



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

*Trabajo de diploma presentado en opción al
título de Ingeniero Eléctrico*

*Caracterización energética de grupo de motores de
inducción con rotor en jaula a través del modelo de
motor agregado en Panta de Agua A.*

Yoelis Romero Rodríguez

For IEC Market

Moa-2012-2013



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

*Trabajo de diploma presentado en opción al
título de Ingeniero Eléctrico*

*Caracterización energética de grupo de motores de
inducción con rotor en jaula a través del modelo de
motor agregado en Panta de Agua A.*

Diplomante: Yoelis Romero Rodríguez_____

Tutor: M. Sc. Ignacio Romero Rueda_____

Consultante: Ing. Geolvis Galano Urtate_____

For IEC Market

Moa-2012-2013

Declaración de autoridad.

Yo, Yoelis Romero Rodriguez, autor de este trabajo de diploma titulado: "Caracterización energética de grupo de motores de inducción con rotor en jaula a través del modelo del motor agregado en Panta de Agua A". Empresa Comandante Pedro Sotto Alba certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes y educativos.

Tutor. M. Sc. Ignacio Romero Rueda.

Tutor. Ing. Geolvis Galano Urtate.

Diplomante: Yoelis Romero Rodríguez.

Agradecimientos

A la revolución que me ha dado la oportunidad de formarme como un Técnico Superior más de este país.

A todos los profesores que durante estos seis años contribuyeron a mi formación y a mis compañeros de trabajo.

En especial a mi tutor y tío M. Sc. Ignacio Romero Rueda por su ayuda incondicional y al ing. Geolvis Galano Urtate.

Y a todas las personas que siempre me han apoyado.

Dedicatoria

En primer lugar a mis padres, hermana, esposa e hija porque me dieron siempre el apoyo necesario para lograr realizar uno de mis principales deseos.

A mis demás familiares y amistades, pues siempre me alentaron.

A todos mis compañeros de aula, y demás personas que hicieron posible la realización de este trabajo.

Pensamiento

La eficiencia energética y el ahorro de energía, constituyen el eje central de esta primera etapa del nuevo paradigma energético cubano.

Fidel Castro Ruz.

Resumen

RESUMEN

En grandes industrias donde existen miles de motores, estos se agrupan en barras por departamentos específicos. Cuando se desea evaluar energéticamente estas máquinas, efectuar un análisis individual a cada una de ellas incrementa significativamente el volumen de mediciones y de cálculos. Este trabajo propone realizar la caracterización energética de un grupo de motores asíncronos de baja tensión, para ello utiliza un motor agregado equivalente que permita identificar las barras más ineficientes, y una vez seleccionadas acometer el análisis individual de cada motor con mayor efectividad y en menor tiempo.

Al emplear el modelo de motor agregado con este propósito se utiliza el método del momento en el entrehierro en un ambiente asimétrico y contaminado, aspecto de gran importancia ya que se propone caracterizar energéticamente los motores asíncronos en condiciones de campo. Para ello las ondas originales de tensión y de corriente se descomponen en diferentes frecuencias, lo que permite evaluar el comportamiento y diferenciar las pérdidas por armónicos y por asimetría.

Se demuestra que las variaciones en las cargas de los motores individuales inducen respuestas del motor agregado con errores inferiores al 5 % en comparación con la resultante del grupo de motores. Estas respuestas satisfactorias, aún en presencia de disímiles cargas, corrobora la utilidad del motor agregado para evaluar grupos de máquinas, lo que economiza tiempo y recursos; y posteriormente, dirigir y llevar a cabo un análisis energético más detallado hacia los centros de control y motores individuales más determinantes en la eficiencia energética de un proceso. La técnica propuesta ofrece la posibilidad de identificar potenciales de ahorro con elevada efectividad, menores recursos, disminución del tiempo de trabajo y del volumen de cálculo a realizar.

ABSTRACT

In large industries, where there are thousands of motors, they are grouped by bars under specific departments. The energy efficiency assessment of these machines or the separate analysis of each one of them significantly increases the number of calculations and measurements. This paper intends to make a characterization, from an energy efficiency perspective, of a group of low-voltage induction motors. In order to do so, an equivalent motor aggregation is used to identify the most inefficient bars and, once defined, run the individual analysis of each motor with higher efficiency and less time.

