



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad Metalurgia-Electromecánica
Departamento de Ingeniería Eléctrica

*Procedimiento a partir de un modelo de motor
agregado para la caracterización energética de
motores de inducción*

*Tesis presentada en opción al grado científico de
Doctor en Ciencias Técnicas*

Ignacio Romero Rueda

Moa 2014



*Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad Metalurgia-Electromecánica
Departamento de Ingeniería Eléctrica*

*Procedimiento a partir de un modelo de motor
agregado para la caracterización energética de
motores de inducción*

*Tesis presentada en opción al grado científico de
Doctor en Ciencias Técnicas*

Autor: M. Sc. Ignacio Romero Rueda

*Tutores: Dr. C. Ángel Costa Montiel
Dr. C. Ángel Oscar Columbié Navarro*

Moa 2014

Agradecimientos

Agradecimientos

A todas aquellas personas que hicieron posible el desarrollo de este trabajo; especial gratitud hacia mis tutores, Dr. Ángel Costa Montiel con quien inicio por los caminos de la ciencia, al Dr. Marcos A. de Armas Teyra por su dedicación y tenacidad; y al Dr. Ángel Columbié Navarro como complemento indispensable para lograr el término de esta investigación.

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

También se le agradece a los compañeros de la producción, quienes posibilitan la realización de experimentos.

Agradecimiento especial a mi familia, quienes experimentan cada minuto de tensión y estado de ánimo durante el tiempo en que se desarrolló la investigación.

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

Dedicatoria

Dedicatoria

A mi familia

Síntesis

SÍNTESIS

La presente investigación propone un procedimiento a partir de un modelo de motor agregado para la caracterización energética de grupos de motores asíncronos en régimen estacionario bajo condiciones reales de operación, aplicación sin evidencia en la literatura consultadas.

Con este propósito se desarrolla un modelo de motor agregado que determina el número de polos por la potencia predominante y contempla las pérdidas en el acero, las mecánicas y las adicionales; y para adaptar el agregado a las condiciones reales se utiliza el método del momento en el entrehierro modificado, por sus ventajas en comparación con otros métodos.

Con la utilización de modelos en estado estacionario de motores de inducción validados por numerosos especialistas y para diferentes combinaciones posibles de estas máquinas, se demuestra la factibilidad de agregar motores desde el punto de vista energético.

En la validación y aplicación se demuestra que las variaciones en las cargas de los motores individuales, inducen respuestas en las potencias de entrada y de salida del motor agregado con diferencias inferiores del 2 % en comparación con la resultante del grupo, y un error estadístico en la estimación de estas magnitudes menor del 5 %.

El procedimiento de caracterización energética a partir del modelo de motor agregado constituye una herramienta factible de aplicar, útil para la evaluación energética de los motores en servicio y posibilita identificar potenciales de ahorro en barras con motores de inducción, sin la necesidad de analizar individualmente cada uno de ellos, con errores relativos menores del 5 %, cuando se compara con los métodos tradicionales.

Tabla de contenido

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	5
CAPÍTULO 1. ESTADO ACTUAL DE LOS PROCEDIMIENTOS PARA LA CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE MOTORES DE INDUCCIÓN ...	11
Introducción	11
1.1. Métodos para estimar el grado de carga y la eficiencia en motores de inducción	12
1.1.1. Métodos normalizados en la evaluación de la eficiencia	12
1.1.2. Métodos de evaluación de la eficiencia en condiciones de campo	13
1.2. Métodos para la caracterización energética de motores de inducción	16
1.2.1. Investigaciones en el campo de la gestión energética de motores de inducción	16
1.2.2. Trabajos prácticos en el campo de la gestión energética de motores de inducción ...	19
1.3. Fundamentos del concepto de motor agregado	22
1.3.1. Fundamento del método y del modelo físico matemático del motor agregado	22
1.3.2. Características, aplicaciones y criterios de agrupamiento del MMA	24
1.4. Conclusiones Capítulo 1	26
CAPÍTULO 2. DESARROLLO DE UN PROCEDIMIENTO A PARTIR DEL MODELO DE MOTOR AGREGADO PARA LA CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE MOTORES DE INDUCCIÓN	29
Introducción	29

2.1.	Modelo agregado de motores eléctricos conectados a una barra eléctrica de potencia en baja tensión	30
2.1.1.	Derivación del modelo de motor agregado	31
2.2.	Método del momento en el entrehierro aplicado a un motor agregado	37
2.2.1.	Ecuaciones del momento en el entrehierro y la eficiencia.....	38
2.2.2.	Algoritmo del método de momento en el entrehierro bajo condiciones reales.....	40
2.3.	Selección de los motores agregados más significativos.....	44
2.4.	Procedimiento para la caracterización energética con el MMA	45
2.5.	Conclusiones Capítulo 2	47
CAPÍTULO 3. VALIDACIÓN DEL PROCEDIMIENTO A PARTIR DEL MMA PARA		
	CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE MOTORES DE INDUCCIÓN ...	49
	Introducción	49
3.1.	Validación del MMA por simulación de modelos energéticos.....	50
3.1.1.	Selección de los motores que forman los agregados	51
3.1.2.	Resultados del comportamiento de los agregados por grupos principales	56
3.1.3.	Representación gráfica de diferentes magnitudes de los agregados	62
3.2.	Resultados experimentales limitados y su interpretación a nivel industrial	66
3.2.1.	Características particulares del motor agregado VESC-5.....	69
3.3.	Conclusiones Capítulo 3	74
CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE CARACTERIZACIÓN		
	ENERGÉTICA PROPUESTO A NIVEL INDUSTRIAL	77
	Introducción	77
4.1.	Caracterización de la barra objeto de estudio	78

4.1.1. Composición de motores agregados para la barra 5TP4.....	80
4.2. Evaluación de los motores agregados en condiciones reales.....	81
4.2.1. Determinación del potencial de ahorro en la barra 5TP4.....	86
4.3. Conclusiones Capítulo 4	89
CONCLUSIONES GENERALES.....	92
RECOMENDACIONES.....	94
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
ANEXOS.....	113

Introducción

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con estudios realizados se ha podido comprobar que entre el 40 y el 60 % del consumo total de energía eléctrica a nivel mundial corresponde a los motores trifásicos de inducción. Según el Departamento de Energía de E.U. (DOE) en ese país constituyen el 70 % de la energía total consumida por las industrias [1]; y según de Almeida [2] estos motores representan el 75 % para la Unión Europea.

En Cuba, según la Unión Nacional Eléctrica (UNE) el consumo de electricidad facturado ascendió a 12,8 TWh en el año 2010, donde el sector estatal fue responsable del 46,8 %; y dentro de este, la industria demandó el 86,4 %, en la cual los motores de inducción constituyen las causas principales de la energía total consumida [3].

La industria del níquel “Ernesto Che Guevara” tiene un total de 1981 motores de baja tensión, distribuidos en diez plantas y 120 barras y/o **centro de control de motores (CCM)**; 974 de 4 a 500 kW y 42 son mayores de 500 kW para un 49,17 % y 2,12 % del total, respectivamente. En cuanto a la potencia instalada representan el 45,98 % y 45,87 %, en el mismo orden.

Por lo anterior la determinación de la eficiencia en industrias con un elevado número de motores eléctricos, que operan en condiciones continuas de trabajo, así como el mejoramiento del desempeño energético de estos y la identificación de forma rápida y eficiente en tiempo de los potenciales de ahorro de energía, constituye un aspecto de gran importancia en la actualidad.

En muchas aplicaciones los motores de inducción funcionan subcargados y con tensiones diferentes a las nominales e incluso desbalanceadas y con armónicos que provocan un consumo

adicional de energía, lo cual significa industrialmente mayores costos y una demanda superior a la necesaria. En términos ecológicos la disminución del consumo de energía eléctrica reduce la emisión de gases contaminantes a la atmósfera; factor de gran importancia en la actualidad.

Para llevar a término un programa de eficiencia energética en industrias energéticamente intensivas, donde predominen las cargas accionadas por motores de inducción, es necesario realizar un análisis de las prestaciones energéticas de estas máquinas y compararlas versus motores de mayor eficiencia, con la finalidad del desarrollo de programas de reubicación o de reorientación de las mismas a otras condiciones de trabajo.

En el contexto industrial esto tiene dos problemas difíciles de resolver:

Primero, para hacer esta evaluación se necesita de la potencia mecánica que demanda el mecanismo accionado por el motor. Orientado a este fin se destacan los métodos propuestos en las normas **IEC 34-2-1** e **IEEE- 112- 2004** con un elevado nivel de exactitud, pero impracticables en la industria [4-6]. En aras de dar solución a esta problemática se han desarrollado diferentes métodos aplicables bajo condiciones industriales y con un nivel de precisión generalmente proporcional al grado de invasividad requerido [7-12]. Por otra parte se necesita la eficiencia del motor propuesto para ese estado de carga, motor no disponible todavía; de esto se encargan los métodos de selección de motores.

El segundo problema es que un estudio de eficiencia energética en una industria grande envuelve enorme cantidad de motores; es impracticable hacerles pruebas a cada uno de ellos, y también calcular la eficiencia de todos por métodos computacionales sin hacer ensayos en campo debido al volumen de información a manejar y procesar, lo cual haría los estudios extensos y engorrosos; este problema con frecuencia conduce a realizar estudios muestrales, los cuales dejan de considerar un gran número de estas máquinas.

Sin embargo estas máquinas en la mayoría de los casos se encuentran a un mismo nivel de tensión y alimentadas por una misma sección de barras o CCM, lo cual crea características comunes y posibilidades para el análisis en grupo.

El procedimiento propuesto utiliza el concepto de **modelo de motor agregado** (MMA), nuevo en su aplicación a la determinación de la eficiencia energética, para evaluar grupos de motores y tomar decisiones sin la necesidad de ensayarlos a todos. Esto permite disminuir y simplificar apreciablemente el número de ensayos o mediciones a realizar en la industria. La aplicación del **método del momento en el entrehierro** (MME) posibilita adaptar el motor agregado a las condiciones reales, incluyendo las situaciones donde la tensión puede ser diferente a la nominal, e incluso con la presencia de armónicos superiores de tiempo y asimetría.

Sobre la base de la necesidad de implementar métodos no invasivos y de altas prestaciones en el análisis de la eficiencia energética de motores en ambientes industriales, se declaran los siguientes propósitos generales de la presente investigación:

Problema científico

Insuficiencia de los procedimientos utilizados en la caracterización energética de motores asincrónicos trifásicos en redes eléctricas de baja tensión, los cuales tienen sus bases en el análisis individual por cada motor, en la identificación de forma rápida y eficiente de los mayores potenciales de ahorro de energía en grandes industrias con un régimen de trabajo intensivo y en presencia de un elevado número de estas máquinas agrupadas en barras.

Objeto de investigación

Motores trifásicos de inducción de propósitos generales agrupados en barras de baja tensión

Campo de acción

Caracterización energética de motores de inducción

Objetivo general

Desarrollar un procedimiento basado en un modelo de motor agregado para la caracterización energética de grupos de motores asíncronos de propósitos generales, que operan en régimen continuo y están conectados en barras comunes de baja tensión.

Objetivos específicos

1. Establecer las limitaciones de los procedimientos para la caracterización energética de motores de inducción en servicio y de la teoría actual del motor agregado, cuando se aplican en agrupaciones de estas máquinas en barras eléctricas de baja tensión
2. Construir un modelo de agregación de motores trifásicos de inducción con fines energéticos en barras eléctricas de baja tensión
3. Desarrollar un procedimiento a partir del MMA, para la caracterización energética de grupos de motores de inducción en barras de baja tensión
4. Validar el modelo de agregación propuesto y aplicar el procedimiento de caracterización energética sobre la base del mismo, a grupos de motores de inducción a nivel industrial

Hipótesis de la investigación

Es posible evaluar energéticamente y con resultados satisfactorios las potencialidades de ahorro de energía en industrias con gran cantidad de motores conectados en barras de baja tensión si se utiliza un modelo de motor agregado, constituido por motores trifásicos de inducción de propósitos generales que operan de forma continua en régimen estacionario y con suministro eléctrico desde puntos comunes.

Novedad científica de la investigación

Procedimiento basado en un modelo de motor agregado, para la caracterización energética de grupos de motores asincrónicos de propósitos generales, que operan en régimen continuo y están conectados en barras comunes de baja tensión.

Aportes teóricos de la investigación

- Desarrollo del modelo de motor agregado que considera las pérdidas en el acero, las mecánicas y las adicionales, y la determinación del número de polos por potencia predominante
- Procedimiento general para caracterización energética de motores trifásicos de inducción agrupados en una misma barra de baja tensión a partir del modelo de motor agregado y el uso del método del momento en el entrehierro modificado
- Empleo del factor de incidencia como complemento del coeficiente de carga y la eficiencia en la definición de los motores agregados a un análisis energético individual

Aporte práctico de la investigación

- Evaluación energética de grupos de motores en ambientes industriales

Capítulo 1

Estado actual de los procedimientos para la caracterización energética de motores de inducción

CAPÍTULO 1. ESTADO ACTUAL DE LOS PROCEDIMIENTOS PARA LA CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE MOTORES DE INDUCCIÓN

Introducción

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

Numerosas investigaciones han precedido a este trabajo y, por tanto, varios son los procedimientos sugeridos en la determinación de la eficiencia, la potencia desarrollada, el estado de carga, etc. Cada uno de ellos con sus ventajas y limitaciones [8, 13-20]. Todos persiguen el objetivo de incrementar la eficiencia, optimizar el uso final de la energía eléctrica, reducir los costos, el impacto ambiental y las fallas en este tipo de máquina universalmente empleada. *Ninguno de los métodos conocidos utilizan el concepto del motor agregado para estratificar las barras de menor eficiencia de una gran industria y, posteriormente, evaluar cada elemento de ese sistema.*

La evaluación energética de estas máquinas es un proceso invasivo, y se complica cuando en las grandes industrias deben ser evaluados cientos de motores que accionan disímiles cargas.

Bajo estas circunstancias es importante desarrollar un procedimiento que permita conducir la evaluación energética de las agrupaciones de motores con una precisión adecuada, sin la

necesidad de conocer los parámetros de sus circuitos equivalentes, algo en ocasiones difícil de obtener en condiciones de campo y, con ello, determinar las potencialidades de ahorro de energía. El tipo de análisis que se presenta exige mayor atención en tanto crece el costo de la energía y se deteriora el medioambiente. El incremento de la eficiencia en muchos de los casos puede lograrse cuando se reemplazan o se reubican uno o varios motores, o mediante otras estrategias. Efectuar la evaluación más acertada y económica en tiempo y recursos de las agrupaciones de máquinas es un paso importante en este empeño.

Como se conoce, la eficiencia de los motores varía con el diseño, la velocidad, la potencia, el coeficiente de carga y una complicación adicional es su dependencia de la calidad de la energía del sistema, por tanto, son varios los factores que actúan sobre un conjunto de máquinas. Integrar todos ellos a la evaluación de barras alimentadoras es una tarea también complicada.

El objetivo de este capítulo es:

Establecer las limitaciones de los procedimientos para la caracterización energética de motores de inducción en servicio y de la teoría actual del motor agregado, cuando se aplican en agrupaciones de estas máquinas en barras de baja tensión.

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

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

1.1.1. Métodos normalizados en 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 implícitamente determinan la potencia en el eje.

Los valores de la eficiencia se deben determinar de acuerdo con las normas internacionales vigentes [21-23]. Estas normas establecen consideraciones para las pérdidas, tipos de mediciones e instrumentos requeridos, valores de corrección de temperatura para las resistencias, etc. De estas normas, las principales que han sido objeto de muchos análisis comparativos son: la americana **IEEE-112-2004**, la europea **IEC 34-2-1** y la japonesa **JEC 37** [4, 5, 24-28].

La norma **IEC 60034-2-1** editada en el año 2007 presenta diferencia con la **IEEE-112-2004**, principalmente en la forma de determinar las pérdidas adicionales [29, 30]. La norma **JEC-37** empleada en Japón y otros países asiáticos se caracteriza por despreciar totalmente las pérdidas adicionales. Según de Almeida [27] los valores de eficiencia que se determinan bajo esta norma, son superiores a los obtenidos por las normas **IEEE-112-2004** y la **IEC-34-2-1**.

La norma **IEEE-112-2004** es la de mayor exigencia y en ella se establecen cinco métodos denominados **A, B, C, E** y **F** con las variantes **E1, F1, C/F, E/F** y **E1/F1** [6]. Con esta norma armonizan algunas normas nacionales como la **NEMA, MG1** y la **CS-390** aplicadas en EEUU y Canadá, respectivamente [31]. En el caso de las variantes **E1** y **F1**, las pérdidas adicionales son asumidas como un porcentaje de la potencia de salida nominal.

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

Lo anterior implica el desarrollo de muchos métodos para la evaluación de la eficiencia en condiciones de campo y la continuidad de la investigación en este sentido [7, 8, 12, 14, 32-36].

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

Los métodos básicos más utilizados en la evaluación de la eficiencia de los motores trifásicos de inducción, en condiciones de campo son: a) método de la potencia de entrada b) método de los

datos de chapa, c) método del deslizamiento, d) método de la corriente, e) método del circuito equivalente, f) método de segregación de pérdidas, g) métodos estadísticos, h) método del momento en el entrehierro, i) método del momento en el eje o método directo [10, 14, 17, 37]. En la evaluación de la eficiencia con frecuencia se utiliza la combinación de algunos de ellos.

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

Los métodos más simples: datos de chapa, deslizamiento, corriente y potencia de entrada son fáciles de aplicar pero pueden conducir a errores apreciables si se considera que la eficiencia de chapa, además de ser el resultado del tratamiento estadístico de un lote de motores, no se mantiene constante en todo el rango de operación; que el deslizamiento correspondiente a los valores nominales puede presentar un 20 % de desviación según los fabricantes [38] y que tanto la corriente como la potencia de entrada poseen un comportamiento no lineal versus la potencia en el eje del motor.

El método del circuito equivalente (basado en el método **F** de la norma **IEEE-112-2004**) necesita de los parámetros del circuito que modela el comportamiento en régimen estacionario del motor de inducción, lo cual constituye su principal inconveniente en un ambiente industrial. Este método permite determinar las pérdidas, las características operacionales y la eficiencia del motor asincrónico trifásico, y tiene como ventaja la posibilidad de predecir el comportamiento para cualquier estado de carga [31, 39-43].

El método del momento en el entrehierro (MME) requiere de los valores instantáneos de dos tensiones de líneas y dos corrientes de fase para determinar el momento y la potencia de salida en el eje; a diferencia de otros métodos considera las condiciones de calidad del suministro eléctrico [11, 13-15, 40, 44-46]. Sus ventajas son: a) supera al método **EI** de la **IEEE-112-2004** cuando la tensión de alimentación está desbalanceada y contiene armónicos; b) puede aplicarse mientras el motor está en servicio; sus principales desventajas están dadas por las exigencias de ganar en precisión: a) requiere del ensayo en vacío, y b) requiere de sensores especializados.

A partir de las ventajas del MME se han desarrollado modificaciones que resuelven algunas de las desventajas anteriores con aproximaciones, las cuales afectan la exactitud del método. No obstante, es necesario tener presente que la exactitud para determinados estudios en condiciones industriales posee un valor útil dado en el porcentaje de error permisible según las posibilidades reales proporcionadas por los estándares de fabricación de máquinas eléctricas [16, 47].

Gharakhani [7] sintetiza y amplía con gran precisión las particularidades de los diferentes métodos de evaluación de la eficiencia en el campo, incluye aquellos que utilizan algoritmos evolutivos, bajo condiciones de tensión diferente a la nominal, con desbalance y en presencia de armónicos. También en la literatura se reportan varios métodos, los cuales requieren de programas de computación o instrumentos especiales para su aplicación en las industrias [4, 28, 32, 48]. Gómez [9] resume eficazmente estas técnicas y métodos computarizados de estimación de la eficiencia en motores de inducción.

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

Una de las vías utilizadas en solucionar estos problemas es utilizar tacómetros ópticos para determinar la velocidad y medir la resistencia del motor cuando el mismo no esté en servicio; si

no es posible, existen otros procedimientos que estiman la velocidad según el contenido de armónico de la corriente del estator con precisión de hasta cinco revoluciones por minutos a altas velocidades y 0,005 p.u. de deslizamiento a bajas velocidades [49-51].

Los métodos anteriores representan herramientas valiosas para los especialistas que llevan a cabo programas de ahorro de energía en las industrias o participan en la toma de decisiones, donde es necesario estimar la eficiencia operacional de los motores en servicio, sin embargo, estos métodos están destinados a la evaluación individual de la eficiencia en motores trifásicos de inducción, y en industrias con elevado número de motores requieren de grandes volúmenes de cálculos y mediciones que hace engorroso el trabajo de la caracterización energética.

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

1.2. Métodos para la caracterización energética de motores de inducción

Los trabajos más recientes en el campo de la caracterización energética de motores de inducción, hacen énfasis en la búsqueda de métodos poco invasivos en la estimación de la eficiencia, y otros trascienden los límites de la investigación científica y proponen métodos prácticos y procedimientos para su aplicación directa en las industrias.

1.2.1. Investigaciones en el campo de la gestión energética de motores de inducción

Bin Lu [52] desarrolla un método no invasivo para la evaluación de la eficiencia en motores de inducción, el cual sirve de base en la implementación de un sistema inalámbrico de gestión energética que posibilite la obtención de ahorro de energía globales en las industrias.

La aplicación del sistema de gestión energética necesita de una red inalámbrica con tres nodos: el transmisor, el receptor y el de conmutación. Cada motor está conectado a un nodo transmisor que

envía las señales a la central supervisora, la cual presenta un nodo receptor. A partir de la recopilación y procesamiento de la información proveniente de cada motor se genera un resumen para el consumo de energía en la planta.

Este sistema de gestión energética de motores de inducción es efectivo, sin embargo, lleva implícito una alta tecnología lo cual es imposible en países subdesarrollados como Cuba por el alto costo asociado; solo toma en consideración los motores seleccionados según la importancia que se le asignan en la planta; y aunque evalúa la energía que consumen los motores individuales y la total en planta, no caracteriza el funcionamiento del grupo al unísono.

Gharakhani [7] desarrolla una técnica no invasiva que evalúa la eficiencia de los motores de inducción en el campo de aplicación, válida en condiciones de desbalance y sobretensión en el suministro eléctrico. Para lograr el más bajo nivel de invasividad utiliza solamente las mediciones eléctricas en los terminales; las potencias de entrada y de salida, la velocidad y los parámetros del motor se calculan sobre estas mediciones. *Aunque demuestra la efectividad de la técnica propuesta en la determinación de la eficiencia, no contempla su aplicación a un programa de caracterización energética de motores de inducción a nivel industrial que verifique su utilidad.*

Gómez [9] demuestra la efectividad de un procedimiento que determina la eficiencia y otros parámetros operacionales de los motores asincrónicos, en condiciones de campo, mediante la aplicación de algoritmos genéticos (AG) en presencia de desbalances de tensión, en un ambiente no contaminado con armónicos superiores. Constituye una herramienta para el análisis técnico y económico de proyectos de mejoramiento de la eficiencia energética y de desarrollo de programas de motores de alta eficiencia en la industria y los servicios en Cuba. *Sin embargo, la estimación de los parámetros y evaluación de la eficiencia se realiza con AG que fuerzan las soluciones según las propiedades de la aplicación informática, y no contempla el tratamiento en*

grupos de motores como carga única, por tanto, el trabajo se desarrolla para motores seleccionados, y dejan muestras sin evaluar.

Pérez [53, 54] sintetiza un procedimiento que determina, con mínimos recursos de medición, los parámetros de operación de un motor de inducción bajo carga arbitraria a partir de los datos nominales y sin necesidad de realizarle pruebas.

De la Rosa [55] analiza la influencia de la incertidumbre de las mediciones y de la especificación de la eficiencia de un motor en la evaluación del potencial de ahorro de energía por la sustitución de motores eléctricos. Se establece que la simple acción de sustituir un motor de baja eficiencia por uno aparentemente más eficiente no garantiza un ahorro real de energía y, por tanto, debe hacerse un análisis de la probabilidad de la dispersión de la eficiencia para la toma de decisión.

De Armas [56] desarrolla un método para graficar la potencia en el eje del motor, evaluar la eficiencia y otros parámetros operacionales y, en adición, verificar si la selección ha sido la correcta para el mecanismo que acciona. El procedimiento se fundamenta en el método del momento en el entrehierro (MME) con un algoritmo incorporado, el cual facilita la información necesaria, y evita el uso de costosos y complejos sensores en condiciones de campo.

De forma general, algunos trabajos abordan la temática energética de motores de inducción desde el punto de vista de obtener un método que determine la eficiencia con precisión y con el menor número de variables [53-56]. Otras investigaciones se enfocan en obtener métodos no invasivos en la determinación de la eficiencia en motores de inducción [16, 21, 27, 32, 35, 37, 47, 57-59].

Todos concluyen con las ventajas de los métodos propuestos, sin embargo, no valoran el potencial de ahorro de energía como aspecto fundamental en un sistema de gestión energética.

1.2.2. Trabajos prácticos en el campo de la gestión energética de motores de inducción

La compañía PROCROBRE [60] desarrolla el trabajo “Estudio de caso. Proyecto Piloto de Reemplazo de Motores Eléctricos en la Minería de Cobre – Chile”, el cual tiene como objetivo verificar los ahorros mediante el reemplazo de motores existentes por motores de alta eficiencia, a partir de las recomendaciones del Departamento de Energía de Estados Unidos (DOE) en su documentación de uso público. Con el objetivo de verificar los ahorros se realizaron auditorías previas y posteriores a la sustitución de motores en los procesos intervenidos.

