



*Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa*

*Dr. Antonio Núñez Jiménez*

*Facultad Metalurgia-Electromecánica*

# *Trabajo de Diploma en opción al Título de Ingeniero Eléctrico*

**Tema:** *Evaluación energética de motores asincrónicos en redes contaminadas por asimetría y armónicos por el método del torque en el entrehierro.*

**Autor:** *Yoenrri Arce Peña*

**Tutores:** *MSc Ignacio Romero Rueda  
Ing. Bárbara M. Pérez Mena*

*Moa 2012*

*Año 54 de la Revolución*



*Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa*

*Dr. Antonio Núñez Jiménez*

*Facultad Metalurgia-Electromecánica*

# *Trabajo de Diploma en opción al Título de Ingeniero Eléctrico*

***Tema:*** *Evaluación energética de motores asincrónicos en redes  
contaminadas por asimetría y armónicos por el método del  
torque en el entrehierro.*

***Autor:*** *Yoenrri Arce Peña*

***Tutores:*** *M.Sc Ignacio Romero Rueda  
Ing. Bárbara M. Pérez Mena*

*Moa 2012  
Año 54 de la Revolución*

## DECLARACIÓN DE AUTORIDAD

Yo: Yoenrri Arce Peña

Autor de este Trabajo de Diploma certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, y Hacer uso del mismo en la finalidad que estime conveniente a M.Sc .Ignacio Romero Rueda.

---

Yoenrri Arce Peña

Diplomante

---

M.Sc Ignacio Romero Rueda

Tutor

---

Ing. Bárbara M. Pérez Mena

Tutor



**PENSAMIENTO**

El espectáculo de lo grande templea el espíritu para la producción de lo grande... Que la enseñanza científica vaya como la sabía en los árboles, de la raíz al tronco.

José Martí.



## **AGRADECIMIENTOS**

El género humano tiene como primaria condición la socialización. A través de ella heredamos el pasado familiar y gracias a ella cultivamos nuestro presente y futuro. Como resultado de este proceso heredamos familiares y obtenemos compañeros y amigos. Vienen y van, o se mantienen. Nos acompañan, nos ayudan, nos critican, nos escuchan o nos corrigen en nuestro actuar cotidiano y siempre se le agradece. Se les agradece mucho más si su consejo, su crítica o su ayuda contribuyen a que alcancemos metas superiores.

He de expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres Pablo E. Arce Zaldívar y Norelvis Peña Zaldívar por el interés indulgente que han demostrado en el transcurso de mi carrera, a mi hermano Yoennis Arce Peña, a mis amigos que me brindaron su apoyo incondicional. A toda mi familia y en general a los que de una forma u otra posibilitaron la realización de este trabajo.

Agradezco a mis tutores M.Sc. Ignacio Romero Rueda e Ing. Bárbara Pérez Mena por su paciencia, ayuda, energía, sentido práctico, comprensión y abierta libertad que han deparado en el trayecto de mi formación como profesional.

Agradezco al Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz y a Raúl por posibilitarme estudiar en una sociedad donde el estudio es prioridad de toda persona y a la revolución por los ilimitados horizontes que ha abierto con su leal protección a todos los estudiantes del país.

A todos, muchas gracias

***Yoenrri Arce Peña***







## **DEDICATORIA**

El curso de una vida es un continuo transitar por diversas etapas. Continuamente se cierra una etapa fecunda y se abre otra mucho más prometedora. Cobran vida sueños y proyectos y se hacen realidad en la etapa sucesiva. En este instante, se cumplen algunos de mis sueños y proyectos pero inicia la gestación de lo que pretendemos alcanzar en el futuro.

En pos de ellos seguiremos.

Dedico este trabajo a mis padres Pablo E Arce Zaldívar y Norelvis Peña Zaldívar por el apoyo que me han brindado en el transcurso de mi carrera, a mi hermano Yoennis Arce Peña.

A mis tutores MSc Ignacio Romero Rueda e Ing. Bárbara Pérez Mena por su ayuda, entrega y comprensión durante la realización de este trabajo.

De forma general, sin ocasionar ingratitudes y disgustos al no mencionar nombres, dedico este trabajo a todos los que de una manera u otra hicieron posibles mi preparación profesional: Familiares, profesores, amigos, compañeros, etc.

# Resumen

## **RESUMEN**

La fuente de suministro eléctrico en muchas ocasiones presenta niveles considerables de armónicos de varios órdenes y desbalance de tensión. Para determinar la eficiencia de un motor de inducción que funciona en estas condiciones, hay que considerar las pérdidas por armónicos. En este trabajo se presenta un procedimiento basado en el método del momento en el entrehierro modificado, con un algoritmo agregado para evitar el uso de complejo sensores, para determinar la potencia en el eje y el gráfico de la eficiencia de motores eléctricos asíncronos en condiciones de campo y en presencia de asimetría y armónicos. También se realiza la evaluación económica de la sustitución del motor a través del costo del ciclo de vida.

**ABSTRACT**

The electric supply source presents, in many occasions, considerable levels of harmonic of several tension orders and unbalance. To determine the efficiency of an induction motor working under these conditions, it is necessary to consider the losses due to harmonic. In this work, a procedure based on the method of the moment in the modified air gap is presented, with an added algorithm to avoid the sensor complex use, to determine the power in the shaft and the graph of the asynchronous electric motors efficiency, under field conditions and in presence of asymmetry and harmonic. The economic evaluation of the motor substitution is also carried out, through the cost of the life cycle.

# Indice



## ÍNDICE

Introducción.....	1
Problema de investigación:.....	2
Objeto de estudio:.....	3
Campo de acción: .....	3
Objetivo general:.....	3
Objetivos específicos: .....	3
<i>Hipótesis</i> del trabajo: .....	3
<i>Aportes</i> del trabajo:.....	3
<i>Tareas de investigación</i> a partir del diseño metodológico planteado:.....	4
Métodos de investigación .....	4
Estructura de la tesis .....	4
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL .....	5
Introducción .....	5
1.1. Métodos para estimar el grado de carga y eficiencia en motores de inducción .....	5
1.1.1. Métodos normalizados para la evaluación de la eficiencia.....	6
1.1.2. Métodos de evaluación de la eficiencia en condiciones de campo. ....	7
1.1.3. Métodos computarizados y otras técnicas para la estimación de la eficiencia..	10
1.2. Métodos más utilizados para determinar el estado de carga del motor de inducción .....	11
1.2.1. Medición de la potencia de entrada.....	12
1.2.2. Medición de la corriente de línea .....	13
1.2.3. Método del deslizamiento.....	13
1.3. Conclusiones parciales .....	16

CAPÍTULO 2. MÉTODO DEL MOMENTO EN EL ENTREHIERRO .....	16
Introducción .....	16
2.1. Método del momento en el entrehierro. ....	17
2.1.1. Modelo matemático del método del momento en el entrehierro.....	19
2.1.2. Derivación de la ecuación para estimar el momento en el entrehierro.....	21
2.2. Algoritmo del método de momento en el entrehierro bajo condiciones reales.....	23
2.2.1. Estimado de la velocidad real del motor agregado .....	27
2.3. Consideraciones para la evaluación económica .....	28
2.4. Conclusiones parciales .....	30
CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES. CASO DE ESTUDIO .....	31
Introducción .....	31
3.1. Resultados para el motor de inducción MI-2.....	31
3.2. Motor bomba del ISMM.....	41
3.3. Conclusiones parciales .....	47
CONCLUSIONES GENERALES .....	48
RECOMENDACIONES.....	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	50
ANEXOS A. Evaluación de eficiencia y herramientas utilizadas	
Anexo A1. Métodos más utilizados para determinar el estado de carga del motor de inducción	
A1.1 . <i>Medición de la potencia de entrada</i>	
A1.2 . <i>Medición de la corriente de línea</i>	
A1.3 . <i>Método del deslizamiento</i>	
Anexo A2. Algoritmo de cálculo de los parámetros nominales del circuito equivalente	



Anexo A3. Estimado de la velocidad del motor

Anexo A4. Fundamento del análisis del costo del ciclo de vida implementado

Anexo A5. Características principales del motor de inducción

Anexo A6. Principales equipos e instrumentos utilizados durante los mediciones

# Introducción

## Introducción

Los motores de inducción son lo de mayor uso. Idealmente la fuente de potencia para un motor de inducción debe ser balanceada y sin armónicos. La realidad es, que en muchas ocasiones, la fuente de potencia está contaminada con armónicos de órdenes superiores y desbalance de tensión. La distorsión de la onda de tensión puede ser por la propia fuente o por las cargas de la planta en análisis, donde muchas cargas pueden ser no balanceadas, en ocasiones las fuentes electrónicas no disponen de filtros para prevenir la contaminación de la tensión.

La IEEE-519 ofrece las recomendaciones prácticas y los requerimientos para el control de los armónicos en el sistema eléctrico de potencia. La NEMA especifica los límites de variación para la tensión y frecuencia nominal. Esto es 10% de la tensión nominal a frecuencia nominal, o 5% de la frecuencia nominal con tensión nominal. El desbalance de tensión en los terminales del motor está limitado a 1%. La IEEE-512, estándar para el ensayo de motores de inducción especifica un límite gráfico.

Esto se establece ya que una alimentación contaminada, resulta en pérdidas de energía en los motores de inducción. Consecuentemente, los motores funcionan a una mayor temperatura con una disminución del tiempo de vida útil, un pago adicional por alto consumo de electricidad, y una mayor contribución a la contaminación ambiental. Este trabajo es una propuesta para determinar el rendimiento del motor a través del momento en el entrehierro.

En la era de la información digital, la adquisición digital de datos 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 de adquisición de datos, tales como osciloscopios digitales, disponibles en el mercado. A través de los sistemas de adquisición de datos, se pueden obtener las formas de ondas de las tensiones y corrientes en los terminales del motor de inducción. Desde esas formas de ondas muchos análisis se pueden realizar. En este trabajo se utiliza un analizador de redes, que permite adquirir las formas de ondas, de las magnitudes medidas.

Es importante que cuando la fuente de potencia está contaminada, la forma de onda de corriente y tensión no son las mismas en todos los ciclos, para mayor precisión de los resultados es necesario obtener varios ciclos.

En este trabajo se determina el momento que produce la potencia de salida. La diferencia entre considerar los armónicos y no, resultan las pérdidas por concepto de armónicos, la cual constituye una pérdida adicional en el motor de inducción cuando se conecta a una fuente de potencia contaminada por armónicos.

El método propuesto, también permite determinar el rendimiento del motor de inducción cuando este es alimentado por un inversor, que produce cierto contenido de armónicos.

Cuando el número de muestra por ciclo es bajo, es más preciso calcular el momento a través de los componentes armónicos de la tensión y corriente. Por cada orden de armónico, la forma de onda se divide en secuencia positiva, negativa y cero a través del método de las componentes simétricas. Cada armónico es una onda sinusoidal.

La suma de las tensiones son cero en un sistema trifásico, solo cuando no están presentes las componentes de secuencia cero. Para aplicar el método del torque en el entrehierro cuando estén presentes, separamos previamente las mismas.

El comportamiento energético de los motores en servicio con frecuencia se desconoce. La presencia de asimetría y contenido de armónicos en la red hace más complejo la transformación de energía en el motor de inducción. La determinación de la potencia en el eje de los motores de inducción en el sitio se agrava por la precisión y el grado de intrusividad de los métodos empleados. Sobre la base de este problema, se establece el objeto de la investigación, los objetivos del trabajo y la hipótesis científica.

### **Problema de investigación:**

La no existencia de un método que permita determinar el comportamiento energético del motor de inducción en el campo, considerando la presencia de asimetría y armónicos.

**Objeto de estudio:**

Motores de inducción trifásicos de rotor en cortocircuito.

**Campo de acción:**

Aplicación industrial de motores de inducción.

**Objetivo general:**

Determinar el comportamiento energético del motor asincrónico en redes contaminadas por asimetría y armónicos aplicando el método del torque en el entrehierro modificado.

**Objetivos específicos:**

1. Establecer el modelo matemático para la implementación del método del torque en el entrehierro en redes contaminadas por asimetría y armónicos.
2. Desarrollar una herramienta computacional que permita la implementación del método.
3. Aplicar el método del torque en el entrehierro en redes contaminadas por asimetría y armónicos a casos de estudios.

**Hipótesis del trabajo:**

Si se aplica el método del momento en el entrehierro modificado, que contemple la presencia de armónicos y asimetría, se disminuye el nivel de invasividad y se determina el comportamiento energético del motor de inducción con mayor precisión que los métodos más empleados en el campo.

**Aportes del trabajo:**

- Adaptación del método del momento en el entrehierro para evaluar la eficiencia del motor de inducción en redes contaminadas.
- Implementación de un algoritmo de cálculo computacional integral.
- Determinación de la eficiencia y evaluación económica de la selección de motores.

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

- Realización de un análisis del estado del arte del tema de método de la determinación de eficiencia en motores de inducción.
- Establecimiento del modelo matemático del torque en el entrehierro en presencia en redes contaminadas por asimetría y armónicos.
- Realización del montaje experimental de motores en presencia de una red contaminada, demostrando la efectividad del método del momento en el entrehierro.
- Determinación de la eficiencia en diferentes casos de estudio aplicando el método del AGT.
- Simulación del trabajo del nuevo motor seleccionado.
- 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 hechos que son objetos de estudio, partiendo de un conocimiento general de los mismos, que permitan una mejor aproximación a la realidad que los originó y luego, mediante un proceso de síntesis, emitir una opinión profesional. Todo esto exigió la utilización de una serie de pasos realizados en forma sistemática, ordenada y lógica, que permitieron luego emitir una crítica objetiva del hecho.
- Histórico-Lógico, para desarrollar el análisis de las investigaciones anteriores y antecedentes que permitan continuar el estudio.
- Análisis-Síntesis, para lograr la descomposición de las funciones de control e información y su concreción.

### **Estructura de la tesis**

La tesis está organizada en tres capítulos:

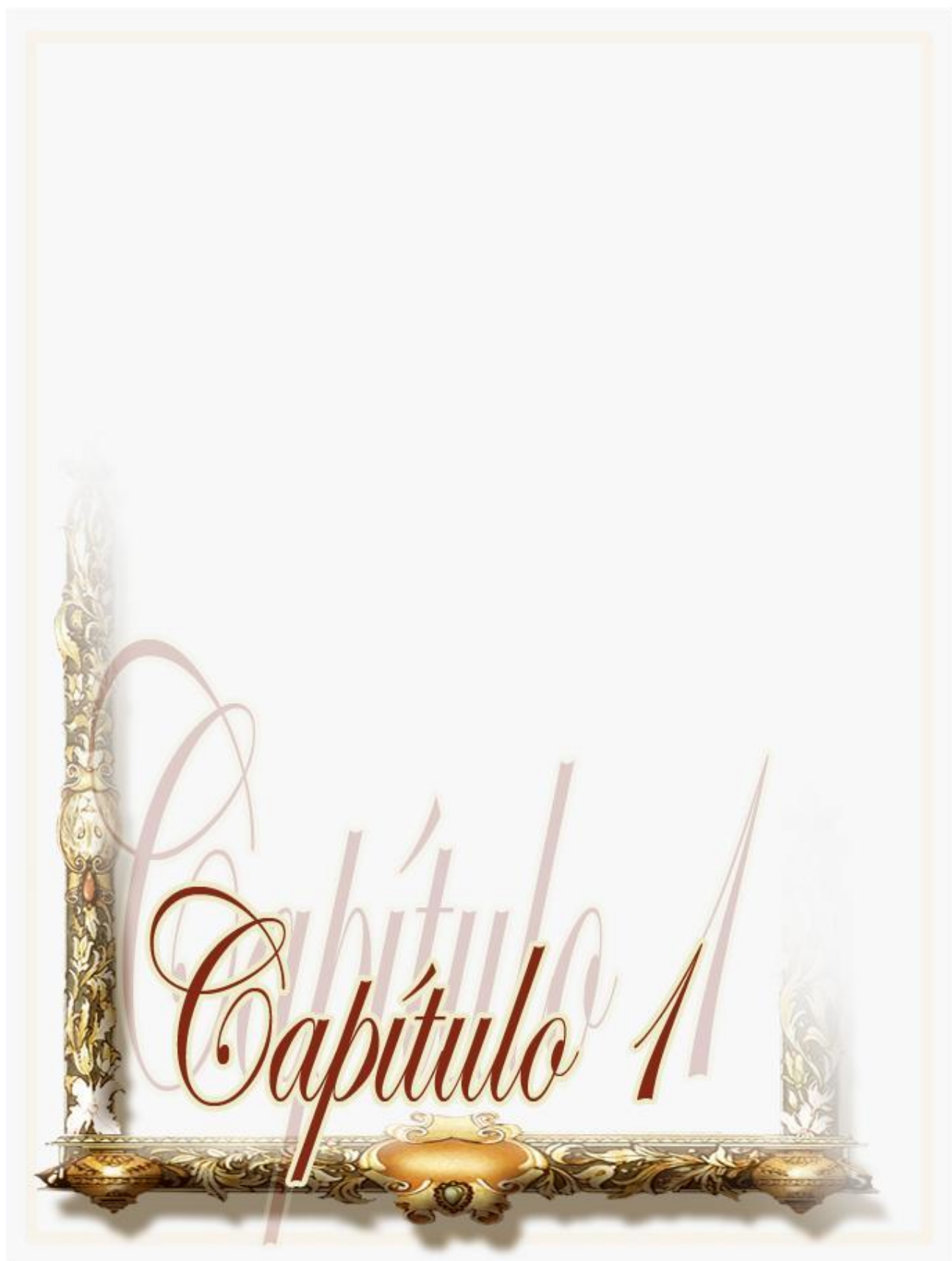
*Capítulo 1:* “Marco teórico-conceptual”. En este capítulo se realiza un análisis de los diferentes aspectos relacionados con los temas que son discutidos en la bibliografía

consultada, con el fin de disponer de los elementos básicos y de las tendencias actuales que resultan esenciales para el desarrollo de este trabajo, las principales dificultades y limitaciones cuando se determina el comportamiento energético de motores de inducción en aplicaciones industriales.

*Capítulo 2: “Método del momento en el entrehierro”.* Aborda los fundamentos teóricos del método del momento en el entrehierro como alternativa para determinar la eficiencia del motor de inducción bajo condiciones reales de operación, para estudios de caracterización energética.

*Capítulo 3: “Resultados y discusiones. Caso de estudio”.* En este capítulo empleando las mediciones de las variables a utilizar, se obtiene el motor adaptado a las condiciones reales, utilizando el método del momento en el entrehierro en presencia de armónicos y desbalance de tensión.





## **CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL**

### **Introducción**

En este capítulo se realiza un análisis de los diferentes aspectos relacionados con los temas que son discutidos en la bibliografía consultada, con el fin de disponer de los elementos básicos y de las tendencias actuales que resultan esenciales para el desarrollo de este trabajo.

Los métodos para la obtención del modelo representativo del motor equivalente y las magnitudes que lo caracterizan varían grandemente en término de su complejidad, sobre todo su comportamiento sustentado por las condiciones reales de operación.

El objetivo específico de este capítulo es:

Analizar los trabajos precedentes relacionados con los métodos empleados para determinar la carga y el rendimiento en motores de inducción de baja tensión.

De la potencia eléctrica total consumida por un motor eléctrico de la red, la mayor parte es entregada al mecanismo accionado y es, por tanto, aprovechada. Una parte se pierde dentro del motor, como consecuencia de los procesos electromagnéticos que se llevan a cabo en su interior, convirtiéndose en calor y tiene dos efectos negativos: aumentar el consumo de energía eléctrica del motor y elevar la temperatura del aislamiento de la máquina disminuyendo su vida útil si sobrepasa un límite.

