2}| & \varphi_{b2} &= \text{angle}(\underline{I}_{b2}) \\ \underline{I}_{c1} &= a\underline{I}_{a1} & I_{c1} &= |\underline{I}_{c1}| & \varphi_{c1} &= \text{angle}(\underline{I}_{c1}) \\ \underline{I}_{c2} &= a^2\underline{I}_{a2} & I_{c2} &= |\underline{I}_{c2}| & \varphi_{c2} &= \text{angle}(\underline{I}_{c2}) \end{aligned} \quad (2.16)$$

4. Cada armónico de tensión, corriente, y momento, con sus dos sistemas, sec(+) y sec(-), se evalúan en el tiempo.

Para cada armónico (q) se evalúan las tensiones y corriente en el tiempo, correspondientes a cada secuencia positiva (+) y negativa (-), con sus respectivos ángulos, matrices (50 × 128).

$$\begin{aligned}
v_{ab(+)}(q,t) &= V_{ab(+)}(q) \sin(2\pi qft + \varphi_{ab(+)}(q)); \\
v_{ab(-)}(q,t) &= V_{ab(-)}(q) \sin(2\pi qft + \varphi_{ab(-)}(q)); \\
v_{ca(+)}(q,t) &= V_{ca(+)}(q) \sin(2\pi qft + \varphi_{ca(+)}(q)); \\
v_{ca(-)}(q,t) &= V_{ca(-)}(q) \sin(2\pi qft + \varphi_{ca(-)}(q));
\end{aligned} \tag{2.17}$$

Para las corrientes

$$\begin{aligned}
i_{a(+)}(q,t) &= I_{a(+)}(q) \sin(2\pi qft + \varphi_{a(+)}(q)); \\
i_{a(-)}(q,t) &= I_{a(-)}(q) \sin(2\pi qft + \varphi_{a(-)}(q)); \\
i_{b(+)}(q,t) &= I_{b(+)}(q) \sin(2\pi qft + \varphi_{b(+)}(q)); \\
i_{b(-)}(q,t) &= I_{b(-)}(q) \sin(2\pi qft + \varphi_{b(-)}(q));
\end{aligned} \tag{2.18}$$

5. Se obtienen los momentos por secuencias, para cada armónico, promedios y totales.

Para secuencia positiva

$$M_{em(+)}(q,:) = \frac{p}{\sqrt{3}} \left\{ \begin{array}{l} \int [V_{ab(+)}(q,:) - r_s (I_{a(+)}(q,:) - I_{b(+)}(q,:))] \\ (2I_{a(+)}(q,:) + I_{b(+)}(q,:)) + \dots \\ \int [V_{ca(+)}(q,:) + r_s (2I_{a(+)}(q,:) + I_{b(+)}(q,:))] \\ (I_{a(+)}(q,:) - I_{b(+)}(q,:)) \end{array} \right\} \tag{2.19}$$

Para secuencia negativa

$$M_{em(-)}(q,:) = \frac{p}{\sqrt{3}} \left\{ \begin{array}{l} \int [V_{ab(-)}(q,:) - r_s (I_{a(-)}(q,:) - I_{b(-)}(q,:))] \\ (2I_{a(-)}(q,:) + I_{b(-)}(q,:)) + \dots \\ \int [V_{ca(-)}(q,:) + r_s (2I_{a(-)}(q,:) + I_{b(-)}(q,:))] \\ (I_{a(-)}(q,:) - I_{b(-)}(q,:)) \end{array} \right\} \tag{2.20}$$

Estos momentos resultan por cada ciclo una matriz de  $(50 \times 128)$ , 50 armónicos considerados y 128 muestra.

6. Se obtienen los valores efectivos de tensiones y corrientes.
7. Se calcula la potencia aparente, activa, reactiva y el factor de potencia, también se puede realizar por armónicos.
8. Se incluye la variación de la velocidad por frecuencia y tensión, cerrando el ciclo repetitivo.
9. Se obtiene el rendimiento y coeficiente de carga del motor, un resumen de los valores promedios, que considera el número de ciclos.
10. Se selecciona un nuevo motor por el método de la potencia equivalente, de un catálogo de Siemens, comprobando por momento máximo (2.21).

$$P_{eficaz} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NC} P_{eje.i}^2 t_i}{\sum t_i}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NC} P_{eje.i}^2}{NC}} \quad (2.21)$$

donde  $\sum t_i = NC \cdot t_i$ .

Tomando el valor del momento máximo y la velocidad promedio se llama a la aplicación que buscará en el catálogo de motores para dar los valores del motor seleccionado. Este comprueba que el momento máximo medido sea menor que el 75 % del momento máximo del motor seleccionado.

$[Conexion, I, P_{2n}, V_{nc}, Cat\_Mot, DM] = Cat\_Mot\_Siemens(P_{eficaz}, N_{prom}, T_{eje.max});$

Datos del catálogo por orden de columna.

- |  |  |
|--|--|
| 1- Potencia nominal, (Pn), hp                  | 9- Eficiencia nominal, ( $\eta_n$ ), %                       |
| 2- Velocidad del campo, (n1), rev/min          | 10- Factor de potencia a 1/2 carga, ( $\cos.\phi_{1/2}$ ), % |
| 3- Velocidad nominal, (n), rev/min             | 11- Factor de potencia a 3/4 carga, ( $\cos.\phi_{3/4}$ ), % |
| 4- Corriente en vacío, (Io), A.                | 12- Factor de potencia nominal, ( $\cos.\phi_n$ ), %         |
| 5- Corriente nominal, (In), A.                 | 13- Momento nominal, ( $M_n$ ), Nm                           |
| 6- Corriente nominal, (Iarr), A.               | 14- Momento de arranque ( $M_{arr}$ ), % del nominal         |
| 7- Eficiencia a 1/2 carga, ( $\eta^{1/2}$ ), % | 15- Momento máximo ( $M_{max}$ ), % del nominal              |
| 8- Eficiencia a 3/4 carga, ( $\eta^{3/4}$ ), % | 16- Precio del motor en USD                                  |

Con estos datos se obtienen los parámetros nominales restantes del motor seleccionado

11. Se calculan los datos operacionales del motor seleccionado, para ello se somete al mismo a la carga del motor en servicio de acuerdo con el gráfico de la potencia en el eje.

Se estima el coeficiente de carga del nuevo motor para cada ciclo, dado por (2.22), donde  $i$  toma valores desde 1 hasta el número total de ciclo  $NC$ .

$$k_{c.nuevo.i} = \frac{P_{eje.i}}{P_n} \quad (2.22)$$

***Eficiencia y Factor de potencia, estimados, para el nuevo estado de carga***

Interpolando para el coeficiente de carga ( $i$ ) estimado se determina la eficiencia y el factor de potencia que tendría el motor seleccionado, cuando opere con la carga real, dado por (2.23).

$$\begin{aligned} \eta_{nuevo.i} &= \text{interp1}(k_{c.catálogo}, \eta_{catálogo}, k_{c.nuevo.i}, 'spline'); \\ f_{p.nuevo.i} &= \text{interp1}(k_{c.catálogo}, f_{p.catálogo}, k_{c.nuevo.i}, 'spline') \end{aligned} \quad (2.23)$$

Estos valores permiten obtener el comportamiento estimado del motor seleccionado para cada estado de carga.

Potencia de entrada estimada en **kW**:

$$P_{1nuevo.i} = \frac{P_{eje.i}}{\eta_{nuevo.i}} \quad (2.24)$$

Corriente en **A**:

$$I_{1nuevo.i} = \frac{P_{1nuevo.i}}{\sqrt{3}V_{prom.i}f_{p.nuevo.i}} \quad (2.25)$$

Pérdidas totales en **kW**:

$$\Sigma_{p.nuevo.i} = P_{1nuevo.i} - P_{eje.i} \quad (2.26)$$

Velocidad en **rev/min**:

$$n_{r.nueva.i} = n_{r.vieja.i} \frac{n_{n.nueva.i}}{n_{n.vieja.i}} \quad (2.27)$$

Momento en el eje en **Nm**:

$$M_{eje.nuevo.i} = 9550 \frac{P_{eje.i}}{n_{r.nueva.i}} \quad (2.28)$$

También se selecciona la conexión del motor y se realiza un resumen de los valores medios para el motor seleccionado y se calculan otras magnitudes.

12. Se realiza el análisis del ciclo de vida o costo diferencial del motor existente y el seleccionado.
13. Los resultados se representan en forma de tablas, gráficos o realizando una salva en fichero \*.TXT, con opciones.

En la Figura 2.2 se representa el esquema del algoritmo de evaluación de motores de inducción en presencia de armónicos y asimetría.

La ejecución de esta aplicación ofrece los siguientes resultados.

- Datos nominales y operacionales del motor en servicio y el seleccionado (Datos\_Operacionales.txt)
- Valores de tensión y corrientes efectivas (Volt\_Amperes.txt)
- Momentos del motor en servicio en Nm (Momentos.txt)
- Potencias, pérdidas, factor de potencia y eficiencia del motor en servicio y el seleccionado (Pot\_MNuevo.txt, Pot\_MViejo.txt)
- Resumen para secuencia positiva y negativa del motor en servicio (Sec\_Pos.txt, Sec\_Neg.txt)
- Valores de THD de tensión y corrientes (THD\_VI.txt)
- Resumen de energía anual y por día motor en servicio y el seleccionado (Energia.txt)
- Datos para el cálculo económico, costos del ciclo de vida y periodo simple de recuperación del capital (Cal\_economico.txt)

Cuando se calcula el consumo de energía, las pérdidas y sus costos, el procedimiento ha sido someter, a la máquina seleccionada por el programa, al mismo diagrama de carga que el desarrollado por el motor en servicio (de Armas *et al.*, 2011a). En este proceso hay que considerar el estado de carga real del nuevo motor y encontrar su eficiencia operacional interpolando entre los valores de eficiencia declarada por el fabricante para éste en el 50, 75 y 100 % de carga.

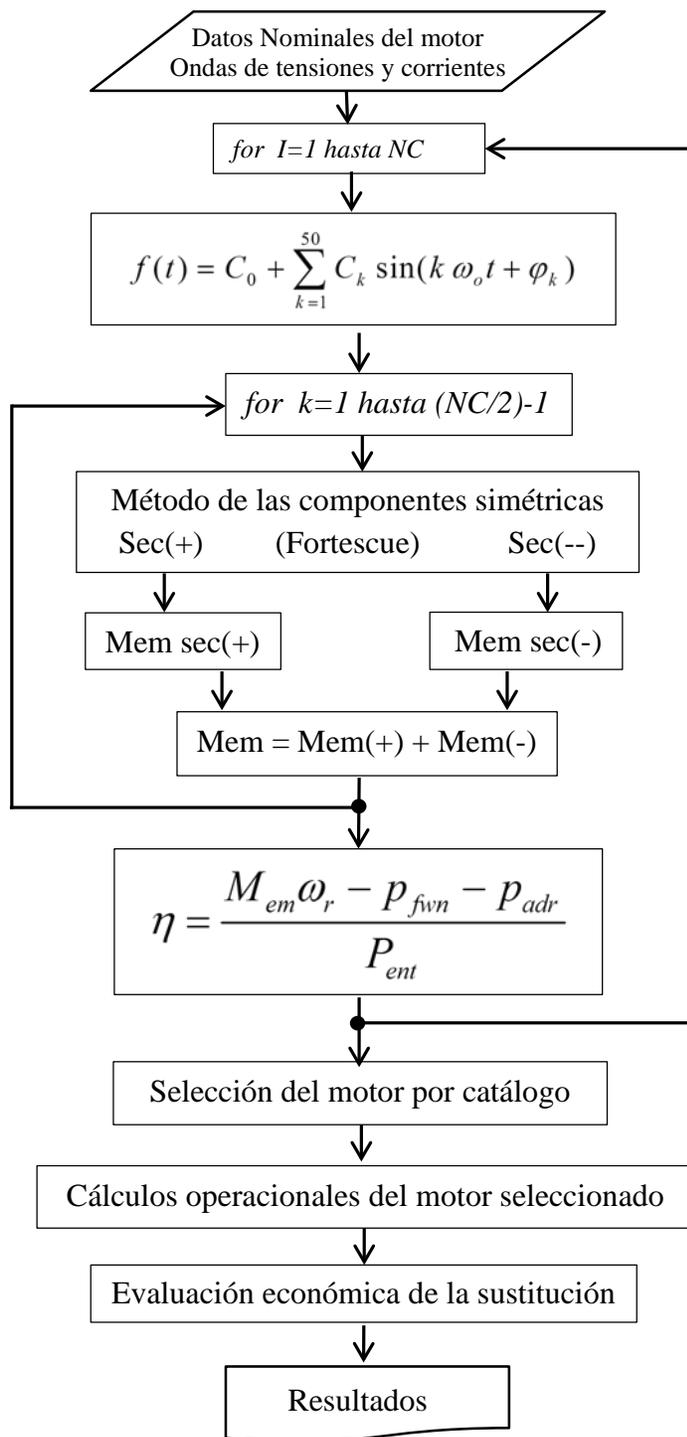


Figura 2.2. Algoritmo de evaluación del motor de inducción por el método del momento en el entrehierro con especificidad de armónicos y desbalance.

El algoritmo incorpora la selección de la potencia de los motores asíncronos para el servicio continuo, lo cual se justifica cuando la velocidad de la carga no varía apreciablemente, como es el caso de los motores de velocidad constante; en este caso la potencia se puede considerar directamente proporcional al momento y se puede aplicar el método de la potencia equivalente (de Armas *et al.*, 2011b), para el cual se utiliza la ecuación (2.21).

También el algoritmo contempla la evaluación económica de la sustitución de motores; en este trabajo se utiliza el método del Costo del Ciclo de Vida (CCV) como una opción en la evaluación energética del motor de inducción, utilizando la metodología de Borroto N. y Montegaudó Y. (2006).

La energía consumida por el motor en servicio  $kWh_{M.viejo}$  y la energía estimada por el motor seleccionado  $kWh_{M.nuevo}$  se determinan por la ecuación (2.29) según el gráfico de carga.

$$kWh_{\substack{M.viejo \\ M.nuevo}} = P_{\substack{1.M.viejo \\ 1.M.nuevo}} \cdot HTD \cdot DTA, \quad [\text{kWh}] \quad (2.29)$$

donde:  $HTD$  - Horas de Trabajo Diario;  $DTA$  - Días de Trabajo Anuales;  $P_{1.M.viejo}$ ,  $P_{1.M.nuevo}$  - potencia de entrada del motor en servicio y del seleccionado, respectivamente, en **kW**.

El costo inicial del motor seleccionado  $C_{Ini.M.nuevo}$  se toma por el valor en catálogo y para el motor en servicio  $C_{Ini.M.viejo}$ , en ausencia de su valor, se toma por interpolación en el catálogo.