Fueron seleccionados 27 motores entre 25 y 100 hp para realizarles las mediciones, ubicados en tres plantas de las compañías mineras participantes en el proyecto: en la primera planta el coeficiente de carga era extremadamente bajo en cada motor y la evaluación económica resultó negativa y en las dos siguientes se encontraron condiciones óptimas para el reemplazo y la evaluación técnica y económica fue positiva. En la tercera planta los resultados de la evaluación posterior fueron muy similares a los obtenidos en la evaluación anterior, debido a que el coeficiente de carga de las bombas se mantuvo superior al 50 %, registrándose evaluaciones económicas muy cercanas antes y después del reemplazo de los motores.

En este proyecto no estaba previsto revisar el diseño, solo sustituir motores estándar por motores eficientes de igual potencia nominal, esto último estimulado por los fabricantes de motores (WEG) para garantizar el mercado. La evaluación económica y del ahorro de energía se realizó individualmente para todos los motores, lo cual permitió destacar la influencia del factor de carga. En la determinación del coeficiente de carga se aplicó el método de la potencia de entrada a partir de dos mediciones, con las consiguientes desventajas en la precisión de los resultados obtenidos. Los motores objetos de sustitución se identifican por los procesos productivos más representativos, sin tener en cuenta el estado real de todo el parque de motores.

Bajo la redacción de Almeida [43] se presenta el desarrollo de un proyecto macro donde participan seis países de la Unión Europea (UE) para caracterizar el uso de la electricidad por los motores, tanto en el sector industrial como terciario y estimar el potencial de ahorro a través del uso de tecnología de motor eficiente y variadores de velocidad. La implementación del proyecto contó con la valiosa colaboración de muchas instituciones y expertos. El proyecto se realizó por la Dirección de Transporte y Energía de la Comisión Europea, y el Programa SAVE II 2000.

Se determinó que el 75 % de la energía consumida correspondían a motores y de ellos el 90 % son del tipo de inducción. En la caracterización se seleccionaron por países las industrias más importantes y para toda la UE se extrapolaron los valores.

Se estimó el potencial de ahorro, sin embargo, el cálculo del ahorro se realiza para la UE por un escalado a partir del diagnóstico en los seis países seleccionados, sin la precisión técnica y económica más adecuada. Aunque la investigación se realiza para un elevado número de motores, en ningún momento se evalúan la influencia del grupo como carga asincrónica única.

Otro de los trabajos de mayor repercusión a nivel mundial lo constituye el programa computacional “Software Internacional para Selección de Motores y Análisis de Ahorros” (IMSSA) [61], herramienta diseñada para apoyar a consultores en el área energética, distribuidores de motores, y usuarios industriales en la planeación y manejo de la energía, como también en las acciones encaminadas a mejorar la eficiencia del parque de motores.

El IMSSA muestra los parámetros de operación y las especificaciones de los motores **NEMA** e **IEC**. Esta versión de IMSSA contiene una base de datos superior a los 25000 motores (recopilada para el programa **MotorMaster+ 4.0** del **U.S. Department of Energy**) y una base de datos de más de 5000 motores IEC (recopilada para el uso del programa **Eurodeem 2000**). La plataforma del software es capaz de aceptar y usar datos de diferentes fabricantes que contienen

valores de eficiencia a plena carga y a fracciones de ésta, tomados de acuerdo con lo especificado en los protocolos de prueba **NEMA IEEE 112** o **IEC 60034-2**.

Los valores por defecto de la eficiencia en motores de 1 a 200 hp se refieren a la norma NEMA MG-1, y *se asume que los mismos representan el funcionamiento de los motores “en el campo”* [31]. *El software solo contempla el remplazo de motores viejos por otro de mayor eficiencia, sin tener en cuenta las condiciones reales de funcionamiento del motor, y en ningún momento se contabilizan los ahorros totales por grupos de motores. Cuando se quiere un análisis más cercano a la realidad se recomiendan la determinación del coeficiente de carga y factores influyentes en la eficiencia por mediciones directas en el campo.*

Cuando se evalúan agrupaciones de motores de inducción en condiciones de campo, determinar la eficiencia y el estado de carga individual no es la vía más directa y económica en tiempo y recursos para la determinación de la eficiencia operacional de los mismos. Tampoco es representativo evaluar un bajo porcentaje de motores del total existente y de estos inferir sobre el comportamiento de la carga asincrónica a nivel global en la industria.

Paralelamente a los trabajos anteriores se ha ido generando la idea de agregación de motores con fines de estudios de sistemas donde el objetivo es facilitar el análisis de la estabilidad y el comportamiento transitorio en redes eléctricas de baja tensión, con grandes cantidades de nodos y, por tanto, un elevado número de motores de inducción [62-66]. Sobre estas bases se han desarrollado teorías sobre el motor agregado, las cuales dieron lugar a un modelo físico matemático que reemplaza a un grupo de motores individuales por una carga asincrónica y se utiliza para el análisis dinámico en sistemas eléctricos industriales.

La presente investigación sustenta la hipótesis siguiente: si los motores se alimentan desde puntos comunes o CCM, es posible agruparlos en barras específicas y sustituir cada grupo por un motor

equivalente, denominado motor agregado, donde los parámetros más importantes sean los energéticos y, a partir de éste, determinar las características de comportamiento de la barra, centro de control de motores o conjunto de estas máquinas.

1.3. Fundamentos del concepto de motor agregado

Como parte del programa de ahorro y uso racional de la energía eléctrica en grandes industrias surge la necesidad, en aras de reducir el tiempo y numerosos ensayos, de agrupar conjuntos de motores en equivalentes, para lo cual es imprescindible obtener los modelos que caractericen este tipo de carga. De esta forma, un sistema industrial con muchas máquinas en explotación se puede representar por un número menor, pero más significativo, de motores de inducción equivalentes, los cuales posibilitan realizar un estudio de carga en régimen estacionario. *Sin embargo, el concepto de motor agregado ha sido fundamentalmente dirigido a la modelación de las cargas y al estudio de la dinámica del sistema [67, 68], y en la literatura no hay evidencias de su aplicación en la caracterización energética y determinación del ahorro de energía.*

Según Venikov [69], si en una barra el 80 % de la carga total se compone de motores de inducción, representarla por un modelo agregado no implica un error significativo; la precisión de los resultados obtenidos por el MMA depende de las consideraciones en la definición del modelo y la variedad de métodos existentes para obtener el equivalente [11, 43, 67, 70-72].

1.3.1. Fundamento del método y del modelo físico matemático del motor agregado

Existen dos métodos generales para obtener el modelo de agregado a partir de motores de inducción conectados a una barra común: el **primer método** parte del conocimiento de los parámetros del modelo de circuito equivalente seleccionado y, por igualdad de impedancias en paralelo, determinar la impedancia del agregado [65, 71, 73].

Los puntos característicos para obtener los parámetros del circuito equivalente pueden ser: el nominal, el máximo, de arranque y/o la combinación de estos en dependencia de la finalidad que se persigue con el motor agregado. Una variante puede ser disponer de los datos nominales y de catálogos y, por alguna metodología, determinar los parámetros de cada motor y así obtener las impedancias equivalentes. Los resultados finales del primer método son los parámetros del circuito equivalente del motor agregado. *Este procedimiento posee el inconveniente de la disponibilidad de los datos del circuito equivalente de los motores individuales que forman el motor agregado.*

El **segundo método** establece un balance de potencia a partir del funcionamiento en paralelo de los motores individuales, y presenta las magnitudes sumatorias de potencia, corriente, etc. de cada uno de los motores del conjunto como las magnitudes equivalentes correspondientes a un motor agregado [66]. La información esencial es la que ofrecen los catálogos.

En ambos métodos el número de polos del agregado coincide con el del motor de mayor potencia nominal presente en el equivalente, lo cual se establece como criterio general ya que desde el punto de vista dinámico este determina la inercia del grupo [62, 65, 66, 74-76]. *Sin embargo, desde una visión energética, el número de polos se relaciona con la eficiencia nominal y, por tanto, no siempre es válido este criterio de decisión. Por otra parte, ambos métodos desprecian las pérdidas mecánicas, del acero y las adicionales en el modelo, por tanto, no establecen un balance entre las potencias mecánicas convertidas; aspectos necesarios cuando se utiliza el MMA en un procedimiento para la caracterización energética de motores de inducción.*

Existen otras técnicas para derivar un modelo de carga equivalente que represente los estados estacionarios de un sistema constituido por motores de inducción y carga de impedancia

constante [62, 64, 77]. Los parámetros de los motores son calculados por los datos nominales y, junto con los datos de la carga, se incorporan a una carga equivalente.

En la literatura los investigadores se inclinan por el uso del circuito equivalente en \mathbf{T} , obtenido sobre la base de las ecuaciones de Park sin considerar las variaciones de los parámetros en el tiempo, sin la inclusión de la resistencia ficticia de la rama de magnetización [66, 71, 73]. Cuando se analiza un régimen con deslizamiento próximo al nominal se propone un modelo de agregación de un grupo de motores que utiliza el modelo de simple jaula [65, 73].

En la validación se comparan los resultados que se obtienen por el MMA y por el grupo de motores individuales. Se toma como criterio básico que la potencia de salida del motor agregado sea igual a la potencia total desarrollada por los motores individuales [66, 71, 73]. *Este criterio es de precisar a la hora de utilizar el MMA para fines energéticos, ya que es imprescindible la existencia de un balance de potencia no solo entre las salidas, sino también entre las entradas del motor agregado y los motores individuales.*

El principal inconveniente de estos modelos equivalentes, en los procedimientos para caracterización energética, es considerar que el motor agregado siempre desarrolla la potencia nominal, sin tener presente el estado de carga real de los motores individuales, además de no contemplar las pérdidas en el acero, las mecánicas y las adicionales.

1.3.2. Características, aplicaciones y criterios de agrupamiento del MMA

Para la determinación de las características del motor agregado no existen normas ni laboratorios dedicados a esa labor por lo que se experimenta industrialmente. Son varias las consideraciones con relación al nivel de intrusión, dado por la exigencia del método; el costo asociado con el equipamiento instalado; la recolección y procesamiento de datos; las posibles interrupciones del servicio del motor o motores conectados y el método de agregación.

Para estimar el estado de carga del motor agregado, desde el punto de vista teórico se pueden utilizar todos los métodos que se aplican a un motor de inducción ordinario [9-11, 14, 40, 70, 78].

La determinación práctica del estado de carga del motor agregado debe tener como base las mediciones realizadas en el alimentador principal, las cuales permitan, estimando la velocidad y algunas pérdidas, tener en cuenta la carga real de los motores individuales.

Para poder caracterizar energéticamente un motor agregado es necesario determinar el estado de carga y las características de la eficiencia, el factor de potencia, la corriente del estator y la velocidad en función de la potencia de salida, aspecto no tratado en las literaturas.

Al considerar el motor agregado por los datos nominales, se obtiene un motor equivalente de la potencia instalada, pero no de la carga real en funcionamiento, que puede diferenciarse sustancialmente de las condiciones nominales.

Dentro de las aplicaciones del modelo del motor agregado se encuentran las siguientes:

1. Utilización de un modelo representativo de una carga variable, puede emplearse el modelo estacionario o dinámico del motor [79, 80].
2. Análisis del flujo de carga, se reduce considerablemente el número de nodos [81, 82].
3. Análisis de la dinámica en un nodo de carga, donde los modelos tradicionales no reflejan con la exactitud requerida el proceso que tiene lugar en una carga de carácter asincrónica y se aprovecha el acabado del modelo dinámico del motor de inducción [83-85].
4. Comparación de la efectividad con otros métodos de análisis de carga dinámica en el análisis de la estabilidad, oscilaciones y los procesos transitorios en un nodo de carga [74-76, 86].
5. Análisis del proceso de autoarranque y de detención de grandes motores asincrónicos, con potencias comparables con las fuentes de alimentación [69].

6. Pronóstico de comportamiento futuro de la carga o los parámetros del nodo, sin la necesidad de realizar pruebas dinámicas que pueden afectar el sistema.

El análisis de los trabajos precedentes no evidencia referencias sobre el empleo del modelo de motor agregado orientado a un análisis energético.

Dentro de los criterios para agregar motores de inducción y encontrar su equivalente, siempre que la tensión de alimentación sea la misma, se pueden mencionar, entre otros, los siguientes:

- Igualdad de potencias nominales.
- Relación de potencias individuales a la del motor agregado, lo cual constituye un coeficiente de peso a la hora del análisis.
- Uso de función de densidad de probabilidad, donde la potencia mecánica sea variable según una ley de probabilidad [87, 88].
- Relación de momento de inercia, en análisis dinámicos [71, 89].
- Características de los mecanismos o cargas mecánicas accionadas.

No existen sugerencias acerca del número de motores para formar el motor agregado y no ha sido necesaria la existencia de un alimentador común, esto último imprescindible en los trabajos de caracterización energética.

1.4. Conclusiones Capítulo 1

- Los procedimientos para la caracterización energética de motores de inducción, referidos en la literatura, se ejecutan con evaluaciones individuales de las máquinas seleccionadas, lo cual aumenta el tiempo de realización, conlleva a dejar muestras sin analizar y, en ocasiones, se efectúan valoraciones técnicas y económicas superficiales.
- El modelo de motor agregado, referido en la literatura, no tiene en cuenta las pérdidas en el acero, las mecánicas y las adicionales que inciden en la eficiencia, por tanto, no resuelve el

problema investigado para análisis energéticos donde la carga es diferente a la nominal y las pérdidas un aspecto importante.

- El MMA referido en la literatura fija el número de polos del agregado por el motor de mayor potencia en el equivalente, y no contempla que el mismo guarda relación con la eficiencia nominal, aspecto necesario cuando se establece un modelo con objetivo energético.

Capítulo 2

*Desarrollo de un
procedimiento a partir del
modelo de motor agregado
para la caracterización
energética de motores de
inducción*

CAPÍTULO 2. DESARROLLO DE UN PROCEDIMIENTO A PARTIR DEL MODELO DE MOTOR AGREGADO PARA LA CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE MOTORES DE INDUCCIÓN

Introducción

Este capítulo enfoca su atención en establecer un procedimiento, a partir de un modelo de motor agregado, para la caracterización energética de grupos de motores de inducción en barras de baja tensión. Las etapas incluidas en el procedimiento son las siguientes:

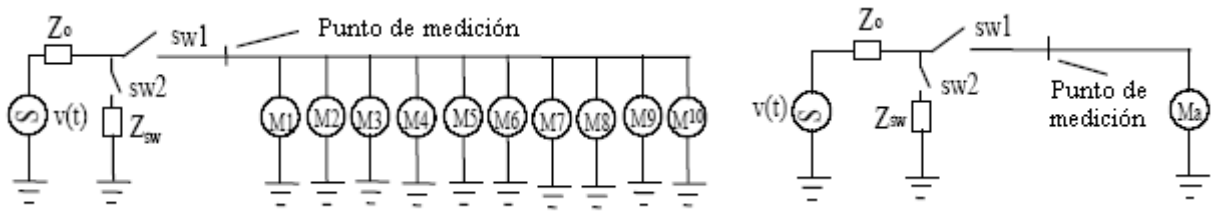
1. Obtener el modelo físico matemático del motor agregado adecuado a la caracterización energética por un balance de potencias entre el equivalente y los motores individuales, para lo cual sirven de base diferentes investigaciones [62, 65, 66, 73, 84].
2. Desarrollar el método del momento en el entrehierro modificado (MMEM) y su implementación por un algoritmo computacional, para ajustar el motor agregado nominal a las condiciones reales y determinar las características energéticas del mismo.
3. Evaluar la energía anual por cada motor agregado y el potencial de ahorro; para ello se utiliza el método de la potencia equivalente en la selección de los motores sustitutos, a los cuales se les aplican los mismos gráficos de carga que tienen los motores en servicio.
4. Seleccionar los motores agregados más significativos, a partir del factor de incidencia, el coeficiente de carga y la eficiencia, como parámetros que definen el comportamiento energético de agrupaciones de motores.
5. Evaluar técnica y económicamente los potenciales de ahorros en los agregados seleccionados y presentar la correspondencia del agregado con los motores individuales.

Las investigaciones recogidas en la literatura no reconocen procedimientos que utilicen el concepto del modelo de motor agregado en trabajos de caracterización energética de motores de inducción, por lo cual como objetivos de este capítulo se plantean:

- Construir un modelo de agregación de motores trifásicos de inducción con fines energéticos para su aplicación en barras eléctricas de baja tensión.
- Establecer un procedimiento, a partir del modelo de motor agregado, para la caracterización energética de motores trifásicos de inducción en barras de baja tensión.

2.1. Modelo agregado de motores eléctricos conectados a una barra eléctrica de potencia en baja tensión

La idea central del motor agregado radica en obtener un modelo único, equivalente a un conjunto de motores asíncronos seleccionados en una barra determinada, como se muestra en la Figura 2.1, y que las características operacionales de ambas representaciones se correspondan.



(a) Barra de potencia original con el grupo de motores

(b) Barra de potencia con el motor agregado

Figura 2.1. Motores de inducción en una misma barra y su representación en agregado.

La selección de las barras con posibilidades de agrupar los motores para formar los agregados se realiza a partir de un análisis del diagrama unifilar. Seleccionadas las barras es posible obtener el comportamiento energético del motor agregado a partir de las mediciones realizadas en un punto totalizador donde se registre el comportamiento energético general del grupo de motores, como se indica en la Figura 2.1. a).

Para poder agrupar los motores individuales en un motor equivalente con fines energéticos se establecen determinadas condiciones:

1. Tener conexión directa a barra sin que medie ningún elemento de fuerza y/o control.
2. Pertenecer a una misma barra, sin compensación individual de reactivo.
3. Operar en estado estacionario con un régimen de trabajo continuo.
4. Considerar despreciables los procesos transitorios por cambios del estado de la carga.
5. Poseer un alimentador principal la barra en análisis.
6. No considerar los motores en reserva conectados a las barras o CCM.
7. Despreciar las impedancias en los conductores de alimentación a cada motor.

El motor agregado se considera de simple jaula y en conexión estrella con el punto de operación en la zona lineal de su característica de trabajo; tiene un alimentador común desde una fuente de tensión no contaminada por asimetría y armónicos, para obtener el equivalente en las condiciones reales de operación y realizar el análisis o valoración sobre el uso de la energía en esa barra.

2.1.1. Derivación del modelo de motor agregado

En el desarrollo del modelo de motor agregado, factible de utilizar en la evaluación de la eficiencia a cualquier estado de carga, además de cumplir lo establecido por Louie [66], se plantea un balance entre las potencias mecánicas, el cual considera las pérdidas en el acero, las mecánicas y las adicionales en la determinación del deslizamiento y así se tiene en cuenta su influencia en el grado de carga del agregado.

Para obtener la potencia aparente compleja total se parte de los balances de las potencias activa y reactiva por separado, entre el motor agregado y los motores individuales [66].

$$\underline{S}_{ag} = \sum_{k=1}^3 \left(\underline{V}_{ak} \cdot (\underline{I}_{1ak})^* \right) = P_{ag} + jQ_{ag}, \quad [\text{VA}] \quad (2.1)$$

$$\underline{S}_{ti} = \sum_{k=1}^3 \left(\underline{V}_{ik} \cdot (\underline{I}_{lik})^* \right) = P_{ti} + jQ_{ti}, \quad [\text{VA}] \quad (2.2)$$

donde: \underline{S}_{ag} , \underline{V}_{ak} e \underline{I}_{lak} son la potencia aparente compleja en **VA**, la tensión en **V** y la corriente en **A** para el motor agregado; \underline{S}_{ti} , \underline{V}_{ik} e \underline{I}_{lik} son la potencia aparente compleja en **VA**, la tensión en **V** y la corriente en **A** para el total de los motores individuales t ; P_{ag} , Q_{ag} son las potencias activa y reactiva para el motor agregado; P_{ti} , Q_{ti} son las potencias totales activa y reactiva para los motores individuales; m es el número de motores considerados y k el número de fase.

A partir del balance de potencia entre el equivalente y los motores individuales se desarrolla el modelo matemático para la obtención del MMA para caracterización energética.

- **Potencia nominal.** La potencia nominal de salida del agregado total P_{nag} , es igual a la suma de la potencia nominal P_{ni} , de cada motor individual i :

$$P_{nag} = \sum_{i=1}^m P_{ni}, \quad [\text{kW}] \quad (2.3)$$

donde m es el número total de motores conectados a la barra.

- **Potencia de entrada nominal.** La potencia nominal de entrada del agregado total P_{neag} , es igual a la suma de la potencia nominal de entrada P_{nei} , de cada motor individual i :

$$P_{neag} = \sum_{i=1}^m P_{nei}, \quad [\text{kW}] \quad (2.4)$$

- **Eficiencia nominal del motor agregado η_{nag} .** Viene dada por (2.5), donde η_{ni} , I_{ni} y $\cos\varphi_{ni}$ simbolizan la eficiencia, la corriente y el factor de potencia de cada motor individual i :

$$\eta_{nag} = \frac{P_{nag}}{P_{neag}} = \frac{\sum_{i=1}^m \eta_{ni} I_{ni} \cos\varphi_{ni}}{\sum_{i=1}^m I_{ni} \cos\varphi_{ni}}, \quad [\text{pu}] \quad (2.5)$$

- **Corriente y factor de potencia nominales.** Por el balance de las componentes activa y reactiva de la corriente del estator se determinan la corriente nominal I_{nag} y el factor de potencia del motor agregado $\cos\varphi_{nag}$, que para condiciones nominales se obtienen por la ecuación (2.8) y (2.9), respectivamente, coincidente con el trabajo de Louie [66].

$$I_{nag} \cos \varphi_{nag} = \sum_{i=1}^m I_{ni} \cos \varphi_{ni} \quad (2.6)$$

$$I_{nag} \sen \varphi_{nag} = \sum_{i=1}^m I_{ni} \sen \varphi_{ni} \quad (2.7)$$

donde: φ_{nag} y φ_{ni} son los ángulos del factor de potencia del motor agregado y de los motores individuales, respectivamente.

A partir de las ecuaciones (2.6) y (2.7) la corriente de entrada del motor agregado es:

$$I_{nag} = \sqrt{\left(I_{nag} \cos \varphi_{nag}\right)^2 + \left(I_{nag} \sen \varphi_{nag}\right)^2} \quad (2.8)$$

El factor de potencia se calcula por la relación entre las ecuaciones (2.6) y (2.8).

$$\cos \varphi_{nag} = \frac{\sum_{i=1}^m I_{ni} \cos \varphi_{ni}}{I_{nag}}, \quad [\text{pu}] \quad (2.9)$$

- **Deslizamiento nominal.** Dada la igualdad de la potencia electromagnética del motor agregado P_{emag} y la potencia electromagnética total de los motores individuales, también las pérdidas en el circuito del rotor de ambos tienen que ser iguales.

$$s_{nag} P_{emag} = \sum_{i=1}^m s_{ni} P_{emi} = \sum_{i=1}^m s_{ni} \frac{P_{meci}}{(1 - s_{ni})} \quad (2.10)$$

De donde el deslizamiento para el motor agregado s_{nag} , viene determinado por (2.11):

$$s_{nag} = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{s_{ni}}{1-s_{ni}} (P_{ni} + p_{fwi} + p_{adi})}{P_{emag}}, \quad [\text{pu}] \quad (2.11)$$

donde: P_{ni} ; P_{emi} ; P_{meci} ; s_{ni} ; p_{fwi} y p_{adi} representan la potencia de salida; la potencia electromagnética; la potencia mecánica; el deslizamiento; las pérdidas mecánicas y las pérdidas adicionales de cada motor individual i .

La ecuación (2.11) considera las pérdidas adicionales y las mecánicas para obtener el deslizamiento del motor agregado, a diferencia de los trabajos referenciados en la literatura que desprecian estas pérdidas [65, 66, 90], *lo cual constituye un aporte en el desarrollo del MMA para ser utilizado en los procedimientos de caracterización energética.*

Las pérdidas por fricción y batimiento del aire p_{fw} , se expresan como una fracción de la capacidad de la máquina k_{fw} y varían con el cuadrado de la velocidad según Gómez [9] por la ecuación (2.12).

$$k_{fw} = 0.052 \cdot P_{nag}^{-0.3296}, \quad [\text{pu}] \quad p_{fw} = k_{fw} P_{nag} \left(\frac{n_{ag}}{n_{nag}} \right)^2, \quad [\text{W}] \quad (2.12)$$

donde: P_{nag} y n_{nag} son la potencia en **W** y la velocidad nominal en **rev/min** del agregado, respectivamente; y n_{ag} la velocidad del agregado en **rev/min** a cualquier nivel de carga.

Las pérdidas adicionales nominales se estiman por la norma [29], según la 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
$P_n \leq 1 \text{ kW}$	$p_{ad} = 2,5\% P_{ent}$
$1 \text{ kW} < P_n < 10 \text{ 000 kW}$	$p_{ad} = [2,5\% - 0,5\% \log_{10} P_n] P_{ent}$
$P_n \geq 10 \text{ 000 kW}$	$p_{ad} = 0,5\% P_{ent}$

Fuente: IEC 60034-2-1 [29]

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

- **Número de polos y velocidad nominal.** La velocidad nominal del motor agregado se determina a partir del deslizamiento calculado en (2.11) y el número de polos.

En los trabajos reportados en la literatura se considera que el motor de mayor potencia predomina en el grupo, y el número de polos del motor agregado lo hacen corresponder con ese motor [62, 65, 66, 74, 91]. Con este fin en esta investigación se formulan dos reglas:

1. Si todos los motores individuales que integran la barra de potencia tienen el mismo número de polos, se cumple también el balance de momentos electromagnéticos y el número de polos del motor agregado coincide con el de los motores individuales.
2. Si todos los motores individuales que integran la barra de potencia no tienen el mismo número de polos, entonces se toma el número de polos predominante por potencia para el motor agregado.