### **1.1. Métodos para estimar el grado de carga y eficiencia en motores de inducción**

Un factor de suma importancia relacionado con el uso de los motores de inducción es el factor de carga, debido a que el rendimiento de éstos varía con dicho factor. Por tanto es necesario determinar el consumo con el objetivo de analizar las posibles medidas a tomar para disminuirlo y aumentar la eficiencia energética de las instalaciones industriales.

Existen dos grandes métodos para determinar el grado de carga y la eficiencia en el motor de inducción: métodos normalizados y métodos diseñados para condiciones de campo.

### 1.1.1. Métodos normalizados para la evaluación de la eficiencia.

Los métodos normalizados para la evaluación de la eficiencia permiten obtener el coeficiente de carga del motor de inducción, ya que tiene implícito determinar la potencia en el eje o de salida.

Los valores de rendimiento han de ser determinados de acuerdo con las normas internacionales vigentes[1-3]. Estas normas establecen consideraciones en cuanto a las pérdidas, tipos de mediciones e instrumentos requeridos, valores de corrección de temperatura para las resistencias, etc. De estas normas, las principales y que han sido objeto de muchos análisis comparativos son: Norma Americana **IEEE-112**, Norma Europea **IEC 34-2-1** y Norma japonesa **JEC 37**[4-9].

La norma **IEC 60034-2-1**, editada en el año 2007 por la “International Electrotechnical Commission”, reemplaza a la **IEC 60034-2** de 1996 adoptada como norma UNE[10]. Esta última edición de la norma europea presenta grandes similitudes con la norma americana, principalmente en la forma de la determinación de las pérdidas adicionales en carga, asumiendo de 2.5 % a 0.5 % de la potencia de entrada a potencia nominal, y en la inclusión de nuevos procedimientos para su determinación, procedimientos que no están incluidos en la edición de 1996.

La norma **JEC-37** desarrollada por la “Japanese Electrotechnical Committee” se emplea en Japón y otros países asiáticos y se caracteriza por despreciar totalmente las pérdidas adicionales. Los valores de eficiencia determinados bajo esta norma arrojan resultados superiores a los obtenidos por los métodos de la **IEEE** o la **IEC**.

La norma **IEEE-112**[11] del “Institute of Electric and Electronic Engineers” es la que tiene mayores exigencias 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**. Con esta norma armonizan algunas normas nacionales como la **NEMA, MG1**[12] y la **CS-390** aplicadas en EEUU y Canadá, respectivamente. En el caso de las variantes **E1** y **F1**, las pérdidas adicionales son asumidas como un porcentaje de la potencia de salida nominal.

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 que se hayan desarrollado muchos métodos para la evaluación de la eficiencia en condiciones de campo y que se continúe investigando en este sentido [13-20].

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

Al igual que los métodos normalizados, los métodos para la evaluación de la eficiencia en condiciones de campo, permiten obtener el coeficiente de carga del motor de inducción, ya que tiene implícito determinar la potencia en el eje.

Los métodos básicos para la evaluación del rendimiento en el sitio pueden ser individuales o la combinación de algunos de ellos. Se pueden agrupar en los siguientes[8,15,21-23]:

1. Método de los datos de chapa
2. Método del deslizamiento
3. Método de la corriente
4. Método del circuito equivalente
5. Método de segregación de pérdidas
6. Métodos estadísticos
7. Método de momento en el entrehierro
8. Método de momento en el eje o método directo

La diferencia entre la potencia de entrada y la potencia de salida son las pérdidas; de la forma en cómo se determinan las pérdidas depende la exactitud del método aplicado [24]. La medición de la potencia de entrada es obligatoria, otras mediciones y datos auxiliares se requieren para diferentes métodos, y se pueden resumir en: lectura de la chapa del motor y resistencia del estator; medición de la velocidad o deslizamiento; medición de la corriente y tensiones de fase o línea; temperatura del devanado; medición de momento en el eje; datos de ensayos de vacío y cortocircuito; formas de ondas de la tensión y la corriente y análisis armónico.

La adquisición de estos datos requiere de instrumentos con errores individuales menores de 0.5 % a plena escala, incluyendo los efectos de la amplitud y fase según la norma **IEEE-112**, siempre que no sea para el método **B**, en cuyo caso las exigencias son mayores. Este requisito lo cumplen diferentes tipos de analizadores de redes existentes en el mercado. Si este no es el caso, deben tomarse las máximas precauciones en la adquisición de datos. En particular, en las condiciones de campo, 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, corriente y deslizamiento, son fáciles de aplicar, pero pueden conducir a errores apreciables si se considera que la eficiencia de chapa no se mantiene constante en todo el rango de operación, además de ser el resultado del tratamiento estadístico de un lote de motores; la corriente posee un comportamiento no lineal y el deslizamiento correspondiente a los valores nominales puede presentar tanto como un 20 % de desviación[25]. En el anexo A1 se presentan los métodos de la potencia de entrada, la corriente del estator y el deslizamiento, de gran aplicación práctica. Los métodos de segregación de pérdidas, diseñados para medir directamente las pérdidas en el motor, en principio deben dar resultados precisos. Sin embargo, el método **IEEE-112 E** no es útil, pues incluye retirar el rotor y hacer pruebas especiales para determinar las pérdidas adicionales. El método **E1** asume un valor de pérdidas adicionales, pero utiliza un ensayo en vacío con tensión variable, así como ensayos en seis estados de operación. En la gran mayoría de los casos, este procedimiento es inaplicable en el campo, como también lo son algunas modificaciones realizadas al mismo.

El método del circuito equivalente (basado en el método **F** de la norma **IEEE-112**) se fundamenta en el conocimiento de los parámetros del circuito que modela el comportamiento de estado estable del motor asincrónico, lo cual constituye su principal inconveniente en un ambiente industrial, por los ensayos que requiere.

El uso de este método para determinar las pérdidas, las características de funcionamiento y la eficiencia del motor, radica en las posibilidades que ofrece el mismo de predecir el

comportamiento para cualquier estado de carga[11, 26-30]. Se debe tener en cuenta que los valores de las impedancias pueden variar mucho entre la condición de rotor estático y la condición de operación en vacío de la máquina.

Los métodos estadísticos pueden ser muy efectivos cuando no se cuenta con el equipamiento requerido para algún tipo de ensayo. Existen metodología para tal efecto[17], pero hay que tener presente que todos estos métodos estadísticos utilizan base de datos de fabricantes obtenidos en el laboratorio, diferentes al ambiente donde operan las máquinas.

El método de la medición del momento en el eje, es el más directo para determinar la eficiencia. Sin embargo, su aplicación no es práctica en el campo, como tampoco lo son los métodos que requieren sensores especiales, por poseer un alto costo y elevada complejidad e invasividad.

El método del momento en el entrehierro requiere de la medición de las tensiones y corrientes de fase instantáneos para determinar ese momento y deducir la potencia de salida en el eje, a diferencia de los anteriores permite considerar las condiciones de calidad del suministro eléctrico[31].

Las ventajas del método del momento en el entrehierro son:

1. Supera al método **EI** de la **IEEE-112** cuando la tensión de alimentación está desbalanceada y contiene armónicos[31].
2. Puede medirse mientras el motor está funcionando.
3. Al contrario de cualquier otro método puede usarse cuando la potencia por fase están desequilibradas.
4. Es aplicable a otros tipos de motores.

Las principales desventajas del método están dadas por las exigencias para ganar en precisión:

1. Requiere del ensayo en vacío.

2. Requiere un equipamiento especializado para las mediciones de campo.
3. Necesita un desarrollo extenso para lograr un nivel adecuado de exactitud.

En Budapest, Hungría la “Industrial AutomationCo. Ltd”, desarrolló el instrumento, SILEX (TMI-02), portátil con alimentación a 120 V y varios sensores incorporados, usando las ecuaciones de momento en el entrehierro; las pérdidas del acero, por fricción y ventilación no son medidas, constituyendo una aproximación al método original desarrollado por ORNL, sin la necesidad de desacoplamiento del motor. Como consecuencia, la exactitud no es tan alta.

La principal dificultad que presentan estos métodos de determinación “*in situ*” de la eficiencia, son conocer la velocidad del rotor y el valor de la resistencia del estator. Una de las vías utilizadas para solucionar este problema es medir la resistencia del motor cuando este no está en servicio o utilizar tacómetros ópticos o “*encoders*” para determinar la velocidad. Otros procedimientos determinan la velocidad según el contenido armónico de la corriente del estator lo cual es específico para cada máquina pues depende del número de ranuras del rotor que debe conocerse. Este método brinda una precisión de 5 rpm a altas velocidades y 0.005 pu. de deslizamiento a bajas velocidades[32-34].

### **1.1.3. Métodos computarizados y otras técnicas para la estimación de la eficiencia.**

En la literatura se reportan varios métodos para uso práctico en la industria, implementados por medio de programas de computación o instrumentos especiales[8, 13, 35]. Oak Ridge NationalLaboratory desarrolló el **ORMEL 96** (Oak Ridge Motor Efficiency and Load, 1996), software que utiliza el método del circuito equivalente para estimar el estado de carga y la eficiencia de un motor en servicio. Solo requiere de los datos de chapa y de la medición de velocidad para calcular tanto la eficiencia como el factor de carga, asumiendo los valores de corriente a rotor trancado y pérdidas de fricción y batimiento para construir el circuito equivalente del motor. Este programa permite al usuario entrar mediciones opcionales, tal como la resistencia del estator, para mejorar el estimado de la eficiencia. La precisión de este método está en dependencia de la validez de los datos de chapa y considerar constante los parámetros en toda la banda de operación en que pueda encontrarse el motor.



El software **MotorMaster+**[36] es notable por su flexibilidad, baja invasividad y fácil uso. Este software parte de los datos de chapa y datos de operación para estimar el estado de carga y la eficiencia. Incluye cuatro técnicas para la estimación de la carga, y selecciona la más adecuada en función de los datos de entrada. Las técnicas internas para la estimación de la carga son: método de la potencia de entrada; método del deslizamiento compensado con tensión; método de la corriente compensada con tensión y método ORMEL.

Con el factor de carga se accede a la base de datos interna y por interpolación lineal se estima la eficiencia para ese estado de carga. Este software contiene factores para corregir las desviaciones de la tensión y otras condiciones de operación que se aparten de las de diseño.

Otras técnicas se basan en la utilización de equipos especiales para la estimación de la eficiencia como es el caso del desarrollado por **VernNielsen**[35] que emplea el probador *MAS-1000* producido por Niagara Instruments de New York. Además de este equipo especial, el método requiere de sensor óptico de velocidad. Otro instrumento especial es el *Motor-Check* desarrollado por **Vogelsang&Benning** de Alemania el cual emplea un método que requiere probar el motor para tres estados de carga diferentes[8, 13, 35]. También se reporta el Vectron Motor Monitor que emplea un método desarrollado por **ECNZ** (Electric Council of New Zealand) que necesita que el motor se pruebe a factores de carga por debajo del 10% y por encima del 50%[8, 13, 35]. Todos estos instrumentos son genéricos, utilizados solo en compañía del método al cual soportan y requieren que el motor sea temporalmente desacoplado de la carga para una prueba en vacío.

## **1.2. Métodos más utilizados para determinar el estado de carga del motor de inducción**

De los métodos de evaluación de la eficiencia en el campo, para determinar el grado de carga del motor de inducción, tienen mayores aplicaciones industriales el método de la corriente y el del deslizamiento, por ser los de menores exigencias de la instrumentación. Actualmente se emplea una combinación de métodos con el nombre de método de la potencia de entrada[24]. Los otros métodos aunque permiten obtener el grado de carga,

requieren de un personal calificado y dedicado exclusivamente a ellos, industrialmente no realizable.

### 1.2.1. Medición de la potencia de entrada

Se puede cuantificar el estado de carga del motor por comparación directa de la potencia de entrada medida bajo carga y la potencia requerida cuando el motor opera a capacidad nominal.

$$P_{ent} = \sqrt{3} \cdot U_{med} \cdot I_{med} \cdot fp, \quad [W] \quad (1.1)$$

donde:

$P_{ent}$  - Potencia trifásica del motor, medida en el alimentador principal, [W].

$U_{med}$  - Valor efectivo medio de la tensión de línea medida en las tres fases, [V].

$I_{med}$  - Valor efectivo medio de la corriente de línea medida en las tres fases, [A].

$fp$  - Factor de potencia, [pu].

La potencia de entrada,  $P_{ent\_nom}$  que corresponde a la salida nominal se determina a través de eficiencia para este régimen.

$$P_{ent\_nom} = \frac{P_{eje\_nom}}{\eta_n}, \quad [W] \quad (1.2)$$

$P_{eje\_nom}$  - Potencia de salida nominal (en el eje), [W].

$\eta_n$  - Eficiencia nominal del motor.

El coeficiente de carga  $k_c$ , que permitirá determinar la potencia real que entrega el motor se obtiene en base a la relación de potencia de entrada en por ciento de la potencia nominal.

$$k_c = \frac{P_{ent}}{P_{ent\_nom}} \cdot 100, \quad [\%] \quad (1.3)$$

Este método no tiene en cuenta la no linealidad de pérdidas, considerando que la potencia de salida varía linealmente con la potencia de entrada.

### 1.2.2. Medición de la corriente de línea

La corriente nominal aparece, sólo a la tensión nominal del motor. El valor efectivo de la corriente medida tiene que ser corregido por la tensión. Si la tensión de alimentación es mayor que la indicada en la chapa del motor, el valor de la corriente medida será correspondientemente mayor que el esperado para condiciones nominales y tiene que ser ajustado. La ecuación que relaciona la carga del motor con los valores medidos de corriente está dado por (1.4).

$$k_c = \frac{I_{med}}{I_{nom}} \cdot \left( \frac{U_{med}}{U_{nom}} \right) \cdot 100, \quad [\%] \quad (1.4)$$

donde:

$k_c$  - Coeficiente de carga del motor de inducción.

$U_{nom}$  - Tensión nominal del motor de inducción, [V].

$I_{nom}$  - Corriente nominal del motor de inducción, [A].

Estimar la potencia en el eje por la corriente se recomienda cuando sólo es posible la medición de la misma. La corriente que demanda un motor es aproximadamente lineal respecto a la carga para valores por encima del 50 % de carga, por debajo de este valor la corriente de magnetización, el factor de potencia y la curva de corriente presentan un incremento no lineal. Por tanto en la región de baja carga la medición de corriente no es indicador fiel del estado de carga.

### 1.2.3. Método del deslizamiento.

El método se basa en la medición de la velocidad de giro del motor. La carga se considera como el cociente entre el deslizamiento medido y el nominal. El incremento del deslizamiento es proporcional a la carga que acciona el motor, por ejemplo un motor funciona con un 50 % de carga, tiene un deslizamiento medio entre la velocidad nominal y

sincrónica[25]. Usando un tacómetro se puede medir la velocidad del eje y es posible estimar el coeficiente de carga del motor de inducción por (1.5).

$$k_c = \frac{(n_s - n)}{(n_s - n_n)} \cdot 100 = \frac{s}{s_n} \cdot 100, \quad [\%] \quad (1.5)$$

donde:

$n_s$  - Velocidad sincrónica del motor, [rev/min]

$n$  - Velocidad del rotor a un estado de carga desconocido, [rev/min]

$n_n$  - Velocidad a plena carga, [rev/min].

$s$  - Deslizamiento al estado de carga desconocido, [pu].

$s_n$  - Deslizamiento a carga nominal, [pu].

El deslizamiento varía inversamente con respecto al cuadrado de la tensión. Insertando un factor de corrección en (1.5) se obtiene el método de deslizamiento corregido por tensión dado en (1.6).

$$k_c = \frac{n_s - n}{(n_s - n_n) \cdot \left( \frac{U_{nom}}{U_{med}} \right)^2} \cdot 100, \quad [\%] \quad (1.6)$$

El método del deslizamiento sólo se recomienda cuando es posible la medición de la velocidad por medios ópticos. Uno de los problemas de este método es que se permite por parte del fabricante un error del 20 % en la velocidad nominal de la placa del motor. Para cargas bajas un equipo de medida poco exacto o una incorrecta medición de la velocidad pueden influir significativamente en el resultado de carga debido a que el motor girará a revoluciones cercanas a la velocidad sincrónica y cualquier pequeño error influye en el resultado final.

Los métodos mencionados en los epígrafes 1.1 y 1.2 pueden representar herramientas valiosas para los especialistas que en la industria llevan a cabo programas de ahorro de

energía o participan en la toma de decisiones que requieren estimar la eficiencia operacional de los motores en servicio, además de otros trabajos en este sentido[37].

Las desventajas fundamentales de estos tres métodos radica en la idealización que realizan para ser aplicados, estimando comportamiento lineal de pérdidas, y desestimando las condiciones reales de la calidad del suministro eléctrico.

### **1.3. Conclusiones parciales**

1. Los métodos desarrollados para determinar la eficiencia y el grado de carga de las máquinas asincrónicas no consideran los aspectos de la calidad de la energía en los escenarios industriales, aspecto a tener en cuenta ya que se propone evaluar el comportamiento de éstas máquinas en condiciones de campo.
2. La existencia de carga diferente a la nominal impone la determinación del coeficiente de carga del motor agregado por un método de mayor exactitud y precisión, debido a las desventajas de los métodos prácticos más utilizados.

# Capítulo 2



## CAPÍTULO 2. MÉTODO DEL MOMENTO EN EL ENTREHIERRO

### Introducción

Durante el desarrollo de todo trabajo investigativo, que garantice la calidad y veracidad de los resultados, es fundamental una adecuada aplicación del método que determinará la eficiencia en el sitio que ocupa el motor de inducción.

Este capítulo tiene como objetivo:

Exponer el fundamento de la aplicación del método del momento en el entrehierro.

En este trabajo se aplica el método del momento en el entrehierro en presencia de armónicos y desbalance al mismo tiempo.

Las pérdidas por fricción y batimiento del aire,  $p_{fw}$ , se expresan como una fracción de la capacidad de la máquina  $k_{fw}$ , y considerando que varían con el cuadrado de la velocidad se calculan por la ecuación(1.7),[38].

$$k_{fw} = 0.052 \cdot P_n^{-0.3296}, \quad [\text{pu}] \quad p_{fw} = k_{fw} P_{nag} \left( \frac{\Omega_{ag}}{\Omega_{nag}} \right)^2, \quad [\text{W}] \quad (1.7)$$

Las pérdidas adicionales nominales se estiman por la norma **IEC 60034-2-1** del 2007, Tabla 2.1

Tabla 2.1. 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
$P_n \leq 1 \text{ kW}$	$P_{ad} = 2.5\% P_{ab}$
$1 \text{ kW} < P_n < 10\,000 \text{ kW}$	$P_{ad} = [2.5\% - 0.5\% \log_{10} P_n] P_{ab}$
$P_n \geq 10\,000 \text{ kW}$	$P_{ad} = 0.5\% P_{ab}$

Fuente: [39]

donde:  $P_{ab}$  potencia absorbida por el motor, kW y  $P_n$  potencia nominal del motor, kW

Durante el funcionamiento de los motores asíncronos en el sitio, la carga está determinada por la exigencia mecánica en el eje de acuerdo a los requerimientos del proceso productivo, y los cambios que experimentan las magnitudes del estator son respuestas a estas cargas. Para el motor de inducción es determinante un método que permita obtener el momento en el eje y demás características de funcionamiento de forma precisa y con cierto nivel de exactitud. En este trabajo se utiliza el método del momento en el entrehierro considerando la presencia de desbalance y deformaciones de ondas en las corrientes y tensiones.

### **2.1. Método del momento en el entrehierro.**

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 se proponen como mejores candidatos claramente definidos en condiciones de campo los métodos ORMEL96, OHME y el del momento en el entrehierro[40]. 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 %.

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, considerando 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 durante la última década[40].

El método del momento en el entrehierro, por sus siglas en inglés (AGT), es visto como el mejor en términos de precisión y facilidad de implementación. Éste se desarrolló, basado en la conocida expresión del momento en el entrehierro[27]. Este método ha sido verificado por varios experimentos, resultando ser efectivo para estimar la eficiencia [27, 41-44]. 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.