Los gastos del motor en servicio  $G_{M.viejo}$  y del seleccionado  $G_{M.nuevo}$ , se calculan por la ecuación (2.30), evaluados por un vector del tiempo  $VU$ , desde uno hasta el valor máximo del tiempo de vida útil del motor, en **años**.

$$G_{\substack{M.viejo \\ M.nuevo}} = kWh_{\substack{M.viejo \\ M.nuevo}} \left( \text{usd/kWh} \right) \sum_{VU=1}^{VidaUtil} \frac{1}{(1+D)^{VU}}, \quad [\text{usd}] \quad (2.30)$$

donde:  $D$  - Tasa de descuento, en **pu** y  $\text{usd/kWh}$  - Costo de la Energía, en **usd/kWh**.

El costo del ciclo de vida (2.31) del motor en servicio  $CCV_{M.viejo}$  y del motor seleccionado,  $CCV_{M.nuevo}$ , se determinan por la suma del costo inicial y los gastos del motor.

$$CCV_{\substack{M.viejo \\ M.nuevo}} = C_{\substack{Ini.M.viejo \\ Ini.M.nuevo}} + G_{\substack{M.viejo \\ M.nuevo}} \quad (2.31)$$

En la ecuación del costo del ciclo de vida el primer término refleja los gastos capitales y el segundo los gastos operacionales por consumo de energía.

El costo del ciclo de vida diferencial  $CCV_{Diferencial}$ , ecuación (2.32), es la diferencia entre el costo del ciclo de vida del motor en servicio y del seleccionado, y refleja el ahorro o gasto obtenido por comparación de ambas variantes. Mientras mayor sea este valor más rentable es la inversión.

$$CCV_{Diferencial} = CCV_{M.viejo} - CCV_{M.nuevo} \quad (2.32)$$

El ahorro de energía por diferencia de potencia entre el motor en funcionamiento y motor seleccionado  $kWh_{ahorrado}$  se establece por la ecuación (2.33).

$$kWh_{ahorrado} = kWh_{M.viejo} - kWh_{M.nuevo} \quad (2.33)$$

El período simple de recuperación de la inversión  $PRI_{simple}$ , ecuación (2.34), no tiene en cuenta el costo del motor en funcionamiento, pero ofrece una idea del tiempo requerido para recuperar la inversión inicial a través del ahorro de energía por concepto de sustitución.

$$PRI_{simple} = \frac{C_{Ini.M.nuevo}}{Costo_{Anual}} = \frac{C_{Ini.M.nuevo}}{kWh_{ahorrado} \cdot (usd/kWh)} \quad (2.34)$$

Con la ecuación (2.34) se completa la evaluación técnico-económica de todos los motores de inducción en análisis, comparándolos con motores de mejor eficiencia.

### 2.3. Conclusiones parciales

Las correcciones a través de la descomposición armónica de Fourier y las transformaciones de Fortescue en el método del momento en el entrehierro precisan e introducen originalidad y rigor en la evaluación de la eficiencia de motores de inducción en redes contaminadas por armónicos y desbalance.

Por vez primera se propone la sustitución de un motor por un conjunto de motores de diferentes frecuencias y secuencias, en la aplicación del método del momento en el entrehierro y el algoritmo propuesto, además de estimar la eficiencia, contempla la selección del motor de inducción y la evaluación técnica-económica.

*Capítulo 3*  
*Resultados y discusiones.*  
*Casos de estudio*

## **CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES. CASOS DE ESTUDIO**

### **Introducción**

Este capítulo se estructura en cuatro partes principales; 1ro. Se valora el comportamiento del método del momento en el entrehierro de acuerdo con las características de las formas de ondas y sus resultados; 2do. Se toman los resultados experimentales realizado por (Bin *et al.*, 2006c) para comprobar la eficiencia del método clásico y de la variante propuesta que especifica el desbalance y la presencia de armónicos en las ondas; 3ro. Se comparan los resultados obtenidos por el método del momento en su forma clásica y con las correcciones realizadas para diferentes niveles de armónicos (THD<sub>v</sub>) y desbalance (DB<sub>v</sub>) en la tensión del suministro eléctrico; y 4to. Se aplica el método a la evaluación energética de motores industriales.

### **3.1. Consideraciones para la implementación del método del momento en el entrehierro en presencia de desbalance y armónicos**

Debido al incremento de las cargas no lineales las ondas de tensión y corrientes pueden tener valores medios diferentes de cero (asimetría con respecto al eje de abscisas), apareciendo en el desarrollo de Fourier las componentes de directa y de orden pares. Lo común en eléctrica es la simetría de las ondas y, por tanto, la existencia de solo las componentes impares.

Existen consideraciones con relación a las ondas de tensión y corrientes a la hora de aplicar la conocida ecuación (1.6) para el cálculo del momento electromagnético. Aquí se analiza la simetría de las ondas con respecto al eje de abscisas y la inclusión de armónicos seleccionados por diferentes criterios, sin pretender abarcar la totalidad de los casos. En esta investigación se toma un motor de inducción de rotor en jaula de ardilla con los siguientes datos nominales: tensión 220 V; corriente 73,74 A; potencia 22,5 kW; eficiencia 91 %; factor de potencia 88 %; velocidad 3550 rev/min; conexión en Y y motor clase de diseño B.

#### **1. Onda Simétrica Sin Armónicos (OSSA)**

Esta variante es aplicada formando las ondas a través de los valores efectivos de tensión y corriente, además de la potencia activa trifásica (de Armas *et al.*, 2011a). Por el método de los

coeficientes de desbalance complejos tanto para la corriente como para la tensión se obtienen los ángulos iniciales de ambas magnitudes, **no existen armónicos superiores**, sólo el fundamental considerando el desbalance por naturaleza del método.

## 2. Onda Simétrica con Todos los Armónicos [1, 3, 5, etc.] (OSTA)

Las formas de ondas de tensión y corrientes son **simétricas** con respecto al eje de abscisas y por tanto **no contienen componentes de directas ni de orden pares**, aunque se mantienen las componentes de tercer orden y sus múltiplos por desbalance de potencia [1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, etc.], se considera el desbalance por naturaleza del método y se utiliza la transformada de Fourier para obtener los componentes por armónicos. De existir las componentes de CD en las formas de ondas se realiza una previa separación.

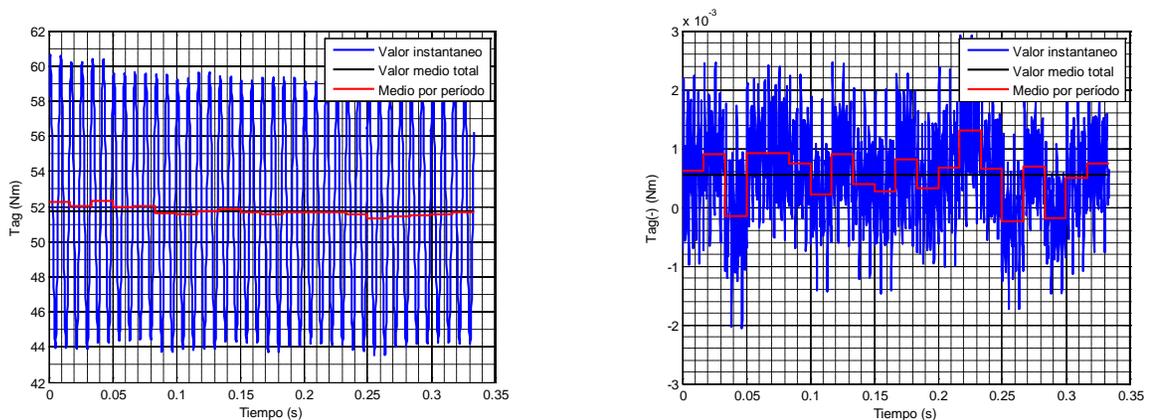


Figura 3.1. Momento electromagnético total y de secuencia negativa (OSTA)

Las oscilaciones del momento, Figura 3.1, se deben a la presencia del desbalance en las ondas, por tanto la conversión del sistema *ABC* al *DQO* no resultan magnitudes de directas.

## 3. Onda Simétrica con Armónicos Típicos [1, 5, 7, 11, 13, etc.] (OSAT)

Las formas de ondas de tensión y corrientes son simétricas con respecto al eje de abscisas y por tanto no contienen componentes de directas ni de orden pares. Dividen las componentes en secuencia positiva [1, 7, 13,  $6k+1$  para  $k = 1, 2, 3, \dots$ ]; secuencia negativa [5, 11, 17,  $6k+5$  para  $k = 1, 2, 3, \dots$ ], **no tiene en cuenta las componentes de tercer orden y sus múltiplos**. Se utiliza la transformada de Fourier para obtener los componentes de armónicos, además se considera el desbalance por naturaleza del método, Figura 3.2.

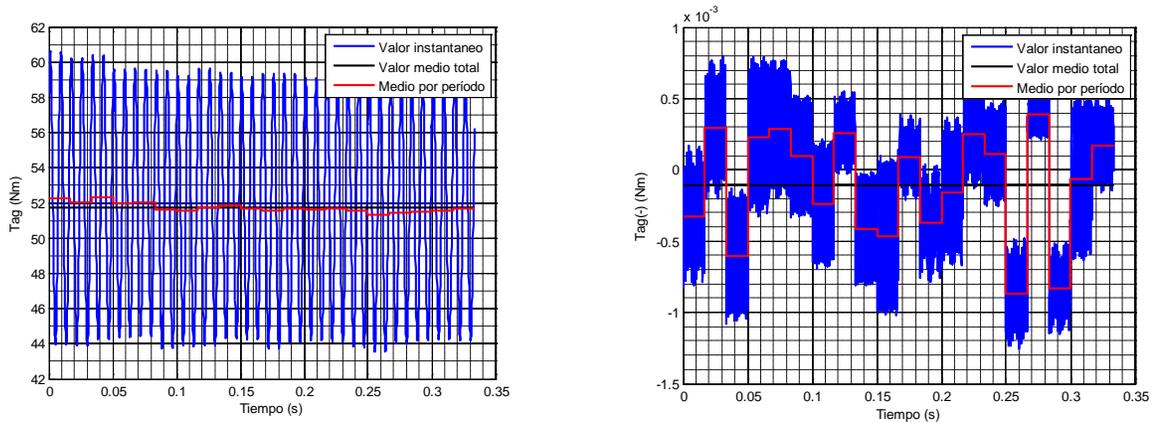


Figura 3.2. Momento electromagnético total y de secuencia negativa (**OSAT**)

Se mantienen las oscilaciones del momento debido a la presencia del desbalance en las ondas, aunque se manifiestan más concentrado por el efecto de la división.

#### 4. Onda Asimétrica con Todos los Armónicos [1, 2, 3, 4, 5, etc.] (**OATA**)

Las formas de ondas de tensión y corrientes no son simétricas con respecto a la abscisa y por tanto **contienen componentes de directas y de orden pares**, se mantienen las componentes de tercer orden y sus múltiplos por desbalance de potencia [1, 2, 3, 4, etc.]. Se utiliza la transformada de Fourier para obtener los componentes, además del desbalance por naturaleza del método. Se mantienen las oscilaciones del momento debido a la presencia de asimetría, semejante al caso de ondas simétricas con todos los armónicos [1, 3, 5, etc.] (**OSTA**); punto 2.

#### 5. Onda Asimétrica con Armónicos Típicos [1, 5, 7, 11, 13, etc.] (**OAAT**)

Las formas de ondas de tensión y corrientes no son simétricas con respecto al eje de abscisas y por tanto **contienen componentes de directas y de orden pares**, se mantienen las componentes de tercer orden y sus múltiplos por desbalance de potencia [sec(+)] 1, 7, 13,  $6k+1$  para  $k = 1, 2, 3, \dots$ ; [sec(-)] 5, 11, 17,  $6k+5$  para  $k = 1, 2, 3, \dots$ . Se utiliza la transformada de Fourier para obtener los componentes y se resume por armónico, considerando el desbalance por naturaleza del método.

hp = [1 7 13 19 25 31 37 43 49]; % Armónicos sec(+), momento motor

hn = [5 11 17 23 29 35 41 47 53]; % Armónicos sec(-), momento de frenado

Se mantienen las oscilaciones del momento debido a la presencia del desbalances, semejante al caso de onda simétrica con armónicos típicos [1, 5, 7, 11, 13, etc.] (OSAT); punto 3.

#### **6. Onda Simétrica con Todos Armónicos y Desbalance [1, 3, 5, etc.] (OSTAD)**

Las formas de ondas de tensión y corrientes son simétricas con respecto al eje de abscisas y por tanto **no contienen componentes de directas ni de orden pares**, aunque se mantienen las componentes de tercer orden y sus múltiplos por desbalance de potencia [1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, 17, etc.]. Se utiliza la transformada de Fourier para obtener los componentes, además del desbalance por naturaleza del método, se resume por secuencias positiva y negativa cada armónico aplicando el método de las componentes simétricas. En este caso desaparecen las oscilaciones del momento al considerarse sistemas trifásicos balanceados.

#### **7. Onda Asimétrica con Todos Armónicos y Desbalance [1, 2, 3, 4, 5, etc.] (OATAD)**

Las formas de ondas de tensión y corrientes no son simétricas con respecto a la abscisa y por tanto **contienen componentes de directas y de orden pares**, se mantienen las componentes de tercer orden y sus múltiplos por desbalance de potencia [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, etc.]. Se utiliza la transformada de Fourier para obtener los componentes y se resume por armónico, además del desbalance por naturaleza del método, se resume por secuencias positiva y negativa cada armónico aplicando el método de las componentes simétricas. Igual que en el caso anterior desaparecen las oscilaciones del momento al considerarse sistemas trifásicos balanceados.

Varios investigadores han realizado la comparación de los resultados del método del momento en el entrehierro, con respecto a los obtenidos experimentalmente, para demostrar la precisión del mismo, después de realizar transformaciones en su forma clásica (Bin *et al.*, 2006a; de Armas *et al.*, 2011b; Gharakhani, 2012). En lo adelante, la aplicación del método del momento en el entrehierro en su forma actual se hará referencia por **clásico** y cuando se aplique con las correcciones expuestas en el capítulo 2, se hará referencia por **corregido**.

A continuación se comparan los resultados que se obtienen por la forma clásica y la corregida para tres casos experimentales, lo cual sirve para verificar la precisión de los valores obtenidos por ambos métodos.

### 3.2. Comparación del método propuesto con respecto a los resultados experimentales

Para la validación experimental del método se toma de referencia el trabajo realizado por (Bin *et al.*, 2006c) y la página Web del mismo investigador [www.binlu](http://www.binlu) donde aparece la base de dato de las formas de ondas utilizadas en el experimento; las condiciones experimentales tienen un bajo contenido de armónicos y desbalance de tensión. Aquí se compara la efectividad del método del momento en el entrehierro para estimar la eficiencia en tres motores de inducción, sometidos a diferentes estados de carga. Para estos mismos motores se aplica el método con las correcciones en la descomposición armónica de Fourier y se utiliza el método de la componente simétrica para descomponer cada armónico en secuencias positiva y negativa.