Estas reglas se fundamentan en que la eficiencia nominal de los motores de inducción difiere para una misma potencia según el número de polos, como se puede inferir del análisis del catálogo [92]. *Aspecto que constituye otro aporte en el desarrollo del MMA para ser utilizado en los procedimientos de caracterización energética.*

Con la velocidad sincrónica n_{lag} y el deslizamiento nominal del motor agregado se calcula la velocidad nominal del motor agregado n_{nag} por (2.13).

$$n_{nag} = (1 - s_{nag}) n_{lag}, \quad [\text{rev/min}] \quad (2.13)$$

- **Momento electromagnético máximo.** A partir del balance de potencia electromagnética máxima entre el motor agregado P_{maxag} y la total de los motores individuales se obtiene:

$$M_{maxag} = p_{ag} \sum_{i=1}^m \frac{M_{máxi}}{P_i}, \quad [\text{Nm}] \quad (2.14)$$

donde: $M_{m\acute{a}xag}$ es el par máximo del motor agregado y $M_{m\acute{a}xi}$ es el par máximo de cada motor individual i , **Nm**; p_{ag} y p_i número de polos del agregado y de cada motor i , respectivamente.

- **Coeficiente de carga (k_c).** Establece la relación entre la potencia de salida real y la nominal, y se expresa en valores reales o en porcentaje [10, 27, 34, 37, 78, 93].

Si se expresa la potencia en el eje de cada motor i a través del coeficiente de carga k_{ci} y la potencia nominal P_{ni} , se obtiene el mismo para el motor agregado k_{cag} por (2.15).

$$k_{cag} = \frac{\sum_{i=1}^n k_{ci} P_{ni}}{\sum_{i=1}^n P_{ni}} \quad (2.15)$$

Si todos los motores de inducción individuales tienen un mismo coeficiente de carga, al motor agregado le corresponde el mismo valor y $k_{cag} = k_{ci}$.

Los motores agregados que se obtienen por este procedimiento se caracterizan por los datos nominales, comparables a motores reales para las mismas potencias, como se demuestra en [73].

A partir de las recomendaciones dadas en los trabajos [1] y [94] se propone realizar el modelo del motor agregado para caracterización energética con motores de inducción de propósitos generales de 2, 4 o 6 polos en el rango de 0,746 a 375 kW, conectados a una misma barra en baja tensión y que operan en régimen continuo; pues los motores de potencia mayores, debido a sus características, ya son de alta eficiencia y quedan excluidos de este análisis.

El número de motores en el agregado está limitado por la cantidad de ellos en cada centro de control o barra que lo agrupa, generalmente inferior a 15 máquinas.

Para ajustar el MMA nominal a las condiciones reales de operación, y así tener en cuenta el grado de carga de los motores individuales, lo cual es obligatorio en caracterización energética, en la presente investigación se utiliza el método del momento en el entrehierro modificado (MMEM),

aspecto que marca la diferencia con los trabajos anteriores donde siempre consideran la operación a plena carga y se utiliza el modelo de motor agregado para otros propósitos [65, 66].

2.2. Método del momento en el entrehierro aplicado a un motor agregado

Varios experimentos a lo largo del tiempo han verificado el método del momento en el entrehierro (MME) y han concluido que el mismo es efectivo para estimar la eficiencia [13, 40, 95, 96]. La potencia de entrada del motor es calculada por la tensión y la corriente de línea, y la potencia de salida por la velocidad y el momento en el eje, por tanto, requiere de las mediciones de tensiones de líneas, corrientes de fases, velocidad del rotor y resistencia del devanado del estator. Adicionalmente, para medir las pérdidas en el acero p_{acero} y las pérdidas por fricción y batimiento del aire p_{fw} , es necesario un ensayo en vacío, lo cual constituye una de las dificultades de este método.

Para minimizar estas dificultades y convertir el MME en una técnica no invasiva, la ecuación se desarrolla con transformaciones en la concepción original, de donde surge el método del momento en el entrehierro modificado (MMEM), que mantiene una precisión satisfactoria y reduce grandemente el nivel de intrusión [16]. Las transformaciones que se proponen, para su aplicación a un motor agregado, son las siguientes:

1. Las pérdidas por fricción y batimiento del aire se calculan por (2.12), según Gómez [9], y las pérdidas adicionales con la carga se estiman por la norma IEC 60034-2-1 del 2007 [29].
2. La resistencia del estator se estima por los datos nominales [97].
3. La velocidad del rotor se estima por el análisis espectral de la corriente del motor [49, 98-109], o por otras alternativas resumidas en el **Anexo A**.

Es común determinar el comportamiento del motor de inducción por el método del circuito equivalente, con la dificultad principal en la necesidad de disponer de los parámetros del mismo

[110], sin embargo, si se aplica el MMEM a un motor agregado es posible determinar el comportamiento del mismo bajo condiciones reales, con solo requerir de la resistencia del devanado del estator [111]; este aspecto ofrece ventaja al método, además de su precisión, en un ambiente industrial.

2.2.1. Ecuaciones del momento en el entrehierro y la eficiencia

La potencia (p_{ent}) en términos de tensiones de líneas y corrientes de fases se calcula por (2.16):

$$p_{ent} = -u_{ab}i_b - u_{ca}(i_a + i_b) = u_{ca}i_c - u_{ab}i_b, \quad [\text{VA}] \quad (2.16)$$

Lo anterior es válido siempre que las componentes de corriente directa no estén presentes en las señales de tensión y corriente. Bin Lu [16] presenta un resumen de las transformaciones de potencia en el motor de inducción y el sistema de referencia en los ejes dq en la aplicación del método del momento en el entrehierro.

El sistema de ecuaciones para el estator en el sistema dq está dado por (2.17) en [16, 112],

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_{me} \lambda_{qs} \\ v_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_{me} \lambda_{ds} \end{aligned}, \quad [\text{V}] \quad (2.17)$$

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

Para el sistema de referencia estacionario $\omega_{me} = 0$ y el flujo mutuo del estator, está dado por la integral de la tensión de entrada menos la caída en la resistencia del estator (2.18).

$$\begin{aligned}\lambda_{ds}^e &= \int (v_{ds}^e - R_s i_{ds}^e) dt \\ \lambda_{qs}^e &= \int (v_{qs}^e - R_s i_{qs}^e) dt, \quad [\text{Wb}]\end{aligned}\quad (2.18)$$

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

El momento en el entrehierro se expresa en el sistema dq por (2.19).

$$M_{em} = \frac{3}{2} \frac{p}{2} (\lambda_{ds}^e i_{qs}^e - \lambda_{qs}^e i_{ds}^e), \quad [\text{Nm}] \quad (2.19)$$

Cuando se desarrolla (2.19) para un sistema de referencia estacionario por las magnitudes trifásicas se obtiene (2.20), ecuación ampliamente utilizada en la literatura [13, 15, 16, 56].

$$M_{em} = \frac{\sqrt{3} p}{6} \left\{ \begin{aligned} &(2i_a + i_b) \int [v_{ab} - R_s (i_a - i_b)] dt \\ &+ (i_a - i_b) \int [v_{ca} + R_s (2i_a + i_b)] dt \end{aligned} \right\}, \quad [\text{Nm}] \quad (2.20)$$

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

La eficiencia η está dada por (2.21) donde: P_{eye} - potencia de salida en el eje en **W**, M_{eye} - momento en el eje en **Nm**, ω_r - velocidad del rotor en **rad/s**, p_{fwn} - pérdidas mecánicas y del núcleo en **W** y p_{adr} - pérdidas adicionales del rotor con la carga en **W**.

$$\eta = \frac{P_{eye}}{P_{ent}} = \frac{M_{eye} \omega_r}{P_{ent}} = \frac{M_{em} \omega_r - p_{fwn} - p_{adr}}{P_{ent}}, \quad [\text{pu}] \quad (2.21)$$

La implementación del MMEM requiere de un algoritmo computacional para su aplicación, además del gran volumen de cálculos y operaciones complejas que encierra.

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

El algoritmo de la Figura 2.2 desarrolla el método del momento en el entrehierro, válido en 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, los cuales se alimentan por señales de diferentes frecuencias.

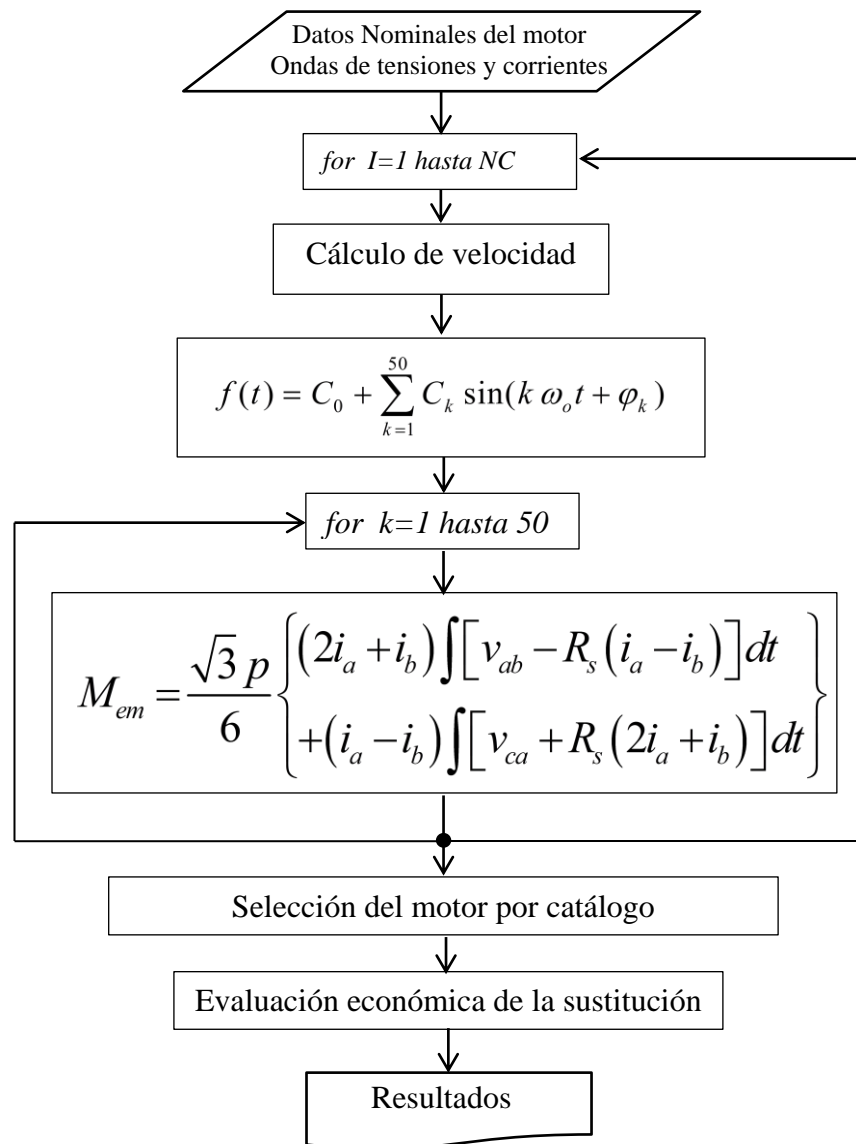


Figura 2.2. Esquema por bloques del algoritmo de evaluación de motores de inducción

Para implementar el algoritmo de cálculo del MME se requiere de un trabajo previo con las bases de datos para ser interpretado por la aplicación computacional:

1. Tomar los datos nominales característicos de los motores de inducción.
2. Tomar las mediciones de velocidad, si están disponibles.
3. Tomar las mediciones de frecuencia y las formas de ondas de tensión y de corriente.
4. Salvar en una estructura las mediciones y los datos nominales.

El algoritmo incorpora la selección de la potencia de los motores asíncronos para el servicio continuo, lo cual se justifica cuando la velocidad de la carga no varía apreciablemente, como es el caso de los motores de velocidad constante; en este caso la potencia se puede considerar directamente proporcional al momento y se puede aplicar el método de la potencia equivalente [56], para el cual se utiliza la ecuación (2.22):

$$P_{eficaz} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{NC} P_{ej.e.i}^2 t_i}{\sum t_i}}, \quad [W] \quad (2.22)$$

donde: $P_{ej.e.i}$ son los valores de potencia en **W**, correspondientes a cada intervalo de tiempo t_i en s, y NC el número de intervalos del gráfico de carga. Después que se selecciona el motor, se comprueba por condiciones de sobrecarga y de arranque.

También el algoritmo contempla la evaluación económica de la sustitución de motores; en este trabajo se utiliza el método del Costo del Ciclo de Vida (CCV) como una opción en la evaluación energética del motor agregado, utilizando la metodología de Borroto [113].

La energía consumida por el motor en servicio $kWh_{M.viejo}$ y la energía estimada por el motor seleccionado $kWh_{M.nuevo}$ se determinan por la ecuación (2.23) según el gráfico de carga.

$$kWh_{\substack{M.viejo \\ M.nuevo}} = P_{\substack{1. M.viejo \\ 1. M.nuevo}} \cdot HTD \cdot DTA, \quad [kWh] \quad (2.23)$$

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

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

Los gastos del motor en servicio $G_{M.viejo}$ y del seleccionado $G_{M.nuevo}$, se calculan por la ecuación (2.24), evaluados por un vector del tiempo *VU*, desde uno hasta el valor máximo del tiempo de vida útil del motor, en **años**.

$$G_{M.viejo} = kWh_{M.viejo} (USD/kWh) \sum_{VU=1}^{VidaUtil} \frac{1}{(1+D)^{VU}}, \quad [USD] \quad (2.24)$$

donde: *D* - Tasa de descuento, en **pu** y *USD/kWh* - Costo de la Energía, en **USD/kWh**.

El costo del ciclo de vida (2.25) del motor en servicio $CCV_{M.viejo}$ y del motor seleccionado, $CCV_{M.nuevo}$, se determinan por la suma del costo inicial y los gastos del motor.

$$CCV_{M.viejo} = C_{Ini.M.viejo} + G_{M.viejo} \quad (2.25)$$

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

El costo del ciclo de vida diferencial $CCV_{Diferencial}$, ecuación (2.26), es la diferencia entre el costo del ciclo de vida del motor en servicio y del seleccionado, y refleja el ahorro o gasto obtenido por comparación de ambas variantes. Mientras mayor sea este valor más rentable es la inversión.

$$CCV_{Diferencial} = CCV_{M.viejo} - CCV_{M.nuevo} \quad (2.26)$$

El ahorro de energía por diferencia de potencia entre el motor en funcionamiento y motor seleccionado $kWh_{ahorrado}$ se establece por la ecuación (2.27).

$$kWh_{ahorrado} = kWh_{M.nuevo} - kWh_{M.viejo} \quad (2.27)$$

El período simple de recuperación de la inversión PRI_{simple} , ecuación (2.28), no tiene en cuenta el costo del motor en funcionamiento, pero ofrece una idea del tiempo requerido para recuperar la inversión inicial a través del ahorro de energía por concepto de sustitución.

$$PRI_{simple} = \frac{C_{Ini.M.nuevo}}{Costo_{Anual}} = \frac{C_{Ini.M.nuevo}}{kWh_{ahorrado} \cdot (usd/kWh)} \quad (2.28)$$

Con la ecuación (2.28) se completa la evaluación técnico-económica de todos los motores agregados en análisis, comparándolos con motores de mejor eficiencia.

El método del momento en el entrehierro modificado se aplica al MMA propuesto y permite analizar energéticamente grupos de motores de inducción, determinar las características de la eficiencia, factor de carga, factor de potencia y otras magnitudes. La utilización del MMA en la caracterización energética de estas máquinas, tiene particularidades si se compara con los métodos estándares: considera el total de motores de inducción, en contraste con el método que estratifica entre los de mayor peso; entre varias barras se seleccionan aquellas más significativas, lo cual disminuye el tiempo y la cantidad de motores para el análisis energético.

Existen magnitudes consideradas básicas para realizar un estudio del comportamiento energético de motores de inducción de forma individual, entre ellas el coeficiente de carga y la eficiencia, además de tener en cuenta las características del proceso en el cual están aplicados, donde cada factor tiene incertidumbre en su determinación [55]. Cuando se analizan motores agregados hay que utilizar criterios para el total de estas máquinas, distribuidas por grupos.

Cuando se analiza el comportamiento energético de motores agregados, el coeficiente de carga y la eficiencia se refieren a grupos de motores y tienen en cuenta la potencia real de cada uno de ellos; la carga de cada motor individual se refleja en la del motor agregado.

2.3. Selección de los motores agregados más significativos

En presencia de varias barras hay que distinguir cuáles de ellas son significativas; si se decide por la de eficiencia más baja puede ocultar el criterio del estado de carga en motores con potencias superiores a los 100 kW, con relación de potencia de 2 a 1, o iguales, donde las eficiencias de estas máquinas siempre son altas. Si la relación de potencias es superior de 2 a 1 los motores de menor potencia tienen valores disminuidos de eficiencia, aunque tengan un mayor coeficiente de carga.

Cuando se define por nivel de carga menor del 50 % impediría analizar algunas posibilidades reales existentes, debido a la variedad de potencia presente en las barras.

Por lo anterior, la selección de los motores agregados más significativos se realiza a partir de la eficiencia, el coeficiente de carga y la potencia. Se adiciona a la toma de esta decisión el factor de incidencia del agregado k_{inc} , definido como la relación entre la potencia que demanda cada motor agregado y la demanda total de todos los motores conectados a la barra (2.29). Es conveniente precisar que establece una relación entre potencias reales y no entre las nominales [114].

$$k_{inc} = \frac{P_{li}}{\sum_{i=1}^{n_{ma}} P_{li}} \cdot 100, \quad [\%] \quad (2.29)$$

donde: n_{ma} es el número de motores agregados y P_{li} la potencia que demanda cada motor en \mathbf{W} .

La ecuación (2.29) garantiza el predominio de los motores agregados que demandan mayor potencia, los cuales son los principales en la selección para un análisis individual.

También se introduce el factor de incidencia medio k_{inc_medio} , que establece la relación entre la potencia media demandada por todos los motores agregados y la demanda total de los motores conectados a la barra (2.30).

$$k_{inc_medio} = \frac{\frac{1}{n_{ma}} \sum_{i=1}^{n_{ma}} P_{1i}}{\sum_{i=1}^{n_{ma}} P_{1i}} \cdot 100, \quad [\%] \quad (2.30)$$

Se plantea la hipótesis que los motores agregados para la investigación individual son aquellos con factores de incidencia mayores o iguales al factor de incidencia medio del conjunto. Luego de la selección de los principales motores agregados de acuerdo con el factor de incidencia, estos se organizan por la eficiencia. La potencia y la eficiencia constituyen los principales parámetros que caracterizan energéticamente estas máquinas, por ello en la investigación individual se priorizan los motores con más bajas eficiencias.

Por otro lado, cuando solo hay un CCM no es necesario este análisis por la presencia de un solo agregado, sin embargo, se puede hacer la selección de los motores de inducción que lo componen y decidir cuál de ellos necesita de una sustitución, con la determinación del ahorro de energía y el comportamiento energético de la barra.

Los elementos hasta este momento referidos a lo largo del trabajo permiten plantear de forma concreta el procedimiento para la caracterización energética con el MMA propuesto.

2.4. Procedimiento para la caracterización energética con el MMA

La Figura 2.3 resume los elementos fundamentales del procedimiento propuesto para la caracterización energética de motores de inducción agrupados en barras de potencias eléctricas de baja tensión a través del modelo de motor agregado [114]. Inicia con los datos nominales de los motores de inducción y las mediciones de las principales magnitudes eléctricas en cada barra. Desde la barra de potencia eléctrica, en los puntos seleccionados, se forman los motores agregados nominales y se toman las mediciones características del funcionamiento real de los mismos.

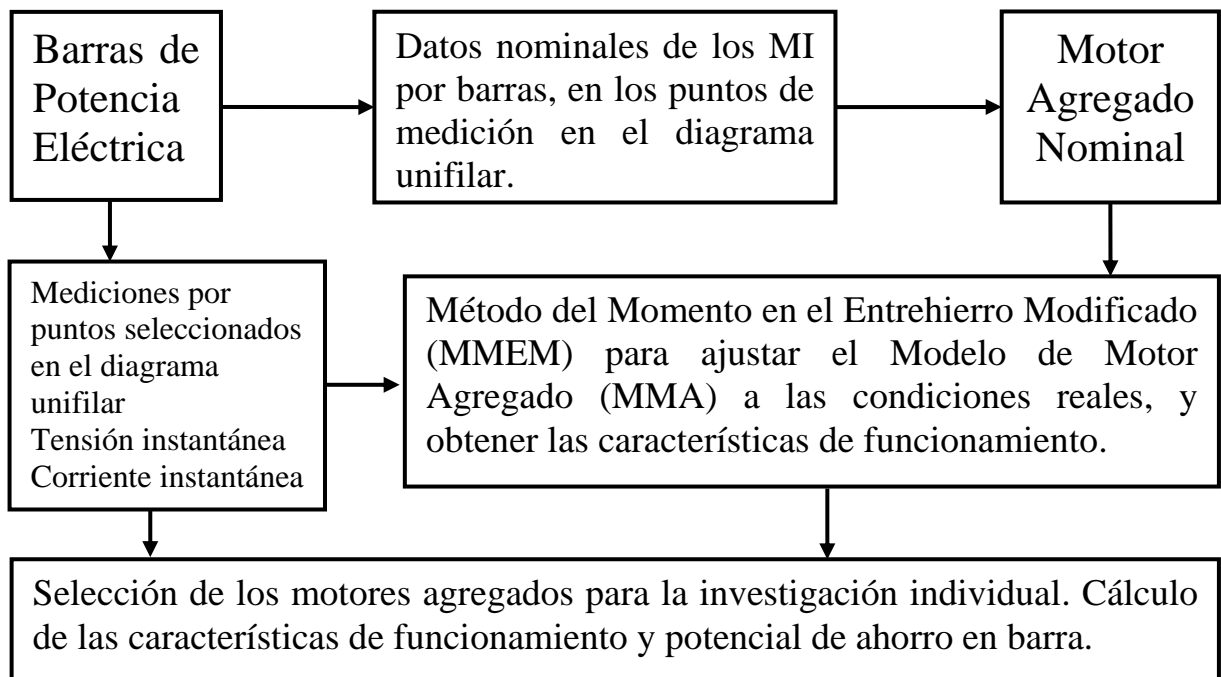


Figura 2.3. Diagrama en bloques del procedimiento para caracterización energética con el MMA

La convergencia de estas dos direcciones se hace con la aplicación del MMEM que identifica la carga como un motor de inducción y obtiene las características de funcionamiento de todo el grupo. Luego se identifican y seleccionan los motores agregados de mayor significación y se procede a un análisis individual, lo cual simplifica la cantidad de máquinas en análisis. De esta forma, la evaluación energética a través del agregado se hace más efectiva técnicamente y en tiempo, si se compara con un análisis convencional de cada motor por separado.

El procedimiento a seguir para la caracterización energética a partir del modelo del motor agregado se resume en los siguientes puntos:

1. Seleccionar las barras donde se desee obtener el MMA.
2. Tomar los datos nominales de los motores que integran las barras.
3. Tomar las mediciones de las formas de ondas de tensiones y corrientes en el alimentador.
4. Obtener el modelo del motor agregado nominal.

5. Aplicar el MEM para adaptar el modelo de motor agregado a las condiciones reales existentes en el campo de las mediciones.
6. Definir los agregados para un análisis individual.
7. Determinar el potencial de ahorro existente en barras.

2.5. Conclusiones Capítulo 2

- El modelo de motor agregado desarrollado para caracterización energética incluye las pérdidas en el acero, las mecánicas y las adicionales, posibilita el análisis con carga diferente a la nominal y el número de polos se toma por el valor predominante de potencia.
- Cuando se aplica el método del momento en el entrehierro modificado para la evaluación energética del motor agregado, se incluye la selección y evaluación técnica económica de motores propuestos en la sustitución de los actuales en servicio a través del método del Costo del Ciclo de Vida, el cual permite cuantificar el consumo de energía y los costos que representan.
- El procedimiento general propuesto en este trabajo a partir del modelo de motor agregado para la caracterización energética de grupos de motores de inducción, además de considerar la influencia de la eficiencia y el factor de carga, propone el factor de incidencia como un elemento adicional de decisión en la selección de los motores agregados más significativos.

Capítulo 3

Validación del procedimiento a partir del MMA para caracterización energética de motores de inducción

CAPÍTULO 3. VALIDACIÓN DEL PROCEDIMIENTO A PARTIR DEL MMA PARA CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE MOTORES DE INDUCCIÓN

Introducción

Las investigaciones en los sistemas eléctricos de potencia imponen los métodos de simulación pues la magnitud de las potencias de los equipos e instalaciones imposibilitan el método de experimentación como vía tradicional y, en este caso, la simulación se convierte en lo tradicional; particularmente, los parámetros y características de las máquinas eléctricas son muy diferentes a distintos valores de potencia por lo que una instalación experimental con motores medios o grandes no es posible por el elevado costo que representa, incluso para los países desarrollados.

La imposibilidad de tener a escala de laboratorio la diversidad de potencias de motores existentes en la industria hace cualquier demostración experimental limitada, por ello se realiza una validación del MMA a partir de modelos energéticos de motores que han sido comprobados con anterioridad por numerosos investigadores, y se extiende para toda la gama de motores de interés industrial y para muchas combinaciones posibles. Con este objetivo, se utilizan motores con disponibilidad de datos en catálogos afines y, a través del método del circuito equivalente, se obtienen las características de funcionamiento del agregado y de los motores individuales.

Los resultados experimentales pertenecientes a tres barras de las industrias del níquel ratifican la validez del agregado para la pequeña gama de motores que la integran. En estas barras fue posible realizar mediciones en el alimentador principal y en cada motor individual. La potencia de salida se determinó con el uso del método del momento en el entrehierro modificado.