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  $p_{adr}$ . El flujo de potencia y las definiciones de cada término de pérdidas en un motor de inducción se muestra en la Figura 2.1

El método del momento en el entrehierro (AGT) requiere de las siguientes mediciones: Tensiones de líneas, corrientes de fases, velocidad del rotor y resistencia del devanado del estator. Adicionalmente, para medir las pérdidas en el acero  $p_{core}$  y las pérdidas por fricción y batimiento del aire  $p_{fw}$ , es necesario un ensayo en vacío[45]. Los requerimientos de velocidad, resistencia del estator y el ensayo en vacío son las dificultades de este método.

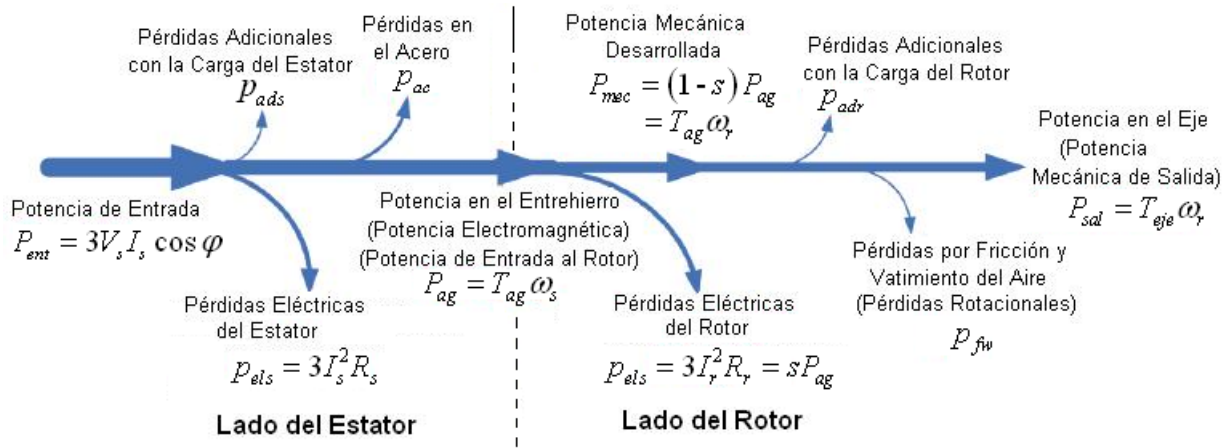


Figura 2.1. Flujo de potencia y definición de pérdidas del motor de inducción

Para minimizar estas dificultades y convertir el momento en el entrehierro en un método de bajo nivel de intrusión, la ecuación se desarrolla haciendo transformaciones en el método original. Esto mantiene una precisión satisfactoria, pero reduce grandemente el nivel de intrusión[46].

1. La velocidad del rotor no se toma directamente de las mediciones, esta se estima con alta precisión (0.005 p.u.) por el análisis espectral de la corriente del motor, extrayendo los armónicos de las ranuras de las corrientes del estator o a través de la velocidad nominal y los factores de cargas, asimetría, frecuencia y nivel de armónicos.

2. La resistencia del estator es estimada a través de los datos nominales, con adaptación a las condiciones reales de carga.
3. El ensayo en vacío ha sido eliminado por su alto nivel de intrusión. Los datos de este ensayo pueden ser estimado por los valores empíricos usando solo los datos nominales, similar a los métodos OHME y ORMEL96[15]. Especificando un poco más, las pérdidas combinadas de vacío son asumidas como 3.5 % de la potencia de salida nominal, la pérdidas por fricción y batimiento del aire es 1.2 % de la potencia de salida nominal o por la ecuación (1.7); y las pérdidas adicionales con la carga son estimadas por la norma IEEE-112.

### 2.1.1. Modelo matemático del método del momento en el entrehierro

Lo más importante del método del momento en el entrehierro (AGT) es su sencillez, dado que sólo 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 obtiene 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 en términos de tensiones de líneas y corrientes en las fases se calcula por (1.8):

$$p = -u_{ab}i_b - u_{ca}(i_a + i_b) = u_{ca}i_c - u_{ab}i_b, \quad [\text{VA}] \quad (1.8)$$

Lo anterior es válido siempre que las componentes de  $cd$  no estén presentes en las señales de tensión y corriente. Si las magnitudes de fase contienen componentes de secuencia cero ellas deben ser previamente separadas.

### Transformación de variables para eje directo y eje en cuadratura

La transformación  $dq0$ , se puede representar en una forma directa en términos del ángulo eléctrico  $\theta_{me}$  igual a  $poles/2$  multiplicado por el ángulo espacial,  $\theta_m$  entre el eje directo del rotor y el eje de la fase  $a$  del estator, según se define por la ecuación (1.9). Suponiendo que se representa una cantidad del estator que se va a transformar  $S_a, S_b, S_c$  (corriente, voltaje o flujo), es posible escribir la transformación en forma matricial como

$$\begin{bmatrix} s_d \\ s_q \\ s_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{me}) & \cos(\theta_{me} - 120^\circ) & \cos(\theta_{me} + 120^\circ) \\ -\sin(\theta_{me}) & -\sin(\theta_{me} - 120^\circ) & -\sin(\theta_{me} + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} [S(\theta_{me})] \begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} \quad (1.9)$$

La matriz  $S(\theta_{me})$  se denomina matriz de transformación directa. La transformación  $dq0$  se aplica a los valores instantáneos de las cantidades que se van a transformar, no a los valores *rms*.

Después de haber separado las componentes de secuencia cero en las tensiones y corrientes del estator, los vectores espaciales en los ejes  $d, q$  dado por  $v_{dqs}$  e  $i_{dqs}$ , se describen por (1.10):

$$v_{dqs} = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = S(\theta_{me}) \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad [V] \quad i_{dqs} = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = S(\theta_{me}) \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad [A] \quad (1.10)$$

Industrialmente, los motores son conectados a centros de control, donde existen los TP y TC instalados para propósitos de protección y/o mediciones. La propuesta del método es 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. La recolección de los datos se puede hacer desde el centro de control de motores, sin costo alguno.

### 2.1.2. Derivación de la ecuación para estimar el momento en el entrehierro

El sistema de ecuaciones para el estator en el sistema  $dq$  está dado por (1.11),

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_{me} \lambda_{qs} \\ v_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_{me} \lambda_{ds} \end{aligned}, \quad [\text{V}] \quad (1.11)$$

donde,  $\lambda_{ds}$ ,  $\lambda_{qs}$  son los vectores de flujo concatenado del estator por los ejes  $d$  y  $q$ ,  $R_s$  es el valor medio de la resistencia de la tres fases del estator y  $\omega_{me}$  la velocidad angular eléctrica del rotor, dada por,  $\omega_{me} = d\theta_{me}/dt$ .

Seleccionando un sistema de referencia estacionario  $\omega_{me} = 0$ , el flujo mutuo del estator está dado por la integral de la tensión de entrada menos la caída en la resistencia del estator (1.12).

$$\begin{aligned} \lambda_{ds}^e &= \int (v_{ds}^e - R_s i_{ds}^e) dt \\ \lambda_{qs}^e &= \int (v_{qs}^e - R_s i_{qs}^e) dt \end{aligned}, \quad [\text{Wb}] \quad (1.12)$$

La potencia instantánea  $p_{in}$ , a través de las magnitudes en el sistema  $dq$ , viene dada por (1.13),

$$p_{in} = \frac{3}{2} (u_{ds}^e i_{ds}^e + u_{qs}^e i_{qs}^e + 2u_0 i_0), \quad [\text{VA}] \quad (1.13)$$

y el momento en el entrehierro, puede expresarse cómo (1.14),

$$M_{em} = \frac{3}{2} \frac{\text{polos}}{2} (\lambda_{ds}^e i_{qs}^e - \lambda_{qs}^e i_{ds}^e), \quad [\text{Nm}] \quad (1.14)$$

Desarrollando en (1.14) a través de la matriz de transformación directa  $S(\theta_{me})$  se obtiene (1.15).

$$M_{em} = \frac{\sqrt{3} \text{ polos}}{6} \left\{ (2i_a + i_b) \int [v_{ab} - R_s(i_a - i_b)] dt + (i_a - i_b) \int [v_{ca} + R_s(2i_a + i_b)] dt \right\}, \quad [\text{Nm}] \quad (1.15)$$

Ecuación, vista en (1.15), que permite calcular el momento en el entrehierro a partir de las mediciones del sistema trifásico, donde *polos* representa el número de polos del motor y el contenido bajo la integral corresponde al flujo concatenado. Para la solución de la integral, dado un amplio número de muestra, se puede utilizar el método de integración trapezoidal, aunque se puede aplicar otros métodos de integración numérica de mayor precisión.

### **Estimado de la eficiencia**

La potencia de salida en el eje del motor  $P_{eje}$  es el producto del momento en el eje  $M_{eje}$  y la velocidad del rotor  $\omega_r$ . El momento en el eje, dado por (1.16), es la diferencia entre el momento en el entrehierro  $M_{em}$ , y el momento de pérdidas correspondiente a las pérdidas mecánicas  $p_{fw}$  y las pérdidas adicionales  $p_{adr}$  producidas por la corriente del rotor.

$$M_{eje} = M_{em} - \frac{P_{fw}}{\omega_r} - \frac{P_{adr}}{\omega_r}, \quad [\text{Nm}] \quad (1.16)$$

La mayor parte de las pérdidas adicionales del rotor se debe a la corriente del rotor, y las mismas se asumen por la norma **IEEE-112** o en su lugar la norma **IEC 60034-2-1** del 2007, finalmente la eficiencia  $\eta$ , viene dada por (1.17).

$$\eta = \frac{P_{eje}}{P_{ent}} = \frac{M_{eje} \cdot \omega_r}{P_{ent}} = \frac{M_{em} \cdot \omega_r - P_{fw} - P_{adr}}{P_{ent}}, \quad [\text{pu}] \quad (1.17)$$

El significado de las nomenclaturas utilizadas se definieron previamente.

La implementación del método del momento en el entrehierro requiere de un gran volumen de cálculos, por ello se realizó una aplicación auxiliar con Matlab.

## 2.2. Algoritmo del método de momento en el entrehierro bajo condiciones reales.

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]);**

Algunos trabajos determinan el comportamiento del motor de inducción, basado en el circuito equivalente y las variaciones de sus parámetros con la frecuencia y el tipo de secuencia[47], cuando están presentes las deformaciones de ondas y asimetría de tensión.

El algoritmo aquí presentado desarrolla el método del momento en el entrehierro considerando la presencia de armónicos en las formas de ondas de tensión y corriente, para ello supone la sustitución de un motor por un conjunto de motores acoplados a un mismo eje y alimentado por señales de diferentes frecuencias. Este 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, 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) [48] a cada ondas de corriente y tensión de línea, obteniendo las componentes de CD, y de armónicos desde el primero hasta  $N/2$ .
3. La presencia de asimetría complica la no sinusoidalidad[49], por ello cada armónico se divide en secuencia positiva y negativa. Esto será analizar un grupo de motores de diferentes frecuencias en régimen de asimetría conectado a un mismo eje.
4. Cada armónico de tensión, corriente, y momento, con sus dos sistemas, sec(+) y sec(-), se evalúan en el tiempo.
5. Se obtienen los momentos por secuencias, para cada armónico, promedios y totales.
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.
11. Se realiza el análisis del ciclo de vida o costo diferencial del motor existente y el seleccionado.
12. Los resultados pueden representarse 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.

### **Salidas en formas tabuladas y salvada en formato \*.txt**

La ejecución de esta aplicación ofrece los resultados siguientes.

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

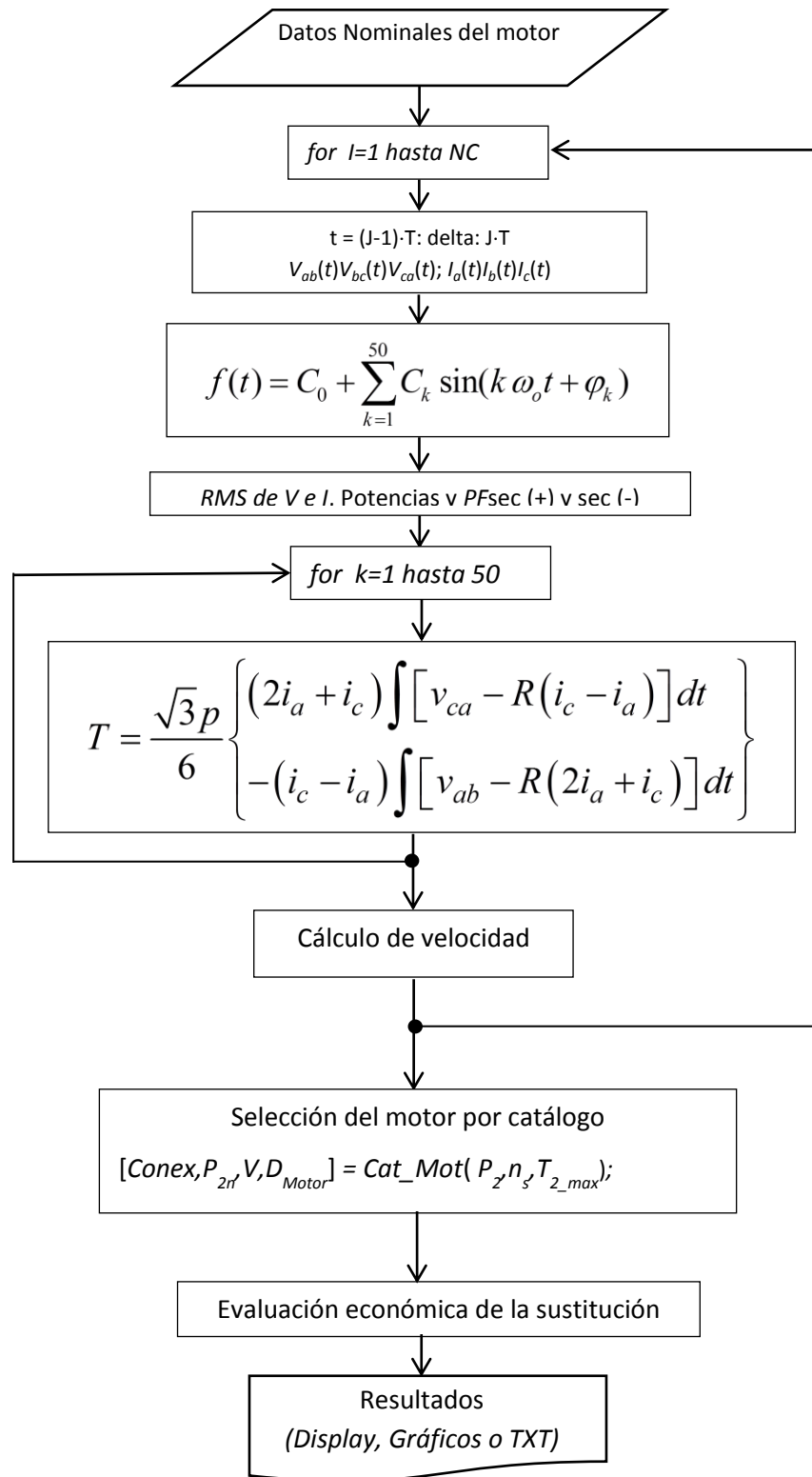


Figura 2.2. Algoritmo del método del momento en el entrehierro

La combinación de los datos nominales del motor agregado y las mediciones en el nodo de alimentación, a través del método del momento en el entrehierro, permite determinar el comportamiento del estado de carga, la eficiencia y demás magnitudes que caracterizan energéticamente el motor de inducción.

Dentro de las mediciones a realizar no está la velocidad, la cual se necesita para establecer un algoritmo de cálculo del método del momento en el entrehierro.

### 2.2.1. Estimado de la velocidad real del motor agregado

La velocidad se puede estimar a través del coeficiente de carga aproximado, suponiendo que la misma varía hasta un 5 % a plena carga e interpolando para la carga dada, o utilizar la velocidad estimada durante la realización del motor agregado nominal. En condiciones reales de explotación deben considerarse factores de ajustes de la velocidad ante las variaciones de tensión y de frecuencia y el desbalance[50]. En sistemas contaminados con armónicos puede introducirse el factor de distorsión armónica propuesto por la NEMA 30.01.2,[12].

Cuando se dispone de las formas de ondas de corrientes en las fases del estator, la velocidad del rotor de un motor de inducción puede ser estimada con la técnica de análisis espectral con mayor precisión que otros métodos[51-53]. Este método no requiere de los parámetros del motor, ni los modelos matemáticos del mismo, es insensible a los cambios de los parámetros con la frecuencia, la temperatura, o cualquier otra perturbación externa. Este observador de velocidad usa la transformada rápida de Fourier (FFT)[48], de sólo una corriente de fase del estator actual, para detectar la velocidad del rotor a cualquier condición de carga y cubre una amplia gama de velocidades. En la literatura[54-59] se proponen mejoras para los observadores de velocidad basados en los armónicos de ranuras del rotor.

La velocidad del rotor  $n$  viene dada por(1.18), [60, 61]:

$$n = \frac{60}{p} \left[ \frac{p}{Z} (f_{sh} + \beta f_0) \right] = \frac{60}{Z} (f_{sh} + \beta f_0), \quad [\text{rev/min}] \quad (1.18)$$

donde:

$n$  - Velocidad del rotor a cualquier estado de carga, [rev/min]

$f_0$  - frecuencia de la red, [Hz]

$f_{sh}$  - frecuencia del armónico de ranura de mayor energía, [Hz]

$Z$  - número de barras del rotor

$\beta$  - orden del armónico de la densidad de flujo del entrehierro, puede ser 1 o -3.

$p$  - número de pares del polo del motor

El número de ranuras del rotor  $Z$ , generalmente es desconocido, por tanto en la expresión (A.28) se tienen dos incógnitas  $f_{sh}$ , esto se resuelve por un proceso iterativo[62, 63], asignando valores pares al número de ranuras, desde 24 hasta 64. Se recomienda un número de cinco a 15 ciclos para obtener el espectro de frecuencia, con precisión[60].

Este método queda implementado, dentro del algoritmo general del método del momento en el entrehierro visto en la Figura 2.2.

### 2.3. Consideraciones para la evaluación económica

En muchos casos al decidir sobre nuevas inversiones se toma en consideración solamente el costo de adquisición e instalación de un sistema. Sin embargo, el costo inicial de muchos sistemas energéticos representa una fracción pequeña del costo total a lo largo de la vida útil del sistema[64].

Para un motor de inducción los costos de la energía representan las partidas principales, mientras que el costo inicial representa una pequeña fracción de los costos totales. En este trabajo se utiliza el costo del ciclo de vida como una opción en la evaluación energética del motor agregado, ver anexo A5 para más precisión.

El Costo del Ciclo de Vida (CCV) constituye un método que permite evaluar opciones de conservación de la energía a lo largo de la vida de un equipo o sistema, desde la

adquisición, instalación, operación y mantenimiento hasta el desmontaje y disposición final del mismo.

La esencia del método del Costo del Ciclo de Vida radica en llevar a valor presente todos los costos a lo largo de la vida del sistema y sumarlos[65]. La alternativa mejor será aquella que tenga el menor valor.

Este método posibilita realizar comparaciones entre diferentes alternativas para lograr un mismo fin productivo o servicio. Esto es particularmente útil en los casos en que no resulta factible determinar los ingresos que genera un proyecto dado, como pueden ser las inversiones en equipos de proceso específicos.

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 original en servicio[50]. En este proceso hay que considerar el estado de carga real de carga 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 estado de carga.