Los parámetros nominales de los motores utilizados en el experimento se ofrecen en la Tabla 3.1

Tabla 3.1. Parámetros de los motores de inducción en experimento

	<b>Motor I</b>	<b>Motor II</b>	<b>Motor III</b>
<b>Marca</b>	Leeson	GE	Marathon
Potencia nominal de salida en (hp)	7,5	7,5	10
No de Catálogo	G140417	S231	U639
Fases	3-phase	3-phase	3-phase
Velocidad nominal (rpm)	1760	1755	1750
Tensión nominal de Línea (volts)	230/460	230/460	230/460
Corriente de carga nominal (amps)	20,0/10,0	18,2/9,1	25,6/12,8
Factor de potencia nominal	0,72	0,865	0,86
Eficiencia nominal	0,885	0,895	0,895
Resistencia del estator (ohms)	0,326	1,044	0,223
Diseño NEMA	B	A	B

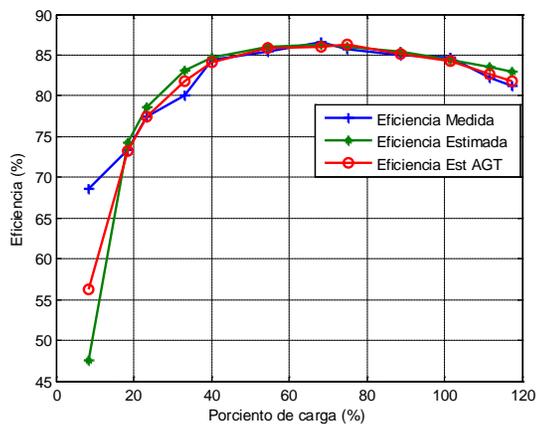
Fuente: (Bin *et al.*, 2006c)

El cálculo de las eficiencias estimada se realiza por el método de momento en el entrehierro no invasivo según (Bin *et al.*, 2006c) y a través de la propuesta de esta investigación. Las tensiones de línea y corrientes de fases se muestrean a la frecuencia (5 kHz para el Motor I y III, y a 2 kHz

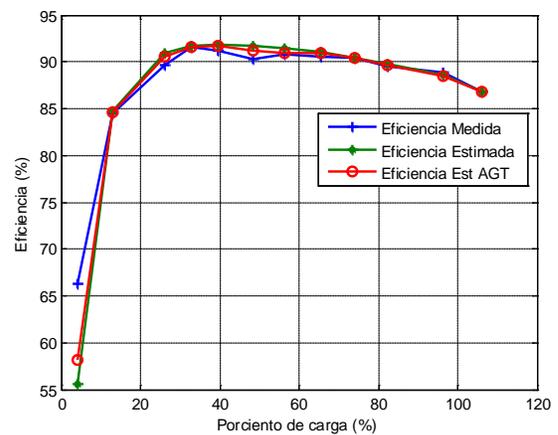
para el Motor II). Se utiliza la regla de Simpson para la integración numérica del flujo en el entrehierro. Previamente fueron separadas las componentes de secuencia cero.

En este estudio se presta atención a la operación de los motores de inducción con un nivel de carga de 40 al 90 % de su valor nominal. Para las condiciones de carga sumamente bajas y altas, no es muy necesaria una estimación precisa de la eficiencia del motor para tomar decisiones en la planificación. Puede predecirse de una curva de la actuación de motor típica que bajo estas condiciones el motor tiene las eficiencias bajas.

En el experimento, los tres motores se ensayan bajo varios niveles de carga, desde vacío hasta condición de sobrecarga. Las tablas I, II, y III del **Anexo A**, listan los resultados experimentales de los motores I, II, y III, respectivamente, incluyendo el porcentaje de carga, velocidad del rotor, las eficiencias del motor medida y estimada por las dos vías. La Figura 3.3 ilustra los valores estimados por el método del momento en el entrehierro en su forma clásica y corregida y, las eficiencias medidas contra el porcentaje de carga.



a) (LEESON 7.5 HP ODP)



b) (MARATHON 10 HP TEFC)

Figura 3.3. Eficiencia por tres vías: a) motor I y b) motor III

Para los tres motores, las eficiencias estimadas se corresponden estrechamente con las eficiencias medidas (dentro de 2% errores) durante el funcionamiento normal del motor (rangos de carga de 40% a 90% de carga nominal). Por otro lado, este método también da eficiencia relativamente exacta para carga muy baja (menos de 30% la carga nominal) y bajo condiciones de alto nivel de carga (mayor que 90% de la carga nominal).

Los resultados experimentales también confirman el hecho de que los datos de placa de un motor genéricos pudieran contener una cantidad grande de inexactitudes. Los resultados experimentales

de los motores I e III están de acuerdo con los datos de placa. Cuando el motor opera a la condición de carga nominal, la velocidad está cerca de su valor nominal. La eficiencia máxima ocurre a niveles de carga normales que son típicamente los valores que se diseñan para operar. Sin embargo, los resultados del Motor II muestran las inconsistencias obvias con los datos de placa. A la carga nominal, las caídas de la velocidad del rotor alrededor de 1640 rev/min, la cual está bien por debajo de la velocidad nominal de 1755 rev/min. La eficiencia máxima ocurre a alrededor de 30% de la carga nominal, lo cual es más bajo que el valor de placa deseado. Las pruebas repetitivas dan los resultados similares. Puede concluirse que los datos de la plantilla de motor genéricos contienen las inexactitudes significantes por el Motor II. Sin embargo, dado que el método del momento en el entrehierro propuesto confía en los voltajes terminales y corrientes principalmente, las inexactitudes en los datos de chapa no generan los errores obvios en las estimaciones de eficiencia.

Existe una alta correspondencia entre la eficiencia estimada por ambos métodos y la obtenida experimentalmente, por lo cual se recurre al error de los valores por ambos métodos con respecto a los experimentales para decidir cuál de ellos presenta mayor precisión; se han representados los errores en la Figura 3.4, a) para el motor I y en b) para el III. Se observa que el método con las correcciones propuestas tiene un menor error con respecto al valor experimental, en valores promedios: para el motor I 0,59 vs 1,15 y para el motor III 0,35 vs 0,56.

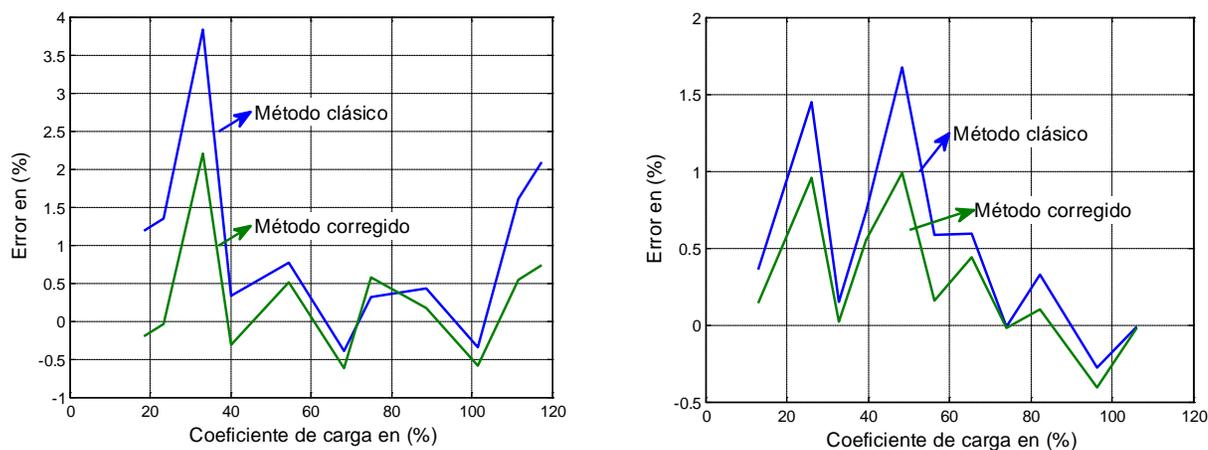


Figura 3.4. Errores relativos a los valores experimentales a) motor I, b) motor III

El error en la eficiencia estimada por el método del momento en el entrehierro con las correcciones por Fourier de las ondas de tensiones y corrientes y la especificación de las

componentes simétrica para el desbalance por cada armónico, cuando se compara con el valor obtenido experimentalmente es menor que aquel, el cual se produce cuando se consideran los aspectos del desbalance y los armónicos por naturalidad del método.

Los motores de inducción tienen por características que en el rango de potencia de 20 a 50 kW presentan el mejor comportamiento de acuerdo con la teoría general que aparecen en los textos al respecto, sin embargo no es así cuando se alejan de estos valores y se acercan a los extremos (1 y 1000 kW). Aunque los errores por ambos métodos se acerquen o sean iguales Figura 3.4, no significa que el método con las correcciones propuestas no tenga ventajas con respecto al método clásico, ya que permite identificar las pérdidas por armónicos y desbalance, y su contribución a la eficiencia; permite evaluar el momento resultante, dividir en armónico fundamental y armónicos superiores, los cuales no participan en la conversión electromecánica de energía.

Una vez demostrada la precisión del método con las correcciones, se investiga la influencia del contenido de armónico en las ondas de tensiones y corrientes, y cómo responde el mismo con respecto al método en su concepción clásica.

### **3.3. Respuestas del método del momento en el entrehierro en su versión clásica y corregida frente a los armónicos y el desbalance**

Se analizan los resultados obtenidos para tres condiciones diferentes de operación, a partir del método del momento en el entrehierro en su forma clásica y con las correcciones planteadas, para valorar la influencia de los armónicos y el desbalance en la eficiencia y el comportamiento energético del motor de inducción. Los datos nominales del motor de inducción son los siguientes: tensión 220 V; corriente 73,74 A; potencia 22,5 kW; eficiencia 91 %; factor de potencia 88 %; velocidad 3550 rev/min; conexión en Y y motor clase de diseño B.

1. **Normal:** los armónicos y el desbalance están muy por debajo de los valores admitidos como límites de acuerdo con las normas (Coeficiente de desbalance (DESB<sub>v</sub>) de 0,81 % y una distorsión armónica total de tensión (THD<sub>v</sub>) de 1,39 %. (**Anexo C, Figura C.1**)
2. **THD<sub>v</sub> y DESB<sub>v</sub> dentro de las normas y próximo a sus límites:** los armónicos y el desbalance de tensión están dentro de los valores admitidos y cerca de los límites de acuerdo con las normas (Coeficiente de desbalance (DESB<sub>v</sub>) de 2,25 % y una distorsión armónica total de tensión (THD<sub>v</sub>) de 4,12 %. (**Anexo C, Figura C.2**)

3. **THDv y DESBv fuera de las normas:** los armónicos y el desbalance de tensión están fuera de los valores admitidos por las normas (Coeficiente de desbalance (DESBv) de 5,80 % y una distorsión armónica total de tensión (THDv) de 6,55 %. (**Anexo C, Figura C.3**)

La Tabla 3.2 muestra los resultados operaciones del motor de inducción para las tres condiciones, por ambos métodos.

Tabla 3.2. Datos operacionales del motor para tres condiciones de operación

Parámetros	Simb	UM	THDv y DESBv muy inferior a las normas		THDv y DESBv en los límites de las normas		THDv y DESBv exceden las normas	
			Clásico	Corr.	Clásico	Corr.	Clásico	Corr.
Tensión en el estator	$V_1$	V	235,70	235,71	239,04	239,04	251,91	251,91
Corriente del estator	$I_s$	A	61,65	61,68	63,60	63,60	65,38	65,38
Potencia de entrada	$P_1$	kW	21,16	21,18	22,02	21,40	23,19	22,11
Potencia en el eje	$P_2$	kW	18,19	<b>18,54</b>	18,05	<b>18,54</b>	18,85	<b>18,54</b>
Pérdidas totales	$Z_p$	kW	2,98	2,64	3,98	2,86	4,34	3,58
Eficiencia	$E_f$	pu	0,86	0,88	0,82	0,87	0,81	0,84
Factor de potencia	$F_p$	pu	0,84	0,84	0,84	0,84	0,81	0,82
Velocidad del rotor	$n_r$	rpm	3543	3543	3543	3543	3543	3543
Momento en el eje	$M_2$	Nm	49,02	49,98	48,65	49,97	50,81	49,94
Coeficiente de Carga	$k_c$	pu	0,81	0,82	0,80	0,82	0,84	0,82
Desbalance de tensión	$DB$	%	0,81	<b>0,81</b>	2,25	<b>2,25</b>	5,80	<b>5,80</b>
THD de tensión	THDv	%		<b>1,39</b>		<b>4,12</b>		<b>6,55</b>
THD de corriente	THDi	%		2,61		15,36		25,48

Según los resultados de la Tabla 3.2, por el método corregido, la potencia de salida permanece constante, independientemente de las condiciones en que fueron determinadas, coincidiendo con el enunciado de que los armónicos y el desbalance no participan en la conversión electromecánica, sin embargo constituyen pérdidas como se reflejan en la fila “Pérdidas totales” (2,64; 2,86 y 3,58) kW y se refleja en el incremento de la potencia de entrada. Cuando se aplica el método en su forma clásica existen variaciones en la potencia de salida, lo cual no debía ocurrir ya que la misma está determinada por la carga; esta comparación ofrece una mayor veracidad al

método propuesto, Figura 3.5, donde “P1 Clásico”, “P2 Clásico” son las potencias de entrada y de salida por el método clásico y “P1 Corrección”, “P2 Corrección” las potencias de entrada y de salida por el método corregido; en el eje de la abscisa están los valores de la distorsión armónica total (THDv) y el desbalance (DBv) de tensión.