Se plantean como objetivos de este capítulo los siguientes:

- Obtener la validación del motor agregado a partir de los modelos de simulación basados en métodos comprobados con anterioridad por otros investigadores.
- Validar experimentalmente el agregado para una gama de potencias limitada.

Las características principales que influyen en la obtención del modelo de motor agregado, de acuerdo con la diversidad de motores existentes a nivel industrial, son las siguientes: 1) potencia nominal; 2) cantidad de motores; 3) número de polos; 4) estado de carga; 5) tipo de eficiencia y 6) tiempo de explotación. La configuración del MMA encierra dependencias complejas e interrelacionadas, sin embargo, para demostrar su validez se toman como referencia las potencias de salida y de entrada, por ser resultados de un proceso de transformación electromecánica donde concurren variaciones en casi todas las magnitudes del motor agregado.

3.1. Validación del MMA por simulación de modelos energéticos

Para la validación por simulación se comparan los resultados que se obtienen tanto por el MMA como por el método de análisis individual a cada motor, modelos demostrados ampliamente en trabajos anteriores. Con este fin, las distintas magnitudes resultantes del grupo de motores deben mostrar un comportamiento sin diferencias apreciables en comparación con las respuestas del agregado. Esta validación se desarrolla en tres momentos:

- En **primer lugar**, se forman variantes de agregados nominales de eficiencias estándar y alta, a partir de los motores seleccionados en el catálogo de “Siemens 2005” [92], a través de las recomendaciones generales dadas en [1, 2, 43, 94, 115]. Tanto para los motores individuales como para el agregado se determinan los parámetros del circuito equivalente por [97].
- En **segundo lugar**, a través de los coeficientes de carga de los motores individuales se establecen las potencias de salida correspondientes y, con la suma de estas, el coeficiente de

carga del agregado. A partir del deslizamiento, en función del coeficiente de carga, se obtiene un circuito equivalente con impedancia variable, lo cual permite determinar las características de funcionamiento para los motores individuales y el agregado.

- En **tercer lugar**, se determinan las magnitudes sumas de cada grupo de motores individuales del agregado, se comparan versus las mismas magnitudes obtenidas directamente por el equivalente y se representan en formas de tablas y gráficas. Las diferencias entre estas magnitudes, su comportamiento típico y variaciones que experimentan, son las bases para la validación del método propuesto para caracterización energética.

En esta etapa de la validación del MMA se consideran variables que no pueden ser evaluadas bajo consideraciones reales, como son: el tipo de eficiencia y un número variable de motores en el agregado. Este trabajo se inicia con la selección de los motores del agregado.

Se pueden diferenciar varios tipos de motores agregados de acuerdo con las potencias de los motores de inducción que lo integran. En este trabajo se hace una división en cuatro grandes grupos: *agregados con motores de inducción de iguales potencias; agregados con motores de inducción de potencias similares; agregados con motores de inducción de potencias diferentes y agregados con motores de inducción de potencias muy diferentes.*

3.1.1. Selección de los motores que forman los agregados

Existen numerosas investigaciones sobre la caracterización de motores asíncronos de baja tensión en el sector industrial [2, 43, 115]. En la Unión Europea, de Almeida [2] realizó un trabajo donde se caracterizan los motores de inducción de acuerdo con los niveles de potencias referidos a: por ciento que representan en capacidad instalada y en el consumo de energía, horas de trabajo anuales y el incremento del costo anual, figuras 3.1 y 3.2. Ambas figuras sirvieron de base en la elección de las máquinas para las diferentes combinaciones de motores agregados.

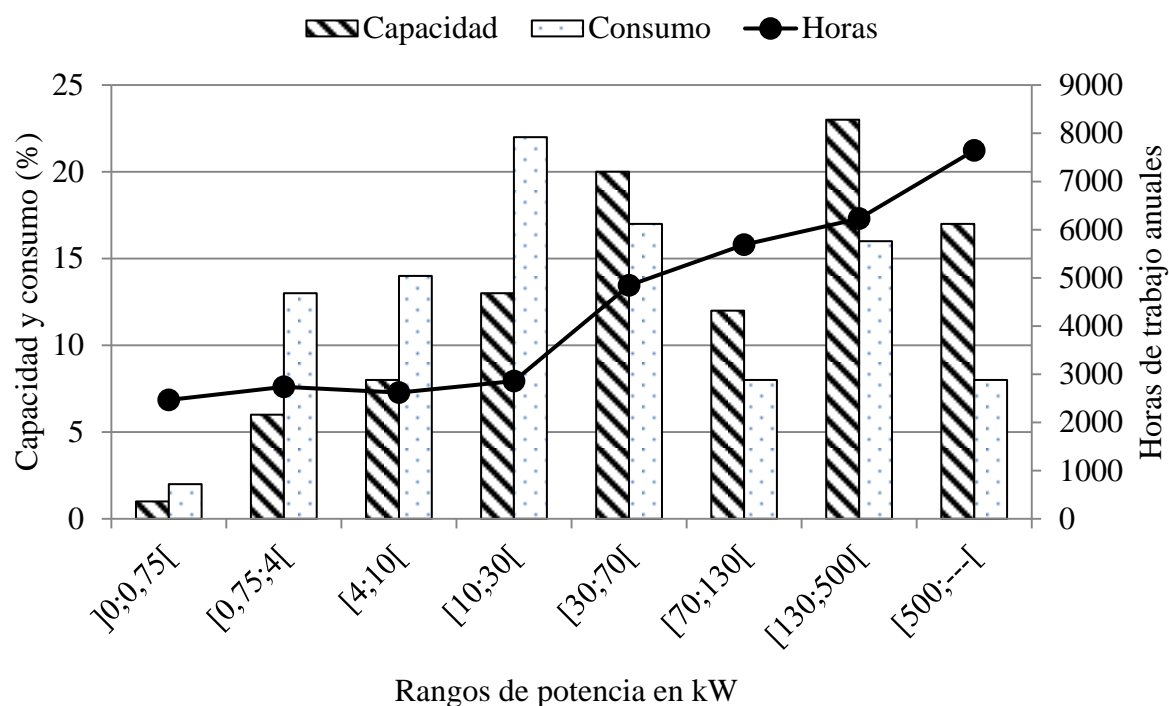


Figura 3.1. Capacidad instalada, consumo de energía y horas promedios de operación del motor de inducción por rango de potencia en el sector industrial *Fuente:* [43]

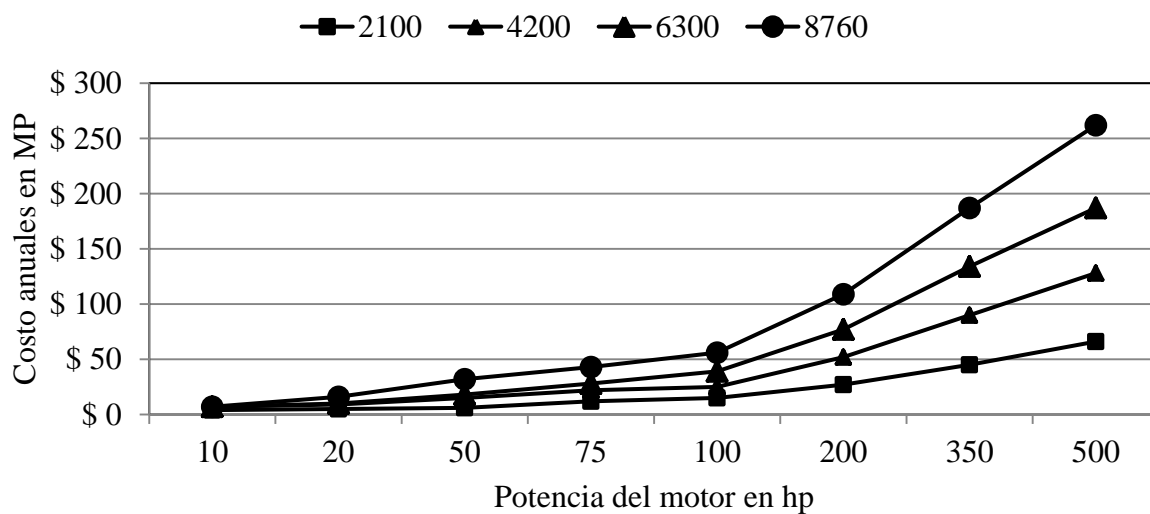


Figura 3.2. Incremento del costo de la energía del motor de inducción con el tamaño y las horas de operación anuales *Fuente:* [115]

Los datos nominales de los motores trifásicos de inducción de baja tensión se tomaron del catálogo “Siemens 2005” [92] de acuerdo con el rango de potencias de 1 a 375 kW, de 2 a 6 polos, eficiencia estándar y alta, para derivar en las cuatro variantes de agregado.

Las particularidades en la realización de los cuatro agregados a partir de los motores individuales (1- de polos iguales con eficiencia estándar, 2- de polos iguales con alta eficiencia, 3- de polos diferentes con eficiencia estándar y 4- de polos diferentes con alta eficiencia) dan como resultado 16 variantes a tomar en consideración.

Grupo 1) *Agregados con motores de inducción de iguales potencias*

Los motores de 10 a 70 kW, Figura 3.1, constituyen el 33 % en capacidad y el 39 % del consumo en el sector industrial, cualquier motor en este rango, seleccionado de forma aleatoria, puede formar parte de los agregados con motores de inducción de iguales potencias. Para la investigación se utilizaron motores con potencia nominal de 44,76 kW.

Grupo 2) *Agregados con motores de inducción de potencias similares*

Los motores de 10 a 130 kW, Figura 3.1, constituyen el 45 % en capacidad y el 47 % del consumo en el sector industrial, por su tipicidad se puede seleccionar este rango para formar agregados con motores de potencias similares. Aquí se eligió como potencia media 22 kW con una desviación estándar de 6,91 kW; valor mínimo de 14,92 kW; valor máximo de 37,3 kW.

Grupo 3) *Agregados con motores de inducción de potencias diferentes*

Los motores de 4 a 500 kW, Figura 3.1, constituyen el 76 % en capacidad y el 77 % del consumo en el sector industrial, cualquier motor seleccionado en este rango puede formar los agregados con motores de potencias diferentes. En esta investigación se seleccionó como potencia media 52,518 kW con una desviación estándar de 60,97 kW; valor mínimo de 1,12 kW; valor máximo de 186,5 kW y recorrido de 185,38 kW.

Grupo 4) *Agregados con motores de inducción de potencias muy diferentes*

Seleccionando todos los rangos, se forman agregados con motores de potencias muy diferentes.

Para la investigación se seleccionó una potencia media de 92,09 kW con una desviación estándar de 110,44 kW; valor mínimo de 0,74 kW; valor máximo de 298,4 kW y recorrido de 297,65 kW.

Por el procedimiento descrito en el epígrafe 2.1.1 se obtuvieron los datos nominales de las 16 variantes de agregados, Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Datos nominales de los motores agregados obtenidos

No		P_n (kW)	U_n (V)	I_n (A)	n_n (r/min)	fp_n	η_n	p	s_n
PI	EE	447,60	440	730,00	1775	0,870	0,930	4	0,0139
	AE	447,60	440	740,00	1775	0,860	0,936	4	0,0139
PD	EE	447,60	440	741,03	1771	0,866	0,919	4	0,0158
	AE	447,60	440	757,75	1776	0,841	0,934	4	0,0132
PI	EE	220,07	440	373,66	1765	0,846	0,912	4	0,0197
	AE	220,07	440	364,50	1765	0,863	0,930	4	0,0194
PD	EE	220,07	440	368,29	1761	0,864	0,908	4	0,0215
	AE	220,07	440	390,36	1767	0,808	0,926	4	0,0185
PI	EE	525,18	440	850,06	1776	0,871	0,933	4	0,0134
	AE	525,18	440	842,57	1781	0,879	0,950	4	0,0107
PD	EE	525,18	440	836,73	1779	0,885	0,932	4	0,0119
	AE	525,18	440	832,27	1781	0,888	0,946	4	0,0107
PI	EE	920,94	440	1478,89	3568	0,876	0,933	2	0,0089
	AE	920,94	440	1376,35	3570	0,933	0,949	2	0,0082
PD	EE	920,94	440	1506,56	1780	0,861	0,938	4	0,0112
	AE	920,94	440	1417,69	1783	0,908	0,951	4	0,0096

Nota: PI Polos iguales; PD Polos diferentes; EE Eficiencia Estándar y AE Alta Eficiencia

donde: P_n , U_n , I_n , n_n , fp_n y s_n representan la potencia en **kW**, tensión en **V**, corriente en **A**, velocidad en **rev/min**, factor de potencia y deslizamiento, respectivamente, todos en valores nominales; p es el número de polos.

Los datos nominales, cuando se refieren a motores agregados de potencias iguales, se diferencian por los valores de corriente, velocidad, factor de potencia, eficiencia, deslizamiento y, en menor grado, por el número de polos. Los equivalentes de eficiencias estándar versus los de alta se diferencian fundamentalmente en las magnitudes de la eficiencia y la velocidad.

Muchas son las investigaciones sobre los procedimientos para determinar los parámetros del circuito equivalente a partir de los datos nominales [39, 42, 97, 116-119]. En el presente trabajo se utilizó el procedimiento de este autor donde las variaciones que experimentan los parámetros están en los límites permisibles [97].

En los parámetros del circuito equivalente de los motores agregados que se analizaron, Tabla 3.2, *se incluye la resistencia adicional como un aporte a la consideración del agregado para fines energéticos*, a diferencia de las restantes teorías.

Tabla 3.2. Parámetros del circuito equivalente en **T** de los motores agregados

No		$r_s (\Omega)$	$x_s (\Omega)$	$r_r (\Omega)$	$x_r (\Omega)$	$r_m (\Omega)$	$x_m (\Omega)$	$r_{ad} (\Omega)$
PI	EE	0,00839	0,0260	0,0050	0,0390	0,0818	1,0101	0,0065
	AE	0,00839	0,0297	0,0050	0,0446	0,0962	0,9960	0,0063
PD	EE	0,00930	0,0240	0,0057	0,0364	0,0673	0,9143	0,0065
	AE	0,00986	0,0323	0,0047	0,0488	0,0838	0,8998	0,0063
PI	EE	0,02052	0,0566	0,0142	0,0851	0,1329	1,7410	0,0140
	AE	0,02047	0,0520	0,0140	0,0784	0,1325	1,9266	0,0137
PD	EE	0,02290	0,0528	0,0154	0,0796	0,1501	1,9006	0,0140
	AE	0,02651	0,0552	0,0133	0,0864	0,0971	1,4081	0,0139

No		$r_s (\Omega)$	$x_s (\Omega)$	$r_r (\Omega)$	$x_r (\Omega)$	$r_m (\Omega)$	$x_m (\Omega)$	$r_{ad} (\Omega)$
PI	EE	0,00616	0,0239	0,0041	0,0361	0,0720	0,9097	0,0049
	AE	0,00589	0,0308	0,0032	0,0468	0,1322	1,1766	0,0048
PD	EE	0,00611	0,0223	0,0037	0,0340	0,0805	0,9889	0,0049
	AE	0,00595	0,0293	0,0032	0,0460	0,1314	1,2810	0,0048
PI	EE	0,00215	0,0136	0,0016	0,0204	0,0420	0,5091	0,0026
	AE	0,00200	0,0182	0,0014	0,0276	0,2657	1,8520	0,0025
PD	EE	0,00280	0,0131	0,0020	0,0198	0,0363	0,4622	0,0026
	AE	0,00273	0,0176	0,0017	0,0271	0,1046	1,0123	0,0025

Las diferencias entre los parámetros del circuito equivalente, que representan a iguales partes del motor, para el agregado de eficiencia estándar versus el de alta, tienen el mayor valor en la reactancia de magnetización con una desviación estándar de 0,426. Los demás parámetros no exceden de 0,07 como desviación estándar, aunque se evidencia la influencia del tipo de eficiencia del motor en los parámetros del circuito equivalente.

Cada motor agregado y los motores individuales que lo integran se caracterizan por los datos nominales y los parámetros del circuito equivalente, incluyendo las resistencias, las cuales simulan las pérdidas adicionales y las del acero, estrategia que permite comparar el comportamiento de ambas clases de motores por el método del circuito equivalente.

3.1.2. Resultados del comportamiento de los agregados por grupos principales

En la evaluación del comportamiento de los motores de inducción individuales en condiciones diferentes a las nominales se utilizó el coeficiente de carga (k_c), ya que la impedancia del circuito equivalente y las magnitudes características del motor de inducción varían en función del mismo.

La Tabla 3.3 es una muestra de los valores del coeficiente de carga para los 10 motores

individuales que forman un agregado. Como se observa, tres columnas (k_{ci1} , k_{ci2} y k_{ci3}) fijan valores para todos los motores y en las otras (k_{ci4} , k_{ci5} y k_{ci6}) oscilan entre 0,5 y 1,25. Estos coeficientes determinan el comportamiento del motor agregado bajo estas condiciones.

Tabla 3.3. Muestra del coeficiente de carga por motores individuales para un agregado

	k_{ci1}	k_{ci2}	k_{ci3}	k_{ci4}	k_{ci5}	k_{ci6}
Motor 1	0,900	0,700	0,500	0,948	1,034	0,801
Motor 2	0,900	0,700	0,500	0,965	0,876	1,019
Motor 3	0,900	0,700	0,500	0,923	0,637	0,487
Motor 4	0,900	0,700	0,500	0,641	0,625	0,801
Motor 5	0,900	0,700	0,500	0,721	0,960	0,621
Motor 6	0,900	0,700	0,500	0,901	0,997	0,947
Motor 7	0,900	0,700	0,500	0,516	0,834	0,565
Motor 8	0,900	0,700	0,500	0,516	0,603	0,715
Motor 9	0,900	0,700	0,500	0,612	0,503	0,686
Motor 10	0,900	0,700	0,500	0,765	0,953	0,946

La Tabla 3.4 contiene los valores del coeficiente de carga para los 16 motores agregados según la combinación de la Tabla 3.2, donde se observa la coincidencia para ambos tipos de eficiencia y, debido a la igualdad en potencia de cuatro motores agregados, los coeficientes de carga se concentran en igual cantidad de grupos.

Tabla 3.4. Valores del coeficiente de carga por motores agregados

Agregados	k_{cag1}	k_{cag2}	k_{cag3}	k_{cag4}	k_{cag5}	k_{cag6}
1-2-3-4	0,900	0,700	0,500	0,751	0,802	0,759
5-6-7-8	0,900	0,700	0,500	0,757	0,829	0,765
9-10-11-12	0,900	0,700	0,500	0,671	0,775	0,790
13-14-15-16	0,900	0,700	0,500	0,664	0,753	0,785

Para comparar el comportamiento del motor agregado versus la suma de magnitudes de los motores de inducción, a cada motor individualmente se le aplicó una potencia en el eje, la cual se simuló a través del coeficiente de carga y la potencia nominal. La carga del motor agregado es la suma de las potencias reales del conjunto de motores individuales.

Las diferencias entre las potencias de entrada DPE, Tabla 3.5 y las otras magnitudes del motor agregado y las resultantes de todos los motores individuales resumidas en el **Anexo B** (corriente del estator, DCE; eficiencia, DEF; y pérdidas totales, DPT), se obtuvieron para cada coeficiente de carga que se evaluó. Las diferencias relativas tienen como referencias el análisis individual a cada motor, por considerarse el método ya comprobado con anterioridad.

Grupo 1) *Agregados con motores de inducción de iguales potencias nominales*

Si todos los motores de inducción tienen el mismo número de polos e iguales coeficientes de carga, independientemente del tipo de eficiencia existe una identificación exacta entre el grupo y el agregado; cero por ciento de diferencia de potencia de entrada (DPE), Tabla 3.5. Cuando el coeficiente de carga es diferente para cada motor individual y se mantienen las demás condiciones, la DPE es inferior a 0,6 % comparada con el equivalente por suma, donde los valores más altos se obtienen para motores de alta eficiencia.

Cuando el número de polos es diferente los valores de DPE, existen aunque prácticamente despreciables, se hacen mayores para motores de eficiencia estándar y varían inversamente proporcional con los coeficientes de carga. Si el coeficiente de carga se toma diferente para cada motor individual, y se mantienen las demás condiciones, los valores más altos de DPE se obtienen para motores de alta eficiencia.

Este tipo de motor agregado caracteriza eficazmente las combinaciones para motores estándares con iguales o diferentes número de polos.

Tabla 3.5. Valores de DPE para las 16 variantes de motores agregados en análisis

Potencias	Polos	Eficiencia	DPE (%)					
			Iguales kc			Diferentes kc		
kc del agregado →			0,9	0,7	0,5	0,751	0,802	0,759
Iguales	Iguales	Estándar	0	0	0	0,368	0,422	0,367
		Alta	0	0	0	0,435	0,500	0,434
	Diferentes	Estándar	0,008	0,026	0,051	0,357	0,390	0,366
		Alta	0,006	0,020	0,035	0,321	0,355	0,422
kc del agregado →			0,9	0,7	0,5	0,757	0,829	0,765
Similares	Iguales	Estándar	0,005	0,015	0,024	0,437	0,445	0,421
		Alta	0,008	0,024	0,042	0,324	0,493	0,448
	Diferentes	Estándar	0,011	0,032	0,054	0,520	0,773	0,617
		Alta	0,013	0,041	0,063	0,010	0,129	0,269
kc del agregado →			0,9	0,7	0,5	0,671	0,775	0,790
Diferentes	Iguales	Estándar	0,006	0,018	0,032	0,340	0,687	0,454
		Alta	0,044	0,131	0,215	0,123	0,679	0,484
	Diferentes	Estándar	0,013	0,038	0,072	0,167	0,369	0,263
		Alta	0,056	0,167	0,287	0,032	0,544	0,119
kc del agregado →			0,9	0,7	0,5	0,664	0,753	0,785
Muy Diferentes	Iguales	Estándar	0	0,003	0,012	0,180	0,380	0,252
		Alta	0,013	0,037	0,058	0,194	0,819	0,289
	Diferentes	Estándar	0,008	0,026	0,047	0,147	0,484	0,261
		Alta	0,035	0,103	0,173	0,027	0,517	0,132

Grupo 2) *Agregados con motores de inducción de potencias similares*

La DPE toma el menor valor cuando todos los motores de inducción tienen el mismo número de polos e iguales coeficientes de carga, Tabla 3.5. Estos valores de DPE son mayores para motores de eficiencia estándar y su magnitud varía inversamente proporcional con el grado de carga. Si el

coeficiente de carga es diferente para cada motor individual, los valores más altos de DPE se obtienen para motores de alta eficiencia, sin embargo, nunca alcanzan el 1%. Los valores más altos coinciden con los motores de diferente número de polos y eficiencia estándar. Este motor agregado caracteriza con certeza las combinaciones de motores de eficiencia estándar con iguales números de polos y motores de alta eficiencia con diferentes números de polos.

Grupo 3) *Agregados con motores de inducción de potencias diferentes*

Si todos los motores de inducción tienen el mismo número de polos e iguales coeficientes de carga, los valores de DPE resultan más bajos para el tipo de eficiencia estándar, Tabla 3.5. Para coeficientes fijos de cargas y números de polos diferentes, aumentan ligeramente los valores de DPE, los cuales son más altos para el motor agregado formado por motores de alta eficiencia. Los niveles más altos de DPE, menores del 1 %, siempre coinciden para motores con iguales números de polos y de alta eficiencia. En este tipo de motor agregado resultan más efectivas las combinaciones de motores de ambos tipos de eficiencias con diferentes números de polos.

Grupo 4) *Agregados con motores de inducción de potencias muy diferentes*

Los valores mínimos de DPE oscilan entre 0 y 0,003 % comparada con el equivalente por suma; los medios varían entre 0,138 y 0,235 % y los máximos entre 0,380 y 0,819 %, según Tabla 3.5. Los niveles más altos siempre coinciden con los motores de igual número de polos y de alta eficiencia. Este tipo de motor agregado caracteriza eficazmente las combinaciones para motores estándar con iguales y diferentes números de polos.

Generalizando los resultados para todos los grupos de agregados en la Tabla 3.5, los valores de las diferencias de potencias de entrada (DPE) no alcanzan el 1%, bajo cualquier circunstancia de operación del motor agregado; y cuando se fija el coeficiente de carga para todos los motores individuales, la DPE varía inversamente proporcional con el mismo.

La diferencia de eficiencia (DEF) prácticamente repite los resultados vistos para la DPE, en ningún caso supera el 1% bajo cualquier circunstancia de operación del motor agregado, **Anexo B, Tabla B.1.**

La diferencia de corriente del estator tiene una dependencia no lineal de la carga y los valores son superiores a los de otras magnitudes, sin embargo, no exceden del 1,5 % comparados con el equivalente por suma, **Anexo B, Tabla B.2.**

Por último, se presentan las diferencias entre las pérdidas totales del motor agregado comparadas con la equivalente del grupo de motores individuales, **Anexo B, Tabla B.3.** Las pérdidas totales tienen una dependencia compleja versus el grado de carga del motor y, por ello, la DPT toma valores mayores a los vistos para magnitudes de menor complejidad en sus dependencias.

Solo para la DPT los límites de variaciones de los valores mínimos, medios y máximos de las magnitudes analizadas como promedio general sobrepasan el 1 %, sin embargo, es menor del 5 % en todos los casos, Tabla 3.6, tomado como criterio básico de la medida de la exactitud en estudios de carácter energéticos [43, 56, 115]. Estos resultados justifican el empleo del motor agregado para determinar el comportamiento energético de un grupo de motores de inducción.