## **2.4. Conclusiones parciales**

1. Se establece el algoritmo del método del momento en el entrehierro considerando la presencia de armónicos y desbalance, diferentes a lo establecido en las principales literaturas al respecto, descomponiendo las ondas originales en componentes de diferentes frecuencias, lo cual permite caracterizar el comportamiento energético diferenciando las pérdidas por armónicos y desbalance, aspecto con dificultad en los métodos anteriores.
2. Se incorpora la determinación de la velocidad a través del método del armónico de ranura, el cual no depende de los parámetros del motor y presenta errores de velocidad menores del 5 %, con mayor precisión que muchos métodos utilizados.
3. El método del momento en el entrehierro permite adaptar al motor a las condiciones reales de operación y establecer la caracterización del comportamiento energético del mismo.

# Capítulo 3





## CAPÍTULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIONES. CASO DE ESTUDIO

### Introducción

Para la validación experimental del método se toman de referencia los trabajos realizados en la bibliografía consultada [46], donde se compara su efectividad versus otros métodos que determinan el rendimiento, ORNL y ORMEL96. Para el caso de estudio seleccionado el método considera los armónicos superiores y se compara con otro algoritmo[50] que no lo contemplan y no utilizan la descomposición en secuencias positivas y negativas.

Para determinar el potencial de ahorro asociado al motor, después de aplicar el método del momento en el entrehierro con elementos de selección de motores incluido, se utiliza el método del análisis del costo del ciclo de vida (anexo A5), 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.

Los objetivos específicos de este capítulo son los siguientes:

1. Aplicar el método del momento en el entrehierro a casos típicos y comparar resultados.
2. Evaluar energéticamente la selección de motores eléctricos

### 3.1. Resultados para el motor de inducción MI-2

El motor MI-2 tiene potencia nominal 85 kW. Las mediciones de las formas de ondas de tensión y corriente están contenidas en la base de datos **MI-2.mat**.

## Características de las mediciones y evaluación estadísticas para el motor MI-2

Para el motor MI-2, la estructura tiene la siguiente información

**DE1 =DO: [3072x6 double]**

**Df: [24x1 double]**

**Dnr:[]**

**DN: [1x13 cell]**

La matriz de velocidad está vacía, debido a que en este caso no se dispone de este tipo de medición.

El resumen de la estadística descriptiva de las mediciones recogidas en el motor MI-2 se refleja en la Tabla 3.1, donde se observan bajas desviaciones de las magnitudes medidas con sus medias.

Tabla 3.1. Resumen estadístico de las mediciones en el motor de inducción MI-2

	<i>Uab</i> (V)	<i>Ubc</i> (V)	<i>Uca</i> (V)	<i>Ia</i> (A)	<i>Ib</i> (A)	<i>Ic</i> (A)	<i>f</i> (Hz)	<i>P</i> (kW)	<i>CosFi</i> (pu)
Media	453.50	454.54	452.38	110.76	112.79	109.30	59.98	55.40	0.64
Error típico	0.00	0.18	0.14	0.14	0.11	0.11	0.01	0.07	0.00
Mediana	453.50	455.00	452.25	110.46	112.66	109.20	59.96	55.41	0.64
Moda	453.50	455.00	452.00	#N/A	#N/A	#N/A	59.94	#N/A	#N/A
Desviación estándar	0.00	0.87	0.70	0.66	0.55	0.56	0.05	0.34	0.00
Varianza de la muestra	0.00	0.76	0.48	0.44	0.31	0.31	0.00	0.12	0.00
Rango	0.00	3.50	2.00	2.01	1.96	1.95	0.15	1.13	0.01
Mínimo	453.50	453.00	451.50	109.87	111.86	108.34	59.91	54.94	0.63
Máximo	453.50	456.50	453.50	111.88	113.82	110.29	60.06	56.07	0.64
Nivel de confianza (95%)	0.00	0.37	0.29	0.28	0.23	0.24	0.02	0.14	0.00

La Tabla 3.2 presenta los resultados para el motor MI-2, después de aplicar el método del momento en el entrehierro, donde se destaca el bajo coeficiente de carga,  $k_c = 0.59$  pu.

Tabla 3.2. Datos operacionales y nominales del motor actual y del seleccionado

Parámetros	Simbología	UM	Motor actual		Motor seleccionado	
			Real	Nominal	Estimado	Nominal
Tensión valor promedio	$V_1$	V	453.47	440.00	453.47	440.00
Corriente valor promedio	$I_s$	A	110.96	140.97	84.29	97.00
Potencia activa entrada	$P_1$	kW	55.41	92.39	52.65	59.21
Potencia promedio en el eje	$P_2$	kW	50.43	85.00	50.43	55.95
Perdidas medias totales	$Z_p$	kW	4.98	7.39	2.22	3.26
Eficiencia media	$E_f$	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	$N_r$	rpm	1183	1176	1193	1185
Momento medio en el eje	$M_2$	Nm	406.97	690.26	403.88	450.87
Coeficiente de carga	$k_c$	pu	0.59		0.90	
Coeficiente de desbalance	$dv$	%	0.46		0.46	
THD medio tensión	$THDV$	%	1.08		1.08	
THD medio corriente	$THDI$	%	1.09		1.09	
Número de ciclos analizados	$NC$	Ciclos	24		24	
Tiempo de registro	$IT$	min	60.00		60	

Junto a los datos operacionales se presentan los nominales del motor MI-2, lo cual permite comparar los diferentes parámetros promedio reales del mismo. La Figura 3.1 muestra las características de potencia de entrada ( $P_1$ ), potencia de salida ( $P_2$ ), pérdidas totales ( $Z_p$ ),

coeficiente de carga ( $k_c$ ) y la eficiencia ( $E_f$ ) en función del tiempo, que determinan el comportamiento energético del motor de inducción MI-2. Es de notar que las variaciones en las diferentes magnitudes son despreciables, la eficiencia es alta y el coeficiente de carga bajo.

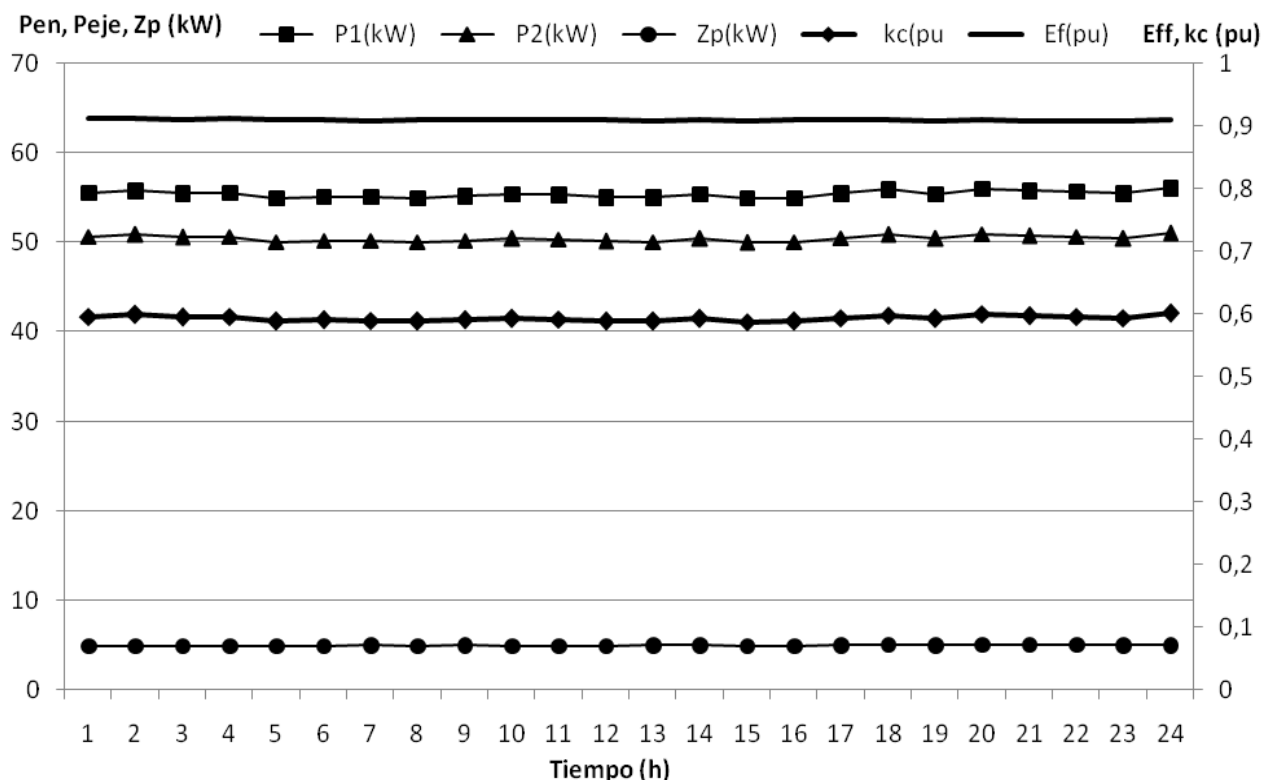


Figura 3.1. Comportamiento energético del motor MI-2

La Tabla 3.3 muestra la estadística descriptiva para las características de funcionamiento del motor de inducción MI-2, donde se observa una baja dispersión de las diferentes magnitudes con respecto a sus valores medios.

Tabla 3.3. Estadística descriptiva para el motor MI-2

	$P1(kW)$	$P2(kW)$	$Tag(Nm)$	$Nr(rpm)$	$Im(A)$	$Vm(V)$	$k_c(pu)$	$E_f(pu)$
Media	55.41	50.43	435.19	1183.49	110.96	453.47	0.59	0.91
Error típico	0.07	0.06	0.55	0.19	0.12	0.10	0.00	0.00
Mediana	55.43	50.42	435.30	1183.18	110.75	453.58	0.59	0.91
Moda	55.49	50.41	435.83	1185.04	110.74	453.66	0.59	0.91

Desviación estándar	0.34	0.32	2.68	0.92	0.58	0.48	0.00	0.00
Varianza de la muestra	0.12	0.10	7.16	0.85	0.33	0.23	0.00	0.00
Coeficiente de asimetría	0.37	0.32	0.37	0.53	0.57	0.12	0.36	0.75
Rango	1.12	1.07	8.83	2.95	1.95	1.82	0.01	0.00
Mínimo	54.96	49.98	431.61	1182.09	110.03	452.67	0.59	0.91
Máximo	56.08	51.05	440.44	1185.04	111.98	454.49	0.60	0.91
Nivel de confianza (95%)	0.14	0.13	1.13	0.39	0.24	0.20	0.00	0.00

### **Potencial de ahorro asociado al motor agregado MI-2**

La Tabla 3.4 muestra a modo de resumen los resultados para la evaluación del potencial de ahorro de energía a través del motor de inducción MI-2. Se comparan los resultados, para la energía consumida por el motor real y estimada para el motor sustituto, ahorrada por año y diario.

Tabla 3.4. Resumen de energía anual y por día para MI-2

	<i>MOaño</i> (kWh)	<i>MNaño</i> (kWh)	<i>MOdía</i> (kWh)	<i>MNdía</i> (kWh)	<i>Aaño</i> (kWh)	<i>Adía</i> (kWh)
Media	19948.473	18954.199	55.412	52.651	994.274	2.762
Suma	478763.350	454900.776	1329.898	1263.613	23862.574	66.285

Además de la influencia de la eficiencia y el factor de carga se puede considerar el período de recuperación de la inversión (PRI), si de seleccionar un motor de inducción se trata. La Tabla 3.5 recoge los datos iniciales del cálculo económico y los resultados referidos al costo del ciclo de vida obtenido para el motor MI-2. También se presenta el tiempo de recuperación de la inversión de 3.36 años y un CCV diferencial de 2514.97 USD.

Tabla 3.5 Datos para el cálculo económico y costos del ciclo de vida

Datos de entrada para el cálculo económico			Resultados del costo del ciclo de vida		
Vida útil del motor	12	Años	Costo de la Energía MV	3191.76	USD
Tasa de Descuento	0.12	Pu	Costo de la Energía MN	3032.67	USD
Costo de la Energía	0.08	USD/kWh	CCV del motor Viejo	11955.64	USD
Horas de Trabajo Diario	24	Horas	CCV del motor Nuevo	9440.67	USD
Días de Trabajo Anuales	360	Días	CCV Diferencial	2514.97	USD
Precio del Motor Nuevo	6408.00	USD	PRI	3.36	años
Precio del Motor Viejo	8763.88	USD	Ahorro por sustitución	2.76	kW

Las principales características que determinan el comportamiento energético del motor de inducción MI-2, se presentan en las siguientes figuras.

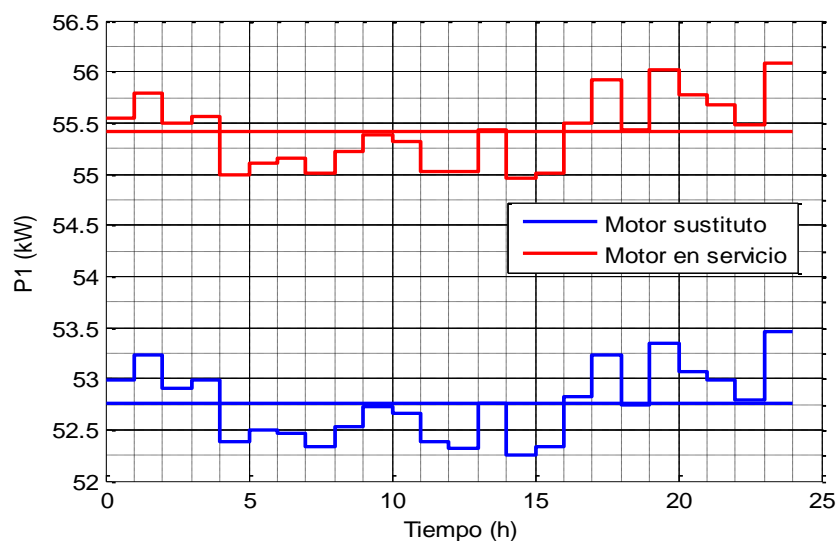


Figura 3.2. Potencia de entrada para el motor original y el seleccionado

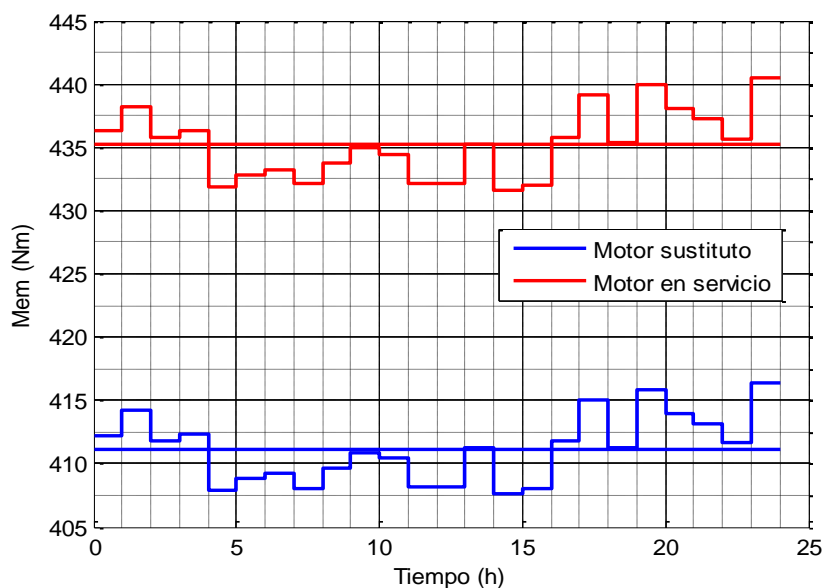


Figura 3.3 Momento en el entrehierro para el motor original y el seleccionado

La Figura 3.2 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 en la Tabla 3.5 como ahorro por sustitución. El momento electromagnético Figura 3.3 también muestra la diferencia entre ambos motores

(435.19 Nm vs 412.04 Nm), debido a la reducción de corriente del motor por disminución de potencia.

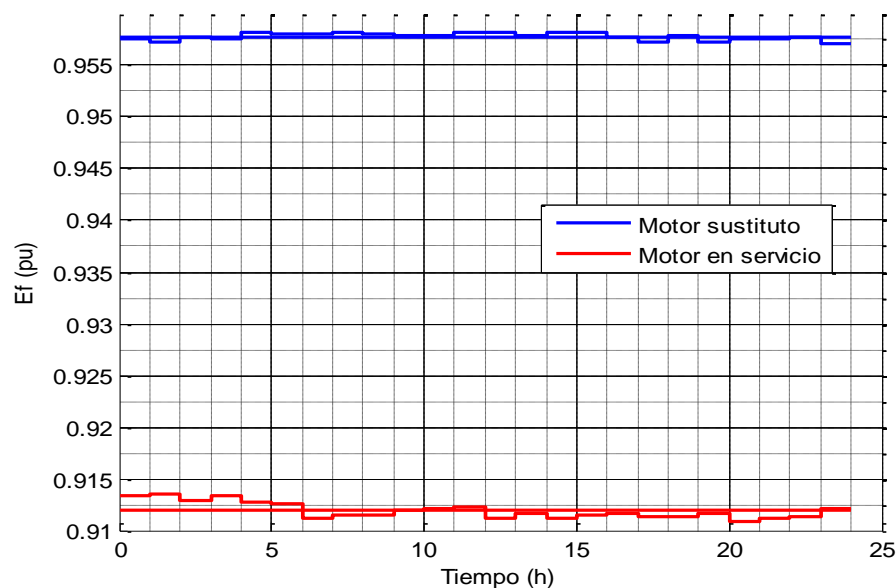


Figura 3.4. Eficiencia para ambos motores

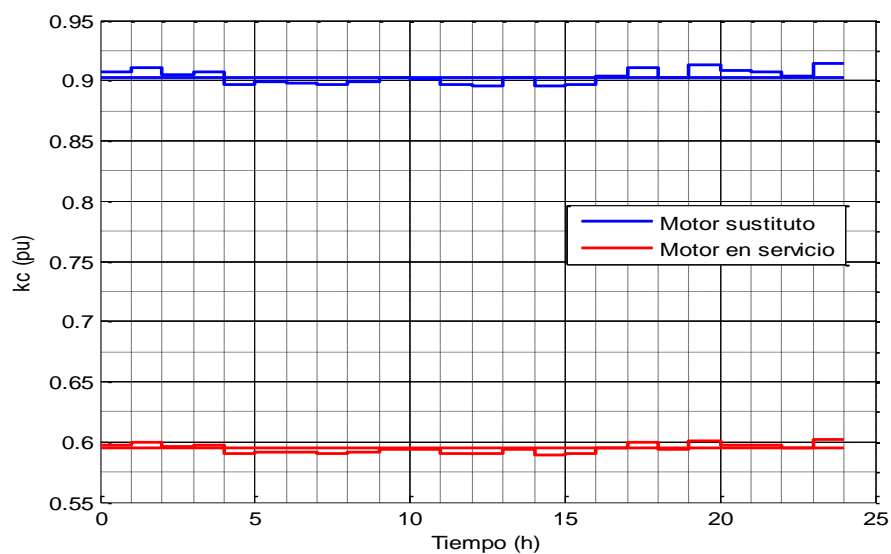


Figura 3.5. Factor de carga de ambos motores

La Figura 3.4 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 3.5 también muestra la diferencia entre ambos motores (0.593 vs 0.901), debido a la reducción de la potencia nominal del motor seleccionado.