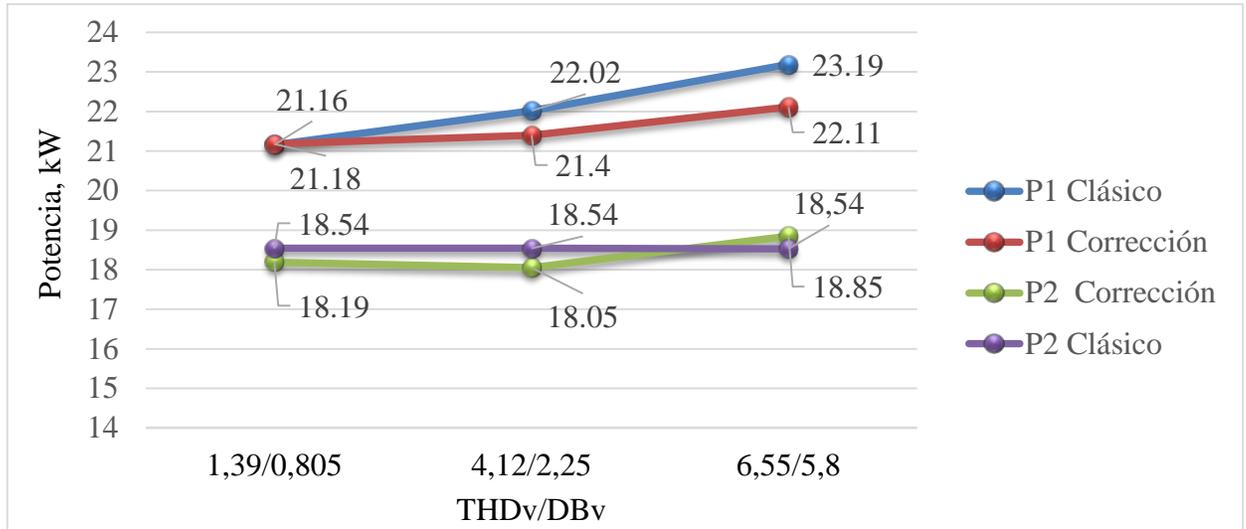


Figura 3.5. Potencia para las tres condiciones y por los dos métodos

Por la Figura 3.6 se puede observar que los valores de eficiencias varían significativamente entre ambos métodos cuando se enfrentan a iguales condiciones del suministro eléctrico: (0,86 vs 0,88 en condiciones normales; 0,82 vs 0,87 en condiciones límites y 0,81 vs 0,84 en condiciones extremas para el método clásico y el corregido, respectivamente).

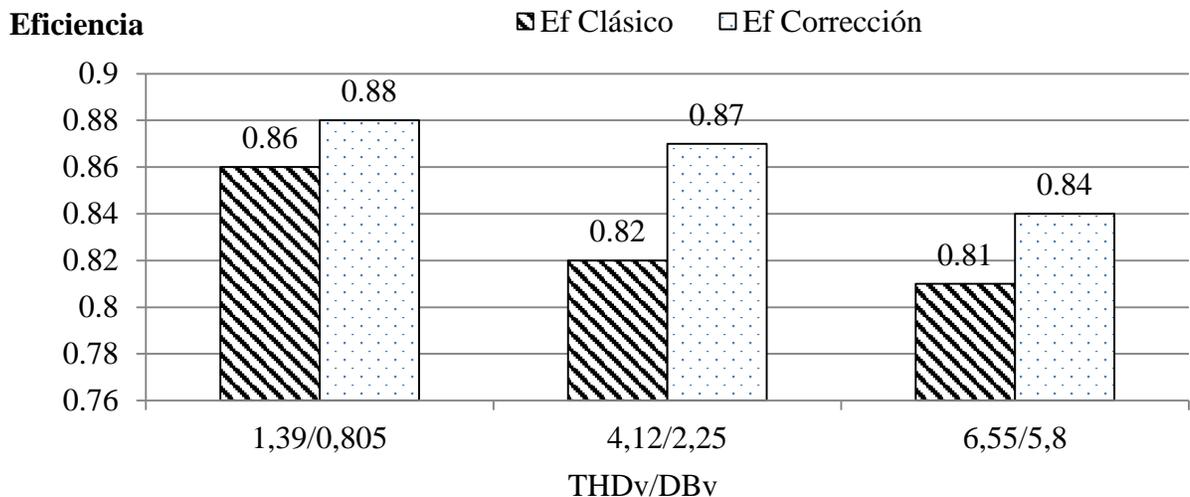


Figura 3.6. Eficiencia para las tres condiciones y por los dos métodos

En la Figura 3.6 “Ef Clásico” y “Ef Corrección” son las eficiencias por el método clásico y corregido, respectivamente; en el eje de la abscisa están los valores del contenido armónico y del desbalance de tensión.

Para las tres condiciones anteriores se grafican las eficiencias para 20 mediciones, por el método corregido, en la Figura 3.7.

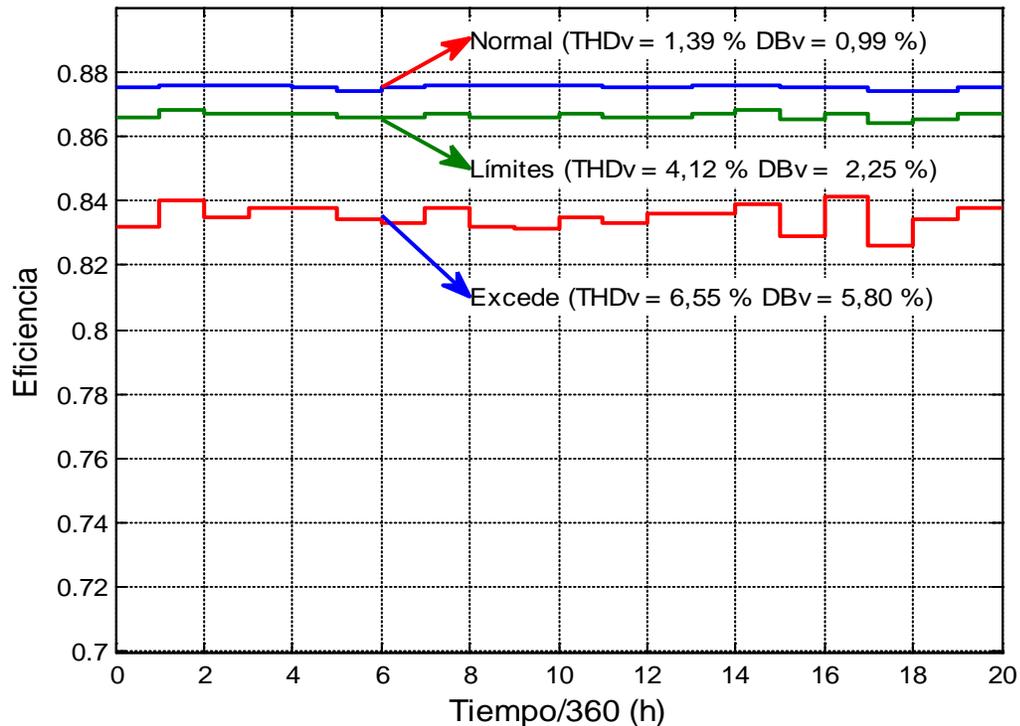


Figura 3.7. Eficiencia para tres condiciones del suministro eléctrico

De la Figura 3.7 se observa cómo a medida que empeoran las condiciones de armónicos y desbalance la eficiencia disminuye, agravándose cuando se exceden los límites de las normas (0,88; 0,087 y 0,84, respectivamente). Igual comportamiento se obtiene por el método clásico, con la diferencia en los valores de las eficiencias.

Pequeñas diferencias entre las eficiencias generan una gran diferencia en el ahorro de energía eléctrica que se estima a partir de las mismas, como se observa en la Figura 3.8: 1741,4 kWh para condiciones normales; 2136,6 kWh para valores dentro de normas y próximo al límite de las mismas y 3434,9 kWh cuando se exceden de los valores máximos recomendados por las normas, referente al nivel de armónico y desbalance en la fuente de suministro eléctrico.

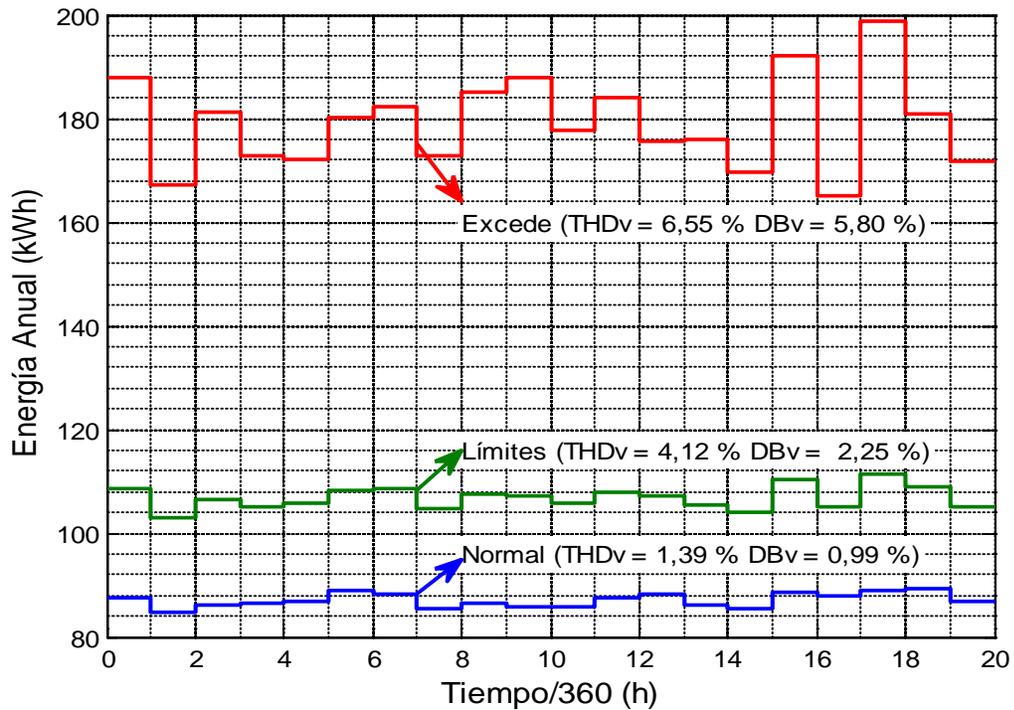


Figura 3.8. Energía estimada para tres condiciones del suministro eléctrico.

En la Tabla 3.3 se resume el ahorro de la energía por ambos métodos para las tres condiciones que se analizaron. Es de observar una gran diferencia entre los resultados del ahorro que se estima por ambos métodos. De gran importancia radica el hecho que cuando las condiciones se acercan a los límites de lo establecido por las normas se obtiene la mayor diferencia en los resultados por ambos métodos.

Tabla 3.3. Ahorro de energía en kWh para tres condiciones por los dos métodos

Parámetros	THDv y DESBv muy inferior a las normas	THDv y DESBv en los límites de las normas	THDv y DESBv exceden las normas
Ahorro por el método Clásico	2426,6	4254,6	4899,1
Ahorro por el método Corregido	1741,4	2136,6	3434,9
Diferencia entre ambos métodos	<b>685,2</b>	<b>2118,0</b>	<b>1464,2</b>

Hasta aquí se ha demostrado, que considerar la presencia de armónicos y desbalance en las ondas de tensiones y corrientes influye en la magnitud de la eficiencia que se determina por ambos

métodos en análisis. También, que el método corregido ofrece los mejores resultados desde el punto de vista de la transformación electromecánica de la potencia en el motor, cuando mantiene la potencia de salida independientemente de las condiciones de la fuente del suministro eléctrico. Una vez demostrada la efectividad del método del momento en el entrehierro, con las correcciones realizadas para tener en cuenta la presencia de armónicos y desbalance en la fuente de alimentación, en la estimación de la eficiencia del motor de inducción, es posible aplicarlo a la evaluación energética industrial.

Se toman dos instalaciones donde se aplica la metodología propuesta para la determinación de la eficiencia en el motor de inducción: en primer lugar se analiza el motor del ventilador de pulverización del secadero número cinco de la empresa Ernesto Che Guevara y en segundo lugar el motor de la bomba de agua del ISMM.

### **3.4. Evaluación energética del Motor de Inducción**

Los datos nominales del motor de pulverización del secadero número cinco de la ECG tiene los siguientes datos nominales: tensión 440 V; corriente 140,97 A; potencia 85 kW; eficiencia 92 %; factor de potencia 86 %; velocidad 1176 rev/min; conexión en Y y motor clase de diseño B. Existía un THD de 1,08 % y un desbalance en la tensión de 0,46 %.

Para determinar el potencial de ahorro asociado al motor se utiliza el método del análisis del costo del ciclo de vida, partiendo de los siguientes datos:

- 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

Para evaluar el comportamiento energético del motor de inducción se utiliza el método del momento en el entrehierro con la aplicación en Matlab dada en el capítulo 2. Además se realiza la selección del motor sustituto y se aplica el mismo gráfico de carga del motor actual para estimar el comportamiento.

### 3.4.1. Resultados para el motor de inducción MI-ECG

El motor MI-ECG tiene potencia nominal 85 kW. Las mediciones de las formas de ondas de tensión y corriente están contenidas en la base de datos MI-ECG.mat.

Para el motor MI-ECG, la estructura tiene la siguiente información

```
DE1 = DO: [3072x6 double]: Formas de ondas de tensiones y corrientes.
Df: [24x1 double]: Vector de frecuencia.
Dnr: []: Vector de velocidad (Vacía porque no hubo mediciones).
DN: [1x13 cell]: Celda de datos nominales
```

Los datos obtenidos para el motor en servicio se presentan en el **Anexo B, Tabla B1**. La Figura 3.9 muestra las características de potencia de entrada (P1), potencia de salida (P2), pérdidas totales (Zp), coeficiente de carga (kc) y la eficiencia (Ef) en función del tiempo, que determinan el comportamiento energético del motor de inducción MI-2-ECG. Es de notar que la eficiencia es alta y el coeficiente de carga bajo; que las variaciones en las diferentes magnitudes son despreciables de forma general, lo cual es característico de regímenes de trabajo con carga constante y, por tanto, posibilita utilizar la media aritmética como parámetro estadístico que caracterice las muestras y servir en la toma de decisiones.