Tabla 3.6. Variaciones de los valores mínimos, medios y máximos de diferentes magnitudes

Criterios	Valores límites de las diferentes magnitudes			
	DPE (%)	DEF (%)	DCE (%)	DPT (%)
Rango de mínimos	0 – 0,044	0 – 0,021	0 – 0,082	0 – 0,448
Rango de medios	0,087 – 0,334	0,02 – 0,131	0,171 – 0,529	0,776 – 2,916
Rango de máximos	0,269 – 0,819	0,051 – 0,389	0,467 – 1,312	2,439 – 7,809
Promedio general	0,205	0,077	0,355	1,929

La representación gráfica permite visualizar el comportamiento de las diferentes magnitudes del motor agregado y caracterizarlas cualitativa y cuantitativamente.

3.1.3. Representación gráfica de diferentes magnitudes de los agregados

La dependencia de la DPE versus el coeficiente de carga promedio por tipos de eficiencia, permite inferir sobre la influencia de este parámetro en la equivalencia del agregado con el grupo de motores de inducción, y en qué rango de carga se comporta con más efectividad, Figura 3.3, donde M1 hasta M16 son los motores agregados resultantes de las diferentes combinaciones. Para ello se asignaron coeficientes de carga diferentes pero en orden ascendente, a cada motor perteneciente al agregado; para generar estos valores se utilizó la ecuación (3.1), la cual forma una matriz donde las filas representan los motores individuales y las columnas la cantidad de coeficientes a considerar; ecuación que define valores desde 0,2 hasta 1,25.

$$k_c(I; J) = \left[(0,2 \div 1,25) (0,88 + 0,2 \cdot \text{rand}(1;1)) \right] \quad (3.1)$$

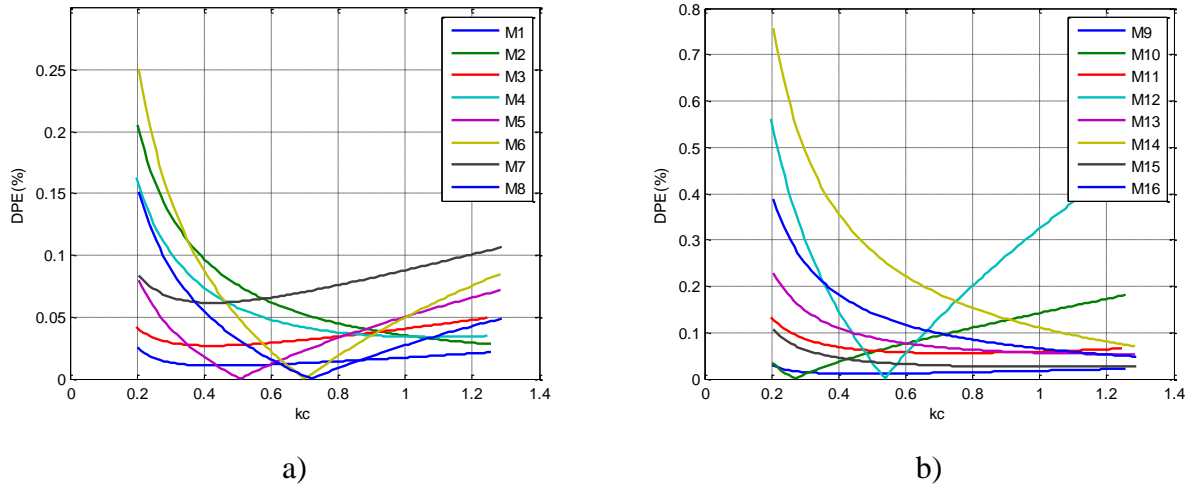


Figura 3.3. DPE para motores agregados: a) de eficiencia estándar; b) de alta eficiencia

De la Figura 3.3 se deduce que: 1) los valores de DPE, de forma general, son más bajos y presentan menor dispersión para motores de eficiencia estándar que en motores de alta eficiencia;

2) para coeficientes de carga entre 80 y 90 % los valores de DPE disminuyen, coincidente con la ocurrencia de la máxima eficiencia de los motores de inducción en estas zonas de carga.

La dependencia de la DPE versus el coeficiente de carga, para diferentes números de motores, se muestra en la Figura 3.4: a) para agregados formados por motores individuales de iguales potencias y b) para agregados a partir de motores de potencias diferentes. De la misma se deduce que las DPE son menores cuando la composición del agregado es más homogénea en potencias nominales de los motores y, aunque la tendencia de DPE es aumentar, siempre es menor del 1 % cuando crece el número de motores en el agregado y, por consiguiente, aumenta la potencia.

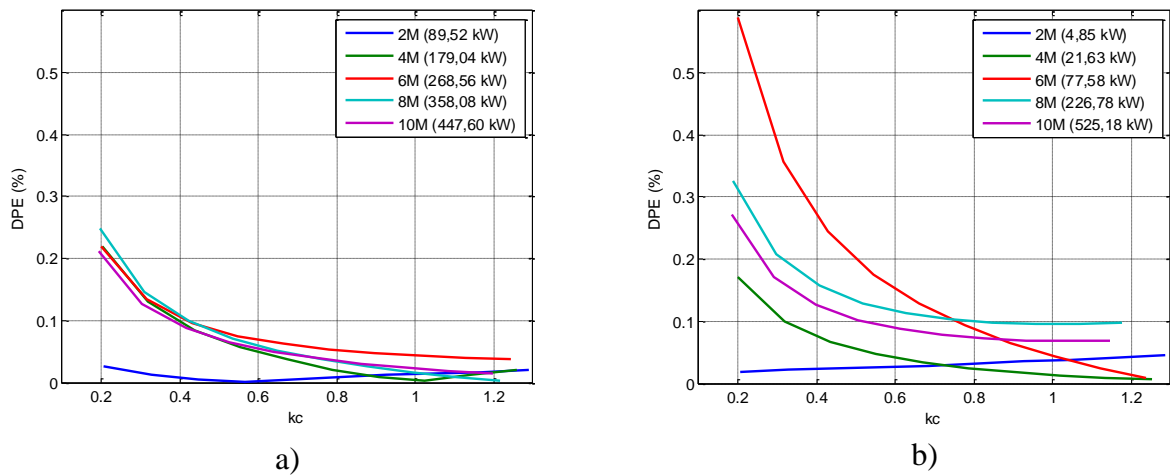


Figura 3.4. DPE para motores agregados: a) de potencias iguales, b) de potencias diferentes.

Se representan en las figuras 3.5 a 3.7, la potencia de entrada, la eficiencia y la corriente por el estator versus el coeficiente de carga; en cada una de ellas se muestran las magnitudes específicas que se obtienen por el agregado y por la equivalencia del grupo de motores individuales, sin embargo, debido a las bajas diferencias entre las mismas, se funden en una sola curva.

La Figura 3.5 muestra un comportamiento prácticamente lineal de la potencia de entrada, con menor espectro para los motores de eficiencia estándar, lo cual significa mayor correspondencia con el grupo de motores individuales para cualquier rango de potencias.

La Figura 3.6 muestra que la eficiencia en motores eficientes adquiere mayor valor para bajos estados de carga comparados con los de eficiencia estándar.

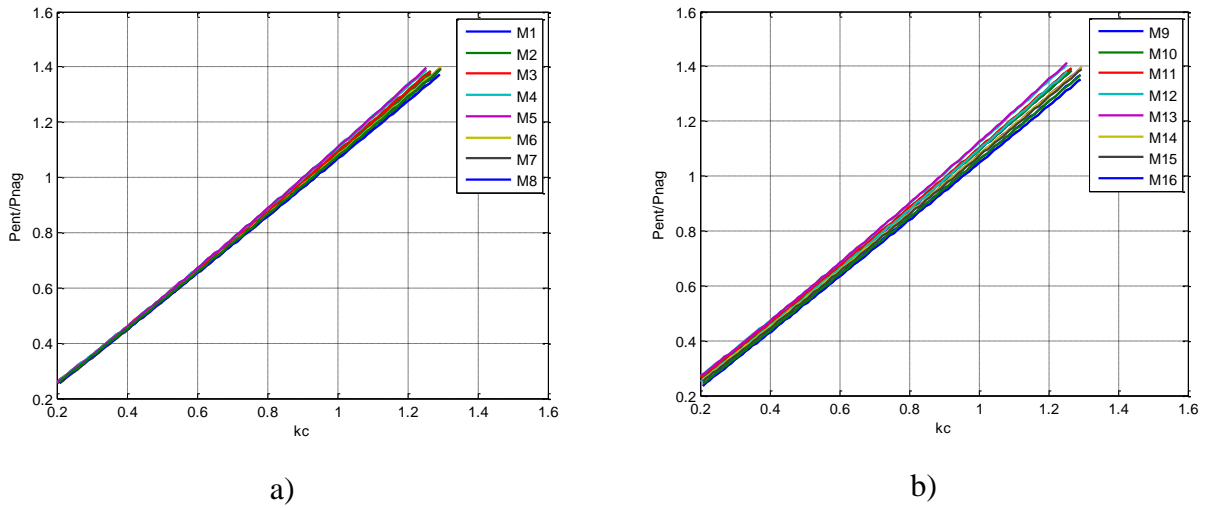


Figura 3.5. Potencia de entrada: a) para eficiencia estándar; b) para alta eficiencia

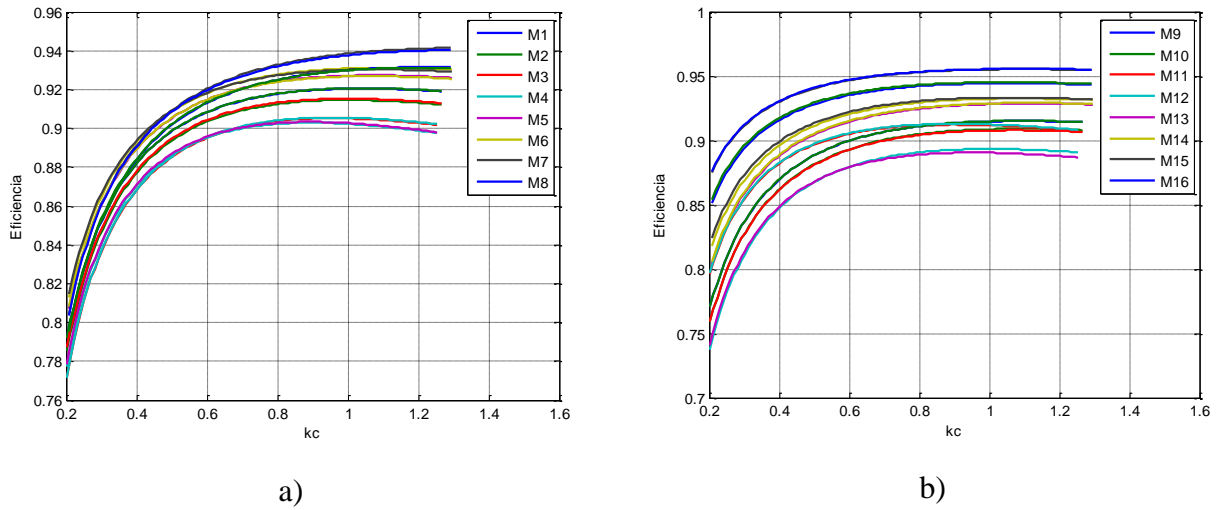


Figura 3.6. Eficiencia: a) para eficiencia estándar; b) para alta eficiencia

La Figura 3.7 muestra la dependencia cuadrática en el comportamiento de la corriente del estator para bajos estados de cargas; para régimen cercano al nominal se verifica una dependencia lineal con el nivel de carga.

La Tabla 3.7 muestra el factor de incidencia promedio según (2.30) y los individuales (2.29) para seis estados de carga diferentes en los motores agregados de eficiencia estándar, Tabla 3.1, seleccionados para la validación del MMA en caracterización energética.

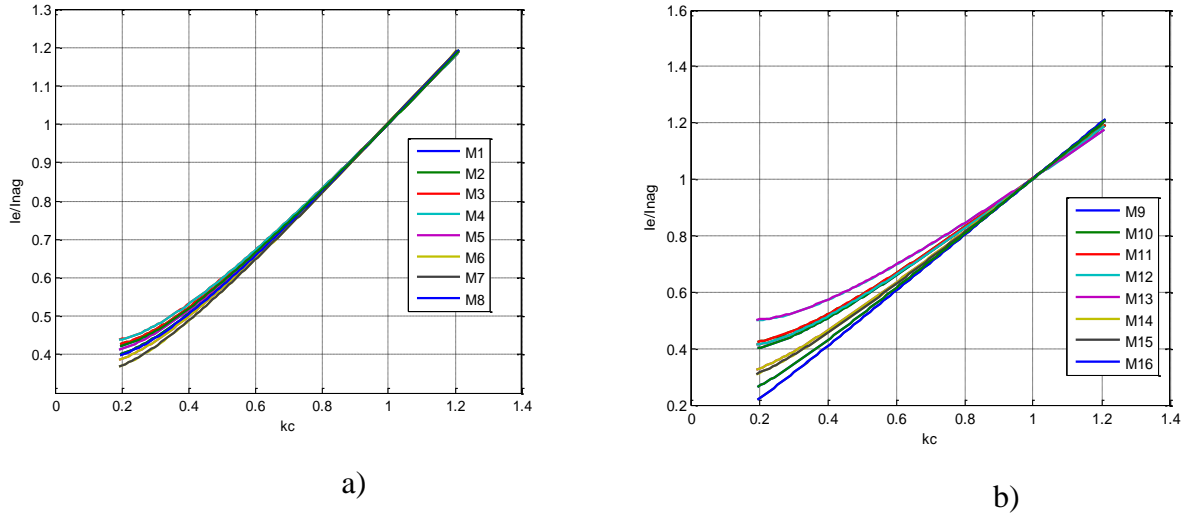


Figura 3.7. Corriente del estator: a) para eficiencia estándar; b) para alta eficiencia

En la Tabla 3.7 Magg-1 hasta Magg-8 simbolizan los ocho motores agregados de eficiencia estándar de los 16 que se analizan; $k_{inc1}(\%)$ hasta $k_{inc6}(\%)$ los factores de incidencia individuales, correspondientes a seis estados de carga diferentes, que aumentan en el mismo orden para todos los motores. Como resultado, los valores promedios del factor de incidencia difieren muy poco y se pueden considerar como constante.

Tabla 3.7. Valores del factor de incidencia para motores agregados de eficiencia estándar

	$k_{inc1}(\%)$	$k_{inc2}(\%)$	$k_{inc3}(\%)$	$k_{inc4}(\%)$	$k_{inc5}(\%)$	$k_{inc6}(\%)$
Magg-1	5,340	5,339	5,343	5,759	5,506	5,209
Magg-2	5,369	5,365	5,367	5,788	5,534	5,235
Magg-3	2,667	2,664	2,666	2,896	2,839	2,619
Magg-4	2,673	2,666	2,662	2,900	2,844	2,622
Magg-5	6,224	6,223	6,223	6,018	6,205	6,313

Magg-6	6,202	6,200	6,197	5,996	6,182	6,290
Magg-7	10,804	10,836	10,873	10,388	10,500	10,910
Magg-8	10,889	10,914	10,949	10,462	10,578	10,991
Promedio	6,271	6,276	6,285	6,276	6,274	6,274

Es de observar que solo cuatro motores agregados tienen factores de incidencia iguales o superiores al valor promedio para cada estado de carga; siendo candidatos principales a un análisis individual, con la reducción a la mitad de la cantidad total de agregados.

Cuando se experimenta a nivel industrial las condiciones imposibilitan manipular variables independientemente, por lo que el ensayo depende según las características de la instalación. Esta investigación tomó para la experimentación tres barras con posibilidades de medición en cada motor, donde la composición fue la siguiente: rango de potencias de 4 a 160 kW, cantidad de motores de 3 a 5, número de polos de 2 a 6, todos de eficiencia estándar, más de 15 años de explotación y un nivel de carga de 50 hasta el 100 %.

3.2. Resultados experimentales limitados y su interpretación a nivel industrial

Dos barras pertenecen a la Empresa Pedro Sotto Alba, en la sección de Planta de Agua: la barra OH-1 compuesta por 4 motores, tres de 4 polos y 151 kW y uno de 6 polos y 86 kW, y la barra UG-5 por 3 motores, dos de 4 polos y 151 kW y uno de 6 polos y 86 kW; en ambos casos se incluye un CCM con cinco de estas máquinas, que se agrupan en un equivalente bipolar de 319 kW. Los datos nominales de estas barras se encuentran en el **Anexo C, Tablas C.1 y C.2**.

La barra VESC-5 corresponde al ventilador del secadero número cinco de la sección de Secaderos en una de sus barras de baja tensión (5TP4), perteneciente a la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara de Moa. La integran tres motores, todos de 6 polos y potencias nominales de 18, 85 y 90 kW. Los datos nominales se encuentran en el **Anexo D, Tabla D.1**.

Según la metodología dada en el epígrafe 2.1.1, se obtuvieron los motores agregados nominales correspondientes a las barras VESC-5, OH-1 y UG-5, Tabla 3.8; las mediciones de VESC-5 se encuentran en el **Anexo F, Tabla F.7**; mientras que para OH-1 y UG-5 están en el **Anexo C, Tablas C.3 y C.4** perteneciente al diagrama unifilar de la barra 345-SG-1 **Anexo C, Figura C.1**. Como resultados, tres motores agregados, dos bipolares y uno de seis polos, donde: P_n - potencia nominal en **W**; U_n - tensión nominal en **V**; I_n - corriente nominal en **A**; n_n - velocidad nominal en **rev/min**; $\cos\phi$ - factor de potencia; η – eficiencia y k_s - coeficiente de sobrecarga.

Tabla 3.8. Datos nominales de los motores agregados para las tres barras

<i>M. Agg</i>	<i>Barras</i>	P_n (kW)	U_n (V)	I_n (A)	n_n (rev/min)	$\cos\phi$ (pu)	η (pu)	k_s (pu)
ME1	VESC-5	193	440	322,99	1175	0,859	0,9104	2
ME2	OH-1	858,5	460	1335,88	3566	0,864	0,934	2,05
ME3	UG-5	707,50	460	1100,99	3565	0,867	0,930	2,06

La determinación de la potencia de salida, tanto para el motor agregado como para los motores individuales, se realizó por el método del momento en el entrehierro modificado y, para verificar la efectividad del MMA propuesto, se compararon los valores de potencias de entrada y de salida del agregado versus los que se obtienen para el grupo, cuando se aplica el análisis individual a cada motor; las diferencias relativas tienen como referencias este último análisis.

Los resultados comparativos para las tres barras se muestran en la Tabla 3.9 donde: PE_{agg} y PS_{agg} , PE_{sum} y PS_{sum} son las potencias de entrada y de salida del motor agregado y por el análisis individual, respectivamente; DPE, DPS las diferencias de potencias de entrada y de salida entre ambas vías y PEM la potencia de entrada medida en el alimentador principal.

Las desviaciones (SDT) de los datos, **Anexo C Tabla C.5 y C.6**, y **Anexo D Tabla D.7**, establecen un error estadístico menor del 5 % en la estimación de las potencias de entrada y de salida por todas las vías, y existe una diferencia entre ambas magnitudes menor del 1 % cuando se compara con los resultados obtenidos por el análisis individual, Tabla 3.9; resultados que confirman la validez del modelo de motor agregado para caracterización energética, donde existe una correspondencia entre el agregado y el equivalente por suma de motores individuales, en el comportamiento de las potencias de entrada y de salida. Se corrobora una vez más la capacidad del MMA para representar al grupo de motores y del MMEM para obtener las características de funcionamiento de los mismos.

Tabla 3.9. Muestra comparativa de resultados para las barras OH-1 y UG-5

Motor agregado	Parámetros estadísticos	PEM (kW)	<i>PEagg</i> (kW)	<i>PEsum</i> (kW)	DPE (%)	<i>PSagg</i> (kW)	<i>PSsum</i> (kW)	DPS (%)
VESC-5	Media	124,52	122,79	123,20	0,332	111,01	111,99	0,870
	STD	19,21	20,54	19,24		19,18	19,01	
	error	3,92	4,19	3,93		3,92	3,88	
OH-1	Media	682,73	680,07	686,65	0,959	635,77	642,91	1,110
	STD	19,37	20,12	19,76		19,18	19,01	
	error	3,95	4,11	4,03		3,91	3,88	
UG-5	Media	556,79	557,35	562,01	0,841	521,89	526,32	0,849
	STD	18,85	20,94	19,99		20,04	19,28	
	error	3,85	4,27	4,08		4,09	3,94	

Específicamente para la barra VESC-5 perteneciente a la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, se representaron gráficamente estas dependencias en un gráfico de carga de 24 horas. La Figura 3.8 muestra diferencias entre las potencias de salida que se obtienen por suma de

motores individuales versus agregado menores del 1 % en relación con los resultados obtenidos por el análisis individual.

La correspondencia entre el agregado y el equivalente por suma de motores individuales es visible; el error estadístico es menor del 5 % en la estimación de la potencia de salida por ambas vías, resultado que corrobora la validación del modelo de motor agregado para caracterización energética de motores de inducción en barras comunes de baja tensión.

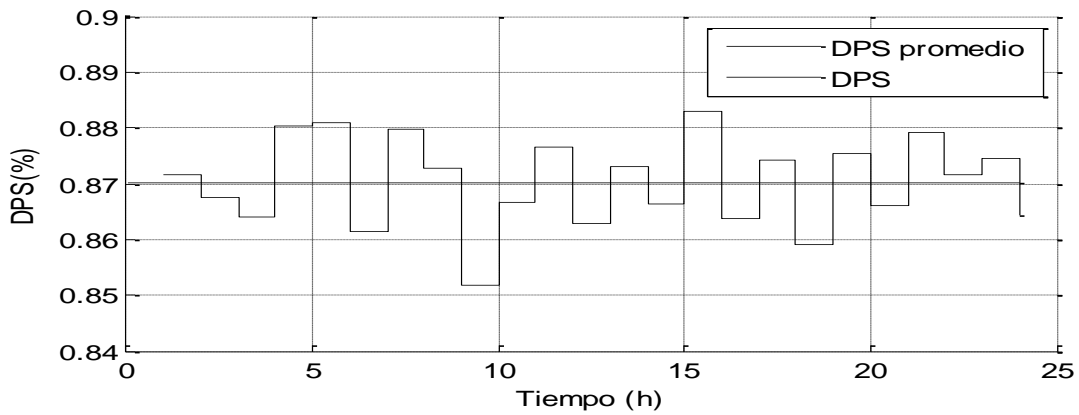


Figura 3.8. DPS por suma de motores individuales versus agregado

Demostrada la efectividad del modelo de motor agregado para representar energéticamente al conjunto de motores individuales, es preciso verificar si su comportamiento se refleja en ellos. Con este objetivo se determinó el comportamiento de ambos tipos de motores para diferentes magnitudes, específicamente para la barra VESC-5.

3.2.1. Características particulares del motor agregado VESC-5

Los resultados promedios de aplicar el MME resumen las características del comportamiento energético del motor agregado VESC-5 como se muestra en la Tabla 3.10, ordenados según el factor de incidencia, donde: P_1 - potencia de entrada; P_2 - potencia de salida; Z_p - pérdidas totales; n_r - velocidad del motor; I_l - corriente por el estator; k_c - coeficiente de carga; η -

eficiencia del motor agregado y k_{incd} - factor de incidencia. Se destaca el bajo estado de carga en los motores del ventilador de pulverización y el de aire primario.

La potencia de entrada nominal y real, la eficiencia nominal y real, así como el coeficiente de carga del motor propuesto surgen de aplicar el mismo gráfico de carga obtenido para el motor en servicio al motor seleccionado por el método de la potencia equivalente, lo cual es útil en la valoración del comportamiento del motor agregado y los motores individuales.

Tabla 3.10. Características de funcionamiento de los motores individuales del VESC-5

<i>M. Ind.</i>	<i>Denominación del motor</i>	P_1 (kW)	P_2 (kW)	Z_p (kW)	n_r (rpm)	I_m (A)	k_c (pu)	η (pu)	k_{incd} (%)
MI 1	Auxiliar	17,38	15,58	1,801	1173	28,12	0,866	0,896	14,11
MI 3	Aire primario	50,41	46,20	4,210	1185	84,27	0,513	0,916	40,91
MI 2	Pulverización	55,41	50,43	4,979	1183	110,96	0,593	0,910	44,98
VESC5	Agregado	122,79	111,01	11,771	1183	235,69	0,575	0,904	

La Figura 3.9 muestra las potencias de entrada, la Figura 3.10 los coeficientes de carga y la Figura 3.11 las eficiencias para el motor agregado VESC-5 y los motores individuales (MI-1, MI-2 y MI-3), donde: **P1 nominal** es la potencia de entrada del motor en servicio; **P1 real** es la potencia que demanda el motor en servicio; **P1p nominal** es la potencia nominal del motor propuesto y **P1p real** es la potencia que demanda el motor propuesto para la sustitución del motor en servicio. En el **Anexo D, Tablas D.3 hasta D.6**, se resumen los datos fundamentales.