When using the motor aggregation model for this purpose, the electric moment method in the air gap is used in a contaminated and asymmetrical environment. This aspect is very important because the proposal is to make an energy efficiency characterization of induction motors under field conditions. Therefore, the original voltage and current waves decompose at different frequencies thus favoring a trend evaluation and the distinction of losses resulting from harmonic or asymmetric conditions.

Load variations in individual motors are confirmed to induce responses of the motor aggregation with errors below 5% compared with that resulting from the group of motors. These satisfactory responses, even in the presence of dissimilar loads, confirm the advantage of the motor aggregation to evaluate groups of machines with savings of time and resources. Subsequently, it allows a more detailed energy efficiency analysis focused on control centers and individual motors with the highest contribution to the energy efficiency of a process. The proposed technique provides the possibility to identify potential savings that are highly effective, the use of less resources, reduction of the working time and less calculations to be performed.

Tabla de contenido

TABLA DE CONTENIDO

Declaración de autoridad.....	1
INTRODUCCIÓN GENERAL	5
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO-REFERENCIAL DEL MOTOR AGREGADO	11
Introducción	11
1.1. Métodos para estimar el grado de carga y eficiencia en motores de inducción... ..	12
1.1.1. Métodos normalizados para la evaluación de la eficiencia	12
1.1.2. Métodos de evaluación de la eficiencia en condiciones de campo	13
1.2. Fundamentos del motor agregado.....	17
1.2.1. Métodos de obtener el modelo agregado.....	18
1.2.2. Características de funcionamiento en motores agregados	19
1.3. Conclusiones Capítulo 1	20
CAPÍTULO 2. MODELO DE MOTOR AGREGADO APLICADO A LA CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA.....	22
Introducción.....	22
2.1. Modelo agregado a una barra eléctrica de potencia en baja tensión	22
2.1.1. Derivación del modelo del motor agregado.....	23
2.1.2. Diagrama por bloques para obtener el modelo de motor agregado nominal	30
2.2. Validación y simulación teórica del motor agregado y sus componentes	31
2.2.1. Resultados de la simulación del agregado y los motores individuales.....	36
2.3. Adaptación del motor agregado a las condiciones reales de operación	41
2.3.1. Momento en el entrehierro y eficiencia	42
2.4. Algoritmo del método de momento en el entrehierro bajo condiciones reales.....	44

2.4.1. Criterios de decisión para la selección del motor agregado al análisis individual.....	46
2.5. Procedimiento para la caracterización energética con el modelo del motor agregado	48
2.6. Conclusiones Capítulo 2.....	51
CAPÍTULO 3. APLICACIÓN DEL MODELO DE MOTOR AGREGADO. CASO DE ESTUDIO.....	53
Introducción	53
3.1. Barra OH-1, UG-5 y sus componentes como objeto de estudio	53
3.1.1. Composición de motores agregados para la barra OH-1 y UG-5.	56
3.2. Comportamiento de los motores agregados en condiciones reales	57
3.2.1. Determinación del potencial de ahorro en las barras OH-1 y UG-5.....	60
3.3. Comportamiento del motor agregado M1 (OH-1) en condiciones reales.....	61
3.3.1. Potencial de ahorro asociado al motor agregado M1 (OH-1).....	66
3.4. Adaptación del motor agregado M2 (UG-5) a las condiciones reales.....	68
3.4.1. Potencial de ahorro asociado al motor agregado M2 (UG-5).....	72
3.5. Conclusiones Capítulo 3.....	74
CONCLUSIONES GENERALES.....	76
RECOMENDACIONES	77
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79
ANEXOS	90

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 de inducción trifásicos. Esta realidad, unida a la crisis energética que comenzó en los años 70 del pasado siglo, ha hecho que los fabricantes de motores más importantes del mundo hayan desarrollado nuevos tipos de máquinas con características de diseño dirigidas a la disminución de las pérdidas de potencia mediante la utilización de materiales ferromagnéticos de mejor calidad, el aumento de la longitud del estator y el rotor, la disminución del entrehierro, el empleo de conductores de mayor calibre y la utilización de mejores rodamientos, entre otras medidas. En muchos países desarrollados se han aprobado leyes energéticas que obligan a los usuarios a utilizar motores con un valor mínimo de eficiencia de acuerdo con la potencia y la velocidad.