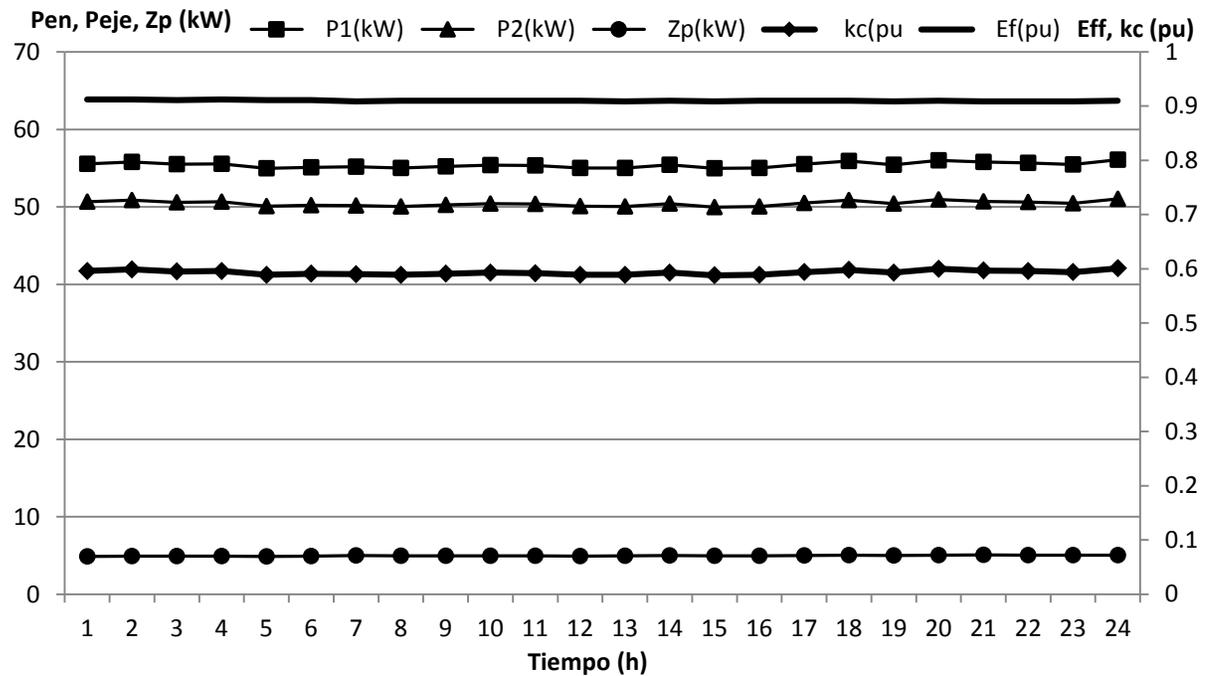


Figura 3.9. Comportamiento energético del motor MI-ECG

La aplicación del punto 11, del epígrafe 2.2 referido al procedimiento para la evaluación energética del motor de inducción cuando se utilizó el método del momento en el entrehierro, especificando la presencia de armónicos y desbalance, devuelve los datos según se muestra en Tabla 3.4, los cuales representan el comportamiento energético del motor de inducción seleccionado, para el gráfico de carga determinado en el eje del motor en servicio. Por cada coeficiente de carga  $k_c$ , se obtienen valores de eficiencia ( $\eta$ ), factor de potencia ( $\cos\phi$ ), potencia de entrada ( $P_1$ ), corriente del estator ( $I_1$ ), Momento electromagnético ( $M_{em}$ ), pérdidas totales ( $\sum p$ ) y velocidad del rotor ( $n_r$ ) según las ecuaciones (2.23) hasta la (2.28) por cada ciclo ( $NC$ ).

Los datos registrados para el motor seleccionado en la Tabla 3.4 se muestran para 24 ciclos en el **Anexo B, Tabla B.2**. A partir de los datos del comportamiento del motor en servicio, sobre la base de la aplicación del método del momento en el entrehierro que especifica la presencia de armónicos y desbalance, y luego de estimar cómo se comporta el motor seleccionado, se obtienen los valores medios que posibilitan un resumen de las características energéticas fundamentales de ambos, según se recogen en la Tabla 3.5.

Tabla 3.4. Ejemplo de los resultados del motor seleccionado

Ciclos	$NC_1$	$NC_2$	$NC_3$	$NC_4$	$NC_5$	---	$NC_i$	Valores Medios
$P_2$ , kW	50,73	50,97	50,66	50,74	50,19	---	50,26	50,33
$k_c$	0,907	0,911	0,905	0,907	0,897	---	0,898	0,9
$\eta$	0,958	0,957	0,958	0,958	0,958	---	0,958	0,958
$\cos \phi$	0,796	0,796	0,796	0,796	0,795	---	0,795	0,795
$P_1$ , kW	52,98	53,24	52,9	52,99	52,38	---	52,46	52,53
$I_1$ , A	84,86	85,19	84,75	84,92	84,08	---	84,15	84,11
$M_{em}$ , Nm	426,06	428,03	425,61	426,13	421,65	---	423,01	423,48
$\sum p$ , kW	2,246	2,272	2,239	2,247	2,192	---	2,199	2,205
$n_r$ , rev/min	1194	1193	1193	1194	1194	---	1191	1192

La Tabla 3.5 presenta un resumen de los resultados para el motor MI-ECG, después de aplicar el método del momento en el entrehierro y estimar el comportamiento del motor seleccionado, donde se destaca un bajo coeficiente de carga del motor en servicio,  $k_c = 0,59$ .

Tabla 3.5. Datos operacionales y nominales del motor en servicio y del seleccionado

Parámetros	Simbología	UM	Motor en servicio		Motor seleccionado	
			Real	Nominal	Estimado	Nominal
Tensión valor promedio	$V_l$	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	$E_f$	pu	0,91	0,92	0,96	0,94
Factor de potencia medio	$F_p$	pu	0,64	0,86	0,80	0,80
Velocidad media del rotor	$N_r$	rev/min	1183	1176	1193	1185
Momento medio en el eje	$M_2$	Nm	406,97	690,26	403,88	450,87
Coefficiente de carga	$k_c$	pu	<b>0,59</b>		0,90	
Coefficiente de desbalance	$dv$	%	0,46			
THD medio tensión	$THDV$	%	2,08			
THD medio corriente	$THDI$	%	4,09			

Junto a los datos operacionales se presentan los nominales de ambos motores, lo cual permite deducir en cuánto se diferencian del estado de carga recomendado por el fabricante. La confrontación entre los resultados de ambos motores establece la posibilidad de mantener el motor en servicio o sustituirlo por el seleccionado; la potencia nominal del motor seleccionado es 55,95 kW vs 85 kW, lo cual evidencia una posibilidad de ahorro por concepto de reducción de potencia requerida por la carga.

Las principales características que determinan el comportamiento energético del motor de inducción MI-ECG, se presentan en las siguientes figuras.

La Figura 3.10 muestra el comportamiento de la potencia de entrada para el motor en funcionamiento, con valor medio de 55,41 kW y el estimado para el seleccionado con 52,65 kW, diferencia de 2,76 kW visto como una fuente de ahorro por la sustitución. El momento electromagnético Figura 3.11, también muestra la diferencia entre ambos motores (435,19 Nm vs 412,04 Nm), debido a la reducción de corriente del motor por la disminución de potencia.

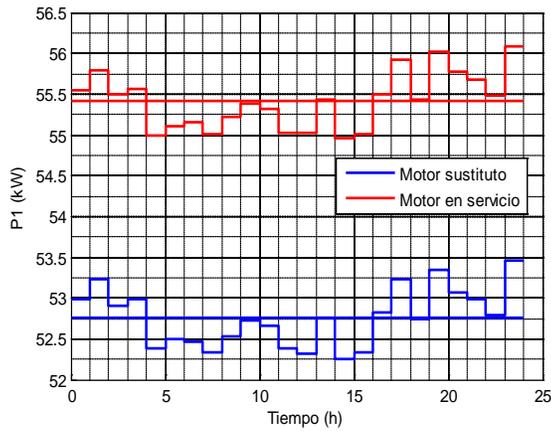


Figura 3.10. Potencia de entrada

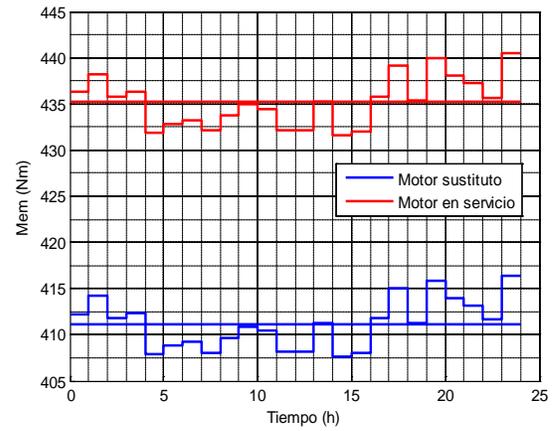


Figura 3.11. Momento en el entrehierro

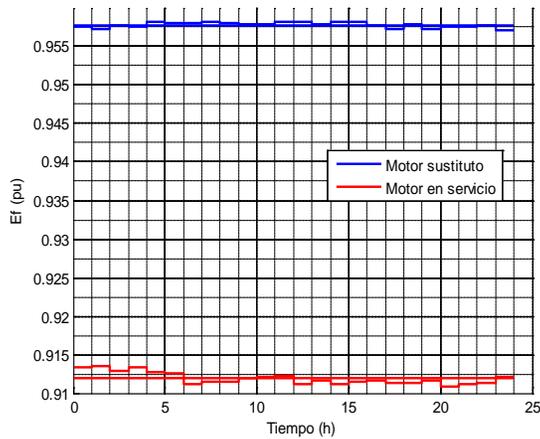


Figura 3.12. Eficiencia

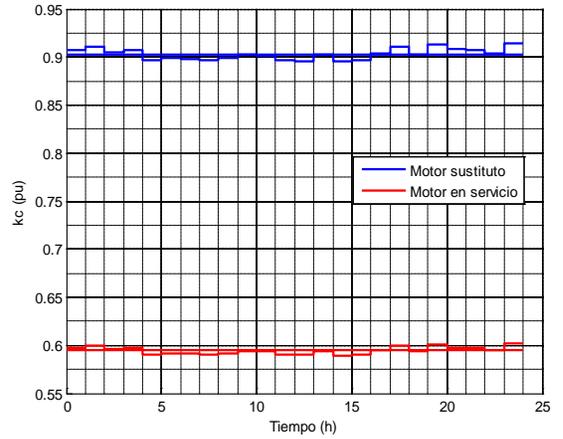


Figura 3.13. Factor de carga

La Figura 3.12 muestra el comportamiento de la eficiencia para el motor en funcionamiento, con valor medio de 0,91 y el estimado para el seleccionado con 0,958, diferencia de 0,048 a favor de este último. El factor de carga Figura 3.13 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 3.14 muestra el comportamiento anual de la energía consumida en 8760 hs para el motor en servicio, con valor medio de 19948,473 kWh y total 478763,35 kWh, y un estimado para el motor seleccionado de 18954,2 kWh y total 454900,776 kWh, diferencia media de 994,274 kWh y ahorro total de 23862,574 kWh, Figura 3.15, visto como ahorro por sustitución.

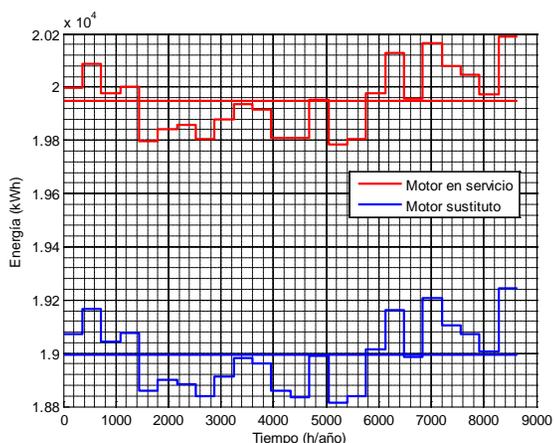


Figura 3.14. Energía anual

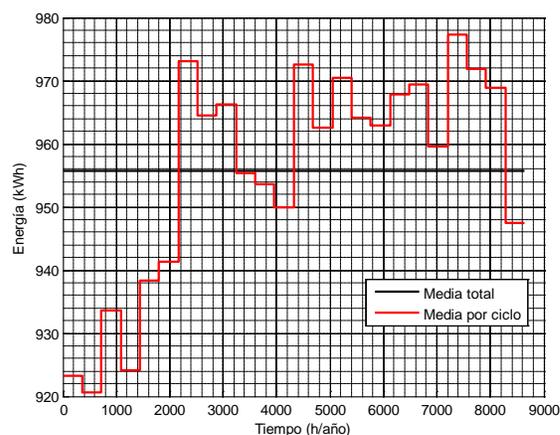


Figura 3.15. Ahorro de energía anual

Como resultado de la sustitución del motor en servicio 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). La velocidad prácticamente permanece constante, por tanto el momento no tiene variación considerable. Estas y otras magnitudes son resumidas en la Tabla 3.5.

Los elementos, hasta aquí plasmados, unido a las características del motor seleccionado demostraron que, técnicamente, es posible la sustitución del motor en servicio; resta una evaluación económica que lo justifique.

### ***Evaluación económica y potencial de ahorro asociado al motor de inducción MI-ECG***

En la evaluación económica se utiliza el método del Costo del Ciclo de Vida (CCV) según las ecuaciones 2.30 hasta la 2.36. La Tabla 3.6 recoge los datos iniciales del cálculo económico y los resultados referidos al CCV obtenido para el motor MI-ECG.

Tabla 3.6. 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

Datos de entrada para el cálculo económico			Resultados del costo del ciclo de vida		
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

La Tabla 3.7 muestra a modo de resumen los resultados para la evaluación del potencial de ahorro de energía a través del motor de inducción MI-ECG. Se comparan los resultados de la energía anual consumida por el motor real y se estima para el motor seleccionado.

Tabla 3.7. Resumen de energía anual y por día para MI-ECG

<i>Motor</i>	<i>Consumo de energía anual</i>		<i>Ahorro de energía anual (kWh)</i>	<i>Evaluación económica</i>	
	Motor en Servicio (kWh)	Motor Propuesto (kWh)		CCV (USD)	PRI (años)
MI-ECG	478763,350	454900,776	23862,574	2514,97	3,36

Existe un potencial de ahorro por la sustitución del motor en servicio de 85 kW, de 23,86 MWh anualmente; el Costo del Ciclo de Vida diferencial de 2514,97 USD, muestra que durante el tiempo de trabajo esperado (12 años) es ventajosa la sustitución y por último el tiempo de recuperación de la inversión de 3,36 años justifica la inversión.

### 3.4.2. Motor bomba del ISMM

Los resultados de la evaluación por el método del momento en el entrehierro sin considerar los armónicos y el propuesto, que incluye los armónicos, para el motor que acciona la bomba del ISMM, se muestran en la Tabla 3.8, donde se aprecian las diferencias entre las eficiencias, el factor de potencia y la potencia en el eje, entre otras. Para este motor el desbalance de tensión es de 0,99% según NEMA (NEMA, 2004b) y la distorsión armónica total THD (IEEE Standard 519, 1992) de tensión es de 1,39%

Tabla 3.8. Resultados para el motor que acciona la bomba del ISMM

Parámetros	Nominales	Motor en servicio (MF)		Motor sustituto (MN)	
		Sin Armónicos	Con Armónicos	Real Estimado	Nominales
Tensión (V)	220	235,69	235,71	235,71	220,00
Corriente (A)	73,74	61,61	61,63	56,60	60,00
Potencia (kW)	24,73	21,48	21,18	20,33	20,34
Potencia (kW)	22,50	19,01	18,72	18,65	18,65
Pérdidas (kW)	2,23	2,42	2,46	1,69	1,69
Eficiencia (pu)	0,91	0,89	0,88	0,92	0,92
cosφ (pu)	0,88	0,86	0,84	0,88	0,88
Momento (Nm)	60,53	51,10	50,27	50,62	50,52

En la Figura 3.16 se representa el Momento vs tiempo, correspondiente a secuencia positiva, el valor medio es de 52,85 Nm, valor mínimo de 52,31 Nm y máximo 53,64 Nm, con una baja desviación estándar de 0,353 Nm, debido al trabajo con una carga prácticamente constante, como sucede en bombas y la tensión con bajo nivel de armónicos y asimetría.