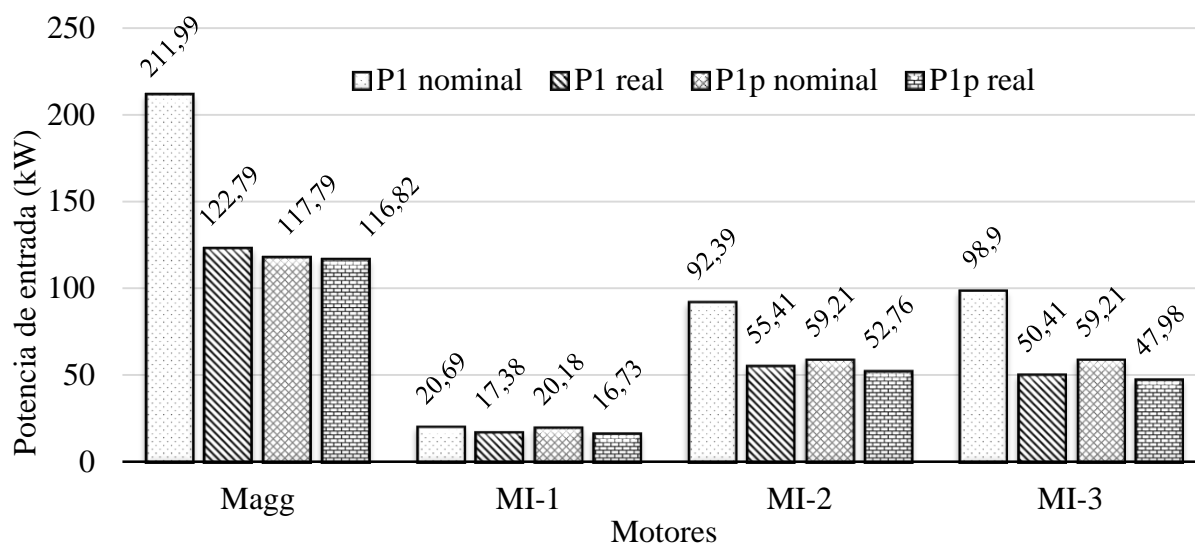


Figura 3.9. Potencia para el agregado VESC-5 y los motores individuales

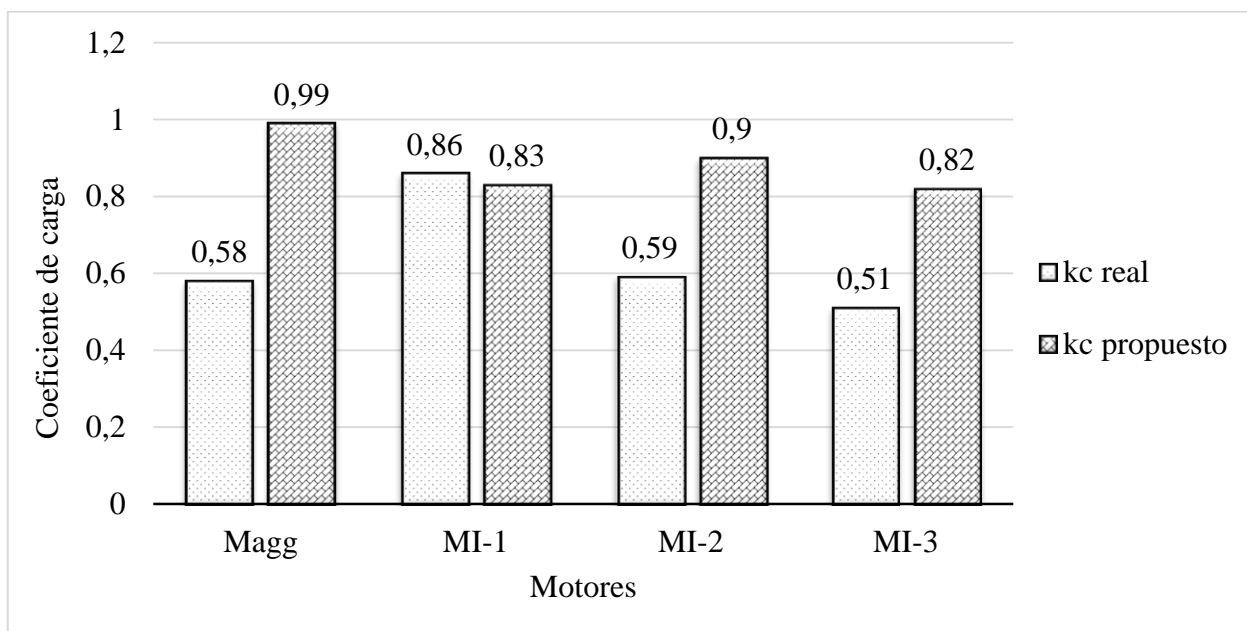


Figura 3.10. Coeficiente de carga del agregado VESC-5 y los motores individuales

La diferencia entre la potencia de entrada del motor agregado nominal en servicio con respecto de la potencia real que se demanda establece un bajo coeficiente de carga, según se puede observar en la Figura 3.10.

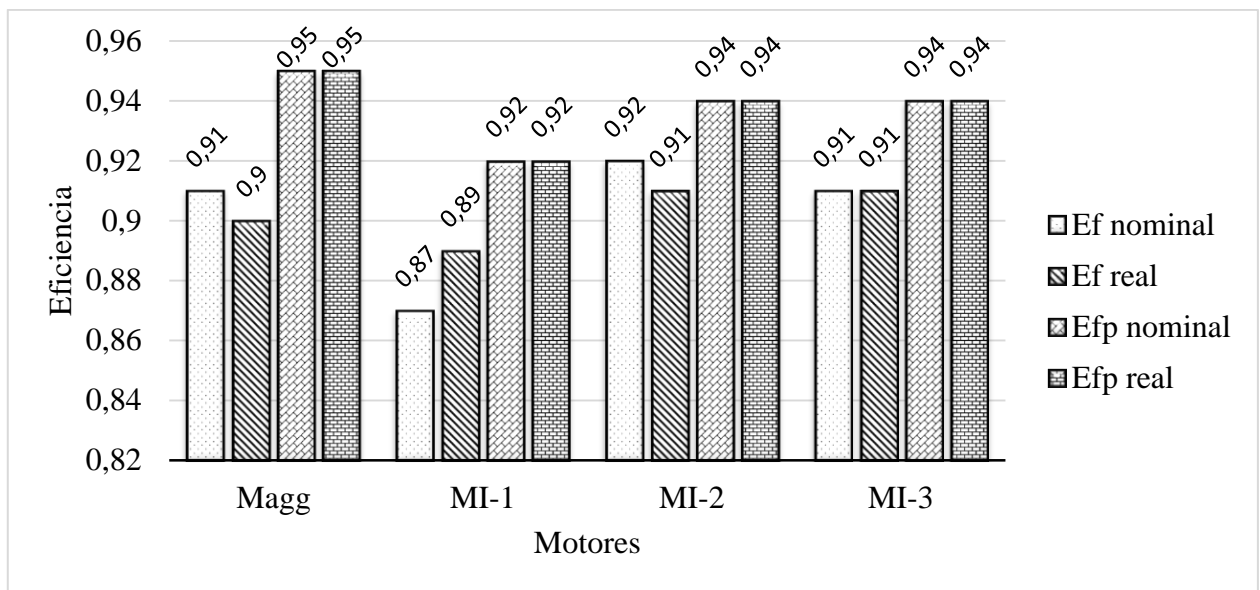


Figura 3.11. Eficiencia del agregado VESC-5 y los motores individuales

El resultado para el agregado se refleja en los motores individuales MI-2 y MI-3, destacándose el bajo coeficiente de carga 0,59 y 0,51, respectivamente, Figura 3.10. Es de notar que la eficiencia, Figura 3.11, es alta aun para coeficientes de carga bajos, como sucede en motores de inducción de potencias nominales superiores a los 20 kW, aunque en las nuevas propuestas siempre existe una correspondencia con alto factor de carga.

Potencial de ahorro asociado para el motor agregado VESC-5

En la determinación del potencial de ahorro asociado con el motor agregado VESC-5 se utilizó el método que analiza el costo del ciclo de vida. Los resultados de la evaluación del potencial de ahorro de energía del motor agregado VESC-5 se muestran en la Tabla 3.11.

La energía consumida por el motor agregado actual es 1060,873 **MWh** y la suma de los motores individuales 1064,492 **MWh**, para una diferencia entre las dos vías de 3,619 **MWh** y un error relativo a la suma de 0,34 %. Semejantes resultados se obtuvieron para el motor propuesto con un error relativo a la suma de 0,56 %.

Tabla 3.11. Potencial de ahorro de energía del motor agregado VESC-5

<i>Motor</i>	<i>Denominación del motor</i>	<i>Consumo de energía anual</i>		<i>Ahorro de energía Anual</i>	<i>Evaluación económica</i>	
		Motor Actual (MWh)	Motor Propuesto (MWh)	(MWh)	CCV (USD)	PRI (años)
MI-1	Auxiliar	150,192	144,574	5,618	2768,67	4,87
MI-2	Pulverización	478,763	455,883	22,879	13722,97	3,50
MI-3	Aire Primario	435,537	414,555	20,982	13176,30	3,82
		Sumas y porcentos				
Motor agregado VESC-5		1060,873	1009,322	51,551	34429,98	2,94
Suma de MI-1, MI-2 y MI-3		1064,492	1015,012	49,480	32667,94	
Error (%)		0,34	0,56	4,18		

El potencial de ahorro, de 50 **MWh** anuales, se obtiene por la diferencia entre el motor actual y el propuesto y se aprecia que el error de estimarlo por la suma de la energía o por el motor agregado VESC-5, es 4,18%, menor del 5 % establecido como criterio estándar. Esto demuestra la efectividad del motor agregado como equivalente del grupo de motores de inducción en comportamiento energético.

La Tabla 3.10 muestra el factor de incidencia promedio para los motores individuales, con un valor de 33,33 % y la Tabla 3.11 refleja el período de recuperación de la inversión (PRI) como magnitud a considerar en la evaluación energética de motores de inducción. Ambos elementos permiten priorizar el motor del ventilador de pulverización (MI-2) con un factor de incidencia de 44,976 % y un PRI de 3,50 años, un bajo coeficiente de carga 0,593, coincidente como el motor de menor eficiencia y el de mayor CCV (13722,97 **USD**, en el análisis de los motores individuales que integran el motor agregado VESC-5.

El mismo análisis se realizó para las dos restantes barras en experimentación y se obtuvieron los siguientes resultados: para la barra OH-1 se obtuvo un potencial de ahorro de energía de 126,81 **MWh** anual, un CCV de 83135,59 **USD** y un PRI de 6,99 **años**; y para la barra UG-5 se obtuvo un potencial de ahorro de energía de 97,33 **MWh** anual, un CCV de 67212,81 **USD** y un PRI de 5,13 **años**.

En ambas barras el PRI es mayor de cinco en todos los motores individuales; lo cual sugiere que existen posibilidades técnicas, pero no económicamente viable a corto plazo.

3.3. Conclusiones Capítulo 3

- Las diferencias entre las magnitudes obtenidas por el motor agregado versus las que se obtienen por sumatoria de los motores individuales siempre fueron menores del 2 % con respecto del equivalente por suma, en presencia de cargas de diferente características.
- Las DPE son menores del 1 % y presentan los valores más bajos para agregados constituidos por motores de eficiencia estándar; esta magnitud decrece a medida que aumenta el factor de carga, alcanza los mínimos entre 80 y 90 %, para un número constante de motores. La DPE crece con el aumento de los motores en el agregado y disminuye cuando aumenta el factor de carga.
- Existe una alta correspondencia entre las características del motor agregado y un motor de inducción ordinario para la potencia específica, según lo demuestran los resultados numéricos y las dependencias gráficas, donde se evidencian bajos niveles de errores, lo cual señala la validez de utilizar un motor agregado para el análisis energético de grupos de motores individuales.
- La evaluación de las tres barras tomadas para la experimentación, corroboró el balance de potencia de salida entre los agregados y la sumatoria de los motores individuales, con DPS

menores del 1 % comparada con el análisis individual, y un error estadístico promedio menor del 5 %; estos resultados validan el uso del MMA en caracterización energética y confirman la efectividad del MMEM para determinar la potencia en el eje.

- La diferencia entre la energía consumida por el motor agregado VESC-5 y la total de los motores individuales tiene un error relativo a la suma de 0,34 %. El ahorro promedio de 50 MWh obtenido por el motor agregado o por motores individuales tiene un error de 4,18 %, menor del 5 % establecido como criterio estándar. Esto demuestra la efectividad del motor agregado como equivalente del grupo de motores en comportamiento energético.
- El resultado técnico y económico del agregado VESC-5 establece un CCV diferencial efectivo y un PRI de 2,94 años, los cuales se reflejan en los motores individuales y verifican las potencialidades de ahorro de energía viables.
- El ventilador de pulverización con un factor de incidencia de 44,976 % y un PRI de 3,36 años, seleccionado dentro del agregado VESC-5 para el análisis particular, coincide con un bajo coeficiente de carga 0,593, y es el de menor eficiencia entre los dos preseleccionados; se identificó un potencial de ahorro de energía anual de 23 862,57 kWh.

Capítulo 4

Aplicación del procedimiento de caracterización energética propuesto a nivel industrial

CAPÍTULO 4. APLICACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA PROPUESTO A NIVEL INDUSTRIAL

Introducción

La aplicación a nivel industrial que se presenta en este capítulo tiene como propósito confirmar la hipótesis planteada en el inicio de esta investigación, y se desarrolla por etapas:

1. **Primera etapa:** se formaron los motores agregados correspondientes a cada barra, los cuales se caracterizaron por sus datos nominales y parámetros del circuito equivalente en **T**. Como resultado se transformó y se simplificó el diagrama unifilar original (epígrafe 4.1).
2. **Segunda etapa:** se obtuvo el comportamiento energético de los motores agregados por cada barra con la utilización del MMEM, los datos nominales y las mediciones en los puntos señalados. Se determinó el consumo de energía asociado a la barra y se valoró la selección de los motores agregados por el factor de incidencia (epígrafe 4.2).
3. **Tercera etapa:** se realizó un análisis particular del agregado seleccionado previamente entre los de mayores incidencias; se estableció el comportamiento energético particular de este agregado y se valoró las potencialidades de ahorro de energía (epígrafe 3.2.2).

El objetivo de este capítulo es el siguiente:

Aplicar el procedimiento de caracterización energética sobre la base del MMA, a grupos de motores de inducción a nivel industrial, con resultados comparables a los obtenidos por el procedimiento tradicional del análisis individual a cada motor.

4.1. Caracterización de la barra objeto de estudio

La Empresa Comandante Ernesto Che Guevara está estructurada en diez plantas y el suministro eléctrico a los consumidores de 0,48 **kV** se realiza por medio de dos transformadores de 10,5/0,48 **kV** con una potencia individual de 1000 **kVA**. La planta de Secadero tiene un total de 465 motores de baja tensión, distribuidos en 28 barras, con promedio de cinco unidades cada CCM; 192 de estas máquinas son de 4 a 500 kW y 10 mayores de 500 kW para un 41,29 % y 2,15 % del total, respectivamente. Las potencias instaladas representan el 59,67 % y 32,32 %, en el mismo orden. Razón por lo cual se seleccionó para realizar un análisis en detalle y demostrar la efectividad del método propuesto, con la posibilidad de extenderlo a toda la empresa.

En la Tabla 4.1 se muestran las características del sistema de alimentación a la sección de Secaderos. El suministro eléctrico se realiza por subestaciones: dos de 10 kV (1TP y 5TP); dos de 6 kV (2TP y 3TP) y cuatro de 480 V (5TP3, 5TP4, 5TP5 y 5TP13). Las subestaciones de 480 V tienen dos transformadores (1T y 2T) que suministran la tensión a las barras principales y de éstas se conectan los centros de control de motores (CCM).

Tabla 4.1. Características del sistema de alimentación a Secaderos

Sección	Subestaciones			Número de CCM por cada transformador en 480 V		Total de motores en CCM de 480 V
	10 kV	6 kV	480 V	1T	2T	
Secaderos	1TP 5TP	2TP 3TP	5TP3	3	1	23
			5TP4	3	6	48
			5TP5	5	5	60
			5TP13	2	2	17
Total de CCM y motores en 480 V				28		148

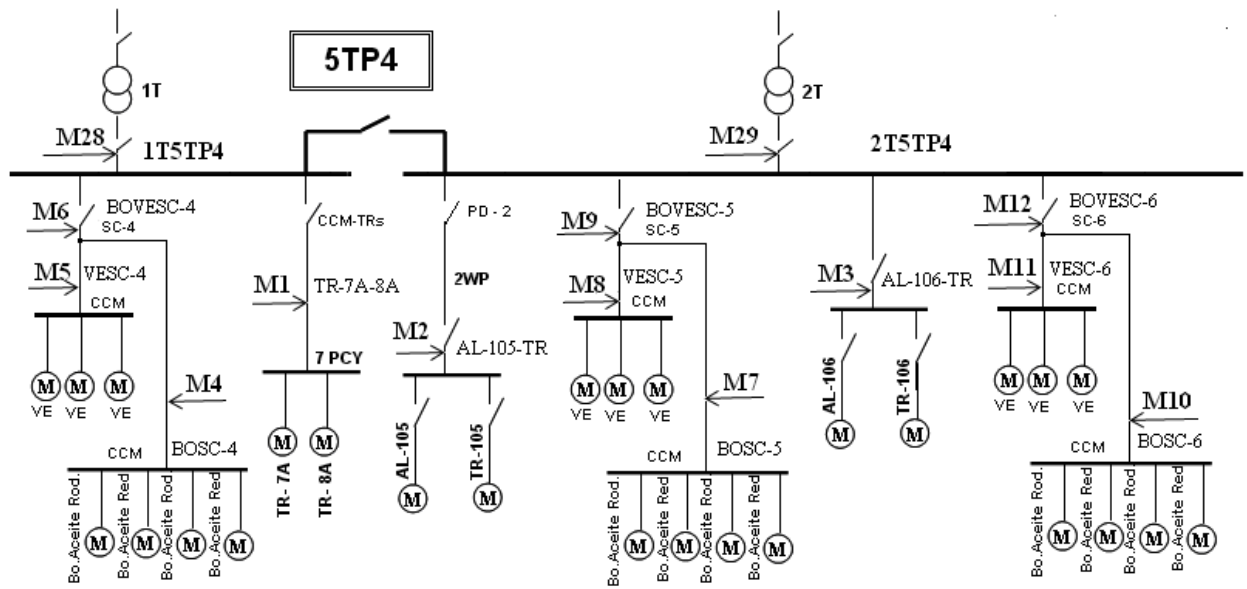


Figura 4.1. Diagrama unifilar de la barra 5TP4

En la aplicación detallada del procedimiento a nivel industrial se seleccionó la barra 5TP4. Las características de la misma se deducen de la Figura 4.1: tiene dos barras principales, una por cada transformador y representadas por 1T5TP4 y 2T5TP4; tres barras intermedias simbolizadas por BOVESC-4, BOVESC-5 y BOVESC-6; y nueve CCM que concentran grupos de motores, identificados de acuerdo con el mecanismo al cual representan.

En el diagrama unifilar se muestran con flechas los puntos de medición de M1 a M12; M28 y M29. La cantidad de motores agregados coincide con el total de barras con alimentación común.

Los datos nominales de los motores de inducción de la barra 5TP4 y las nomenclaturas para cada punto de medición según el tipo de mecanismo se muestran en el **Anexo D, Tabla D.1**.

La Tabla 4.2 presenta los datos nominales del motor M1 (TR7AY8A) como ejemplo. El tipo de motor agregado que se obtiene en cada CCM de la barra 5TP4, según la clasificación por grupos de potencia, se corresponde con el **grupo 3) agregados formados por motores de inducción de potencias diferentes**, con número de polos desiguales y eficiencia estándar.

Tabla 4.2. Datos nominales de los motores de la barra 5TP4

Puntos	Barras (M. Agg)	P_n (kW)	U_n (V)	I_n (A)	n_n (rev/min)	$\cos\varphi$ (pu)	η (pu)	k_s (pu)
M1	TR7AY8A	4	440	7,8	1700	0,81	0,82	2
		4	440	7,8	1700	0,81	0,82	2
		4	440	7,8	1700	0,81	0,82	2
		17	440	28,0	1764	0,87	0,89	2
		160	440	254,0	1764	0,90	0,92	2
		110	440	192,0	1764	0,81	0,93	2

4.1.1. Composición de motores agregados para la barra 5TP4

Una vez que se agrupan los motores individuales de los CCM, la subestación 5TP4 se transformó a un sistema equivalente más simple como se muestra en la Figura 4.2. Este diagrama brinda la posibilidad de una mejor orientación en las transformaciones durante el proceso de agregación de motores; se observa una simplificación en el número de cargas en análisis, y ahora figuran motores correspondientes con los CCM.

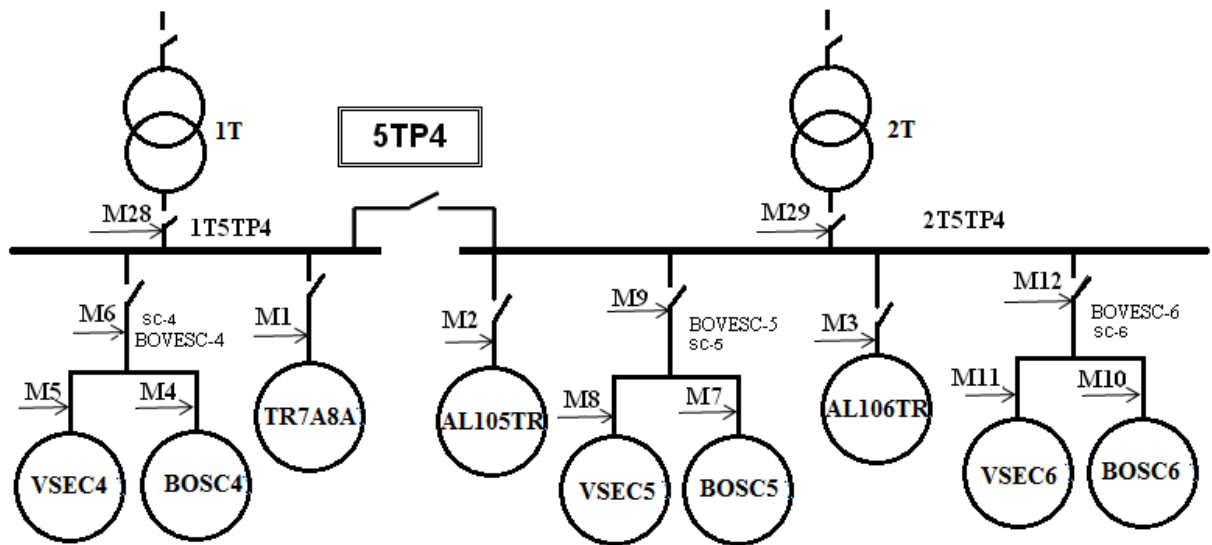


Figura 4.2. Unifilar de la subestación 5TP4 con agregados por barras auxiliares

Los parámetros nominales de los motores agregados, correspondientes a sus respectivas barras se muestran en la Tabla 4.3. Todos en conexión estrella (Y), frecuencia (60 **Hz**) y tensión (440 **V**).

A partir de los datos nominales de cada motor agregado se obtuvieron los parámetros del modelo de circuito equivalente en **T** configuración serie por [97], **Anexo D Tabla D.2**: resistencias del devanado del estator, rotor y rama de magnetización (r_l , r_2 , r_m) y las reactancias del devanado del estator, rotor y rama de magnetización (x_l , x_2 , x_m), todos en Ω .

Tabla 4.3. Parámetros nominales de los motores agregados para la barra 5TP4

<i>M. Agg</i>	<i>Barras</i>	P_n (kW)	U_n (V)	I_n (A)	n_n (rev/min)	$\cos\phi$ (pu)	η (pu)	k_s (pu)
M1	TR7Ay8A	299	440	495,60	1761,33	0,863	0,9157	2
M2	2WPPD22	113	440	208,53	1760,22	0,841	0,843	2
M3	AL105TR	38	440	67,53	1770,61	0,842	0,8702	2
M4	BOSC-4	12.5	440	23,73	1712,41	0,848	0,8179	2
M5	VESC-4	193	440	322,99	1175,91	0,859	0,9104	2
M7	BOSC-5	12.5	440	23,73	1712,41	0,848	0,8179	2
M8	VESC-5	193	440	322,99	1175,91	0,859	0,9104	2
M10	BOSC-6	12.5	440	23,73	1712,41	0,848	0,8179	2
M11	VESC-6	193	440	322,99	1175,91	0,859	0,9104	2

4.2. Evaluación de los motores agregados en condiciones reales

La aplicación del MMEM, necesario en el ajuste del agregado a las condiciones reales, requiere de las mediciones de las formas de ondas de tensiones y corrientes; solo se precisan dos pares: las corrientes de fase i_a e i_b , y las tensiones de línea v_{ab} y v_{ca} .

El registro de las mediciones para estudios energéticos se realizó a intervalos máximos de 10 minutos, durante las 24 horas y formas de ondas con 128 muestras por ciclo. Esto garantizó un adecuado muestreo y la conservación de las particularidades y propiedades de las magnitudes medidas [120]. En el **Anexo E** se muestran las características del equipo de medición utilizado. Con las formas de ondas, también se registraron los valores efectivos de tensiones y corrientes, la potencia activa trifásica total, el factor de potencia, la frecuencia.

Se comprobó que la suma de las tensiones de líneas y la suma de las corrientes en el sistema trifásico sean iguales a cero, lo cual cumple con la propiedad de que las tensiones y corrientes no contengan elementos de secuencia cero; de existir secuencia cero, estas deben ser separadas previamente de las magnitudes de tensión y corriente.

En una industria de régimen de trabajo continuo en tres turnos, como sucede en la empresa del níquel Ernesto Che Guevara de Moa o en otras similares, las magnitudes pueden variar ligeramente. Variaciones que se deben a distintas causas: por diferentes niveles de producción, por fallas, etc., pero dada la continuidad y el intervalo considerado de las mediciones estas oscilaciones no son representativas y no caracterizan los resultados registrados. Evidentemente, situaciones extremas, anómalas o transitorias, pueden ser eliminadas de los registros.

Las mediciones utilizadas resumen 24 horas de registro y son resultados de promedios de mediciones a lo largo de semanas y meses. Para el manejo de una aplicación computacional auxiliar, la base de datos se generó en formato de una estructura que contiene: matriz de las formas de ondas de tensiones y corrientes; matriz de frecuencia; matriz de velocidad y la celda de datos nominales de los motores agregados e individuales. La información completa de los valores promedios de las mediciones en cada CCM aparece en el **Anexo F** para 24 horas.