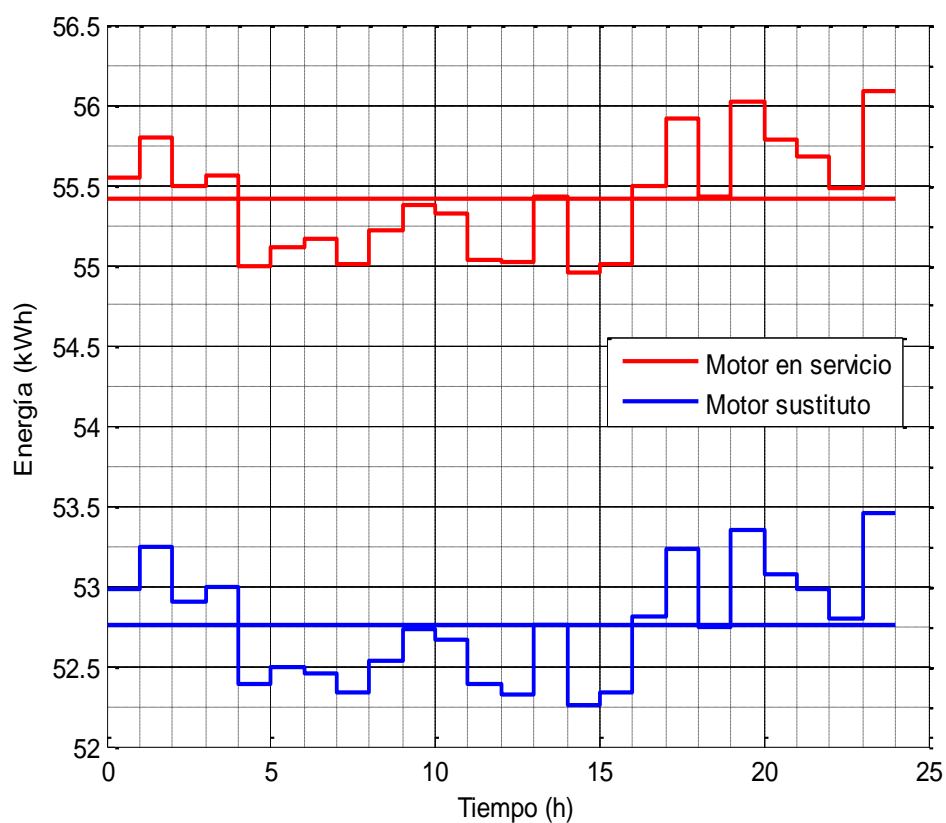


Figura 3.6 Energía día motor original y seleccionado

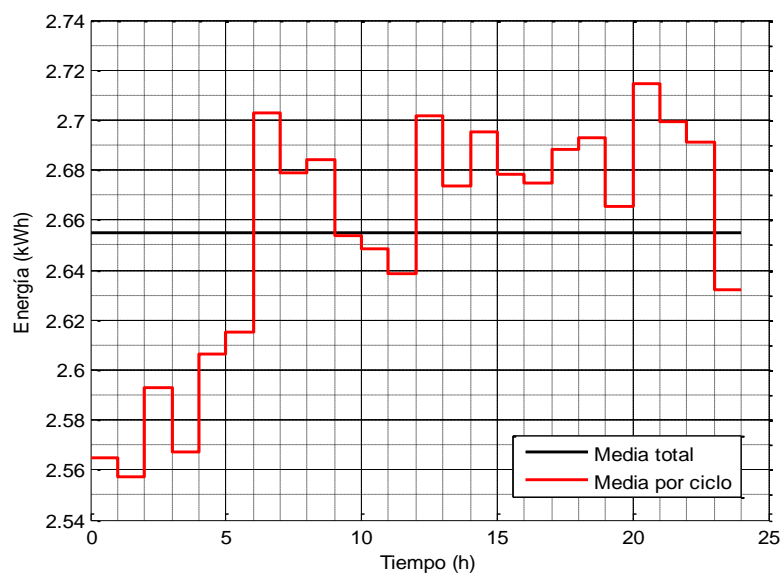


Figura 3.7 Ahorro de energía día por sustitución del MI-2

La Figura 3.6 muestra el comportamiento diario de la energía consumida en 24 hs para el motor en funcionamiento, con valor medio 55.412 kWh y total 1329.90 kWh, y el estimado para el seleccionado de 52.651 kWh y total 1263.613 kWh, diferencia media de 2.762 kWh y ahorro total de 66.285 kWh, Figura 3.7, visto como ahorro por sustitución.

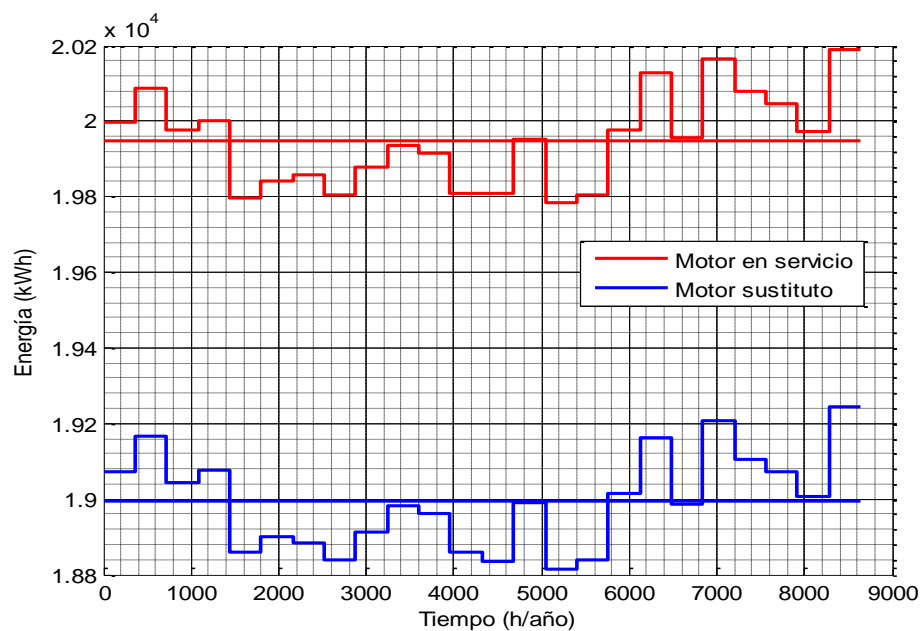


Figura 3.8. Energía anual motor original y seleccionado

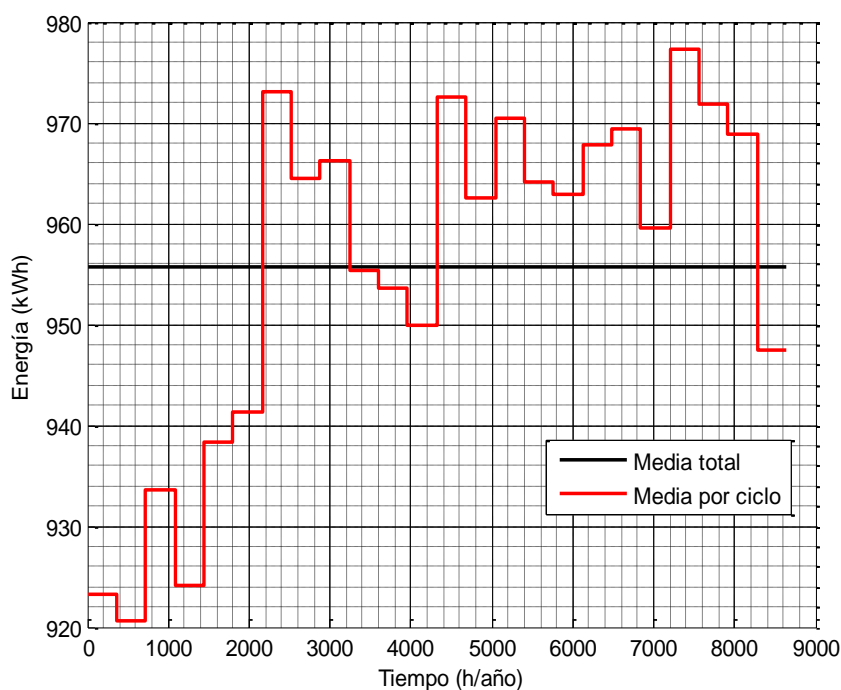


Figura 3.9. Ahorro de energía anual por sustitución de MI-2

La Figura 3.8 muestra el comportamiento anual de la energía consumida en 8760 hs para el motor en funcionamiento, con valor medio 19948.473 kWh y total 478763.35 kWh, y el estimado para el seleccionado de 18954.2 kWh y total 454900.776 kWh, diferencia media de 994.274 kWh y ahorro total de 23862.574 kWh, Figura 3.9, visto como ahorro por sustitución.

Como resultado de la sustitución del motor en funcionamiento de 85 kW por otro de 55.95 kW, se reduce la corriente demandada desde la red (110.96 vs 84.29 A), disminuye 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 significativa. Estas y otras magnitudes se pueden encontrar en la Tabla 3.2

### 3.2. 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 3.6, 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 [12] y la distorsión armónica total THD [66] de tensión es de 1.39%

Tabla 3.6. Resultados para el motor que acciona la bomba de desagüe

		Motor en servicio (MF)		Motor sustituto (MN)	
Parámetros	Nominales	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
$\cos\phi$ (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 3.10 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.

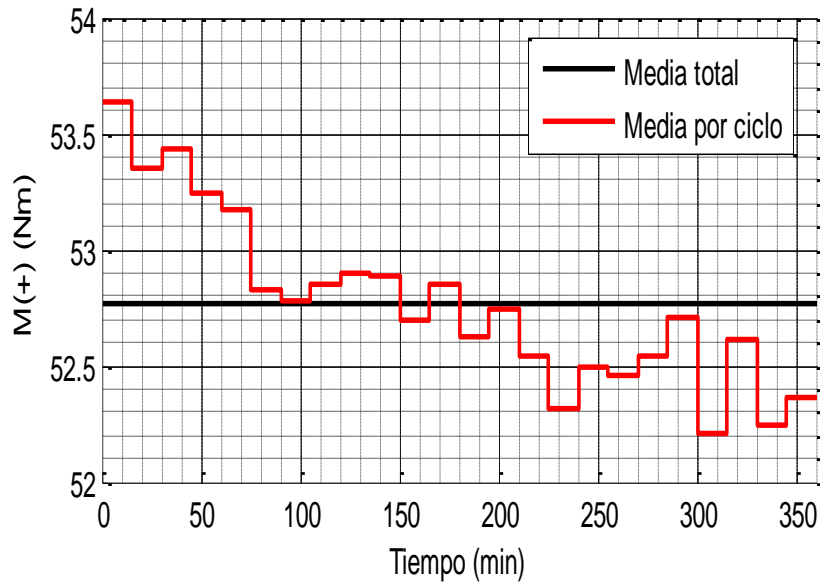


Figura 3.10. Momento de secuencia positiva

La Figura 3.11 representa el Momento vs tiempo para secuencia negativa, los valores máximos 13.29 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 asimetría menor de 5% en la onda de tensión, de acuerdo con la norma IEEE 112 – 2004 (IEEE Standard 112, 2004).

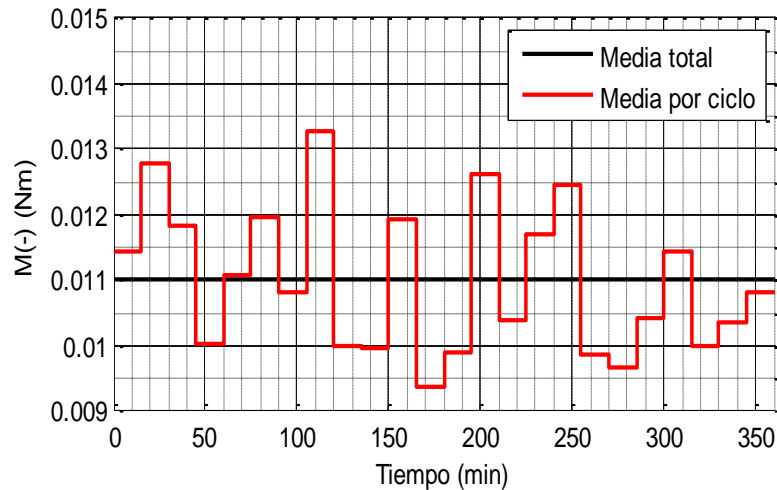


Figura 3.11. Momento de secuencia negativa

La Figura 3.12 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).

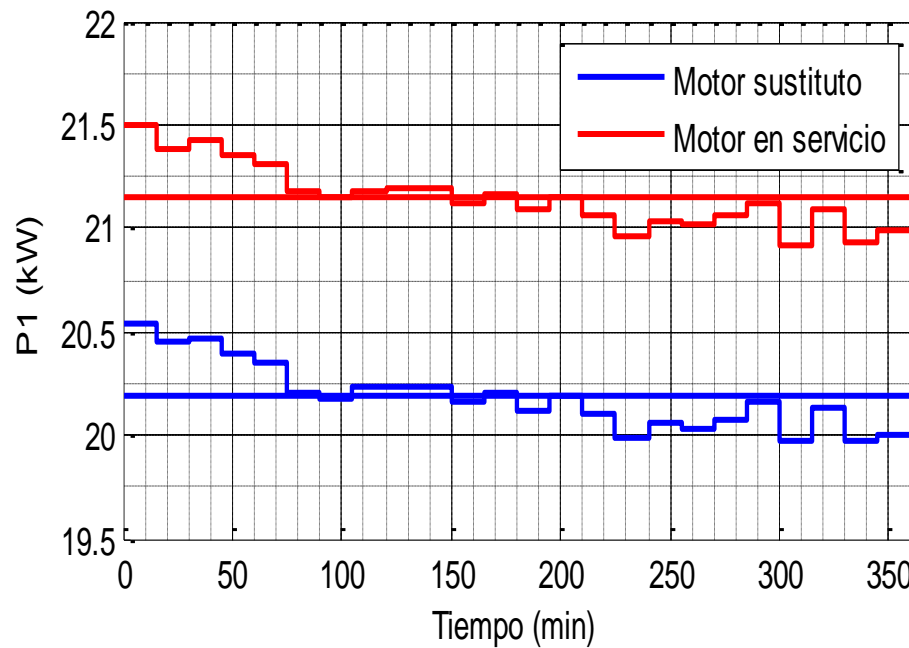


Figura 3.12 Potencia de entrada real y estimada

La Figura 3.13 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.

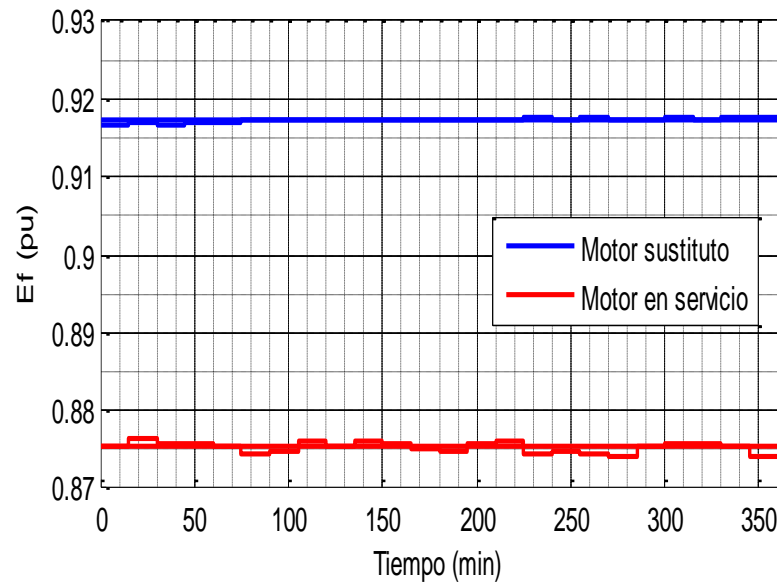


Figura 3.13 Eficiencia real y estimada

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 (CCV) 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 3.6 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 mineras. 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 [50].

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.



### 3.3. Conclusiones parciales

1. La combinación de las mediciones, los parámetros del motor y el algoritmo del método del momento en el entrehierro permiten adaptar el motor a las condiciones reales de operación, obteniendo las características que determinan su comportamiento energético a cualquier estado de carga (potencia en el eje, eficiencia, etc.).
2. El 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.
3. La variante del método del momento en el entrehierro en presencia de armónicos y desbalance de tensión contempla las pérdidas en el motor por estos conceptos, lo que permite perfeccionar otros métodos al considerar la asimetría de las ondas con respecto al eje de la abscisas.



## CONCLUSIONES GENERALES

- El método presentado permite evaluar las prestaciones energéticas de los motores en explotación que operen a velocidad constante o ligeramente variable en las empresas mineras.
- La presencia de armónicos en la fuente que suministra energía eléctrica al motor de inducción aumenta las pérdidas y disminuye la eficiencia de este.
- El programa desarrollado permite iniciar proyectos de evaluación, sustitución y perfeccionamiento energético en los motores asíncronos en explotación y sus cargas en las empresas mineras y sistemas industriales.
- El método del momento en el entrehierro en presencia de armónicos, contempla las pérdidas en el motor por este concepto, perfeccionando otros métodos existentes.



## RECOMENDACIONES

1. Aplicar el método del motor agregado, junto al método del momento en el entrehierro, a la evaluación energética de cargas con motores de inducción, donde su número sea elevado, extendiendo el método propuesto a todas las barras donde sea posible.
2. Dar continuidad a la investigación para incorporar la determinación de las características operacionales del motor de inducción alimentado por variadores de velocidad, donde la frecuencia y la distorsión de las ondas juegan un importante papel.
3. Desarrollar la herramienta propuesta on-line sobre la base de este trabajo, con sensores de tensión, corriente y un software auxiliar.



# *Referencia Bibliográfica*

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CUMMINGS, P. G, Bowers, W. D. y Martiny, W. J. Induction motor efficiency test methods. *IEEE Trans. Ind. Applicat*, May-June 1981, IA(17):253–272 p.
- [2] BONNETT, A. H. An update on ac induction motor efficiency. *IEEE Transaction Industrial Application*, Sept-Oct. 1994, vol. 30: 1362–1372 p.
- [3] HSU, J. S, Otaduy, P. J. y Kueck, J. D. Efficiency and reliability assessments of retrofitted high-efficiency motors. En: *Conf. Rec. IEEEIAS Annu. Meeting*. Lake Buena Vista, 1995a: 2745–2751 p.
- [4] GRAY, G. G; MARTINY, W. J. Efficiency testing of medium induction motors. A comment on IEEE Std 112-1991. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, September, 1996, 11(3): 495-499 p.
- [5] NILSSON, N. E. A comparison of ANSI and IEC standards for power station polyphase induction (asynchronous) motors. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, September 1996, 11(3): 500-507 p.
- [6] GHAI, N. K. IEC and NEMA standards for large squirrel-cage induction motors. A comparison. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, September 1999, 14(3):545-552 p.
- [7] RENIER, B; et al. Comparison of standards for determining efficiency of three phase induction motors. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, September 1999, 14(3).
- [8] ALMEIDA, A.I. de y col. 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*, march-april 2002, 38(2): 608-614 p.
- [9] ALMEIDA, A. de; Ferreira, F. *Efficiency Testing of Electric Induction Motors*. [en línea]. 2006. [Consultado:2012-03-20]. Disponible en: [http://www.clasponline.org/download/Energy\\_Testing/2000/116/Almeida\\_paper.pdf](http://www.clasponline.org/download/Energy_Testing/2000/116/Almeida_paper.pdf)>

- [10] MARTINEZ, E; TORRENT, M. Determinación del rendimiento en motores de inducción trifásicos según la Norma IEC 60034-2-1. *Técnica Industrial*, Julio - Agosto 2009: 36-41p.
- [11] *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*. In, 2004.
- [12] NEMA. *Standards Publication MG 1-2003*, Revision 1-2004, Motors and Generators. In. Washington, D.C, 2004.
- [13] DOUGLAS, J. G. Efficacy of methods for estimating in-service motor efficiency. [en línea].1997. [Consultado: 2012-04-20]. Disponible en : [http:// www.dynamics-research.com/MAS1000/ITMAS-1000.htm](http://www.dynamics-research.com/MAS1000/ITMAS-1000.htm)>.
- [14] ROSA, E. V. de la. *Metodología para la determinación y mejoramiento de los motores asincrónicos en la industria..* Camagüey: Universidad de Camagüey, 1998.
- [15] HSU, John S; et al. Comparison of induction Motor Field Efficiency Evaluation Methods. *IEEE Transacctions on Industry Applications*, january-february 1988, 34(1), 117-125 p.
- [16] Motor Challenge Program. *Determining electric motor load and efficienc* . [en línea]. 1999. [Consultado: 2012-03-23]. Disponible en <http://www.motor.doe.gov>.
- [17] LEÓN, C de. *Metodologías para el análisis energético de los motores en servicio y del empleo de accionamientos eficientes en Santa Clara*. Tesis de Doctor.UCLV, 2002.
- [18] COSTA M, A. y Vilaragut, M. Determinación del comportamiento energético del motor de inducción a partir de sus datos de catálogo y lectura de las corrientes del estator. En: *III Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente*. Cienfuegos, 2004.
- [19] HOLMQUIST, J.R; ROOKS, J.A. y RICHTER, M.E. Practical Approach for Determining Motor Efficiency in the Field Using Calculated and Measured Values. *IEEE Transaction on Industry Applications*, january-february 2004, 40(1): 242-248 p.