En muchas aplicaciones los motores de inducción trifásicos funcionan subcargados y con tensiones diferentes a las nominales e incluso desbalanceadas y/o contaminadas que provocan un consumo adicional de energía, además de la posible disminución de su vida útil.

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. Industrialmente el aumento del consumo significa mayores costos y una demanda superior a la necesaria.

Para llevar a cabo 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 sus máquinas y comparar versus motores de mayor eficiencia con la finalidad del desarrollo de programas de reubicación o de reorientación de ellas a otras condiciones de trabajo.

Existen diferentes métodos para determinar las prestaciones energéticas de un motor. Entre ellos se destacan, los propuestos por las normas **IEC 34-2-1** e **IEEE- 112- 2004** con un elevado nivel de exactitud, pero impracticables en la industria pues requieren retirar el motor del servicio o de ensayos especiales que deben realizarse en laboratorios equipados con costosos instrumentos y equipos de medición. De acuerdo

con lo establecido, se han desarrollado diferentes métodos que son aplicables a las condiciones industriales y que poseen un nivel de precisión generalmente proporcional al grado de invasividad requerido. Esto los hace de limitada utilidad en la industria.

En fábricas, empresas o industrias que cuentan con cientos o miles de motores instalados el procedimiento para su caracterización energética es extenso y engorroso, lo que en ocasiones conduce a realizar ensayos muestrales dejando sin considerar un gran número de máquinas.

Sobre la base del problema existente hoy en la industria se establece la presente investigación, sus objetivos de trabajo y la hipótesis.

Problema de investigación:

¿Cómo orientar y llevar a cabo con efectividad el análisis energético en un sistema eléctrico de baja tensión con un elevado número de motores asíncronos sin la necesidad preliminar de un análisis individual a cada motor?

Objeto de investigación:

Análisis del comportamiento de los motores de inducción trifásicos de rotor en cortocircuito y de baja tensión agrupados en una misma barra de potencia eléctrica.

Campo de acción:

Caracterización energética de motores de inducción.

Objetivo general:

Desarrollar un procedimiento que permita la caracterización energética de las barras, donde concurren un grupo de motores asíncronos en régimen estacionario, con la utilización del modelo de motor agregado, bajo condiciones reales de operación.

Objetivos específicos:

1. Establecer las limitaciones de la teoría actual con respecto al uso del modelo de motor agregado para la caracterización energética en barra de baja tensión.
2. Desarrollar un procedimiento para el uso del modelo de motor agregado en la caracterización energética de grupos de motores de inducción en barras de baja tensión.
3. Evaluar para un caso de estudio la caracterización energética de grupos de motores de inducción en barras de baja tensión con el uso del motor agregado.

Hipótesis del trabajo:

Si se utiliza el modelo de motor agregado es posible evaluar energéticamente y con resultados satisfactorios la potencialidad de ahorro de energía en barras eléctricas de baja tensión con un elevado número de motores de inducción.

Aportes del trabajo:

- Empleo del modelo de motor agregado al estudio de caracterización energética, que generalmente se utiliza en el análisis de procesos dinámicos.
- Modificación del método del momento en el entrehierro para considerar los armónicos y desbalance de los mismos, en la tensión de alimentación y corriente que demanda.
- Generalización de un procedimiento para caracterizar energéticamente motores de inducción agrupados en una misma barra.

Tareas de investigación:

1. Análisis del estado del arte y las teorías relacionadas con el uso del modelo del motor agregado en caracterización energética.