El resumen de las mediciones en valores promedios por cada motor agregado se muestra en la Tabla 4.4. Las magnitudes fundamentales que caracterizan estas barras son: tensión y factor de potencia. Desde un punto de vista del análisis tradicional, las mediciones en barras no se identifican con el tipo de carga que se caracteriza (motor de inducción) y sucede sin tener en cuentas las pérdidas, el coeficiente de carga y la eficiencia de las cargas conectadas.

Por la vía tradicional, la magnitud tomada por regularidad para evaluar el uso de la energía en barras es el factor de potencia, el mismo ofrece que parte de la potencia aparente se convierte en potencia útil, sin embargo, no explica a qué se debe el valor de esta magnitud.

La aplicación del procedimiento propuesto que utiliza el MMA para la caracterización energética de motores de inducción, consideró la presencia de esta carga por sus características y la representó por un modelo específico.

Tabla 4.4. Valores promedios de las mediciones principales para la barra 5TP4

<i>Magg</i>	<i>Denominación de Barras</i>	<i>Ia</i> (A)	<i>Ib</i> (A)	<i>Ic</i> (A)	<i>Uab</i> (V)	<i>Ubc</i> (V)	<i>Uca</i> (V)	<i>P</i> (kW)	<i>cosφ</i> (pu)
M1	TR-7A-8A	199,15	197,40	200,63	446,79	445,02	446,52	108,54	0,704
M2	AL-105-TR	63,42	62,71	60,69	453,44	451,79	452,50	34,28	0,693
M3	AL-106-TR	23,02	23,31	24,33	456,31	455,69	455,54	14,85	0,770
M4	BOSC-4	10,73	5,13	9,46	439,06	436,00	437,77	5,32	0,812
M5	VESC-4	230,04	230,48	227,63	439,06	436,00	437,77	129,96	0,746
M7	BOSC-5	11,69	10,67	10,28	453,50	454,54	452,38	5,66	0,663
M8	VESC-5	235,27	239,58	232,18	453,50	454,54	452,38	122,76	0,662
M10	BOSC-6	12,39	11,58	11,27	447,09	444,93	445,55	5,95	0,653
M11	VESC-6	164,28	165,90	162,26	447,09	444,93	445,55	126,65	0,703

Las características de servicio de cada motor agregado correspondiente a la barra 5TP4, en valores promedios y ordenados según el factor de incidencia, cuando se aplicó el procedimiento propuesto bajo condiciones reales, se muestran en la Tabla 4.5.

Tabla 4.5. Características de funcionamiento de todos los motores agregados para 5TP4

M_{agg}	Denominación de Barras	P_1 (kW)	P_2 (kW)	Z_p (kW)	n_r (rpm)	I_l (A)	k_c (pu)	η (pu)	k_{incd} (%)
M4	BOSC-4	5,25	4,61	0,639	1754,62	8,42	0,369	0,875	0,981
M7	BOSC-5	5,66	4,94	0,716	1754,50	10,87	0,395	0,873	1,057
M10	BOSC-6	5,94	5,18	0,769	1750,41	11,74	0,414	0,869	1,111
M3	AL-106-TR	14,84	13,34	1,502	1787,15	23,56	0,351	0,899	2,773
M2	AL-105-TR	34,28	30,19	4,087	1787,56	62,27	0,267	0,881	6,405
M1	TR-7A-8A	108,53	96,91	11,615	1783,56	199,05	0,324	0,893	20,277
M5	VESC-4	114,40	103,08	11,325	1184,22	229,38	0,534	0,901	21,374
M8	VESC-5	122,79	111,13	11,656	1184,27	235,69	0,576	0,905	22,941
M11	VESC-6	123,54	111,58	11,962	1183,58	241,94	0,578	0,903	23,082

A diferencia del método tradicional se consideraron otras magnitudes en el análisis como son: el factor de carga, la eficiencia, las pérdidas y el factor de incidencia de las cargas conectadas. Del coeficiente de carga se deduce el nivel de utilización de la capacidad instalada; de la eficiencia, la racionalidad de su uso y de las pérdidas de qué potencial de ahorro se dispone. El bajo coeficiente de carga promedio (0,423) puede explicar el bajo factor de potencia por sobredimensionamiento de motores agregados, el cual coincide con bajos niveles de carga en los motores individuales.

Para los motores agregados de la barra 5TP4 el factor de incidencia medio es 11 % y cuatro de estas máquinas tienen valores superiores a este por ciento, Tabla 4.5. Se seleccionan previamente aquellos motores agregados que los factores de incidencias sean iguales o superiores a este valor medio. El orden sugerido en el análisis particular de los motores agregados, definido por el factor de incidencia en la barra 5TP4 es: VESC-6, VESC-5, VESC-4 y TR-7A-8A y. El factor de incidencia “ k_{inc} ” toma valores entre 20 y 25 % en cuatro motores agregados, lo cual reduce la tarea técnica y simplifica la selección del equivalente de mayor influencia, Figura 4.3. Dada la incidencia de cada motor agregado pueden seleccionarse, previamente, uno o varios de ellos para el análisis particular.

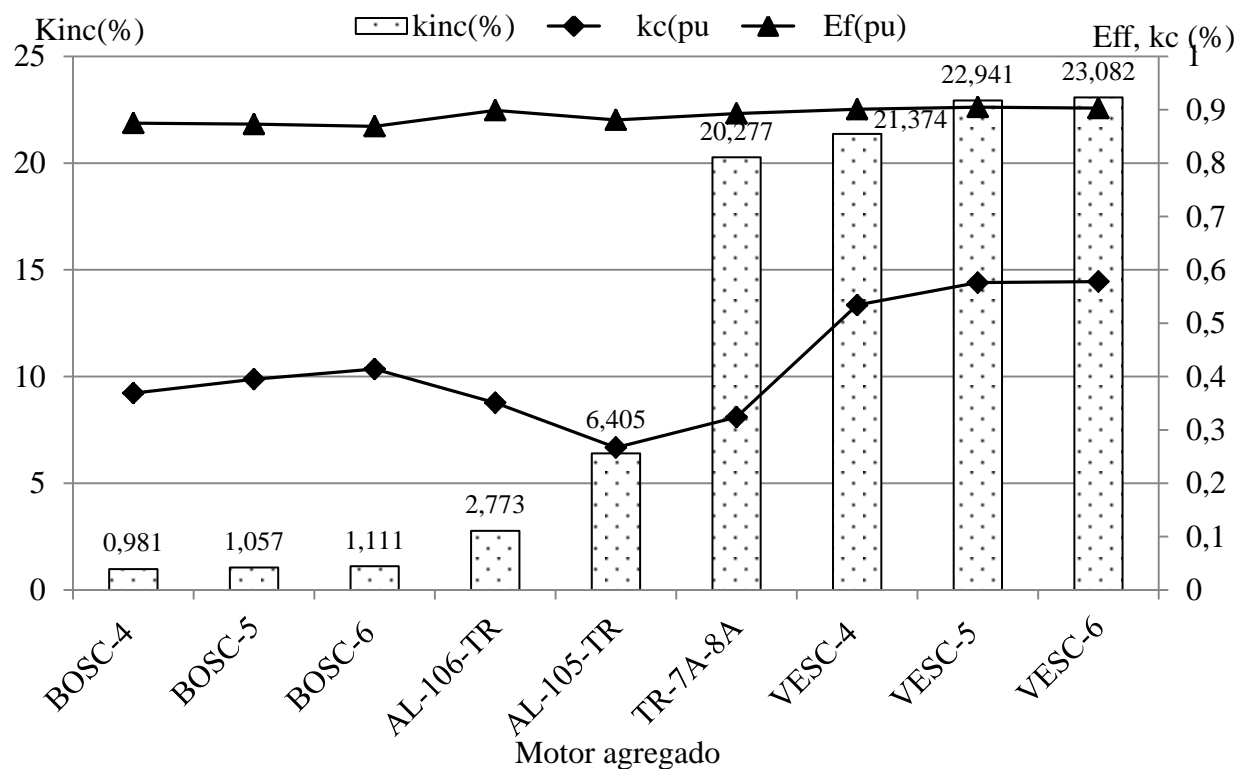


Figura 4.3. Factor de incidencia, eficiencia y coeficiente de carga por motor agregado

Cada motor agregado se caracterizó por un gráfico de carga típico por día y dado que se trató de una operación en régimen continuo fue posible pronosticar el consumo de energía anual por cada uno de ellos, según aparece en la Figura 4.4 para 24 horas de trabajo diario y 360 días en el año.

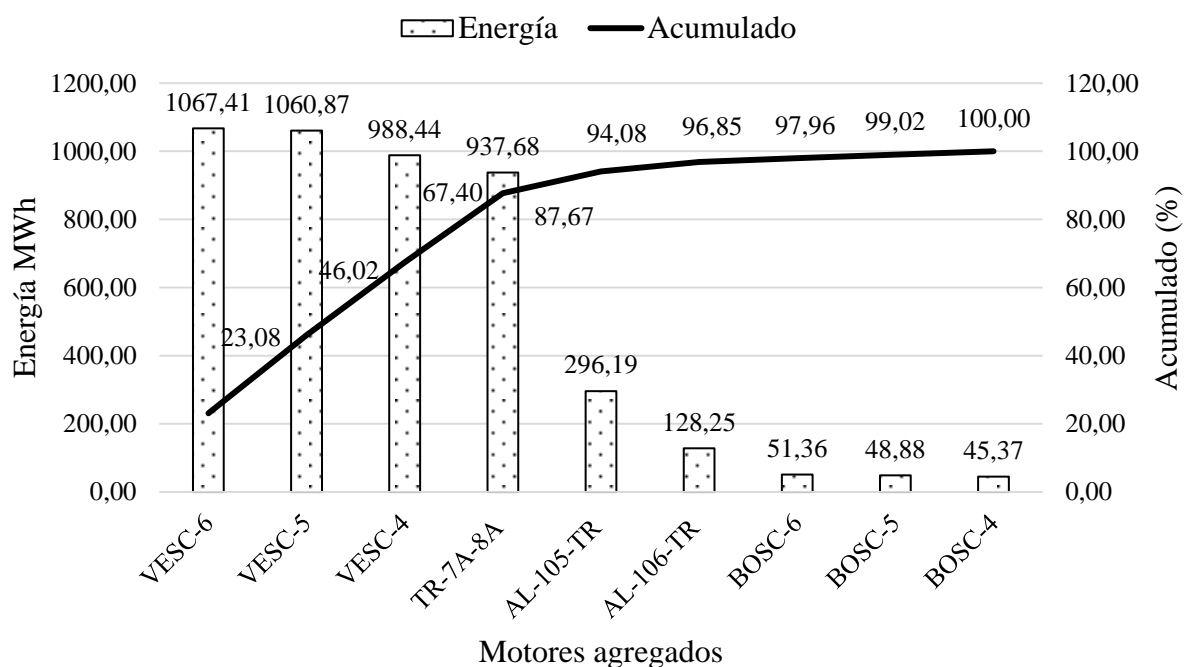


Figura 4.4. Energía anual en MWh y acumulado en % por cada motor agregado

El consumo de energía Figura 4.4, correspondiente a la barra 5TP4 se concentró en los cuatro motores agregados seleccionados previamente, de mayores factores de incidencia, con el 87,67 % del consumo total en barra. En la precisión de los agregados, objetos de análisis particulares, fue necesario tener en cuenta el nivel de carga y la eficiencia, Figura 4.3.

4.2.1. Determinación del potencial de ahorro en la barra 5TP4

La evaluación del potencial de ahorro de energía asociado a cada motor se determinó por el método que analiza el costo del ciclo de vida, a partir de los siguientes datos:

- Vida útil del motor 12 años
- Tasa de Descuento 0,12 pu

- Costo de la Energía 0,08 USD/kWh

En la Tabla 4.6 se muestra un estimado de ahorro anual por cada agregado para la barra 5TP4.

Tabla 4.6. Evaluación del ahorro de energía para 5TP4 por los agregados

<i>Motores agregados Barra 5TP4</i>	<i>Denominación de las Barras</i>	<i>Consumo de energía anual</i>		<i>Ahorro de energía anual (MWh)</i>	<i>Evaluación económica</i>	
		<i>Motor en Servicio (MWh)</i>	<i>Motor Propuesto (MWh)</i>		<i>CCV (mil USD)</i>	<i>PRI (años)</i>
M1	TR-7A-8A	937,677	866,354	71,323	54,944	1,565
M2	AL-105-TR	296,186	273,891	22,295	16,781	1,817
M3	AL-106-TR	128,254	123,507	4,747	4,538	2,992
M4	BOSC-4	45,365	43,759	1,606	1,445	4,366
M5	VESC-4	988,441	934,407	54,034	35,596	2,81
M7	BOSC-5	48,875	46,927	1,948	1,614	3,6
M8	VESC-5	1060,874	1009,777	51,098	34,142	2,971
M10	BOSC-6	51,36	49,392	1,967	1,624	3,565
M11	VESC-6	1067,405	1014,754	52,652	34,912	2,883
Suma de motores agregados		4624,437	4362,769	261,668	185,595	
Resumen del total de energía consumida y ahorrada por año						
Suma de M(1-5-8-11)		4054,397	3825,292	229,107		
Suma M(1-5-8-11) en % del Total		87,67	87,68	87,56		

En la Tabla 4.6, por “Motor en Servicio” se entiende el agregado que se ajusta a las condiciones existentes en el campo de aplicación y por “Motor Propuesto” el motor seleccionado para sustituir la máquina en servicio.

El motor agregado se caracterizó por datos y magnitudes correspondientes a motores reales. Este hecho posibilita desarrollar programas de sustitución o reemplazo de motores y estimar el potencial de ahorro de energía. Para la barra 5TP4 cada motor agregado identificado en el diagrama unifilar por los puntos de mediciones (Motor en Servicio) se sometió a un programa de sustitución de motores y resultaron nuevas propuestas (Motor Propuesto). Tanto al motor en servicio como al propuesto se les aplica el mismo gráfico de carga y la diferencia de consumo de energía anual entre los dos motores representa el ahorro de energía [114].

La fila “*Suma de M(1-5-8-11)*” en la Tabla 4.6 representa la suma de la energía correspondientes a los motores agregados TR-7A-8A, VESC-4, VESC-5 y VESC-6, seleccionados previamente como los de mayores incidencias en la barra 5TP4; la fila “*Total en Barra*” es la suma de la energía para todos los agregados de la barra 5TP4; y la fila “*Suma en % del Total*” muestra el porcentaje que representan los motores M1, M5, M8 y M11 dentro del total de agregados, se observa que constituyen el 87,67 % de la energía total en barra. De esta forma se puede estimar el potencial de ahorro en barras sin necesidad de un análisis de todos los motores individuales.

La distribución del potencial de ahorro en cada motor agregado correspondiente a la barra 5TP4 se presenta en la Figura 4.5. Cuatro motores determinan el 87,56 % del potencial de ahorro de energía existente y el comportamiento energético de la barra y reducen significativamente el número de motores en estudio, ya que no es necesario un análisis para el total de máquinas.

El análisis individual del agregado seleccionado previamente entre los de mayores incidencias; el comportamiento energético del mismo, que valora las potencialidades de ahorro de energía por comparación entre el consumo de energía que se obtiene por el motor agregado versus el obtenido por los motores individuales, se desarrolla según el epígrafe 3.2.2 del Capítulo 3 para el agregado VESC-5. Lo cual constituye la tercera etapa del trabajo.

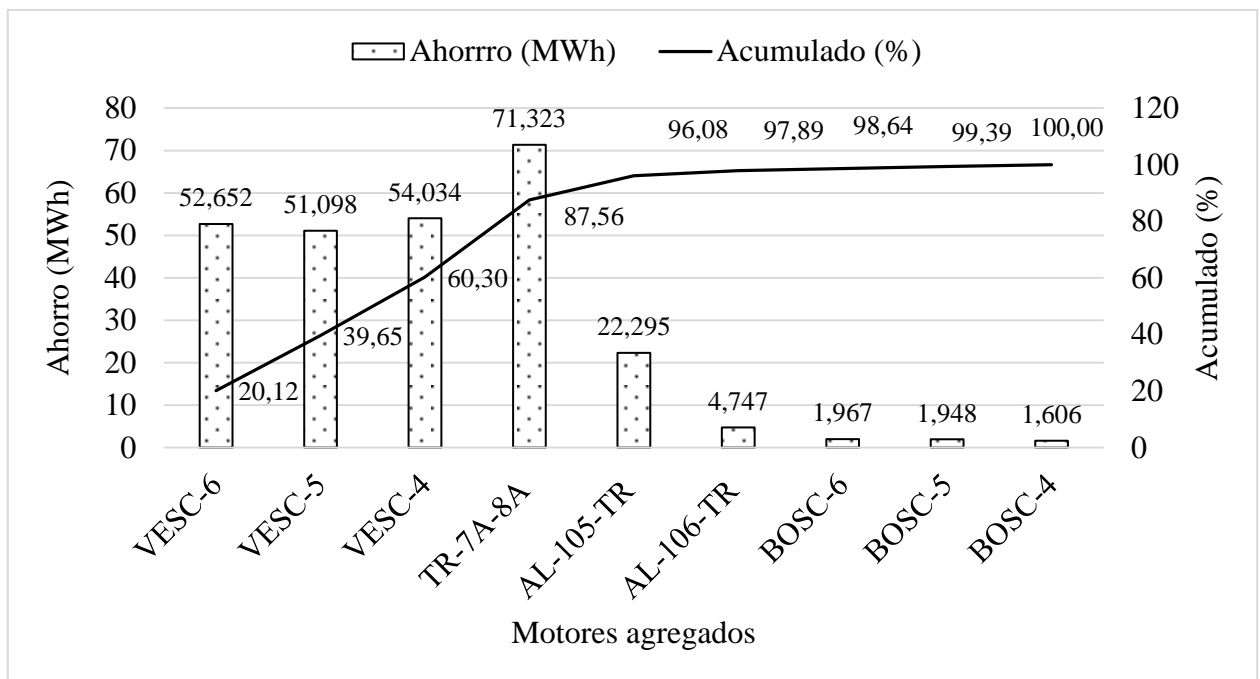


Figura 4.5. Estimado de ahorro anual y acumulado en % por motor agregado, barra 5TP4

Es de observar cómo en esta barra de 48 motores fue posible valorar el potencial de ahorro de energía con solo nueve motores agregados, y se seleccionan a cuatro como los determinantes del consumo de energía. También se caracterizó a cada uno de estos CCM como cargas asincrónicas, sin dejar muestras en el análisis.

4.3. Conclusiones Capítulo 4

- En barras de baja tensión donde concurren gran cantidad de motores, la caracterización energética con el uso de motores agregados reduce el número de cargas en el análisis y el volumen de cálculo, si se compara cuando se realiza esta tarea individualmente; en la barra 5TP4 de 48 motores se valora el potencial de ahorro de energía con solo nueve de ellos.
- La combinación de las mediciones en los puntos de alimentación común, el MMA y el algoritmo del método del momento en el entrehierro, permiten determinar la eficiencia, el

factor de carga, el factor de potencia y el factor de incidencia para el total de motores de inducción, en contraste con el método que estratifica entre los de mayores pesos.

- El uso del factor de incidencia influye en la selección de motores agregados determinantes en la caracterización energética, se confirma en la barra 5TP4 donde los motores seleccionados representan el 87,67 % de la energía total en barra y el 87,56 % del potencial de ahorro total.
- Los potenciales de ahorro de energía que se obtienen por el procedimiento a partir del modelo de motor agregado, son comparables con los obtenidos por el análisis exhaustivo de los motores de inducción que componen las barras; este procedimiento se puede extender a todas las instalaciones aplicables en las industrias.

Conclusiones y Recomendaciones

CONCLUSIONES GENERALES

- Las teorías científicas referidas en la literatura sobre los procedimientos para caracterización energética en motores de inducción son insuficientes para aplicarla al motor agregado, pues no evalúan el comportamiento de la carga en grupos y no reconocen la existencia de un modelo equivalente, el modelo de motor agregado, con esta finalidad.
- El modelo de motor agregado desarrollado tiene en cuenta las pérdidas en el acero, las mecánicas y las adicionales que inciden en la eficiencia, contempla que el número de polos guarda relación con la eficiencia nominal, y que la carga puede ser diferente a la nominal, por tanto, resuelve el problema investigado para análisis energéticos.
- El procedimiento desarrollado a partir del modelo de motor agregado para la caracterización energética de motores de inducción agrupados en barras comunes, considera la influencia de la eficiencia, del coeficiente de carga y propone al factor de incidencia como un nuevo elemento de decisión en la selección de los motores agregados más significativos, e incluye la selección y evaluación técnico económica de motores propuestos.
- La validación demuestra que la DPE son menores del 1 %; para un número constante de motores presentan los valores más bajos en agregados constituidos por máquinas de eficiencia estándar y esta magnitud decrece a medida que aumenta el coeficiente de carga, alcanza los valores mínimos entre 80 y 90 %; cuando se incrementa el número de motores la DPE aumenta y se mantiene su disminución a medida que aumenta el factor de carga.
- Los resultados expuestos para las tres barras tomadas en la experimentación, muestran un balance de la potencia de salida entre los agregados y la sumatoria de los motores individuales con una DPS menores del 1 % comparada con el análisis individual y un error estadístico menor del 5 %, que validan la efectividad del procedimiento propuesto a partir del

MMA en caracterización energética, y corrobora la efectividad del MMEM para determinar la potencia en el eje.

- Los resultados del análisis técnico económico del agregado VESC-5 establece un CCV diferencial efectivo y un PRI de 2,94 años, los cuales se reflejan en los motores individuales y verifican las potencialidades de ahorro de energía viables: estos resultados corroboran la efectividad del MMA propuesto y justifican que el mismo representa al conjunto de motores de inducción y determina el comportamiento energético del grupo.
- El uso del factor de incidencia influye en la selección de motores agregados determinantes en la caracterización energética y los potenciales de ahorro de energía, se confirma en la barra 5TP4 donde los motores seleccionados representan el 87,67 % de la energía total en barra y el 87,56 % del potencial de ahorro total.
- En barras eléctricas de baja tensión donde concurren gran cantidad de motores asincrónicos, la caracterización energética con el uso de motores agregados es muy efectiva, si se compara con realizar esta tarea individualmente; en la barra 5TP4 de 48 motores se valora el potencial de ahorro de energía con solo nueve de ellos. La efectividad se observa cuando se determina el ahorro por la vía tradicional y por el MMA, y la diferencia es de 4,18 %.
- El procedimiento de caracterización energética a partir del MMA constituye una herramienta factible de aplicar, útil para la evaluación de los motores en servicio y posibilita identificar potenciales de ahorro en barras con motores de inducción, sin la necesidad de analizar individualmente a cada uno de ellos, con errores relativos menores del 5 %, cuando se compara con los métodos tradicionales.

RECOMENDACIONES

1. Extender el procedimiento de la caracterización energética con el uso del motor agregado a los accionamientos polimotórico.
2. Analizar la introducción del procedimiento descrito y determinar 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, con sensores de tensión y corriente, y un software auxiliar que determine las características energéticas del grupo de motores en barra.

Referencias bibliográficas

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] U. S. Department of Energy, "United States industrial electric motor systems market opportunities assessment," 1998.
- [2] A. T. de Almeida and P. Fonseca, "Characterisation of EU Motor Use," in *Energy Efficient Improvements in Electric Motors and Drives*, Springer, Ed., ed Berling, 2000, pp. 134-167.
- [3] Oficina Nacional de Estadística, "Electricidad en Cuba. Indicadores seleccionados. Enero - Diciembre 2010," D. d. I. y. M. Ambiente, Ed., ed. Cuba: ONE, 2011.
- [4] W. Cao, "Comparison of IEEE 112 and New IEC Standard 60034-2-1," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 24, pp. 802-808, Sept. 2009.
- [5] N. K. Ghai, "IEC and NEMA standards for large squirrel-cage induction motors. A comparison," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 14, pp. 545-552, September 1999.
- [6] IEEE Standard 112., "IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.," in *American National Standard.*, ed. New York, USA, 2004.
- [7] A. S. Gharakhani, "Efficiency estimation of induction machines with limited measurements," Doctor of Philosophy. Ph.D., Electrical and Computer Engineering, Concordia, Montreal, 2012.
- [8] L. Bin, T. Habetler, G., and R. Harley, G., "A survey of efficiency-estimation methods of in-service induction motors," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 42, pp. 924-933, Jul./Aug 2006.

- [9] S. J. R. Gómez, "Determinación de la Eficiencia de los Motores Asíncronos con Tensiones Desbalanceadas en Condiciones de Campo," Tesis de doctorado. Dr.C., Santa Clara, 2006.
- [10] B. Steele, R. Minhaz, and G. L'Heureux. (2005, October). Field Estimation of Induction Motor Efficiency. *Project proposal submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Bachelor of Science in Electrical and Computer Engineering in the Faculty of Engineering of the University of Manitoba.* Available: http://www.ee.umanitoba.ca/.../coursehome/c24400/24_400/2006-07/FinalReports/G19 Final Report 2006.pdf.pdf
- [11] P. Van Roy and R. Belmans, "Assessment of Efficiency of Low Voltage, Three Phase Motors," in *Proceedings of Energy Efficiency in Motor Driven Systems (EEMODS'02)* 2002, p. 6.
- [12] M. Vilaragut, A. Costa, A. García, and A. C. Ayala, "Métodos para la determinación de la eficiencia energética en los motores de inducción trifásicos," *Ecosolar*, octubre-diciembre 2004.
- [13] J. S. Hsu and B. P. Scoggins, "Field Test of Motor Efficiency and Load Changes Through Air-Gap Torque," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 10, pp. 477- 483, September 1995.
- [14] J. S. Hsu, J. D. Kueck, M. Olszewski, D. A. Casada, P. J. Otaduy, and L. M. Tolbert, "Comparison of induction Motor Field Efficiency Evaluation Methods," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, pp. 117-125, Jan/Feb 1998.