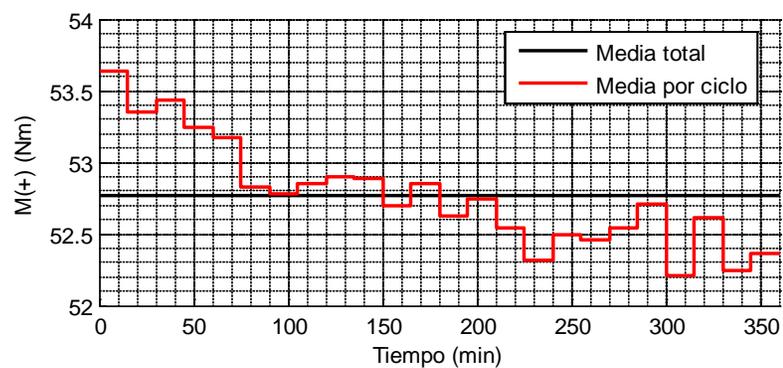


Figura 3.16. Momento de secuencia positiva

La Figura 3.17 representa el Momento vs tiempo para secuencia negativa, los valores máximos 13,9 mNm, mínimos 9,39 mNm y medio de 11,08 mNm, y desviación estándar de 1,194 mNm.

Estos valores, reducidos, se deben a poco contenido de armónicos y desbalance menor de 5% en la onda de tensión, de acuerdo con la norma IEEE 112 – 2004 (IEEE Standard 112, 2004).

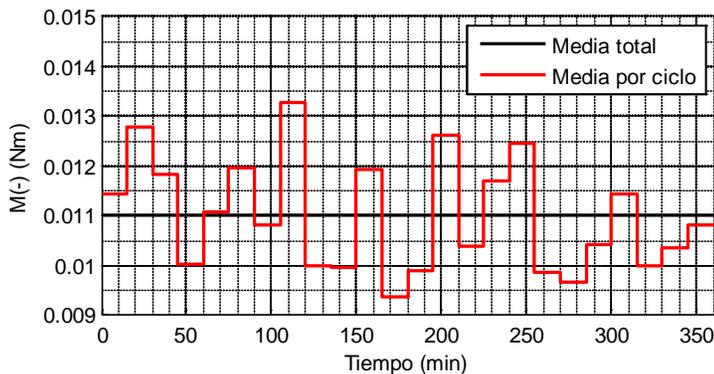


Figura 3.17. Momento de secuencia negativa

La Figura 3.18 muestra el comportamiento de la potencia de entrada vs tiempo de medición. En valores reales, obtenido de las mediciones, para el motor en servicio (MF) con promedio de 21,19 kW y en valores estimados para el motor sustituto (MS) con promedio de 20,33 kW. Las ligeras variaciones con respecto al valor medio está dado por el carácter poco variable de la carga, y la diferencia en potencia entre ambos motores, por desigualdad de potencias nominales (22,5 kW del MF vs 18,65 kW del MS).

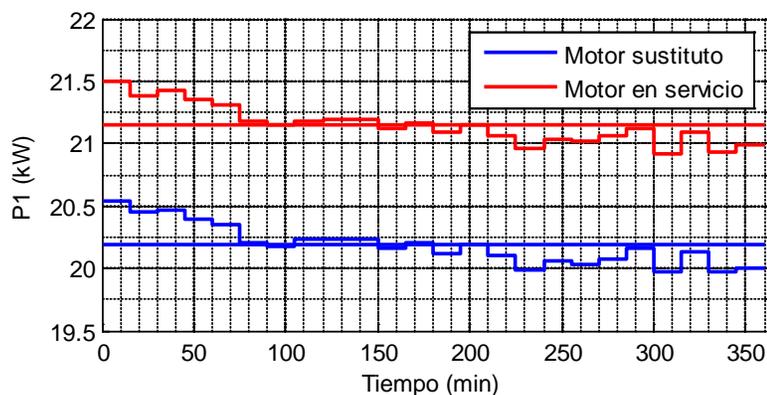


Figura 3.18. Potencia de entrada real y estimada

La Figura 3.19 muestra el comportamiento de la eficiencia vs tiempo de medición, en valores reales para el motor en servicio (MF) y en valores estimados para el motor sustituto (MS), se observa la diferencia entre ambos motores y en término de promedios (0,88 MF vs 0,917 MS), mostrando mayor valor para el motor sustituto, significando la posibilidad de ahorrar energía, por reducción de pérdidas.

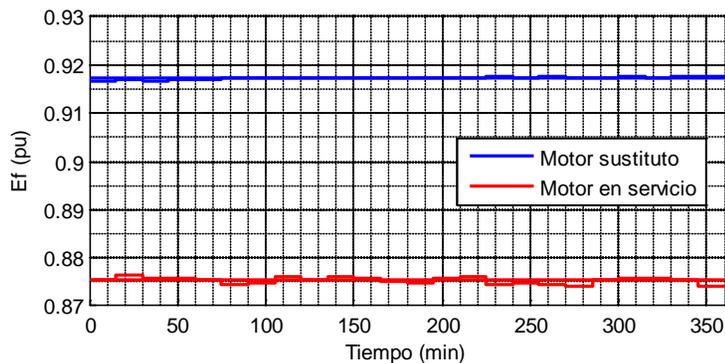


Figura 3.19. Eficiencia real y estimada

Para el análisis de este motor se ha seleccionado 12 horas de trabajo diarias y 300 días anuales, dando un Costo de Ciclo de Vida diferencial de 2145,81 USD, con un período de recuperación de la inversión (*PRI*) de 4,98 años. Con la selección del nuevo motor es posible reducir las pérdidas, por disminución de la corriente demandada. En la Tabla 3.8 se muestran los datos del comportamiento estimado promedio del motor sustituto, menor corriente, menores pérdidas y mayor eficiencia que el motor actual.

El empleo del procedimiento propuesto en este trabajo permite el desarrollo de dos tipos de programas de ahorro de energía; uno de reajuste de capacidades, remodelación y mejoramiento energético y otro que permite evaluar la eficiencia de las cargas accionadas en las empresas. Esto se debe a que la potencia desarrollada en el eje del motor es la potencia de entrada al dispositivo. En estas condiciones si se logra medir la potencia de salida de la bomba, por ejemplo, se puede determinar la eficiencia de éstos y la del conjunto motor carga (de Armas *et al.*, 2011a).

No es común realizar este análisis con una herramienta de campo como lo permite la desarrollada en este trabajo y que su aplicación es más relevante en estos tiempos de incremento de las cargas

no lineales, incremento del costo de la energía, dificultades financieras y deterioro creciente del medioambiente.

### **3.5. Conclusiones parciales**

Comparando con los resultados experimentales en los motores analizados, se obtiene un error de 0,47 % en los valores de la eficiencia por la variante corregida del método del momento en el entrehierro, menor al 0,85 % obtenido por la aplicación en su forma clásica, lo cual demuestra la precisión del método propuesto.

Por el método propuesto, la potencia de salida permanece constante, independientemente de las condiciones en que fueron determinadas, mientras que existen variaciones en la misma por el método en su forma clásica; esta comparación ofrece una mayor veracidad al método propuesto, puesto que los armónicos y el desbalance no participan en la conversión electromecánica, sin embargo constituyen pérdidas.

Los valores de eficiencias disminuyen con el incremento de armónicos y desbalance en la fuente del suministro eléctrico, sin embargo sus magnitudes resultan diferentes según las vías de aplicación del método del momento en el entrehierro; 0,86 por el método propuesto comparado con 0,83 por el método en su forma clásica.

La aplicación del método presentado evalúa las prestaciones energéticas de los motores asíncronos en explotación que operen a velocidad constante o ligeramente variable y permite iniciar proyectos de sustitución de motores y perfeccionamiento energético.

*Conclusiones y  
recomendaciones*

## **CONCLUSIONES GENERALES**

El error de cuantificación de la potencia de entrada, el flujo magnético y de la eficiencia estimada en redes contaminadas por armónicos y desbalance, dado por la solución numérica de las integrales en la ecuación del momento en el entrehierro durante la aplicación del método en su forma clásica, se resuelve a través del modelo matemático de este último con la descomposición de Fourier y las transformaciones de Fortescue en las ondas de tensiones y corrientes, las cuales introducen originalidad y rigor en la evaluación de la eficiencia de motores de inducción.

El error promedio de 0,47 % en los valores de la eficiencia que se obtienen por la variante corregida del método del momento en el entrehierro, menor que 0,85 % obtenido por su forma clásica, cuando se compara con los resultados experimentales en los motores analizados y, la obtención de una potencia de salida constante independientemente de las condiciones en que fueron determinadas, demostró mayor precisión y veracidad al método propuesto.

El procedimiento que propone la sustitución de un motor por un conjunto de motores de diferentes frecuencias y secuencias, en la aplicación del método del momento en el entrehierro sobre un algoritmo que estima la eficiencia, permite evaluar las prestaciones energéticas de los motores asíncronos en explotación que operen a velocidad constante o ligeramente variable e iniciar proyectos de sustitución de motores y perfeccionamiento energético.

La variante del método del momento en el entrehierro con las correcciones por descomposición armónica de Fourier y transformaciones de Fortescue para el desbalance es efectiva en la determinación de la eficiencia de motores de inducción con un suministro eléctrico contaminado por armónicos y desbalance.

## **RECOMENDACIONES**

1. Precisar la dependencia de las pérdidas en el acero del motor de inducción de la frecuencia de la tensión de alimentación para la corrección del error que presupone considerarla constante durante la aplicación del método del momento en el entrehierro propuesto.
2. Extender el método del momento en el entrehierro propuesto a la evaluación energética de motores de inducción accionados por variadores de velocidad.

# *Referencias bibliográficas*

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIELLO, M.; A. CATALIOTTI & S. NUCCIO. 2005.** An induction motor speed measurement method based on current harmonic analysis with the chirp-Z transform. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 54, 1811-1819.
- ATKINSON, D.; P. ACARNLEY & F. W. JOHN. 1991.** Observers for Induction Motor State and Parameter Estimation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 21(6), 1119-1127.
- BECNEL, C. L. & E. AL. 1987.** Determining motor efficiency by field testing. *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, IA(23), 440-443.
- BENSALEM, Y.; W. ABBOUD; L. SHITA & M. N. ABDELKRIM. 2008.** A Sensorless Neural Network Speed Control of Induction Motor Drive. *International Journal of Signal Control and Engineering Application*, 1(2), 150-158.
- BIN, L.** Energy usage evaluation and condition monitoring for electric machines using wireless sensor network. In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy School of Electrical and Computer Engineering, 2006.
- BIN, L.; T. HABETLER, G. & R. HARLEY, G. . 2006a:** 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*. vol. 3, p. 1533-1540.
- BIN, L.; T. HABETLER, G. & R. HARLEY, G. 2006b.** A survey of efficiency-estimation methods of in-service induction motors. *IEEE Transaction on Industry Applications*, 42(4), 924-933.
- BIN, L.; G. H. THOMAS & G. H. RONALD. 2006c:** 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*.
- BIN, L.; G. H. THOMAS & G. H. RONALD. 2006d.** A survey of efficiency-estimation methods of in-service induction motors. *IEEE Trans. Ind. Appl.*, 42(4), 924-933.
- BIN, L.; C. WENPING; I. FRENCH; K. J. BRADLEY, et al. 2007:** Non-Intrusive Efficiency Determination of In-Service Induction Motors using Genetic Algorithm and Air-Gap Torque Methods. In *Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE*. New Orleans, LA p. 1186 - 1192

- BLASCO, R.; G. M. ASHER; M. SUMNER & K. J. BRADLEY. 1996.** Performance of FFT-rotor slot harmonic speed detector for sensorless induction motor drives. *Proceedings of the IEEE Electric Power Applications*, 143, 258-268.
- BLASCO, R.; M. SUMNER & G. M. ASHER. 1994:** Speed measurement of inverter fed induction motors using the FFT and the rotor slot harmonics. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives*. p. 470-475.
- BOGLIETTI, A.; P. FERRARIS; M. LAZZARI & F. PROFUMO. 1993:** Induction motor equivalent circuit parameters determination from standard tests made with inverter supply. In.: Sixth International Conference, vol. Issue, p. 271 – 276.
- BONNETT, A. H. 1994.** An update on ac induction motor efficiency. *IEEE Transaction Industrial Application*, 30, 1362–1372.
- BORROTO N., A. E. & J. P. MONTEGAUDO Y. 2006:** *Gestión y Economía Energética*. Universitaria Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba. ISBN ISBN 959-257-114-7.
- CAO, W. 2009.** Comparison of IEEE 112 and New IEC Standard 60034-2-1. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 24(3), 802-808.
- CATHEY, J. J. 2003:** *Electric Machines: Analysis and Design Applying MATLAB*. McGraw-Hill, New York USA.
- COSTA M, A. & OTROS. 2005:** Determinación Experimental de los Parámetros del Motor de Inducción Trifásico Considerando la Variación de los Parámetros del Rotor. In *XII Simposio de Ingeniería Eléctrica*. Santa Clara, Cuba.
- COSTA M, A. & M. VILARAGUT. 2004:** Determinación del comportamiento energético del motor de inducción a partir de sus datos de catálogo y lectura de las corrientes del estator. In *III Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente*. Cienfuegos.
- CUMMINGS, P. G.; W. D. BOWERS & W. J. MARTINY. 1981.** Induction motor efficiency test methods. *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, IA-17, 253–272.
- DA SILVA, A. M. 2006.** Induction motor fault diagnostic and monitoring methods. Milwaukee, Wisconsin.
- DE ABREU, J. P. G. & A. E. EMANUEL. 2002.** Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and imbalance: loss of useful life and its estimated cost. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38(1), 12-20.