2. Definición de las condiciones para formar el modelo de motor agregado en caracterización energética de barras de potencia eléctrica de baja tensión.
3. Derivación del modelo del motor agregado a partir del balance de potencia entre el motor equivalente y los motores individuales.
4. Comparación a través de la simulación del comportamiento energético del motor agregado y el grupo de motores.
5. Modificación del método del momento en el entrehierro para adaptar el motor agregado a las condiciones reales existente en el campo de las mediciones.
6. Definición del criterio de selección de los motores agregados al análisis particular.
7. Realización del esquema en bloque general para la caracterización energética de grupos de motores a partir del modelo de motor agregado.
8. Adaptación de los motores agregados a las condiciones reales a través del método del momento en el entrehierro.
9. Estimación del potencial de ahorro a partir de los motores agregados.
10. Realización de un análisis final a los motores de inducción en las barras correspondientes de forma individual.

Estructura de la tesis

La tesis está organizada en tres capítulos:

Capítulo 1: “Marco teórico-referencial del motor agregado”. En este capítulo se establecen las limitaciones de los métodos de evaluación del rendimiento de motores de inducción de forma individual a grupos de ellos al mismo tiempo y las limitantes del uso del modelo del motor agregado nominal, generalmente utilizado en análisis dinámicos, en caracterización energética.

Capítulo 2: “Modelo de motor agregado aplicado a la caracterización energética”. Desarrolla un procedimiento para el uso del modelo de motor agregado en la caracterización energética de grupos de motores de inducción en barras de baja tensión. Se destaca la utilización del método del momento en el entrehierro para la

adaptación del motor agregado a las condiciones reales y el criterio de selección para el análisis particular.

Capítulo 3: “Aplicación del modelo de motor agregado. Caso de estudio”. Este capítulo aplica la caracterización energética para el uso del motor agregado a un grupo de motores de inducción en una barra de baja tensión. Se adaptan los motores agregados a las condiciones reales, se describe el potencial de ahorro de energía y se extiende el análisis al motor de inducción de forma individual. Se verifica la equivalencia entre motores agregados directos a barras y la suma de motores individuales en cuanto a comportamiento energético, demostrándose la hipótesis planteada.

Capítulo 1

Marco teórico-referencial del motor agregado

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO-REFERENCIAL DEL MOTOR AGREGADO

Introducción

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

Durante muchos años, numerosas investigaciones han precedido a este trabajo y numerosos son los procedimientos sugeridos para determinar la eficiencia, la potencia desarrollada, el estado de carga, etc. Cada uno de ellos con sus ventajas y limitaciones [1-9]. Todos persiguen el objetivo y reúnen el mérito, de acuerdo con sus potencialidades y alcances en específico, 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 por excelencia. Ninguno de los métodos conocidos utilizan el concepto del motor agregado para estratificar las barras de menor eficiencia de una gran industria para con posterioridad evaluar cada elemento de ese sistema.

La evaluación energética de estas máquinas es un proceso en cierta medida invasivo y en realidad se complica cuando en grandes industrias deben ser evaluados cientos o miles de motores accionando disímiles cargas.

Bajo estas circunstancias es importante desarrollar un algoritmo 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 complicado o imposible de obtener en condiciones de campo, y con ello determinar las potencialidades de ahorro de energía.

Este tipo de análisis exige mayor atención en tanto crece el costo de la energía y se deteriora el medioambiente. El incremento de la eficiencia en muchos de estos casos puede lograrse al reemplazar o reubicar uno o varios motores, o mediante otras

estrategias. Por supuesto, 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 factor de carga y una complicación adicional es su dependencia de la calidad de la energía del sistema, por lo que son varios factores los que actúan sobre un conjunto de máquinas. Integrar todos ellos a la evaluación de barras alimentadoras es una tarea también complicada.

El objetivo específico de este capítulo es:

Presentar brevemente los métodos de evaluación de motores en servicio y establecer el modelo del motor agregado declarando las limitaciones de la teoría actual para ser utilizado en la caracterización del comportamiento energético de agrupaciones de motores de inducción.

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

Es posible clasificar en dos grupos los métodos empleados para 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 para la evaluación de la eficiencia

Los métodos normalizados para la evaluación de la eficiencia permiten obtener el coeficiente de carga del motor de inducción, ya que implícitamente determinan la potencia en el eje.