- [20] VILARAGUT, M; et.al. Métodos para la determinación de la eficiencia energética en los motores de inducción trifásicos. *Ecosolar*, octubre-diciembre 2004, no. 10.
- [21] BECNEL, C. L; et al. Determining motor efficiency by field testing. *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, May-June 1987, IA(23): 440–443p.
- [22] HEUREUX, G. L; STEELE, B. y MINHAZ, R. Field Estimation of Induction Motor Efficiency. [en línea]. 2006. [Consultado: 2012-05-23]. Disponible en: [http://www.ee.umanitoba.ca/programs/undergraduate/courses/coursehome/c24400/24\\_400/2006-07/FinalReports/G19 Final Report 2006.pdf](http://www.ee.umanitoba.ca/programs/undergraduate/courses/coursehome/c24400/24_400/2006-07/FinalReports/G19%20Final%20Report%202006.pdf)>.
- [23] FERREIRA, F. y de Almeida, A. Considerations on In Field Induction Motor Load Estimation Methods. In *18th Inter. Conf. on Electrical Machines (ICEM'08)*, Conf. Proc. Vilamoura, Portugal, 2008.
- [24] ANDREAS, John C. *Energy Efficient Electric Motors*. New York: Marcel Dekker, 1992.
- [25] RUBIN, N.P; Harley, R.G. y DIANA, G.. Evaluation of Various Slip Estimation Techniques for an Induction Machine Operating Under Field-Oriented Control Conditions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, November-December 1992, 28(6).
- [26] BOGLIETTI, A; et.al. Induction motor equivalent circuit parameters determination from standard tests made with inverter supply. En: Sixth International Conference, 1993, 271 – 276 p.
- [27] KUECK, J. D; et al. Assessment of Available Methods for Evaluating In-Service Motor Efficiency. En: ORNL/TM-13237, 1996.
- [28] CATHEY, J.J. *Electric Machines: Analysis and Design Applying MATLAB*. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [29] COSTA M, A; et al. Determinación Experimental de los Parámetros del Motor de Inducción Trifásico Considerando la Variación de los Parámetros del Rotor. En *XII Simposio de Ingeniería Eléctrica*, Santa Clara, Cuba, 2005.

- [30]ALMEIDA, A.I de. *Characterization of Motor Systems in the EU. Improving the Penetration of Energy Efficient. Motors and Drives. SAVE II Study.* [en línea]. 2006. [Consultado: 2012-02-2]. Disponible en: <http://www.iea.org/textbase/work/2006/motor/De%20ALMEIDA%20IEA-Motor-Part-I-15-May-06-Final.pdf>.
- [31]HSU, S; SORENSON, P.J. Field assessment of induction motor efficiency through air-gap torque. *IEEE Trans. Energy Conversion*, Sept. 1996, vol. 11: 489–494 p.
- [32]KEVIN, D. Hurst; THOMAS, G. H. Sensorless Speed measurement using Current harmonic Spectral Estimation in Induction Machine Drive. *IEEE Transaction on Power Electronics*, January 1996, II(1).
- [33]HENAO, H; RAZICK, H; CAPOLINO, G.A. Analytical Approach of the Stator Current Frequency Harmonics Computation for Detection of Induction Machine Rotor Faults. *IEEE Transaction on Industry Application*, Jun 2005, 41(3).
- [34]BENSALEM, Y. A Sensorless Neural Network Speed Control of Induction Motor Drive. *International Journal of Signal Control and Engineering Application*, 2008, 1(2). 150-158 p.
- [35]WALLACE, A, y col. A laboratory assessment of in-service motor efficiency testing methods. En: *IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record*. Milwaukee, Wisconsin, USA, 1977.
- [36]Motor Challenge Program. *Manual del MotorMaster+ 3.0.* [en línea]. 1997. [Consultado: 2012-04-11]. Disponible en:<http://www.motor.doe.gov>.
- [37]PÉREZ, A.I; Rodríguez, J.L. Estimación Energética de Motores de Inducción en Servicio. En: *XII Simposio de Ingeniería Eléctrica*. Santa Clara, Cuba, 2005.
- [38]GÓMEZ, Sarduy J. R. Determinación de la Eficiencia de los Motores Asíncronos con Tensiones Desbalanceadas en Condiciones de Campo. En: Santa Clara, 2006, 117p.

- [39] Standard IEC # 60034-2-1 *Rotatory Electrical Machines part 2-1, Standard Methodes For Determy Losses And Efficient From Tests*. Switzerland: Standard IEC, 2007.
- [40] BIN, Lu; et al. A survey of efficiency-estimation methods of in-service induction motors. *IEEE Trans. Ind. Appl*, Jul.-Aug ,2006b, 42(4): 924-933 p.
- [41] HSU, J. S, et al. Possible errors in measurement of air-gap torque pulsations of induction motors. *IEEE Trans. Energy Conversion*, Mar 1992, vol. 7: 202–208 p.
- [42] HSU, J. S. Monitoring of defects in induction motors through air-gap torque observation. *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Sept.-Oct. 1995, vol. 31: p. 1016–1021.
- [43] HSU, J; SCOGGINS, B.P. Field test of motor efficiency and load changes through air gap torque. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, September, 1995b, vol. 10, 477 - 483 p.
- [44] HSU, J. S; SCOGGINS, B. P. Field test of motor efficiency and load changes through air-gap torque. *IEEE Trans. Energy Conversion*, Sept. 1995c, vol. 10, 471-477 p.
- [45] FITZGERALD, A. E; KINGSLEY, C.Jr; UMANS, Stephen D. *Electric Machinery*. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [46] BIN, Lu; et al. A Nonintrusive and In Service Motor Efficiency Estimation Method Using Air Gap Momento with Considerations of Condition Monitoring. En: *Proc. IEEE Ind. Appl. Annu. Meeting*, 2006a.
- [47] EGUILUZ, L.I, et al. *Performance Analysis of a Three-phase Induction Motor under Non-sinusoidal and Unbalanced Conditions*. [en línea]. 1999. [Consultado: 2012-02-20]. Disponible en: [http://www.diee.unican.es/pdf/gijon99\\_2.pdf](http://www.diee.unican.es/pdf/gijon99_2.pdf)
- [48] OPPENHEIM, A. V. y SCHAFFER, R. W. *Discrete-Time Signal Processing*. New Jersey: Prentice-Hal, 1999.
- [49] ARMAS, M. de; et al. Análisis energético de máquinas asincrónicas. Teoría de los campos rotatorios. En: *Conferencia internacional Ingeniería Eléctrica*. 2006.

- [50] ARMAS, M. de, Gómez, J. y Viego, P. Evaluación de Motores en Servicio. En: *Convención de Ingeniería Eléctrica CIE2011*. Santa Clara, Cuba, 2011.
- [51] ATKINSON, D; et al. Observers for Induction Motor State and Parameter Estimation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, November - December, 1991, 21(6.).
- [52] INANC, N; et al. A new sliding mode flux and speed observer for speed sensorless control of induction machine. En: *Proceedings of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference*. 2000, 574-578 p.
- [53] KIM, Y.R, Sul, S.K. y Park, M.H. Speed sensorless vector control of induction motor using extended Kalman filter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1994, vol. 30, 1225-1233 p.
- [54] BLASCO, R; et al. Performance of FFT-rotor slot harmonic speed detector for sensorless induction motor drives. En: *Proceedings of the IEEE Electric Power Applications*, 1996, vol. 143:258-268 p.
- [55] BLASCO, R; SUMNER, M; ASHER, G.M. Speed measurement of inverter fed induction motors using the FFT and the rotor slot harmonics. En: *Proceedings of the Fifth International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives*. 1994, 470-475 p.
- [56] HURST, K. D. y Habetler, T. G. Sensorless speed measurement using current harmonic spectral estimation in induction machine drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1996, vol. 11: 66-73 p.
- [57] AIELLO, M; CATALIOTTI, A; NUCCIO, S. An induction motor speed measurement method based on current harmonic analysis with the chirp-Z transform. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2005, vol. 54: 1811-1819 p.
- [58] FERRAH, A, BRADLEY, K. J; ASHER, G.M. An FFT-based novel approach to noninvasive speed measurement in induction motor drives. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1992, vol. 41: 797-802 p.

- [59] FERRAH, A; et al. The effect of rotor design on sensorless speed estimation using rotor slot harmonics identified by adaptive digital filtering using the maximum likelihood approach. En: *Proceedings of the Thirty-Second IAS Annual Meeting*. 1997: 1128-135 p.
- [60] SILVA, A. M da. *Induction motor fault diagnostic and monitoring methods*. Milwaukee: Wisconsin, 2006.
- [61] STOCKS, M. *Modeling, Analysis, State and Parameter Estimation of Faulty Induction Machines*. Lulea Sweden, 2006.
- [62] VELEZ-REYES, M, MINAMI, K; VERGHESE, G.C. Recursive speed and parameter estimation for induction machines. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Oct. 1989, vol. 1: 607- 611 p.
- [63] VELEZ-REYES, M; et al. Developing Robust Algorithms for speed and Parameter Estimation in Induction Machines. En: *Proceeding of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, Florida, 2001.
- [64] BORROTO N; et al. *Gestión y Economía Energética*. Cienfuegos: Universitaria Cienfuegos, 2006.
- [65] *Selección Económica y Energéticamente Eficiente de Motores Eléctricos. Evamotor 1.0. Manual del Usuario. Procobre Chile*. [en línea]. 2005. [Consultado: 2012-05-03]. Disponible en: [http://www.procobre.org/procobre/pdf/inst\\_electricas\\_uso\\_eficiente.pdf](http://www.procobre.org/procobre/pdf/inst_electricas_uso_eficiente.pdf)
- [66] IEEE Standard 519. *Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia*. New York: IEEE, 1992.

## Referecia Bibliografica de los Anexos

- [1] ANDREAS, J. C. *Energy Efficient Electric Motors*. New York: Marcel Dekker, 1992.
- [2] RUBIN, N. P; HARLEY, R.G.y DIANA, G, Evaluation of Various Slip Estimation Techniques for an Induction Machine Operating Under Field-Oriented Control Conditions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, November - December 1992, vol. 28.
- [3] PÉREZ A. I; RODRÍGUEZ, J. L. *Estimación Energética de Motores de Inducción en Servicio* [CD-ROM], 2005.
- [4] ARMAS M. de; GÓMEZ J.y VIEGO P. *Evaluación de Motores en Servicio* [CD-ROM], 2011.
- [5] NEMA, *Standards Publication MG 1-2003, Revision 1-2004, Motors and Generators*, Washington, D.C2004.
- [6] ATKINSON,D; ACARNLEY, P.y JOHN, F.W. Observers for Induction Motor State and Parameter Estimation. *IEEE Transactions on Industry Applications*, November-December, 1991, vol. 21.
- [7] N. INANC, M. K. et al. A new sliding mode flux and speed observer for speed sensorless control of induction machine. En:*Proceedings of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference*, 2000, p. 574-578.
- [8] KIM, Y;et al. Speed sensorless vector control of induction motor using extended Kalman filter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1999, .vol. 30, p. 1225-1233
- [9] BOSE, B.K. *Modern power electronics and AC drives*. New York: Prentice Hall, 2002.
- [10] OPPENHEIM, A.V. y SCHAFER, R.W. *Discrete-Time Signal Processing*. New Jersey: Prentice-Hal, 1999.
- [11] BLASCO R, G. M; et al. Performance of FFT-rotor slot harmonic speed detector for sensorless induction motor drives. En: *Proceedings of the IEEE Electric Power Applications*, vol:143 258-268 p. 1996.

- [12]BLASCO R; SUMNER, M. Y ASHER, G.M. Speed measurement of inverter fed induction motors using the FFT and the rotor slot harmonics. En: *Proceedings of the Fifth International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives*, 1994: 470-475 p.
- [13]HURST, K.D.y HABETLER, T.G. Sensorless speed measurement using current harmonic spectral estimation in induction machine drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1996, vol. 11: 66-73 p.
- [14]AIELLO, M; Cataliotti, A.y Nuccio S. An induction motor speed measurement method based on current harmonic analysis with the chirp-Z transform. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2005, vol. 54:1811-1819 p.
- [15]FERRAH, A; BRADLEY; K.J, y ASHER; G.M. An FFT-based novel approach to noninvasive speed measurement in induction motor drives. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 1992, vol. 41: 797-802 p.
- [16]FERRAH, A; et al. The effect of rotor design on sensorless speed estimation using rotor slot harmonics identified by adaptive digital filtering using the maximum likelihood approach. En: *Proceedings of the Thirty-Second IAS Annual Meeting*, 1997:128-135p.
- [17]SILVA, A.M. da. Induction motor fault diagnostic and monitoring methods,. Tesis de maestría. Milwaukee, Wisconsin, 2006
- [18] STOCKS, M. Modeling, Analysis, State and Parameter Estimation of Faulty Induction Machines. Tesis Doctoral. Lulea Sweden, 2006.
- [19]VELEZ-REYES, M; MINAMI, K ;ERGHESE G. C. Recursive speed and parameter estimation for induction machines. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Oct. 1989, vol. 1: 607- 611 p.
- [20]VELEZ-REYES, M; LIAM PUNG, W.y Ramos, T.J.E. Developing Robust Algorithms for speed and Parameter Estimation in Induction Machines. En: *Proceeding of the 40th IEEE Conference on Decision and Control.*, Florida, 2001.
- [21] *Selección Económica y Energéticamente Eficiente de Motores Eléctricos. Evamotor 1.0. Manual del Usuario. Procobre Chile.* [en línea]. 2005. [Consultado: 2012-03-2]. Disponible en:

[http://www.procobre.org/procobre/pdf/inst\\_electricas\\_uso\\_eficiente.pdf](http://www.procobre.org/procobre/pdf/inst_electricas_uso_eficiente.pdf)

[22] Uso eficiente de la energía. *Procobre*. [en línea]. 2005a. [Consultado: 2012-03-20].  
Disponible en:

[http://www.procobre.org/procobre/pdf/inst\\_electricas\\_uso\\_eficiente.pdf](http://www.procobre.org/procobre/pdf/inst_electricas_uso_eficiente.pdf)



# *Las Anexas*



## ANEXOS A. Evaluación de eficiencia y herramientas utilizadas

### Anexo A1. Métodos más utilizados para determinar el estado de carga del motor de inducción

---

De los métodos de evaluación de la eficiencia en el campo, para determinar el grado de carga del motor de inducción, tienen mayores aplicaciones industriales el método de la corriente y el del deslizamiento, por ser los de menores exigencias de la instrumentación. Actualmente se emplea una combinación de métodos con el nombre de método de la potencia de entrada [1]. Los otros métodos aunque permiten obtener el grado de carga, requieren de un personal calificado y dedicado exclusivamente a ellos, industrialmente no realizable.

#### A1.1. Medición de la potencia de entrada

Se puede cuantificar el estado de carga del motor por comparación directa de la potencia de entrada medida bajo carga y la potencia requerida cuando el motor opera a capacidad nominal.

$$P_{ent} = \sqrt{3} \cdot U_{med} \cdot I_{med} \cdot fp, \quad [W] \quad (A.1)$$

donde:

$P_{ent}$  - Potencia trifásica del motor, medida en el alimentador principal, [W].

$U_{med}$  - Valor efectivo medio de la tensión de línea medida en las tres fases, [V].

$I_{med}$  - Valor efectivo medio de la corriente de línea medida en las tres fases, [A].

$fp$  - Factor de potencia, [pu].

La potencia de entrada,  $P_{ent\_nom}$  que corresponde a la salida nominal se determina a través de eficiencia para este régimen.

$$P_{ent\_nom} = \frac{P_{eje\_nom}}{\eta_n}, \quad [W] \quad (A.2)$$

$P_{eje\_nom}$  - Potencia de salida nominal (en el eje), [W].

$\eta_n$  - Eficiencia nominal del motor.

El coeficiente de carga  $k_c$ , que permitirá determinar la potencia real que entrega el motor se obtiene en base a la relación de potencia de entrada en por ciento de la potencia nominal.

$$k_c = \frac{P_{ent}}{P_{ent\_nom}} \cdot 100, \quad [\%] \quad (A.3)$$

Este método no tiene en cuenta la no linealidad de pérdidas, considerando que la potencia de salida varía linealmente con la potencia de entrada.

### **A1.2. Medición de la corriente de línea**

La corriente nominal aparece, sólo a la tensión nominal del motor. El valor efectivo de la corriente medida tiene que ser corregido por la tensión. Si la tensión de alimentación es mayor que la indicada en la chapa del motor, el valor de la corriente medida será correspondientemente mayor que el esperado para condiciones nominales y tiene que ser ajustado. La ecuación que relaciona la carga del motor con los valores medidos de corriente está dado por (1.4).

$$k_c = \frac{I_{med}}{I_{nom}} \cdot \left( \frac{U_{med}}{U_{nom}} \right) \cdot 100, \quad [\%] \quad (A.4)$$

donde:

$k_c$  - Coeficiente de carga del motor de inducción.

$U_{nom}$  - Tensión nominal del motor de inducción, [V].

$I_{nom}$  - Corriente nominal del motor de inducción, [A].

Estimar la potencia en el eje por la corriente se recomienda cuando sólo es posible la medición de la misma. La corriente que demanda un motor es aproximadamente lineal respecto a la carga para valores por encima del 50 % de carga, por debajo de este valor la corriente de magnetización, el factor de potencia y la curva de corriente presentan un

incremento no lineal. Por tanto en la región de baja carga la medición de corriente no es indicador fiel del estado de carga.

### **A1.3. Método del deslizamiento.**

El método se basa en la medición de la velocidad de giro del motor. La carga se considera como el cociente entre el deslizamiento medido y el nominal. El incremento del deslizamiento es proporcional a la carga que acciona el motor, por ejemplo un motor funciona con un 50 % de carga, tiene un deslizamiento medio entre la velocidad nominal y sincrónica [2]. Usando un tacómetro se puede medir la velocidad del eje y es posible estimar el coeficiente de carga del motor de inducción por (1.5).

$$k_c = \frac{(n_s - n)}{(n_s - n_n)} \cdot 100 = \frac{s}{s_n} \cdot 100, \quad [\%] \quad (\text{A.5})$$

donde:

$n_s$  - Velocidad sincrónica del motor, [rev/min]

$n$  - Velocidad del rotor a un estado de carga desconocido, [rev/min]

$n_n$  - Velocidad a plena carga, [rev/min].

$s$  - Deslizamiento al estado de carga desconocido, [pu].

$s_n$  - Deslizamiento a carga nominal, [pu].