- DE ALMEIDA, A. & F. FERREIRA. 2000.** Efficiency Testing of Electric Induction Motors. Available from Internet:<[http://www.clasponline.org/download/Energy\\_Testing/2000/116/Almeida\\_paper.pdf](http://www.clasponline.org/download/Energy_Testing/2000/116/Almeida_paper.pdf)>.
- DE ALMEIDA, A. I. & COL. 2002.** Comparative analysis of IEEE 112-B and IEC 34-2 efficiency testing standards using stray load losses in low-voltage three-phase, cage induction motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38(2), 608-614.
- DE ALMEIDA, A. T. & P. FONSECA. 2000:** Characterisation of EU Motor Use. In SPRINGER ed. *Energy Efficient Improvements in Electric Motors and Drives*. Berling, p. 134-167.
- DE ALMEIDA, A. T.; P. FONSECA; F. FERREIRA & E. ALL. 2000.** Improving the Penetration of Energy-Efficient Motors and Drives. European Commission, Directorate-General.
- DE ARMAS, M.; J. GÓMEZ & P. VIEGO. 2011a:** Evaluación de Motores en Servicio. In *Convención de Ingeniería Eléctrica CIE2011*. Santa Clara, Cuba.
- DE ARMAS, M.; J. GÓMEZ & P. VIEGO. 2011b:** Evaluación de Motores en Servicio. In *Convención de Ingeniería Eléctrica CIE2011*. Santa Clara, Cuba.
- DE ARMAS, M. A. & Y. OTROS. 2006:** Análisis energético de máquinas asincrónicas. Teoría de los campos rotatorios. In *Conferencia internacional Ingeniería Eléctrica*.
- DE LA ROSA, E. V. 1998.** Metodología para la determinación y mejoramiento de los motores asincrónicos en la industria. Camagüey.
- DE LA ROSA, M. E.; F. P. VIEGO & M. A. COSTA. 2007.** Incertidumbre en la evaluación del ahorro de energía por sustitución de motores eléctricos. *Ingenierías*, X(35), 27-31.
- DEPARTMENT OF ENERGY, U. S. 1998.** United States industrial electric motor systems market opportunities assessment.
- DOUGLAS, J. G. 1997.** Efficacy of methods for estimating in-service motor efficiency. Available from Internet:<<http://www.dynamics-research.com/MAS1000/ITMAS-1000.htm>>.
- EGUILUZ, L. I.; P. LAVANDERO; M. MAÑANA & P. LARA. 1999a.** Performance Analysis of a Three-phase Induction Motor under Non-sinusoidal and Unbalanced Conditions. Available from Internet:<[http://www.diee.unican.es/pdf/gijon99\\_2.pdf](http://www.diee.unican.es/pdf/gijon99_2.pdf)>.
- EGUILUZ, L. I.; P. LAVANDERO; M. MAÑANA & P. LARA. 1999b.** Performance Analysis of a Three-phase Induction Motor under Non-sinusoidal and Unbalanced Conditions. Available from Internet:<[http://www.diee.unican.es/pdf/gijon99\\_2.pdf](http://www.diee.unican.es/pdf/gijon99_2.pdf)>.

- FERRAH, A.; K. J. BRADLEY & G. M. ASHER. 1992.** An FFT-based novel approach to noninvasive speed measurement in induction motor drives. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 41, 797-802.
- FERRAH, A.; P. J. HOGBEN-LAING; K. J. BRADLEY; G. M. ASHER, et al. 1997:** The effect of rotor design on sensorless speed estimation using rotor slot harmonics identified by adaptive digital filtering using the maximum likelihood approach. In *Proceedings of the Thirty-Second IAS Annual Meeting*. vol. 1, p. 128-135.
- FERREIRA, F. & A. DE ALMEIDA. 2008:** Considerations on In Field Induction Motor Load Estimation Methods. In *18th Inter. Conf. on Electrical Machines (ICEM'08), Conf. Proc.* Vilamoura, Portugal.
- FIGURA, R.; E. SZYCHTA & L. SZYCHTA. 2011.** In-Service Efficiency Estimation with the use Modified Air-Gap Torque Method for Squirrel-Cage Induction Motor. *Electronics and Electrical Engineering*, 8(114), 51 - 56.
- FITZGERALD, A. E.; C. J. KINGSLEY & S. D. UMANS. 2003:** *Electric Machinery*. McGraw-Hill, New York USA.
- GHAI, N. K. 1999.** IEC and NEMA standards for large squirrel-cage induction motors. A comparison. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 14(3), 545-552.
- GHARAKHANI, A. & P. PILLAY. 2011:** A novel evolutionary based in-situ efficiency estimation technique for induction machines working with unbalanced supplies In *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International* Niagara Falls, ON p. 1563 - 1568
- GHARAKHANI, A. S.** Efficiency estimation of induction machines with limited measurements. Ph.D. Concordia, 2012.
- GÓMEZ, J.; E. QUISPE; M. DE ARMAS & P. VIEGO. 2008.** Estimation of induction motor efficiency in-situ under unbalanced voltages using genetic algorithms. *Proc. IEEE Int. Conf. Electr. Mach.*, 1-4.
- GÓMEZ, S. J. R.** Determinación de la Eficiencia de los Motores Asíncronos con Tensiones Desbalanceadas en Condiciones de Campo. Dr.C., 2006.
- GRAINGER, J. J. & J. WILLIAM D. STEVENSON. 1996:** *Análisis de sistemas de potencia* edited by M. AW-HILL. Mexico. ISBN 0-07-06 1293-5.

- GRAY, G. G. & W. J. MARTINY. 1996.** Efficiency testing of medium induction motors. A comment on IEEE Std 112-1991. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 11(3), 495-499.
- HENAO, H.; H. RAZICK & G. A. CAPOLINO. 2005.** Analytical Approach of the Stator Current Frequency Harmonics Computation for Detection of Induction Machine Rotor Faults. *IEEE Transaction on Industry Application*, 41(3).
- HERNDLER, B.; P. BARENDSE & M. A. KHAN. 2011a:** 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*. Niagara Falls, ON p. 1516 - 1521
- HERNDLER, B.; P. BARENDSE & M. A. KHAN. 2011b:** Error analysis of efficiency estimation methods for induction motors. In *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International*. Niagara Falls, ON p. 1498 - 1503
- HOLMQUIST, J. R.; J. A. ROOKS & M. E. RICHTER. 2004.** Practical Approach for Determining Motor Efficiency in the Field Using Calculated and Measured Values. *IEEE Transaction on Industry Applications*, 40(1), 242-248.
- HSU, J. S. 1995.** Monitoring of defects in induction motors through air-gap torque observation. *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, 31, 1016–1021.
- HSU, J. S.; J. D. KUECK; M. OLSZEWSKI; D. A. CASADA, et al. 1998.** Comparison of induction Motor Field Efficiency Evaluation Methods. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 34(1), 117-125.
- HSU, J. S.; P. J. OTADUY & J. D. KUECK. 1995:** Efficiency and reliability assessments of retrofitted high-efficiency motors. In *Conf. Rec. IEEEIAS Annu. Meeting*. Lake Buena Vista, p. 2745–2751.
- HSU, J. S. & B. P. SCOGGINS. 1995.** Field Test of Motor Efficiency and Load Changes Through Air-Gap Torque. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 10(3), 477- 483.
- HSU, J. S.; H. H. WOODSON & W. F. WELDON. 1992.** Possible errors in measurement of air-gap torque pulsations of induction motors. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 7(1), 202–208.
- HSU, S. & P. J. SORENSON. 1996.** Field assessment of induction motor efficiency through air-gap torque. *IEEE Trans. Energy Conversion*, 11, 489–494.

- HURST, K. D. & T. G. HABETLER. 1996.** Sensorless Speed Measurement Using Current Harmonic Spectral Estimation in Induction Machine Drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 11(1), 66-73.
- IEC 60034-2-1. 2007:** Rotatory Electrical Machines part 2-1, Standard Methodes For Determiny Losses And Efficient From Tests. In. Switzerland: Suiza.
- IEEE STANDARD 112. 2004:** IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators. In *American National Standard*. New York, USA.
- IEEE STANDARD 519. 1992.** Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia. New York.
- IEEE STD. 519. 1993:** IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical systems. In *IEEE Industry Applications Society/Power Engineering Society*. New York: IEEE Press.
- INANC, N.; M. K. GUVEN; H. REHMAN; A. DERDIYOK, et al. 2000:** A new sliding mode flux and speed observer for speed sensorless control of induction machine. In *Proceedings of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference*. p. 574-578.
- IVANON-SMOLENSKI, A. V. 1984:** *Máquinas Eléctricas*. edited by MIR. Moscú: 287 p.
- JAIN, G. C. 1964.** The Effect of Voltage Waveshape on the Performance of a 3-Phase Induction Motor. *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, 83(2), 561-566.
- KIM, Y.-R.; S.-K. SUL & M.-H. PARK. 1994.** Speed sensorless vector control of induction motor using extended Kalman filter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 30, 1225-1233.
- KLINGSHIRN, E. A. & H. E. JORDAN. 1968.** Polyphase Induction Motor Performance and Losses on Nonsinusoidal Voltage Sources. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 87(3), 624-631.
- KUECK, J. D.; G. R., J.; D. C., R R. & H. J. 1996.** Assessment of Available Methods for Evaluating In-Service Motor Efficiency.
- MARTINEZ, E. & M. TORRENT. 2009.** Determinación del rendimiento en motores de inducción trifásicos según la Norma IEC 60034-2-1. *Técnica Industrial*, 36 – 41.
- MASI, V. & J. P. CHASSANDE. 1996.** Dimensionamiento de un motor de inducción para su utilización con variador de frecuencia. *Revista de la Comisión de Integración Eléctrica Regional (CIER)*, V(16), 55-59.
- MOTOR CHALLENGE. 1999.** Determining electric motor load and efficiency.

- NEMA. 2004a:** Standards Publication MG 1-2003, Revision 1-2004, Motors and Generators. In Washington, D.C.
- NEMA. 2004b.** Standards Publication MG 1-2003, Revision 1-2004, Motors and Generators. Washington, D.C.
- NILSSON, N. E. 1996.** A comparison of ANSI and IEC standards for power station polyphase induction (asynchronous) motors. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 11(3), 500-507.
- OFICINA NACIONAL DE ESTADÍSTICA. 2011:** Electricidad en Cuba. Indicadores seleccionados. Enero - Diciembre 2010. In D.D.I.Y.M. AMBIENTE. Cuba: ONE.
- OPPENHEIM, A. V. & R. W. SCHAFER. 1999:** *Discrete-Time Signal Processing*. Prentice-Hal, New Jersey.
- OTTO, S. R. & J. P. DENIER. 2005:** *An Introduction to Programming and Numerical Methods in MATLAB*. Springer-Verlag, Australia. ISBN 1852339195.
- PÉREZ, A. I.; M. BLÁZQUEZ & L. RODRÍGUEZ. 2007:** Estimación de la Operación de un Motor de Inducción con Mínimos Recursos de Medición. In *CIE 2007*. Santa Clara Cuba.
- PÉREZ, A. I. & J. L. RODRÍGUEZ. 2005:** Estimación Energética de Motores de Inducción en Servicio. In *XII Simposio de Ingeniería Eléctrica*. Santa Clara, Cuba.
- RENIER, B., Y COL. 1999.** Comparison of standards for determining efficiency of three phase induction motors. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 14(3).
- ROMERO, I.; M. DE ARMAS; B. PÉREZ & Y. GUERRERO. 2012.** Evaluación energética de motores asincrónicos ante armónicos y desbalance de voltaje en una empresa minera. *Minería y Geología*, 28(1), 47-59.
- ROMERO, I. & B. PÉREZ. 2008.** Algoritmo para la determinación de los parámetros del motor de inducción por datos nominales. *Energética*, XXIX(3), 10-17.
- RUBIN, N. P.; R. G. HARLEY & G. DIANA. 1992.** Evaluation of Various Slip Estimation Techniques for an Induction Machine Operating Under Field-Oriented Control Conditions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 28(6).
- SAKTHIVEL, V. & S. SUBRAMANIAN. 2010:** Swarm Intelligence Algorithm for Induction Motor Field Efficiency Evaluation In B. PANIGRAHI, S. DAS, P. SUGANTHAN & S. DASH eds. *Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing*. Springer Berlin / Heidelberg, vol. 6466, p. 545-558.

- SEN, P. K. & H. LANDA. 1990.** Derating of induction motors due to waveform distortion. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 26(6), 1102-1107.
- SIRAKI, A. G. & P. PILLAY. 2012.** An In Situ Efficiency Estimation Technique for Induction Machines Working With Unbalanced Supplies. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27(1), 85-95.
- SOUSA, S. B.; S. J. R. GÓMEZ; F. P. VIEGO & T. M. DE ARMAS. 2013.** Análisis de eficiencia de motores asincrónicos en presencia de desbalances y armónicos en la tensión. *Energética*, XXXIV(2), 163-173.
- STEELE, B.; R. MINHAZ & G. L'HEUREUX. 2005.** Field Estimation of Induction Motor Efficiency. *Project proposal submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Bachelor of Science in Electrical and Computer Engineering in the Faculty of Engineering of the University of Manitoba* [Type of Work]. Available from Internet:<[http://www.ee.umanitoba.ca/.../coursehome/c24400/24\\_400/2006-07/FinalReports/G19FinalReport2006.pdf.pdf](http://www.ee.umanitoba.ca/.../coursehome/c24400/24_400/2006-07/FinalReports/G19FinalReport2006.pdf.pdf)>.
- STOCKS, M.** Modeling, Analysis, State and Parameter Estimation of Faulty Induction Machines. Doctoral Thesis Lulea University of Technology, 2006.
- VAN ROY, P. & R. BELMANS. 2002:** Assessment of Efficiency of Low Voltage, Three Phase Motors. In *Proceedings of Energy Efficiency in Motor Driven Systems (EEMODS'02)* p. 6.
- VELEZ-REYES, M.; W. LIAM PUNG & T. J. E. RAMOS. 2001:** Developing Robust Algorithms for speed and Parameter Estimation in Induction Machines. In *Proceeding of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*. Florida. USA.
- VELEZ-REYES, M.; K. MINAMI & G. C. VERGHESE. 1989.** Recursive speed and parameter estimation for induction machines. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 1, 607-611.
- VILARAGUT, M.; A. COSTA; A. GARCÍA & A. C. AYALA. 2004.** Métodos para la determinación de la eficiencia energética en los motores de inducción trifásicos. *Ecosolar*, (10).
- WALLANCE, A.; A. VON JOUANNE; E. WIEDENBRUG; E. MATHESON, et al. 2001.** A laboratory assessment of in-service and non-intrusive motor efficiency testing methods. *Electric Power Compon. Syst.*, 29(6), 517-529.

WASHINGTON STATE UNIVERSITY (WSU), C. E. E. P., , 2004. Programa Internacional para la Selección de Motores y el Análisis de Ahorros --IMSSA--. [Version for MM+plus. Washington. System requirements: Manual de usuario.

**ZHANG, H.; P. ZANCHETTA; K. J. BRADLEY & C. GERADA. 2010.** A Low-Intrusion Load and Efficiency Evaluation Method for In-Service Motors Using Vibration Tests With an Accelerometer. *Industry Applications, IEEE Transactions on*, 46(4), 1341 - 1349.