Los valores de rendimiento han de ser determinados de acuerdo con las normas internacionales vigentes [10-12]. Estas normas establecen consideraciones en cuanto a las pérdidas, tipos de mediciones e instrumentos requeridos, valores de corrección de temperatura para las resistencias, etc. De estas normas, las principales 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** [13-17].

La norma **IEC 60034-2-1** editada en el año 2007 presenta diferencias con la **IEEE-112-2004**, principalmente en la forma de determinar las pérdidas adicionales [18, 19]. La norma **JEC-37** empleada en Japón y otros países asiáticos se caracteriza por despreciar totalmente las pérdidas adicionales. Los valores de eficiencia determinados bajo esta norma según de Almeida, et al. (2006) [17], son superiores a los obtenidos por las normas **IEEE-112-2004** o la **IEC-34-2-1**.

La norma **IEEE-112-2004** es la de mayores exigencias y en ella se establecen cinco métodos denominados **A, B, C, E** y **F** con las variantes **E1, F1, C/F, E/F** y **E1/F1** [20]. Con esta norma armonizan algunas normas nacionales como la **NEMA, MG1** y la **CS-390** aplicadas en EEUU y Canadá, respectivamente [21]. En el caso de las variantes **E1** y **F1**, las pérdidas adicionales son asumidas como un porcentaje de la potencia de salida nominal.

Estos métodos no son aplicables en la industria ya que las condiciones exigidas por las normas no existen en el campo directo de la aplicación.

Lo anterior implica el desarrollo de muchos métodos para la evaluación de la eficiencia en condiciones de campo y que se continúe la investigación en este sentido [2, 5, 22-27].

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

Los métodos básicos para la evaluación del rendimiento en el sitio pueden ser uno o la combinación de algunos de ellos. Los más utilizados son [2, 6, 28, 29]:

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

La diferencia entre la potencia de entrada y la potencia de salida son las pérdidas; de la forma en cómo se determinan las pérdidas depende la exactitud del método aplicado [30]. La medición de la potencia de entrada es obligatoria, otras mediciones y datos auxiliares se requieren para los diferentes métodos y se pueden resumir en: lectura de la chapa del motor y resistencia del estator; medición de la velocidad o deslizamiento; medición de la corriente y tensiones de fase o línea; temperatura del devanado; medición de momento en el eje; datos de ensayos de vacío y cortocircuito; formas de ondas de la tensión y la corriente y análisis armónico.

La adquisición de estos datos requiere de instrumentos con errores individuales menores de 0.5 % a plena escala, incluyendo los efectos de la amplitud y fase según la norma **IEEE-112-2004**, siempre que no sea para el método **B**, en cuyo caso las exigencias son mayores. Este requisito lo cumplen diferentes tipos de analizadores de redes existentes en el mercado. Deben tomarse las máximas precauciones en la adquisición de los datos. En particular, en las condiciones de campo, la medición de la velocidad debe realizarse con tacómetros ópticos y el deslizamiento debe medirse con instrumentos estroboscópicos.

Los métodos más simples; datos de chapa, corriente y deslizamiento son fáciles de aplicar pero pueden conducir a errores apreciables si se considera que la eficiencia de chapa, además de ser el resultado del tratamiento estadístico de un lote de motores, no se mantiene constante en todo el rango de operación. La corriente posee un comportamiento no lineal y el deslizamiento correspondiente a los valores nominales puede presentar un 20 % de desviación según fabricantes [31].

Los métodos de segregación de pérdidas están diseñados para medir directamente las pérdidas en el motor y en principio deben arrojar resultados precisos, sin embargo, el método **IEEE-112 E** no es útil pues incluye retirar el rotor y hacer pruebas especiales para determinar las pérdidas adicionales. El método **E1** asume un valor de pérdidas adicionales, pero utiliza un ensayo en vacío con tensión variable, así como ensayos en seis estados de operación. En la gran mayoría de los casos este procedimiento es inaplicable en el campo, como también lo son algunas modificaciones realizadas al mismo.