El deslizamiento varía inversamente con respecto al cuadrado de la tensión. Insertando un factor de corrección en (1.5) se obtiene el método de deslizamiento corregido por tensión dado en (1.6).

$$k_c = \frac{n_s - n}{(n_s - n_n) \cdot \left( \frac{U_{nom}}{U_{med}} \right)^2} \cdot 100, \quad [\%] \quad (\text{A.6})$$

El método del deslizamiento sólo se recomienda cuando es posible la medición de la velocidad por medios ópticos. Uno de los problemas de este método es que se permite por parte del fabricante un error del 20 % en la velocidad nominal de la placa del motor. Para

cargas bajas un equipo de medida poco exacto o una incorrecta medición de la velocidad pueden influir significativamente en el resultado de carga debido a que el motor girará a revoluciones cercanas a la velocidad sincrónica y cualquier pequeño error influye en el resultado final.

Los métodos mencionados en los epígrafes 1.1 y 1.2 pueden representar herramientas valiosas para los especialistas que en la industria llevan a cabo programas de ahorro de energía o participan en la toma de decisiones que requieren estimar la eficiencia operacional de los motores en servicio, además de otros trabajos en este sentido [3].

## Anexo A2. Algoritmo de cálculo de los parámetros nominales del circuito equivalente.

---

Para el régimen nominal se establece la impedancia  $z_{in}$  y sus componentes activa (resistencia,  $r_{in}$ ) y reactiva (reactancia,  $x_{in}$ ) a la entrada del circuito equivalente por fase, ecuación (A.7).

$$z_{in} = \frac{V_f}{I_{1n}}, \quad r_{in} = z_{in} \cdot fp, \quad x_{in} = z_{in} \cdot \text{sen}(a \cos(fp)) \quad (\text{A.7})$$

Donde:  $fp$  es el factor de potencia nominal del motor;  $V_f$  la tensión de fase, [V];  $I_{1n}$  la corriente nominal del motor, [A].

Para cualquier régimen tiene que cumplirse que la resistencia del devanado del estator ( $r_1$ ) esté dada por (A.8) según el circuito equivalente con rama de magnetización serie:

$$r_1 = r_{in} - \frac{r_{2s}(r_M^2 + x_M^2) + r_M(r_{2s}^2 + x_2^2)}{(r_M + r_{2s})^2 + (x_M + x_2)^2}, \quad [\text{Ohm}] \quad (\text{A.8})$$

Igualmente para la reactancia del estator ( $x_1$ ) debe cumplirse (A.9):

$$x_1 = x_{in} - \frac{x_2(r_M^2 + x_M^2) + x_M(r_{2s}^2 + x_2^2)}{(r_M + r_{2s})^2 + (x_M + x_2)^2}, \quad [\text{Ohm}] \quad (\text{A.9})$$

donde:  $r_{2s} = r_2/s_n$  para el régimen nominal;  $r_2$ ,  $x_2$  resistencia y reactancia del devanado del rotor, [Ohm];  $r_M$ ,  $x_M$  resistencia y reactancia de la rama de magnetización serie, [Ohm];

La impedancia para régimen de máximo ( $z_{max}$ ) se obtiene de la expresión de par máximo (A.10).

$$z_{max} = \frac{3 \cdot p \cdot V_{th}^2}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot M_m} - r_{th}, \quad [\text{Ohm}] \quad (\text{A.10})$$

donde:  $p$  es el número de pares de polos;  $V_{th}$  la tensión de Thevenin, [V];  $M_m$  el momento máximo, [Nm];  $r_{th}$  resistencia de Thevenin, [Ohm].

Luego la reactancia de cortocircuito ( $x_{cc}$ ) está dada por (A.11):

$$x_{cc} = \sqrt{z_{max}^2 - r_{th}^2}, \quad [\text{Ohm}] \quad (\text{A.11})$$

La impedancia para régimen nominal ( $z_{nom}$ ) dada por (A.12) permite junto a la impedancia para régimen de máxima ( $z_{max}$ ) obtener la ecuación para la resistencia del rotor ( $r_2$ ) como (A.13).

$$z_{nom} = \frac{3 \cdot p \cdot V_{th}^2}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot M_n} - r_{th}, \quad [\text{Ohm}] \quad (\text{A.12})$$

$$r_2 = s_n \cdot \left( z_{nom} + \sqrt{z_{nom}^2 - z_{max}^2} \right), \quad [\text{Ohm}] \quad (\text{A.13})$$

La corriente del rotor ( $I_2$ ) dada por (A.14), y la representación compleja de la corriente nominal del estator ( $I_{1s}$ ) en (A.15), dan lugar a la corriente de la rama de magnetización ( $I_M$ ) en (A.16).

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{V}_{th}}{r_{th} + \frac{r_2}{s_n} + j \cdot x_{cc}}, \quad [\text{A}] \quad (\text{A.14})$$

$$\underline{I}_{1s} = I_n \cdot e^{-j\varphi}, \quad [\text{A}] \quad (\text{A.15})$$

$$\underline{I}_M = \underline{I}_{1s} - \underline{I}_2, \quad [\text{A}] \quad (\text{A.16})$$

A través de la tensión en la rama de magnetización ( $V_M$ ) dada por (A.17) y la corriente ( $I_M$ ) se obtiene la impedancia de magnetización ( $z_M$ ) dada por (A.18) y sus componentes real e imaginaria.

$$\underline{V}_M = \underline{V}_1 - \underline{I}_{1s} \cdot (r_1 + j \cdot x_1), \quad [\text{V}] \quad (\text{A.17})$$

$$\underline{z}_M = \underline{V}_M / \underline{I}_M, \quad [\text{Ohm}] \quad (\text{A.18})$$

Todos los parámetros nominales de un motor están sujetos a variaciones permisibles, expresada en los mismos catálogos de los fabricantes, uno de estos es el factor de potencia indicado.

El algoritmo de la Figura A.1 explica la metodología propuesta para el cálculo de los parámetros del circuito equivalente a través de los datos nominales, se calculan los datos nominales adicionales, incluyendo la selección de las tensiones y corrientes según la conexión, inicia el proceso iterativo principal y llega a un segundo bucle que puede causar variaciones en el factor de potencia indicado dependiendo de la diferencia entre la componente activa de las corrientes del estator y rotor, esto evita que las impedancias de magnetización resulten negativas, luego en dependencia del conocimiento o no de la resistencia del devanado de estator recalcula los valores de la misma y de la reactancia hasta cumplir con un error determinado.



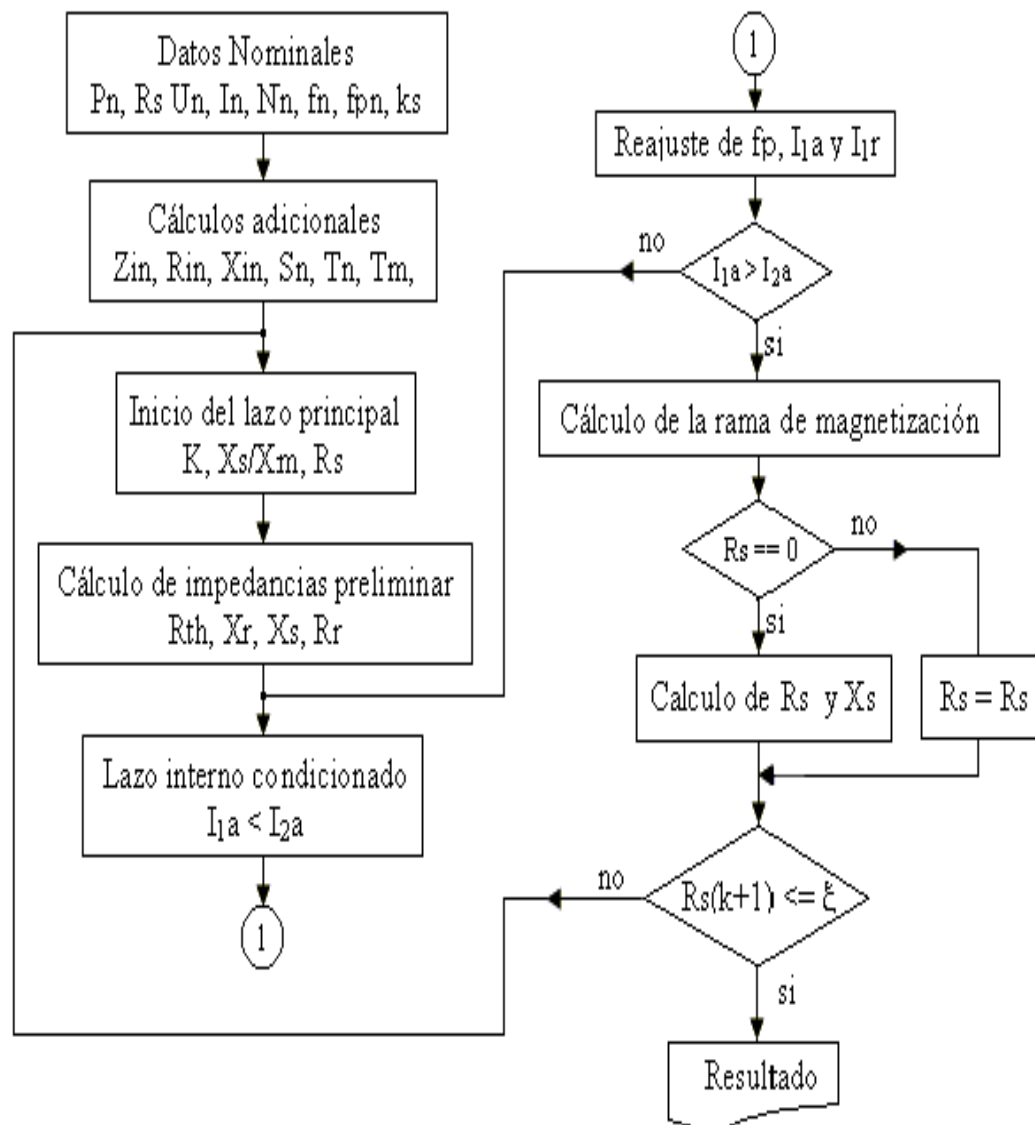


Figura A.1. Algoritmo de cálculo de los parámetros del circuito equivalente.

### Anexo A3. Estimado de la velocidad del motor

---

La velocidad se puede estimar a través del coeficiente de carga aproximado, suponiendo que la misma varía hasta un 5 % a plena carga e interpolando para la carga dada, o utilizar la velocidad estimada por datos nominales.

Las pérdidas en vacío serán las del acero, mecánicas y adicionales calculadas según (A.19).

$$p_{oag} = p_{ac} + p_{fw} + p_{adn}, \quad [\text{W}] \quad (\text{A.19})$$

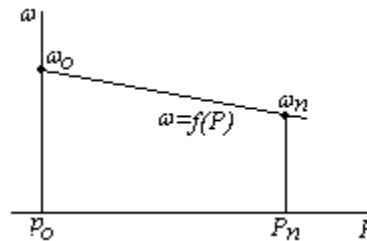


Figura A.2. Dependencia lineal para la velocidad en función de la potencia de salida

Tomando los puntos  $(p_{oag}, \Omega_{oag})$  y  $(P_{nag}, \Omega_{nag})$  de la Figura A.2 se obtiene la ecuación que define la recta:

$$\Omega_{ag} = \Omega_{nag} + \frac{\Omega_{oag} - \Omega_{nag}}{P_{nag} - p_{oag}} (P_{nag} - P_{ag}), \quad [\text{rad/s}] \quad (\text{A.20})$$

o en término del coeficiente de carga y deslizamiento:

$$\Omega_{ag} = \Omega_{nag} + \frac{s_{nag} \Omega_{oag}}{\left(1 - \frac{p_{oag}}{P_{nag}}\right)} (1 - k_c), \quad [\text{rad/s}] \quad (\text{A.21})$$

donde  $\Omega_{ag}$  es la velocidad real del motor agregado para la carga  $P_{ag}$ , ecuación (A.20) o el grado de carga  $k_c$ , ecuación (A.21).

En condiciones reales de explotación deben considerarse factores de ajustes de la velocidad ante las variaciones de tensión y de frecuencia y el desbalance [4]. En sistemas contaminados con armónicos puede introducirse el factor de distorsión armónica propuesto por la **NEMA 30.01.2**, [5]. La velocidad de rotación queda determina por (A.22):

$$n_r = \left( n_s - (n_s - n_n) \frac{1}{F_{DV} \cdot F_{Desb}} E_{fn} \frac{P_{ent}}{P_n} \right) \left( \frac{f}{f_n} \right) \quad (A.22)$$

donde:

$n_s$  - Velocidad sincronica nominal, [rev/min]

$n_n$  - Velocidad nominal, [rev/min]

$n$  - Velocidad del rotor a cualquier estado de carga, [rev/min]

$F_{DV} - (V/V_n)^2$  - Factor de desviacion de tensión

$F_{Desb}$  - Factor de desbalance de tensión de la NEMA

$E_{fn} E_{f_N}$  - Eficiencia nominal, [pu]

$P_n$  - Potencia nominal, [kW]

$f$  - frecuencia medida, [Hz]

$f_n$  - frecuencia nominal, [Hz]

El método basado en la ecuación (A.21) tiene el inconveniente de asumir determinadas pérdidas, cuando no se puede realizar un ensayo en vacío. Por la ecuación (A.22) la velocidad se determina en función de los coeficientes calculados de desbalance, desviación de tensión, asimetría y variación de frecuencia, sin tener en cuenta la verdadera dependencia compleja de estos factores.

La velocidad del rotor de un motor de inducción puede ser estimada con observadores de velocidad a través de datos adquiridos de poca complejidad [6-8] como son los voltajes y corrientes del estator, con la técnica de análisis espectral con mayor precisión que los métodos anteriores.

### **Observador de velocidad por espectro de frecuencia**

Hay varios métodos para estimar la velocidad del rotor [9]. Estos métodos pueden ser divididos en dos grandes grupos: (1) los métodos basados en los modelos matemáticos del motor, y (2) los métodos basados en la densidad espectral de potencia.

Cuando se dispone de las formas de ondas de corrientes en las fases del estator, implementar el observador de velocidad basado en los armónicos de ranuras del rotor (RSH) no es difícil y es muy preciso. Este método no requiere de los parámetros del motor, ni los modelos matemáticos del mismo, es insensible a los cambios de los parámetros con la frecuencia, la temperatura, o cualquier otra perturbación externa. Este observador de velocidad usa la transformada rápida de Fourier (FFT) [10], de sólo una corriente de fase del estator actual, para detectar la velocidad del rotor a cualquier condición de carga y cubre una amplia gama de velocidades. En la literatura [11-16] han propuesto mejoras para los observadores de velocidad basados en los armónicos de ranuras del rotor.

Las ranuras del rotor (o barras) producen una variación en la permeancia del entrehierro aun cuando el deslizamiento,  $s$ , de un motor de inducción es cero. La permeancia del entrehierro es una medida de la capacidad del entrehierro para facilitar o impedir el paso del flujo magnético. Para mayor claridad, el producto de la fuerza electromotriz,  $fmm$ , del entrehierro y la permeancia del entrehierro,  $\mathcal{P}_{ag}$ , [13] produce el flujo,  $\phi$ , y la densidad de flujo del entrehierro,  $B_{ag}$ . Así, la permeancia del entrehierro interactúa con la componente fundamental de  $fmm$  del entrehierro para dar la  $B_{ag}$ . Sin embargo, si el motor está cargado, implicando un deslizamiento mayor que cero ( $s > 0$ ), las corrientes que circulan por las barras de la jaula de ardilla situadas en las ranuras del rotor producen los armónicos de ranuras del rotor (RSH), que también interactúan con la  $B_{ag}$ , lo cual modulará la frecuencia,  $f_{sh}$  (en Hz) dado en (A.23), [11-13].

$$f_{sh} = \frac{Z}{p} f_r \pm f_0, \quad [\text{Hz}] \quad (\text{A.23})$$

donde:  $Z$  es el número de barras del rotor,  $p$  es el número de pares del polo del motor,  $f_r - sf_0$  es la frecuencia del rotor en Hz y  $f_0$  la frecuencia de la red de suministro de potencia, en Hz. De la ecuación (A.23) se observa que la  $f_{sh}$  es sólo función de la velocidad del rotor,

mientras los otros términos son constantes. De esta forma, la  $B_{ag}$  induce una fuerza electromotriz ( $fem$ ) en los devanados del estator de tal manera que los armónicos de ranuras del rotor se reflejan en las corrientes del estator, por ello un análisis del espectro de potencia de las corrientes del estator puede usarse para identificar el RSH para obtener la velocidad del rotor. Analizando los armónicos que aparecen en las ranuras del rotor se puede presentar un método para determinar la velocidad del rotor de un motor de inducción.

El proceso de identificación de velocidad aplica la transformada rápida de Fourier (FFT), de sólo una de las corrientes de fases del estator. El primer paso es calcular la FFT de cualquiera de las tres corrientes de fases del estator. La primera búsqueda en el espectro de potencia de la corriente de la fase identifica la frecuencia de la red de suministro  $f_0$ , que es la componente de frecuencia con la energía más alta. El segundo paso determina una ventana en el espectro de potencia para buscar el RSH. Esta frecuencia máxima,  $f_{sh0}$ , de la ventana de búsqueda viene dada por (A.24).

$$f_{sh0} = \left( \frac{Z}{p} - \beta \right) f_0, \quad [\text{Hz}] \quad (\text{A.24})$$

donde  $\beta$  es orden del armónico de la densidad de flujo del entrehierro, puede ser 1 o -3 [11-13]. La anchura de la ventana  $\Delta f_{sh}$  está dada en (A.25).

$$\Delta f_{sh} = \frac{Z}{p} s_n f_0 = \left( \frac{n_s - n_n}{n_s} \right) \frac{Z}{p} f_0, \quad [\text{Hz}] \quad (\text{A.25})$$

donde  $s_n$  es el deslizamiento,  $n_s$  es la velocidad síncrona, y  $n_n$  es la velocidad nominal, que se encuentra en los datos de chapa del motor de inducción. La ventana está definida en el intervalo  $[(f_{sh0} - \Delta f_{sh}), f_{sh0}]$ . Esta ventana es importante limitar la búsqueda para el RSH a un rango pequeño del espectro de potencia para minimizar los errores y aumentar la rapidez del cálculo. El tercer paso es la búsqueda de la frecuencia del armónico de ranura del rotor,  $f_{sh}$ , en la ventana mencionada. El armónico de ranura del rotor es la frecuencia con la energía más alta que no es múltiplo entero de la frecuencia de la red,  $f_0$ . El último paso es calcular la velocidad del rotor en Hz,  $f_r$ , y la velocidad del rotor  $n$  en r/min.

Disponiendo del número de ranuras del rotor, la proporción  $Z/p$  es un entero. En este caso, la  $f_r$  es calculada por (A.26) como sigue:

$$f_r = \frac{p}{Z}(f_{sh} + \beta f_0), \quad [\text{Hz}] \quad (\text{A.26})$$

La relación entre la frecuencia del rotor,  $f_r$ , y  $n$  está dada por (A.27):

$$n = 60 \frac{f_r}{p} \quad (\text{A.27})$$

Entonces, sustituyendo (A.26) en (A.27) se determina la velocidad del rotor  $n$ , [17, 18] por (A.28):

$$n = \frac{60}{p} \left[ \frac{p}{Z}(f_{sh} + \beta f_0) \right] = \frac{60}{Z}(f_{sh} + \beta f_0), \quad [\text{rev/min}] \quad (\text{A.28})$$

El número de ranuras del rotor, generalmente es desconocido, por tanto en la expresión (A.28) se tienen dos incógnitas, esto se resuelve por un proceso iterativo [19, 20], asignando valores pares al número de ranuras  $Z$ , desde 24 hasta 64. Se recomienda un número de cinco a 15 ciclos para obtener el espectro de frecuencia, con precisión [17].

Este método queda implementado, dentro del algoritmo general del método del momento en el entrehierro visto en el capítulo 2.