- [15] J. S. Hsu and P. J. Sorenson, "Field Assessment of Induction Motor Efficiency through Air-Gap Torque," *IEEE Transsaction on Energy Conversion*, vol. 11, pp. 489–494, September 1996.
- [16] L. Bin, T. Habetler, G. , and R. Harley, G. , "A Nonintrusive and In-Service Motor Efficiency Estimation Method Using Air-Gap Momento with Considerations of Condition Monitoring," in *Proc. IEEE Ind. Appl. Annu. Meeting*, 2006, pp. 1533-1540.
- [17] F. Ferreira and A. de Almeida, "Considerations on In Field Induction Motor Load Estimation Methods," in *18th Inter. Conf. on Electrical Machines (ICEM'08), Conf. Proc*, Vilamoura, Portugal, 2008.
- [18] J. Gómez, E. Quispe, M. de Armas, and P. Viego, "Estimation of induction motor efficiency in-situ under unbalanced voltages using genetic algorithms.," *Proc. IEEE Int. Conf. Electr. Mach.*, pp. 1-4, 2008.
- [19] B. Herndler, P. Barendse, and M. A. Khan, "Error analysis of efficiency estimation methods for induction motors," in *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International*, Niagara Falls, ON 2011, pp. 1498 - 1503
- [20] A. G. Siraki and P. Pillay, "An In Situ Efficiency Estimation Technique for Induction Machines Working With Unbalanced Supplies.," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 27, pp. 85-95, 2012.
- [21] P. G. Cummings, W. D. Bowers, and W. J. Martiny, "Induction motor efficiency test methods," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. IA, pp. 253–272, May/June 1981.
- [22] A. H. Bonnett, "An update on ac induction motor efficiency," *IEEE Transaction Industrial Application*, vol. 30, pp. 1362–1372, Sept./Oct. 1994.

- [23] J. S. Hsu, P. J. Otaduy, and J. D. Kueck, "Efficiency and reliability assessments of retrofitted high-efficiency motors," in *Conf. Rec. IEEEIAS Annu. Meeting*, Lake Buena Vista, 1995, pp. 2745–2751.
- [24] G. G. Gray and W. J. Martiny, "Efficiency testing of medium induction motors. A comment on IEEE Std 112-1991," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 11, pp. 495-499, September 1996.
- [25] N. E. Nilsson, "A comparison of ANSI and IEC standards for power station polyphase induction (asynchronous) motors," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 11, pp. 500-507, September 1996.
- [26] B. Renier, K. Hameyer, and R. Belmans, "Comparison of standards for determining efficiency of three phase induction motors," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 14, pp. 512–517, September 1999.
- [27] A. de Almeida and F. Ferreira. (2000, 2006). Efficiency Testing of Electric Induction Motors. Available:
http://www.clasponline.org/download/Energy_Testing/2000/116/Almeida_paper.pdf
- [28] A. I. de Almeida, "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*, vol. 38, pp. 608-614, march/april 2002.
- [29] IEC 60034-2-1, "Rotatory Electrical Machines part 2-1, Standard Methodes For Determiny Losses And Efficient From Tests.," ed. Switzerland: Suiza, 2007.
- [30] E. Martinez and M. Torrent, "Determinación del rendimiento en motores de inducción trifásicos según la Norma IEC 60034-2-1," *Técnica Industrial*, vol. 282, pp. 36 – 41, Julio - Agosto 2009.

- [31] NEMA, "Standards Publication MG 1-2003, Revision 1-2004, Motors and Generators," ed. Washington, D.C, 2004.
- [32] J. G. Douglas. (1997, June). Efficacy of methods for estimating in-service motor efficiency. Available: [http:// www.dynamics-research.com/MAS1000/ITMAS-1000.htm](http://www.dynamics-research.com/MAS1000/ITMAS-1000.htm)
- [33] E. V. de la Rosa, "Metodología para la determinación y mejoramiento de los motores asincrónicos en la industria," Tesis presentada en opción al título de Master en Ingeniería Eléctrica, Universidad de Camagüey, Camagüey, 1998.
- [34] Motor Challenge, "Determining electric motor load and efficiency," 1999.
- [35] A. Costa M and M. Vilaragut, "Determinación del comportamiento energético del motor de inducción a partir de sus datos de catálogo y lectura de las corrientes del estator," in *III Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente*, Cienfuegos, 2004.
- [36] J. R. Holmquist, J. A. Rooks, and M. E. Richter, "Practical Approach for Determining Motor Efficiency in the Field Using Calculated and Measured Values," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 40, pp. 242-248, january/february 2004.
- [37] C. L. Becnel and e. al., "Determining motor efficiency by field testing," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. IA, pp. 440–443, May/June 1987.
- [38] N. Rubin, R. Harley, and G. Diana, "Evaluation of Various Slip Estimation Techniques for an Induction Machine Operating Under Field-Oriented Control Conditions," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, November / December 1992.
- [39] A. Boglietti, P. Ferraris, M. Lazzari, and F. Profumo, "Induction motor equivalent circuit parameters determination from standard tests made with inverter supply," 1993, pp. 271 – 276.

- [40] J. D. Kueck, R. J. Gray, C. R. Drive, and J. Hsu, "Assessment of Available Methods for Evaluating In-Service Motor Efficiency," ed: ORNL/TM-13237, 1996.
- [41] J. J. Cathey, *Electric Machines: Analysis and Design Applying MATLAB*. New York USA: McGraw-Hill, 2003.
- [42] M. A. Costa, L. M. Vilaragut, S. J. Gómez, F. P. Viego, and M. M. de armas, "Determinación Experimental de los Parámetros del Motor de Inducción Trifásico Considerando la Variación de los Parámetros del Rotor," in *XII Simposio de Ingeniería Eléctrica*, Santa Clara, Cuba, 2005.
- [43] A. T. de Almeida, P. Fonseca, F. Ferreira, and e. all, "Improving the Penetration of Energy-Efficient Motors and Drives," ed: European Commission, Directorate-General, 2000.
- [44] R. Figura, E. Szychta, and L. Szychta, "In-Service Efficiency Estimation with the use Modified Air-Gap Torque Method for Squirrel-Cage Induction Motor," *Electronics and Electrical Engineering*, vol. 8, pp. 51 - 56, 15/02/2011 2011.
- [45] B. Herndler, P. Barendse, and M. A. Khan, "Considerations for improving the non-intrusive efficiency estimation of induction machines using the air gap torque method," in *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International*, Niagara Falls, ON 2011, pp. 1516 - 1521
- [46] H. Zhang, P. Zanchetta, C. Gerada, K. Bradley, and J. Liu, "Performance evaluation of induction motor efficiency and in-service losses measurement using standard test methods " in *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International* Niagara Falls, ON 2011, pp. 913 - 917

- [47] L. Bin, C. Wenping, I. French, K. J. Bradley, and T. G. Habetler, "Non-Intrusive Efficiency Determination of In-Service Induction Motors using Genetic Algorithm and Air-Gap Torque Methods," in *Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE*, ed New Orleans, LA 2007, pp. 1186 - 1192
- [48] A. Wallance, A. Von Jouanne, E. Wiedenbrug, E. Matheson, and J. Douglass, "A laboratory assessment of in-service and non-intrusive motor efficiency testing methods," *Electric Power Compon. Syst.*, vol. 29, pp. 517-529, Jun. 2001.
- [49] K. D. Hurst and T. G. Habetler, "Sensorless Speed Measurement Using Current Harmonic Spectral Estimation in Induction Machine Drives," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 11, pp. 66-73, 1996.
- [50] H. Henao, H. Razick, and G. A. Capolino, "Analytical Approach of the Stator Current Frequency Harmonics Computation for Detection of Induction Machine Rotor Faults," *IEEE Transaction on Industry Application*, vol. 41, Jun 2005.
- [51] Y. Bensalem, W. Abboud, L. Shita, and M. N. Abdelkrim, "A Sensorless Neural Network Speed Control of Induction Motor Drive," *International Journal of Signal Control and Engineering Application*, vol. 1, p. 150 158, 2008.
- [52] L. Bin, "Energy usage evaluation and condition monitoring for electric machines using wireless sensor network," Doctor of Philosophy In Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Doctor of Philosophy, Institute of Technology, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia, 2006.
- [53] A. I. Pérez, M. Blázquez, and L. Rodríguez, "Estimación de la Operación de un Motor de Inducción con Mínimos Recursos de Medición," in *CIE 2007*, Santa Clara Cuba, 2007.

- [54] A. I. Pérez and J. L. Rodríguez, "Estimación Energética de Motores de Inducción en Servicio," in *XII Simposio de Ingeniería Eléctrica*, Santa Clara, Cuba, 2005.
- [55] M. E. de la Rosa, F. P. Viego, and M. A. Costa, "Incertidumbre en la evaluación del ahorro de energía por sustitución de motores eléctricos.," *Ingenierías*, vol. X, pp. 27-31, Abril-Junio 2007.
- [56] M. de Armas, J. Gómez, and P. Viego, "Evaluación de Motores en Servicio," in *Convención de Ingeniería Eléctrica CIE2011*, Santa Clara, Cuba, 2011.
- [57] A. Gharakhani and P. Pillay, "A novel evolutionary based in-situ efficiency estimation technique for induction machines working with unbalanced supplies " in *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International Niagara Falls, ON 2011*, pp. 1563 - 1568
- [58] V. Sakthivel and S. Subramanian, "Swarm Intelligence Algorithm for Induction Motor Field Efficiency Evaluation " in *Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing*. vol. 6466, B. Panigrahi, S. Das, P. Suganthan, and S. Dash, Eds., ed: Springer Berlin / Heidelberg, 2010, pp. 545-558.
- [59] H. Zhang, P. Zanchetta, K. J. Bradley, and C. Gerada, "A Low-Intrusion Load and Efficiency Evaluation Method for In-Service Motors Using Vibration Tests With an Accelerometer," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 46, pp. 1341 - 1349, July-Aug. 2010 2010.
- [60] Procobre, "Proyecto Piloto de Reemplazo de Motores Eléctricos en la Minería de Cobre - Chile," ed. Santiago de Chile: Universidad de Santiago de Chile, Departamento de Ingeniería Eléctrica, 2009.

- [61] C. E. E. P. Washington State University (WSU), „ "Programa Internacional para la Selección de Motores y el Análisis de Ahorros --IMSSA--," MM+plus ed. Washington, 2004, p. Manual de usuario.
- [62] G. J. Rogers, J. D. Manno, and R. T. Alden, "An Aggregate Induction Motor Model for Industrial Plants," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 103, pp. 683-690, 1984.
- [63] D. C. Franklin and A. Morelato, "Improving dynamic aggregation of induction motor models," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, pp. 1934-1941, 1994.
- [64] T. H. Kataoka, S. Uchida, T. K. Nishikata, and T. Funabashi, "A method for aggregation of a group of induction motor loads," in *Proc. POWERCON Perth*, Australia, 2000, pp. 1683–1688.
- [65] P. Pillay, S. Sabur, and M. Haq, "A model for induction motor aggregation for power system studies," *Electric Power System Research*, vol. 42, pp. 225-228, 1997.
- [66] K.-W. Louie, "A New Way to Represent the Aggregate Effects of Induction Motors at a Same Bus in a Power System," *International Journal of Applied Science and Engineering*, vol. 4, pp. 91-102, 2006.
- [67] P. Aree, "Effects of Static and Dynamic Load Models on Power System Load Representation," *Thammasat Int. J. Sc. Tech.*, vol. 7, Sep-Dec 2002.
- [68] M. Akbaba and S. Q. Fakhro, "New model for single-unit representation of induction motor loads, including skin effect, for power system transient stability studies," *IEEE Proceedings-5*, vol. 139 November 1992.
- [69] V. A. Venikov, *Procesos transitorios electromecánicos en los sistemas eléctricos de potencia*. Moscú: Mir, 1988.

- [70] G. A. McCoy, T. Litman, J. G. Douglass, and Washington State Energy Office, *Energy-Efficient Electric Motor Selection Handbook*. Washington: Olympia 1993.
- [71] P. Pillay and S. M. Sabur, "Use of reduced order models to calculate reclosing transients in a refinery," in *Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting IEEE*, 1995, pp. 2180 - 2188.
- [72] T. Parveen and G. Ledwich, "Decomposition of aggregated load: Finding induction motor fraction in real load," in *Power Engineering Conference, 2008. AUPEC '08. Australasian Universities*, Syney, NSW, 2008, pp. 1-6.
- [73] J. Pedra, L. Sainz, and F. Córcoles, "Study of Aggregate Models for Squirrel-Cage Induction Motors," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, pp. 1519-1527, August 2005.
- [74] M. Taleb, M. Akbaba, and E. Ahdullah, "Aggregation of induction machines for power system dynamic studies," in *IEEE/ PES 1994 Winter Meet.*, New York, 1994.
- [75] F. Nozari and M. D. Kankam, "Aggregation of Induction Machines for Transient Stability Load Modeling," *IEEE Transactions on Power System*, vol. 2, 1987.
- [76] A. H. Rahim and A. R. Laldin, "Aggregation of induction motor loads for transient stability studies," *IEEE Transactions Energy Conversion*, vol. EC-2, pp. 55-61, March 1987.
- [77] G. G. Richards, "Reduced order models for an induction motor group during bus transfer," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 4, pp. 494–498, May 1989.
- [78] E. Quispe, G. González, and R. Castrillón. (2006, Febrero). Medición en sitio de la eficiencia de su motor. Una comparación de metodologías prácticas. *Papel y tisú*. Available: <http://www.latinpressinc.com>

- [79] M. Sedighizadeh and A. Rezazadeh, "Load Modeling for Power Flow and Transient Stability Computer Studies at BAKHTAR Network," *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 26, pp. 749-756, December 2007.
- [80] M. Sedighizadeh and A. Rezazadeh, "Dynamic Load Modeling for KHUZESTAN Power System Voltage Stability Studies.," *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology*, vol. 26, pp. 767-771, December 2007.
- [81] P. Aree, "Load flow solution with induction motor," *Songklanakarin J. Sci. Technol.*, vol. 28, pp. 157-168, Jan/Feb. 2006.
- [82] N. Dizdarević, S. Tešnjak, and G. Andersson. (2006, Junio). Induction motor behavior during voltage instability solved by unified power flow controller. Available: <http://www.actapress.com/PDFViewer.aspx?paperId=24977>
- [83] M. Abdel and G. J. Berg, "Dynamic single-unit representation of induction motor groups," *IEEE Transactions Power Apparatus Systems*, vol. Pas-95, pp. 155-165, Jan./Feb. 1976.
- [84] C. Concordia and S. Ihara, "Load Representation in power system stability studies," *IEEE Transactions Power Apparatus Systems*, vol. PAS-101, pp. 969-977, 1982.
- [85] D. S. Brereton, D. G. Lewis, and C. C. Young, "Representation of Induction-Motor Loads During Power-System Stability Studie," *AIEE Transactions*, vol. 76, pp. 451-461, 1991.
- [86] B. M. Nomikos and C. D. Vournas, "Investigation of Induction Machine Contribution to Power System Oscillations," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, pp. 916-925, May 2005.

- [87] J. Stephan, M. Bodson, and J. Chiasson, "Real-Time Estimation of the Parameters and Fluxes of Induction Motors," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, pp. 746-759. , May/Jun 1994.
- [88] A. M. Stankovi and B. C. Lesieutre, "A Probabilistic Approach to Aggregate Induction Machine Modeling," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 11, pp. 1983-1989, November 1996.
- [89] P. Pillay and L. Refoufi, "Calculation of slip energy recovery induction motor drive behavior using the equivalent circuit," in *Industry Applications Society Annual Meeting, IEEE*, 1992, pp. 10 – 17.
- [90] Z. Hongbin, L. Qiyu, and W. Xiaohua, "The aggregation method of induction motors with distribution network," in *Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE), 2010 International Conference on*, Hangzhou, 2010, pp. 445-449.
- [91] K. W. Louie, J. R. Marti, and H. W. Dommel, "Aggregation of Induction Motors in a Power System Based on Some Special Operating Conditions," in *Electrical and Computer Engineering, 2007. CCECE 2007. Canadian Conference on*, Vancouver, BC, 2007.
- [92] Siemens, "Catálogo General SD03," in *Motores Eléctricos*, ed, 2005.
- [93] J. C. Andreas, *Energy Efficient Electric Motors*. New York USA: Copyright Marcel Dekker, 1992.
- [94] H.R.776 and Energy Policy Act of 1992, "Energy conservation requirements for certain commercial and industrial equipment, energy conservation standards for high-intensity discharge lamps, distribution transformers, and small electric motors " 1992.

- [95] J. S. Hsu, H. H. Woodson, and W. F. Weldon, "Possible errors in measurement of air-gap torque pulsations of induction motors," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 7, pp. 202–208, March 1992.
- [96] J. S. Hsu, "Monitoring of defects in induction motors through air-gap torque observation," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. 31, pp. 1016–1021, Sept./Oct. 1995.
- [97] I. Romero and B. Pérez, "Algoritmo para la determinación de los parámetros del motor de inducción por datos nominales," *Energética*, vol. XXIX, pp. 10-17, 2008.
- [98] R. Blasco, M. Sumner, and G. M. Asher, "Speed measurement of inverter fed induction motors using the FFT and the rotor slot harmonics," in *Proceedings of the Fifth International Conference on Power Electronics and Variable-Speed Drives*, 1994, pp. 470-475.
- [99] D. Atkinson, P. Acarnley, and F. W. John, "Observers for Induction Motor State and Parameter Estimation," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 21, pp. 1119-1127, November / December 1991.
- [100] N. Inanc, M. K. Guven, H. Rehman, A. Derdiyok, and L. Xu, "A new sliding mode flux and speed observer for speed sensorless control of induction machine," in *Proceedings of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference*, 2000, pp. 574-578.
- [101] Y.-R. Kim, S.-K. Sul, and M.-H. Park, "Speed sensorless vector control of induction motor using extended Kalman filter," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 30, pp. 1225-1233, 1994.
- [102] R. Blasco, G. M. Asher, M. Sumner, and K. J. Bradley, "Performance of FFT-rotor slot harmonic speed detector for sensorless induction motor drives," *Proceedings of the IEEE Electric Power Applications*, vol. 143, pp. 258-268, 1996.

- [103] M. Aiello, A. Cataliotti, and S. Nuccio, "An induction motor speed measurement method based on current harmonic analysis with the chirp-Z transform," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 54, pp. 1811-1819, 2005.
- [104] A. Ferrah, K. J. Bradley, and G. M. Asher, "An FFT-based novel approach to noninvasive speed measurement in induction motor drives," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 41, pp. 797-802, 1992.
- [105] A. Ferrah, P. J. Hogben-Laing, K. J. Bradley, G. M. Asher, and M. S. Woolfson, "The effect of rotor design on sensorless speed estimation using rotor slot harmonics identified by adaptive digital filtering using the maximum likelihood approach," in *Proceedings of the Thirty-Second IAS Annual Meeting*, 1997, pp. 128-135.
- [106] M. Velez-Reyes, W. Liam Pung, and T. J. E. Ramos, "Developing Robust Algorithms for speed and Parameter Estimation in Induction Machines," in *Proceeding of the 40th IEEE Conference on Decision and Control*, Florida. USA, 2001.
- [107] M. Velez-Reyes, K. Minami, and G. C. Verghese, "Recursive speed and parameter estimation for induction machines," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 1, pp. 607- 611, Oct. 1989.
- [108] A. M. da Silva, "Induction motor fault diagnostic and monitoring methods," Milwaukee, Wisconsin, A Thesis submitted to the Faculty of the Graduate School, in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Electrical and Computer Engineering 2006.
- [109] M. Stocks, "Modeling, Analysis, State and Parameter Estimation of Faulty Induction Machines," Doctoral Thesis, Computer Science and Electrical Engineering, Lulea University of Technology, Lulea Sweden, 2006.

- [110] L. I. Eguiluz, P. Lavandero, M. Mañana, and P. Lara. (1999, Performance Analysis of a Three-phase Induction Motor under Non-sinusoidal and Unbalanced Conditions. Available: http://www.dice.unican.es/pdf/gijon99_2.pdf
- [111] I. Romero, M. de Armas, B. Pérez, and Y. Guerrero, "Evaluación energética de motores asincrónicos ante armónicos y desbalance de voltaje en una empresa minera," *Minería y Geología*, vol. 28, pp. 47-59, Enero - Marzo 2012.
- [112] A. E. Fitzgerald, C. J. Kingsley, and S. D. Umans, *Electric Machinery*. New York USA: McGraw-Hill, 2003.
- [113] A. E. Borroto N. and J. P. Montegaudó Y., *Gestión y Economía Energética*. Cienfuegos, Cuba: Universitaria Cienfuegos, 2006.
- [114] I. Romero, M. Vilaragut, B. Pérez, and O. Peña, "Evaluación energética de motores de inducción a través del modelo de motor agregado," *Ingeniería Energética*, vol. XXXIII, pp. 156-170, Mayo - Agosto 2012.
- [115] Motor Decisions Matter, "Motor Planning Kit. Version 2.1. Strategies, Tools, and Resources for Developing a Comprehensive Motor Management Plan.," 2007.
- [116] A. Costa M, X. M. Lopez Fernandez, G. Ciumbulea, and N. Galan, "Cálculo de los Parámetros del Motor de Inducción a partir de Datos de Catálogo," *Energía y Computación*, Julio 2004.
- [117] J. C. Brandão, C. J. Edgar, and L. M. A. Nogueira, "Estimating the Parameters of Induction Machines at Standstill," *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 17, pp. 85-89, March 2002.

- [118] R. L. A. de Souza, J. C. Brandão, and L. A. Nogueira, "Linear Parameter Estimation for Induction Machines Considering the Operating Conditions," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 14, January 1999.
- [119] J. L. Zamora and A. García-Cerrada, "Online Estimation of the Stator Parameters in an Induction Motor Using Only Voltage and Current Measurements," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, pp. 805 – 816, May/June 2000.
- [120] J. B. Medarametla and M. D. Cox, "Calculations and measurements of the unity plus three-phase induction motor," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 7, December 1992.

Anexos

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Valores asumidos de las pérdidas adicionales p_{ad} en la norma IEC 60034-2	34
Tabla 3.1. Datos nominales de los motores agregados obtenidos	54
Tabla 3.2. Parámetros del circuito equivalente en T de los motores agregados	55
Tabla 3.3. Muestra del coeficiente de carga por motores individuales para un agregado	57
Tabla 3.4. Valores del coeficiente de carga por motores agregados.....	57
Tabla 3.5. Valores de DPE para las 16 variantes de motores agregados en análisis	59
Tabla 3.6. Variaciones de los valores mínimos, medios y máximos de diferentes magnitudes	61
Tabla 3.7. Valores del factor de incidencia para motores agregados de eficiencia estándar	65
Tabla 3.8. Datos nominales de los motores agregados para las tres barras	67
Tabla 3.9. Muestra comparativa de resultados para las barras OH-1 y UG-5	68
Tabla 3.10. Características de funcionamiento de los motores individuales del VESC-5.....	70
Tabla 3.11. Potencial de ahorro de energía del motor agregado VESC-5	73
Tabla 4.1. Características del sistema de alimentación a Secaderos	78
Tabla 4.2. Datos nominales de los motores de la barra 5TP4.....	80
Tabla 4.3. Parámetros nominales de los motores agregados para la barra 5TP4.....	81
Tabla 4.4. Valores promedios de las mediciones principales para la barra 5TP4	83
Tabla 4.5. Características de funcionamiento de todos los motores agregados para 5TP4	84
Tabla 4.6. Evaluación del ahorro de energía para 5TP4 por los agregados.....	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Motores de inducción en una misma barra y su representación en agregado	30
Figura 2.2. Esquema por bloques del algoritmo de evaluación de motores de inducción.....	40
Figura 2.3. Diagrama en bloques del procedimiento para caracterización energética con el MMA	46
Figura 3.1. Capacidad instalada, consumo de energía y horas promedios de operación del motor de inducción por rango de potencia en el sector industrial <i>Fuente:</i> [43].....	52
Figura 3.2. Incremento del costo de la energía del motor de inducción con el tamaño y las horas de operación anuales <i>Fuente:</i> [115].....	52
Figura 3.3. DPE para motores agregados: a) de eficiencia estándar; b) de alta eficiencia	62
Figura 3.4. DPE para motores agregados: a) de potencias iguales, b) de potencias diferentes.	63
Figura 3.5. Potencia de entrada: a) para eficiencia estándar; b) para alta eficiencia	64
Figura 3.6. Eficiencia: a) para eficiencia estándar; b) para alta eficiencia	64
Figura 3.7. Corriente del estator: a) para eficiencia estándar; b) para alta eficiencia.....	65
Figura 3.8. DPS por suma de motores individuales versus agregado.....	69
Figura 3.9. Potencia para el agregado VESC-5 y los motores individuales	71
Figura 3.10. Coeficiente de carga del agregado VESC-5 y los motores individuales	71
Figura 3.11. Eficiencia del agregado VESC-5 y los motores individuales.....	72
Figura 4.1. Diagrama unifilar de la barra 5TP4.....	79
Figura 4.2. Unifilar de la subestación 5TP4 con agregados por barras auxiliares.....	80
Figura 4.3. Factor de incidencia, eficiencia y coeficiente de carga por motor agregado.....	85
Figura 4.4. Energía anual en MWh y acumulado en % por cada motor agregado	86
Figura 4.5. Estimado de ahorro anual y acumulado en % por motor agregado, barra 5TP4	89