El método del circuito equivalente (basado en el método **F** de la norma **IEEE-112-2004**) se fundamenta en el conocimiento de los parámetros del circuito que modela el comportamiento de estado estable del motor asincrónico, lo cual constituye su principal inconveniente en un ambiente industrial, por los ensayos que requiere.

El uso de este método para determinar las pérdidas, las características operacionales y la eficiencia del motor, radica en las posibilidades de predecir el comportamiento para cualquier estado de carga [21, 32-36]. Se debe tener en cuenta que los valores de las impedancias pueden variar mucho entre la condición de rotor estático y la condición de operación en vacío de la máquina.

Los métodos estadísticos pueden ser muy efectivos cuando no se cuenta con el equipamiento requerido para algún tipo de ensayos [37]. Existen metodologías para tal efecto, pero hay que tener presente que todos estos métodos estadísticos utilizan base de datos de fabricantes, obtenidos en el laboratorio, diferentes al ambiente donde operan las máquinas.

El método de la medición del momento en el eje es el más directo para determinar la eficiencia, sin embargo su aplicación no es práctica en el campo, al igual que los métodos que requieren sensores especiales, por poseer alto costo, ser complejo e invasivo sobre todo al aplicarlo a máquinas de pequeña y mediana potencia.

El método del momento en el entrehierro requiere de la medición de las tensiones y corrientes de fase instantáneos para determinar el momento y la potencia de salida en el eje. A diferencia de los anteriores permite considerar las condiciones de calidad del suministro eléctrico [1-3, 33, 38-41].

Las ventajas del método del momento en el entrehierro son:

1. Supera al método **EI** de la **IEEE-112-2004** cuando la tensión de alimentación está desbalanceada y contiene armónicos.
2. Puede medirse mientras el motor está funcionando.
3. Al contrario de cualquier otro método puede usarse cuando la potencia por fase está desequilibrada.
4. Es aplicable a otros tipos de motores.

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

1. Requiere del ensayo en vacío.
2. Requiere de sensores especializados para las mediciones de campo.

Para aprovechar las ventajas del método del momento en el entrehierro se desarrollaron modificaciones que pretenden resolver algunos de los aspectos anteriores mediante determinadas aproximaciones que consecuentemente afectan la exactitud. No obstante, debe tenerse presente, que la exactitud para determinados estudios en condiciones industriales posee un valor útil dado por el porcentaje de error permisible según las posibilidades reales proporcionadas por los estándares de fabricación de máquinas eléctricas [4, 42].

Las principales dificultades, que presentan los métodos de determinación "*in situ*" de la eficiencia, están en conocer la velocidad del rotor y el valor de la resistencia del estator. Una de las vías utilizadas para solucionar estos problemas es utilizar tacómetros ópticos o "*encoders*" para determinar la velocidad y medir la resistencia del motor cuando el mismo no esté en servicio. Otros procedimientos determinan la velocidad según el contenido armónico de la corriente del estator, lo cual es específico para cada máquina pues depende del número de ranuras del rotor que debe conocerse. Este método brinda una precisión de hasta cinco revoluciones por minutos a altas velocidades y 0,005 p.u. de deslizamiento a bajas velocidades [43-45].

Un resumen de las exigencias de los métodos más conocidos en la determinación de la eficiencia en motores de inducción aparece en el **Anexo 1**.

En resumen, es posible plantear que los métodos anteriores están destinados a la evaluación individual de motores y que no existen normas o procedimientos cuando se trata de evaluar energéticamente grupos de motores vistos en su conjunto como un motor equivalente.

Cuando los motores de inducción a evaluar son cientos o miles, se incrementa significativamente el volumen de mediciones y de cálculos a realizar. Una complicación que no debe obviarse en condiciones de campo es la calidad de la energía y el acceso real a cada motor. En estos casos determinar la eficiencia y el estado de carga

individual no es la vía más directa y económica en tiempo y recursos para una evaluación de la eficiencia operacional de los motores en ese tipo de industria.