#### Anexo A4. Fundamento del análisis del costo del ciclo de vida implementado.

---

El Costo del Ciclo de Vida (CCV) constituye un método que permite evaluar opciones de conservación de la energía a lo largo de la vida de un equipo o sistema, desde la adquisición, instalación, operación y mantenimiento hasta el desmontaje y disposición final del mismo.

La esencia del método del Costo del Ciclo de Vida radica en llevar a valor presente todos los costos a lo largo de la vida del sistema y sumarlos [21]. La alternativa mejor será aquella que tenga el menor valor.

Este método posibilita realizar comparaciones entre diferentes alternativas para lograr un mismo fin productivo o servicio. Esto es particularmente útil en los casos en que no resulta factible determinar los ingresos que genera un proyecto dado, como pueden ser las inversiones en equipos de proceso específicos. La energía media consumida por el motor en funcionamiento (*M. viejo*),  $kWh_{M.viejo}$  y la energía media estimada por el motor seleccionado (*M. nuevo*),  $kWh_{M.nuevo}$  en valores medios se determina por la ecuación (A.29).

$$kWh_{\frac{M.viejo}{M.nuevo}} = \frac{P_{1.M.viejo}}{1.M.nuevo} \cdot HTD \cdot DTA, \quad [kWh] \quad (A.29)$$

Donde: *HTD* - Horas de Trabajo Diario [horas]; *DTA* - Días de Trabajo Anuales [días];  $P_{1.M.viejo}$ ,  $P_{1.M.nuevo}$  - potencia de entrada media por mediciones del motor en funcionamiento y seleccionado respectivamente [kW].

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

Los gastos del motor en funcionamiento (*M. viejo*),  $G_{M.viejo}$  y seleccionado (*M. nuevo*),  $G_{M.nuevo}$  se calculan por la ecuación (A.30) y se evalúan para un vector del tiempo *VU*, desde 1 hasta el valor máximo del tiempo de vida útil del motor, *Vida Útil* [años].

$$G_{\substack{M.viejo \\ M.nuevo}} = kWh_{\substack{M.viejo \\ M.nuevo}} (usd/kWh) \sum_{VU=1}^{VidaUtil} \frac{1}{(1+D)^{VU}}, \quad [usd] \quad (A.30)$$

Donde:  $D$  - Tasa de descuento, [pu] y  $usd/kWh$  - Costo de la Energía, [usd/kWh]

El costo del ciclo de vida (A.31), del motor en funcionamiento,  $CCV_{M.viejo}$  y del motor seleccionado,  $CCV_{M.nuevo}$ , se determina por la suma del costo inicial y los gastos del motor en funcionamiento.

$$CCV_{\substack{M.viejo \\ M.nuevo}} = C_{\substack{Ini.M.viejo \\ Ini.M.nuevo}} + G_{\substack{M.viejo \\ M.nuevo}} \quad (A.31)$$

En la ecuación del costo del ciclo de vida el primer término refleja los gastos capitales y el segundo a los operacionales debido a la reducción de pérdidas.

Costo del ciclo de vida diferencial  $CCV_{Diferencial}$ , ecuación (A.32), es la diferencia entre el costo del ciclo de vida del motor en funcionamiento y del motor seleccionado, refleja el ahorro o gasto obtenido por comparación de ambas variantes. Mientras mayor sea este valor más rentable es la inversión.

$$CCV_{Diferencial} = CCV_{M.viejo} - CCV_{M.nuevo} \quad (A.32)$$

El ahorro de energía por diferencia de potencia entre el motor en funcionamiento y motor seleccionado,  $kWh_{ahorrado}$  se establece por la ecuación (A.33).

$$kWh_{ahorrado} = kWh_{M.nuevo} - kWh_{M.viejo} \quad (A.33)$$

El período simple de recuperación de la inversión  $PRI_{simple}$ , ecuación (A.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 [22].

$$PRI_{simple} = \frac{C_{Ini.M.nuevo}}{Costo_{Anual}} = \frac{C_{Ini.M.nuevo}}{kWh_{ahorrado} \cdot (usd/kWh)} \quad (A.34)$$



## Anexo A5. Características principales del motor de inducción.

La dependencia de  $P_1$ ,  $n$ ,  $Re$ ,  $f_p$ ,  $I_1 = f(P_2)$  proporcionan las características de funcionamientos. Si se comparan con las recomendadas en literaturas referidas a la temática, se observan similitudes en su dependencia y comportamiento, lo que sin duda es representativo de un motor de inducción, la Figura A.3 se realizó para todos los motores agregados obtenidos y muestran semejante comportamiento, en este caso se sitúa para el motor M29 el cual consta de 20 motores.

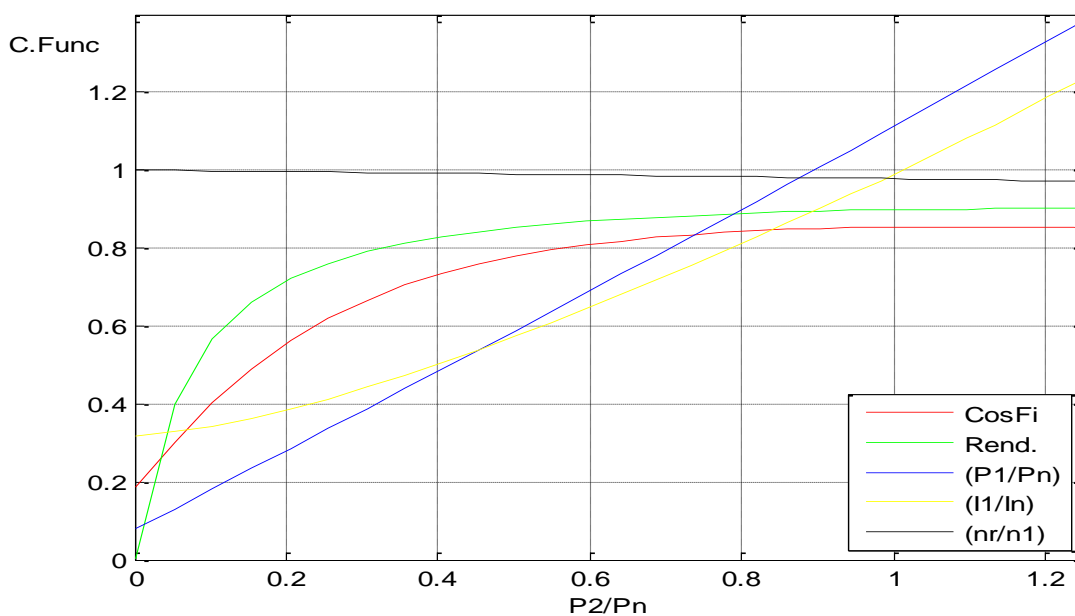


Figura A.3. Características de funcionamiento del motor agregado M29.

La características mecánicas ( $T = f(n)$ ) para los demás parámetros constantes: Para el motor nominal escogido se obtiene por dos vías, una donde solo se necesita el deslizamiento crítico y Momento para régimen de máximo (formula de Kloos), Figura A.4 y otros a partir de los datos del circuito equivalente, que permite además extender al régimen de arranque considerando el efecto pelicular.

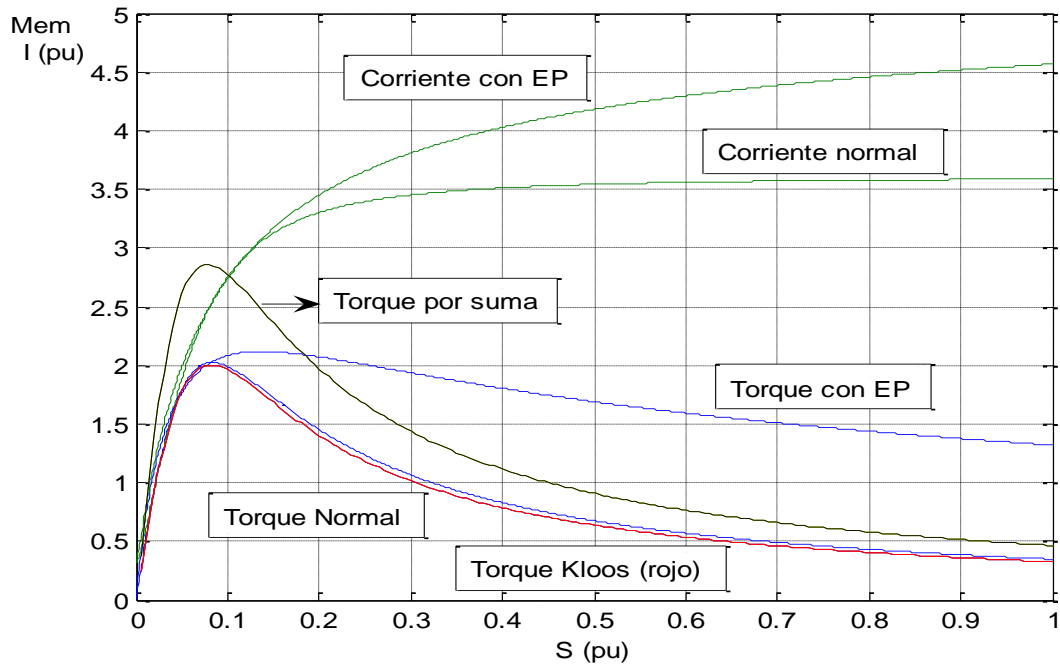


Figura A.4. Características mecánicas por tres vías del Motor Agregado.

En las curvas de la Figura A.4 se destacan claramente los puntos característicos de la característica mecánica de un motor de inducción, obtenidos por tres vías donde existe una gran similitud entre las curvas obtenidas a partir del circuito equivalente y por Kloos, guardando semejanzas con las de un motor de inducción real.

En la Figura A.5 se han graficados las características mecánicas de los motores individuales.

Luego se puede plantear que el juego de parámetros nominales de chapa, semejante a los de catálogos de un motor de inducción, y los del circuito equivalente obtenidos, dan lugar a un juego de impedancia que se corresponde con un motor de inducción, en este caso agregado.

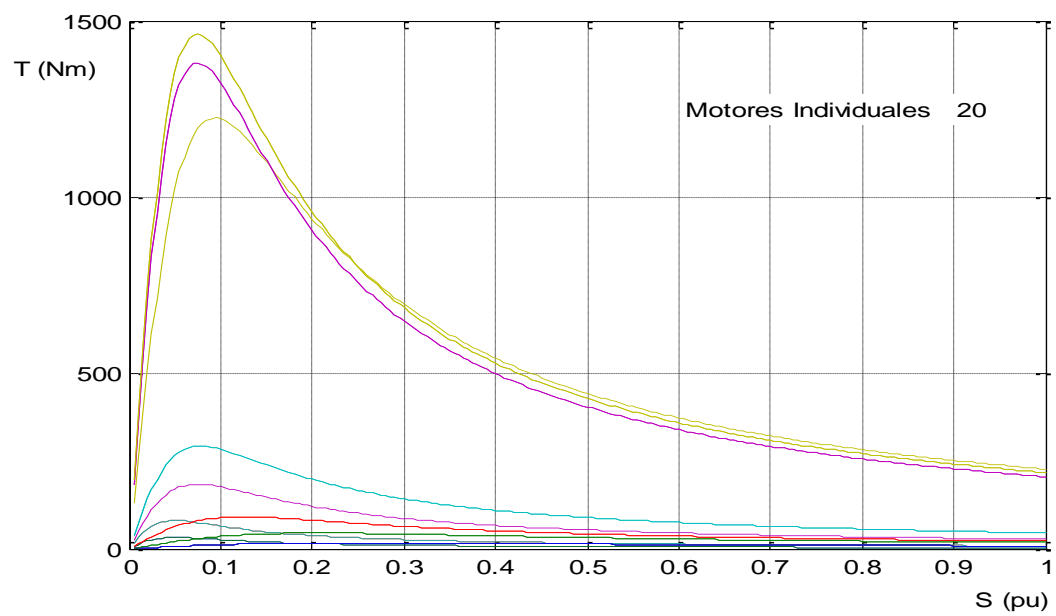


Figura A.5. Motores individuales para formar el motor agregado M29 (20 motores).

## **Anexo A6. Principales equipos e instrumentos utilizados durante las mediciones.**

---

Muchos son los índices que se pueden tomar en cuenta a la hora de realizar mediciones. Para conocer el comportamiento de las cargas en régimen estacionario, fue necesario comenzar haciendo un análisis de las cargas eléctricas de las diferentes subestaciones, el cual estuvo dirigido a las subestaciones 5TP-4 y 5TP-5, teniendo en cuenta los siguientes parámetros: potencia activa (P), corriente (I), tensión (U) y factor de potencia (F.pot), ya que las demás magnitudes asociadas se pueden obtener a través de estas.

La magnitud de estos parámetros puede ser obtenida por medio de instrumentos de medición tanto analógicos como digitales. Las mediciones que se realizaron fueron de forma general de los cuatro parámetros fundamentales en todas las barras seleccionadas, principales y secundarias, para la formación de los motores agregado, también se realizaron a algunos motores que por su ubicación y potencia formarían por si solo un motor agregado de su misma potencia.

El registro de las mediciones, con la finalidad de caracterizar energéticamente las barras y motores seleccionados, se realizó a 15 min, tomando en cada registro la forma de ondas de tensiones y corrientes. Además se realizan muestras independientes de formas de ondas de corrientes para determinar la velocidad.

Las mediciones se realizaron con el ***Analizador programables de redes Interlogger de 8 canales***, Versión 1.3, con la ***Tarjeta clave Power Key Card***, como eje tecnológico principal en la medición de potencias. Junto con el Data Trend (Software intuitivo del interlogger).

**Especificaciones de la Tarjeta clave vatimétrica.**

- Mediciones en redes de 1 fase, 2 hilos y 3 fases y 4 hilos
- Lecturas de mínima, máxima y media instantánea.
- Frecuencia instantánea
- Valor medio de las potencias activa, reactiva, aparente y factor de potencia.
- Valor instantáneo de THD (tensión y corriente), componente armónica hasta el orden 50, memorización de forma de onda para tres canales.
- Análisis gráfico y tabular de todas las lecturas incluyendo los cálculos de magnitudes angulares para los armónicos de corriente y tensión.
- Velocidad de muestreo 128 muestras por ciclo



Figura A.6. Vista exterior del Analizador Interlogger de ocho canales.

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Valores asumidos de las pérdidas adicionales $p_{ad}$ en la norma <b>IEC 60034-2</b> .	16
Tabla 3.1. Resumen estadístico de las mediciones en el motor de inducción MI-2	32
Tabla 3.2. Datos operacionales y nominales del motor actual y del seleccionado	33
Tabla 3.3. Estadística descriptiva para el motor MI-2	34
Tabla 3.4. Resumen de energía anual y por día para MI-2	35
Tabla 3.5. Datos para el cálculo económico y costos del ciclo de vida	36
Tabla 3.6. Resultados para el motor que acciona la bomba de desagüe	42

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Flujo de potencia y definición de pérdidas del motor de inducción	18
Figura 2.2. Algoritmo del método del momento en el entrehierro	26
Figura 3.1. Comportamiento energético del motor MI-2	34
Figura 3.2. Potencia de entrada para el motor original y el seleccionado	37
Figura 3.3. Momento en el entrehierro para el motor original y el seleccionado	37
Figura 3.4. Eficiencia para ambos motores	38
Figura 3.5. Factor de carga de ambos motores	38
Figura 3.6. Energía día motor original y seleccionado	39
Figura 3.7. Ahorro de energía día por sustitución del MI-2	40
Figura 3.8. Energía anual motor original y seleccionado	40
Figura 3.9. Ahorro de energía anual por sustitución de MI-2	41
Figura 3.10. Momento de secuencia positiva	43
Figura 3.11. Momento de secuencia negativa	43
Figura 3.12. Potencia de entrada real y estimada	44
Figura 3.13. Eficiencia real y estimada	45

## ÍNDICE DE FÓRMULAS

[Equation Section 1](#)  $P_{ent} = \sqrt{3} \cdot U_{med} \cdot I_{med} \cdot fp, \quad [\text{W}]$  [\(1.1\)](#) 12

$$P_{ent\_nom} = \frac{P_{aje\_nom}}{\eta_n}, \quad [\text{W}]$$

12

[\(1.2\)](#)

$$k_c = \frac{P_{ent}}{P_{ent\_nom}} \cdot 100, \quad [\%]$$

12

[\(1.3\)](#)

$$k_c = \frac{I_{med}}{I_{nom}} \cdot \left( \frac{U_{med}}{U_{nom}} \right) \cdot 100, \quad [\%]$$

13

[\(1.4\)](#)

$$k_c = \frac{(n_s - n)}{(n_s - n_n)} \cdot 100 = \frac{s}{s_n} \cdot 100, \quad [\%]$$

14

[\(1.5\)](#)

$$k_c = \frac{n_s - n}{(n_s - n_n) \cdot \left( \frac{U_{nom}}{U_{med}} \right)^2} \cdot 100, \quad [\%]$$

14

[\(1.6\)](#)

$$k_{fw} = 0.052 \cdot P_n^{-0.3296}, \quad [\text{pu}] \quad p_{fw} = k_{fw} P_{nag} \left( \frac{\Omega_{ag}}{\Omega_{nag}} \right)^2, \quad [\text{W}]$$

16

[\(1.7\)](#)

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

19

[\(1.8\)](#)

$$\begin{bmatrix} s_d \\ s_q \\ s_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_{me}) & \cos(\theta_{me} - 120^\circ) & \cos(\theta_{me} + 120^\circ) \\ -\sin(\theta_{me}) & -\sin(\theta_{me} - 120^\circ) & -\sin(\theta_{me} + 120^\circ) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} [S(\theta_{me})] \begin{bmatrix} s_a \\ s_b \\ s_c \end{bmatrix}$$

20

[\(1.9\)](#)



$$v_{dqs} = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{bmatrix} = S(\theta_{me}) \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad [\text{V}] \quad i_{dqs} = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = S(\theta_{me}) \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad [\text{A}] \quad (1.10) \quad 20$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_{me} \lambda_{qs}, \quad [\text{V}]$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_{me} \lambda_{ds} \quad (1.11) \quad 21$$

$$\lambda_{ds}^e = \int (v_{ds}^e - R_s i_{ds}^e) dt$$

$$\lambda_{qs}^e = \int (v_{qs}^e - R_s i_{qs}^e) dt, \quad [\text{Wb}] \quad (1.12) \quad 21$$

$$p_{in} = \frac{3}{2} (u_{ds}^e i_{ds}^e + u_{qs}^e i_{qs}^e + 2u_0 i_0), \quad [\text{VA}] \quad (1.13) \quad 21$$

$$M_{em} = \frac{3}{2} \frac{polos}{2} (\lambda_{ds}^e i_{qs}^e - \lambda_{qs}^e i_{ds}^e), \quad [\text{Nm}] \quad (1.14) \quad 21$$

$$M_{em} = \frac{\sqrt{3} polos}{6} \left\{ (2i_a + i_b) \int [v_{ab} - R_s (i_a - i_b)] dt \right. \\ \left. + (i_a - i_b) \int [v_{ca} + R_s (2i_a + i_b)] dt \right\}, \quad [\text{Nm}] \quad (1.15) \quad 22$$

$$M_{aje} = M_{em} - \frac{p_{fw}}{\omega_r} - \frac{p_{adr}}{\omega_r}, \quad [\text{Nm}] \quad (1.16) \quad 22$$

$$\eta = \frac{P_{aje}}{P_{ent}} = \frac{M_{aje} \cdot \omega_r}{P_{ent}} = \frac{M_{em} \cdot \omega_r - p_{fw} - p_{adr}}{P_{ent}}, \quad [\text{pu}] \quad (1.17) \quad 22$$

$$n = \frac{60}{p} \left[ \frac{p}{Z} (f_{sh} + \beta f_0) \right] = \frac{60}{Z} (f_{sh} + \beta f_0), \quad [\text{rev/min}] \quad (1.18) \quad 27$$