**ZHANG, H.; P. ZANCHETTA; C. GERADA; K. BRADLEY, et al. 2011:** Performance evaluation of induction motor efficiency and in-service losses measurement using standard test methods In *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International Niagara Falls, ON* p. 913 - 917

*Anexos*

## ANEXOS

### Anexo A. Resultados experimentales de los tres motores en estudio

Tabla A.1. Resultados experimentales para el motor (LEESON 7.5 HP ODP)

Porcentaje de Carga (%)	Velocidad del rotor (rpm)	Eficiencia Medida (%)	Eficiencia Estimada (%)	Eficiencia AGT Propuesta (%)
8,54	1797,0	68,56	47,59	56,32
18,54	1794,6	73,37	74,24	73,22
23,50	1793,4	77,50	78,55	77,47
33,14	1788,6	79,99	83,06	81,75
40,23	1785,8	84,39	84,67	84,12
54,37	1780,7	85,42	86,08	85,85
68,22	1776,0	86,59	86,25	86,05
75,07	1774,1	85,75	86,02	86,24
88,75	1768,6	85,01	85,37	85,15
101,51	1762,6	84,70	84,40	84,20
111,66	1757,1	82,20	83,52	82,65
117,53	1754,7	81,19	82,89	81,78

Fuente: (Bin *et al.*, 2006c)

Tabla A.2. Resultados experimentales para el motor (GE 7.5 HP TEFC)

Porcentaje de Carga (%)	Velocidad del rotor (rpm)	Eficiencia Medida (%)	Eficiencia Estimada (%)	Eficiencia AGT Propuesta (%)
19,09	1775,0	92,45	90,68	90,05
21,77	1771,5	91,63	91,26	91,14
24,45	1768,0	92,38	91,65	91,43
27,17	1764,5	92,75	91,89	91,85
29,77	1760,8	92,28	91,94	91,38
35,03	1753,5	91,24	91,71	91,43
40,37	1746,0	91,09	91,24	91,19
50,78	1730,0	88,47	90,00	89,63
61,14	1713,0	87,08	88,46	87,87
71,26	1694,0	85,48	86,65	85,89
81,56	1672,0	83,39	84,49	83,50
91,27	1647,0	80,21	82,10	81,12

Fuente: (Bin *et al.*, 2006c)

Tabla A.3. Resultados experimentales para el motor (MARATHON 10 HP TEFC)

Porcentaje de Carga (%)	Velocidad del rotor (rpm)	Eficiencia Medida (%)	Eficiencia Estimada (%)	Eficiencia AGT Propuesta (%)
4,04	1799,2	66,23	55,62	58,22
12,85	1796,0	84,50	84,80	84,62
26,10	1789,2	89,70	91,00	90,56
32,70	1787,4	91,52	91,66	91,54
39,69	1785,0	91,15	91,82	91,65
48,49	1782,6	90,25	91,76	91,14
56,44	1779,0	90,86	91,39	91,00
65,52	1776,0	90,49	91,03	90,89
74,11	1772,6	90,42	90,41	90,40
82,27	1768,9	89,51	89,80	89,60
96,42	1761,8	88,81	88,56	88,45
106,17	1752,8	86,87	86,86	86,85

Fuente: (Bin *et al.*, 2006c)

## Anexo B

Tabla B.1. Características de funcionamiento del motor en servicio

No	P1(kW)	P2(kW)	Tag(Nm)	Zp(kW)	Nr(rpm)	Im(A)	Vm(V)	kc(pu)	Ef(pu)	Fp(pu)
1	55,54	50,73	436,27	4,811	1185,04	110,68	452,92	0,597	0,913	0,640
2	55,80	50,97	438,26	4,830	1184,81	110,75	453,18	0,600	0,913	0,642
3	55,49	50,66	435,83	4,832	1184,68	111,14	452,93	0,596	0,913	0,637
4	55,56	50,74	436,35	4,815	1185,04	110,93	452,69	0,597	0,913	0,639
5	54,99	50,19	431,84	4,799	1184,99	110,74	452,51	0,590	0,913	0,634
6	55,11	50,29	432,84	4,817	1184,59	110,50	453,08	0,592	0,913	0,636
7	55,16	50,26	433,24	4,901	1182,79	110,59	452,73	0,591	0,911	0,636
8	55,01	50,14	432,09	4,867	1183,29	110,03	453,58	0,590	0,912	0,636
9	55,22	50,33	433,71	4,889	1183,02	110,30	453,48	0,592	0,911	0,637
10	55,38	50,50	434,94	4,876	1183,53	110,72	452,97	0,594	0,912	0,638
11	55,32	50,45	434,48	4,866	1183,65	110,49	454,03	0,594	0,912	0,637
12	55,03	50,20	432,18	4,831	1184,22	110,49	453,01	0,591	0,912	0,635
13	55,02	50,13	432,15	4,889	1182,89	110,28	453,56	0,590	0,911	0,635

14	55,43	50,53	435,29	4,898	1183,16	111,05	453,61	0,594	0,912	0,635
15	54,96	50,08	431,61	4,877	1183,17	110,53	454,30	0,589	0,911	0,632
16	55,01	50,15	432,02	4,866	1183,56	110,90	454,65	0,590	0,912	0,630
17	55,49	50,58	435,83	4,905	1182,96	110,74	453,68	0,595	0,912	0,638
18	55,92	50,96	439,16	4,960	1182,25	111,44	453,78	0,600	0,911	0,638
19	55,43	50,51	435,30	4,917	1182,82	111,26	453,88	0,594	0,911	0,634
20	56,01	51,06	439,90	4,949	1182,62	111,77	453,65	0,601	0,912	0,638
21	55,78	50,81	438,02	4,969	1182,09	111,95	453,62	0,598	0,911	0,634
22	55,68	50,73	437,23	4,946	1182,54	111,98	453,90	0,597	0,911	0,633
23	55,48	50,56	435,67	4,919	1182,94	111,79	453,49	0,595	0,911	0,632
24	56,08	51,16	440,44	4,927	1183,20	111,92	453,71	0,602	0,912	0,638
Med	55,41	50,53	435,19	4,881	1183,49	110,96	453,46	0,594	0,912	0,636

Tabla B.2. Características de funcionamiento del motor en seleccionado

No	P1(kW)	P2(kW)	Tag(Nm)	Zp(kW)	Nr(rpm)	Im(A)	Vm(V)	kc(pu)	Ef(pu)	Fp(pu)
1	52,98	50,73	426,06	2,246	1194,11	84,86	452,92	0,907	0,958	0,796
2	53,24	50,97	428,03	2,272	1193,88	85,19	453,18	0,911	0,957	0,796
3	52,90	50,66	425,61	2,239	1193,75	84,75	452,93	0,905	0,958	0,796
4	52,99	50,74	426,13	2,247	1194,11	84,92	452,69	0,907	0,958	0,796
5	52,38	50,19	421,65	2,192	1194,06	84,08	452,51	0,897	0,958	0,795
6	52,50	50,29	422,64	2,202	1193,66	84,13	453,08	0,899	0,958	0,795
7	52,46	50,26	423,01	2,199	1191,84	84,15	452,73	0,898	0,958	0,795
8	52,33	50,14	421,88	2,188	1192,35	83,81	453,58	0,896	0,958	0,795
9	52,53	50,33	423,48	2,205	1192,07	84,11	453,48	0,900	0,958	0,795
10	52,72	50,50	424,71	2,222	1192,58	84,48	452,97	0,903	0,958	0,795
11	52,67	50,45	424,26	2,217	1192,70	84,20	454,03	0,902	0,958	0,795
12	52,39	50,20	421,98	2,193	1193,29	83,99	453,01	0,897	0,958	0,795
13	52,32	50,13	421,94	2,187	1191,95	83,79	453,56	0,896	0,958	0,795
14	52,75	50,53	425,05	2,225	1192,21	84,40	453,61	0,903	0,958	0,795
15	52,26	50,08	421,40	2,182	1192,22	83,57	454,30	0,895	0,958	0,795
16	52,34	50,15	421,81	2,188	1192,62	83,61	454,65	0,896	0,958	0,795

17	52,82	50,58	425,60	2,231	1192,01	84,48	453,68	0,904	0,958	0,796
18	53,23	50,96	428,90	2,271	1191,30	85,06	453,78	0,911	0,957	0,796
19	52,74	50,51	425,07	2,223	1191,87	84,33	453,88	0,903	0,958	0,795
20	53,35	51,06	429,63	2,284	1191,68	85,26	453,65	0,913	0,957	0,796
21	53,07	50,81	427,76	2,255	1191,13	84,85	453,62	0,908	0,958	0,796
22	52,98	50,73	426,97	2,247	1191,59	84,68	453,90	0,907	0,958	0,796
23	52,79	50,56	425,44	2,229	1191,99	84,48	453,49	0,904	0,958	0,796
24	53,45	51,16	430,18	2,295	1192,25	85,40	453,71	0,914	0,957	0,796
Med	52,76	50,53	424,97	2,227	1192,55	84,44	453,46	0,903	0,958	0,795

**Anexo C.** Formas de ondas de tensión y corriente para las tres condiciones vista y el contenido de armónicos por frecuencias.

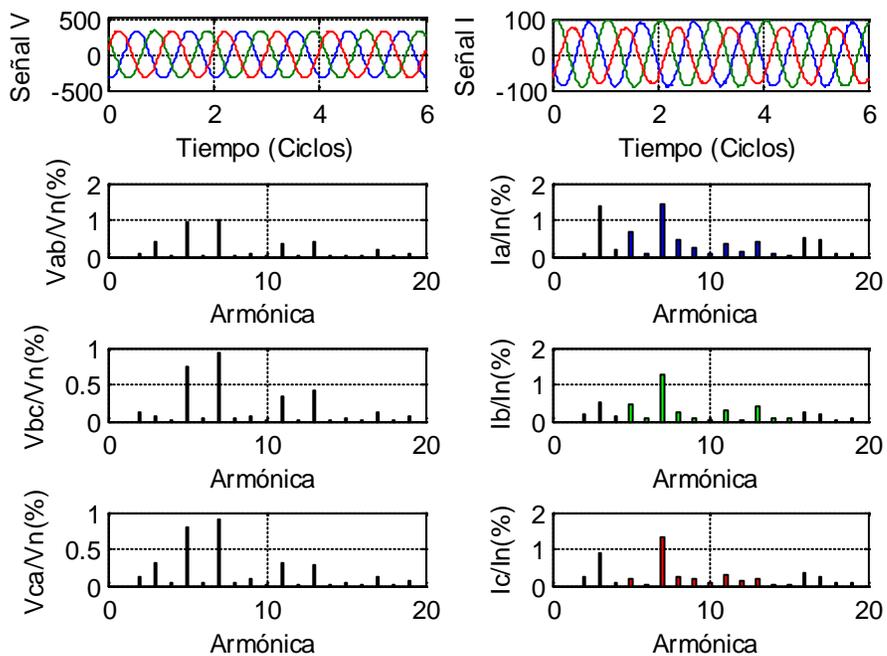


Figura C.1. Forma de ondas condiciones normales

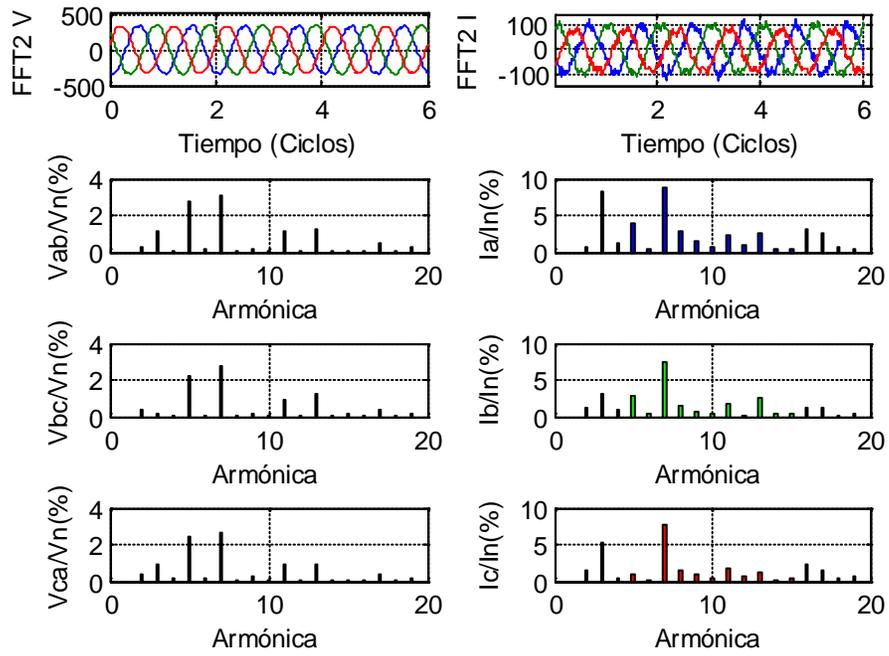


Figura C.2. Forma de ondas condiciones límites

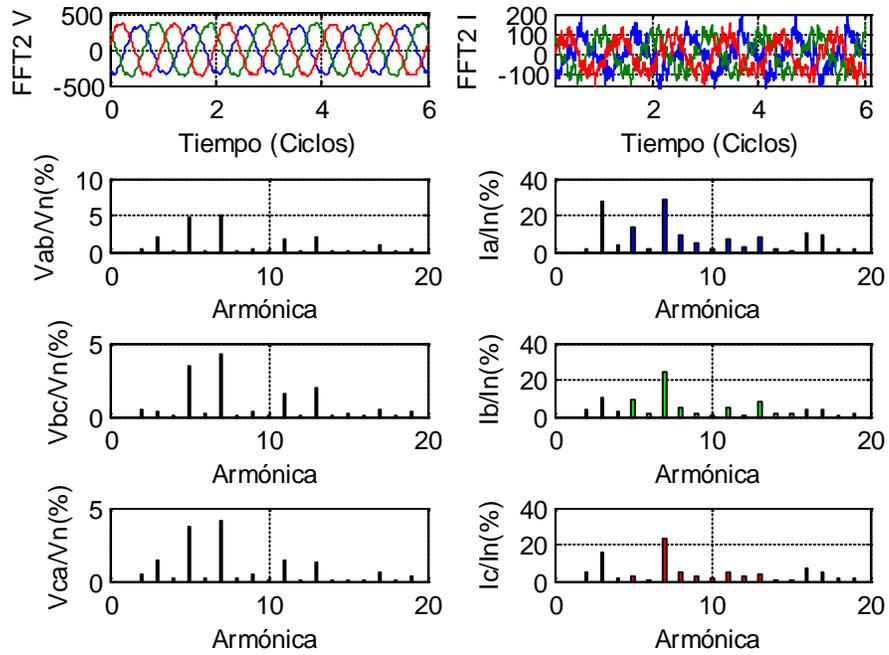


Figura C.3. Forma de ondas condiciones que exceden las normas