Si los motores se alimentan desde puntos comunes o centros de control de motores (CCM), existe la posibilidad de agrupar por barras específicas a cada uno de estos grupos y sustituirlos por un motor equivalente, denominado motor agregado, y a partir de éste determinar el rendimiento y las características de comportamiento de la barra, CCM o conjunto de motores. Este motor, sin existencia física, constituye un modelo del grupo de motores individuales que puede ser utilizado para evaluar la eficiencia de una barra en cualquier industria o proceso en investigación.

1.2. Fundamentos del 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 motores equivalentes, para lo cual es imprescindible obtener los modelos que caractericen este tipo de carga. Esta representación ha sido fundamentalmente dirigida a la modelación de las cargas y al estudio dinámico del sistema. En la literatura no está tratada su aplicación a la caracterización energética y al ahorro de energía.

De esta forma un sistema industrial con muchas máquinas en explotación puede ser representado por un número menor, pero más significativos según Akbaba *et al.* (1992) [46], de motores de inducción equivalentes que permite realizar un estudio de carga en régimen estacionario y también dinámico [46, 47].

Si en una barra el 80 % de la carga total se compone de motores de inducción, representar esta carga por un modelo de un motor de inducción agregado no implica errores significativos [30, 36, 40, 47-50]. La precisión de los resultados obtenidos por el motor agregado depende en parte por las consideraciones realizadas para obtener el modelo y la variedad de métodos existentes para obtener el agregado.

1.2.1. Métodos de obtener el modelo agregado

Existen dos métodos para obtener el modelo agregado a partir de motores de inducción conectados a una barra común: un **primer método** parte del conocimiento de los parámetros del modelo de circuito equivalente seleccionado, y por equivalencia de impedancias en paralelo determinar la impedancia del motor agregado [49, 51, 52].

Los puntos característicos a tomar en consideración 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 de este método son los parámetros del circuito equivalente seleccionado para representar el motor agregado. Este procedimiento posee el inconveniente de la disponibilidad de los datos de los motores individuales que forman el motor equivalente.

El **segundo método** consiste en utilizar, partiendo de un balance de potencia considerar el funcionamiento en paralelo de los motores individuales, las magnitudes sumatorias de potencia, corriente, etc. de cada uno de los motores del conjunto como las magnitudes equivalentes correspondientes al motor agregado [53]. Este método es apropiado para representar el efecto de las cargas caracterizadas por motores de inducción básicamente conectados a una barra común de un sistema eléctrico de potencia. La información esencial es la que ofrecen los catálogos, referida a la base de datos (momento de arranque, máximo y nominal, corriente de arranque y nominal, etc.), la cual no se obtiene por otros métodos.

En ambos métodos se desprecian las pérdidas mecánicas y adicionales, aspectos que deben ser considerados cuando se decide realizar la caracterización energética.

Existen otras técnicas para derivar un modelo de carga equivalente que represente los estados estacionarios y dinámicos de un sistema constituido por motores de inducción y carga de impedancia constante [54-56]. 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. La inercia y el deslizamiento se escogen para minimizar el error entre la respuesta transitoria del sistema y su equivalente por simulación.

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, para el caso de aerogeneradores donde la potencia mecánica es variable, según una ley de probabilidad [57, 58].
- Relación de momento de inercia [49, 59].
- Características de los mecanismos o cargas mecánicas accionadas.

Cuando se trata de caracterizar el comportamiento energético es imprescindible la existencia de un alimentador común, no necesario en los trabajos anteriores.

1.2.2. Características de funcionamiento en motores agregados

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 respecto 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 poder caracterizar energéticamente un motor o un conjunto de motores en forma de motor agregado es necesario determinar el estado de carga y las características que dan la eficiencia, el consumo de potencia reactiva, el factor de potencia, la corriente del estator y la velocidad en función de la potencia de salida.

Para estimar el grado de carga del motor agregado, desde el punto de vista teórico se pueden utilizar todos los métodos aplicables al motor de inducción ordinario [2, 29, 30, 33, 40, 60, 61]. Desde una visión práctica solo se dispondrá de mediciones eléctricas en los alimentadores principales y la velocidad será estimada, por tanto se parte como vía

principal de la relación entre la potencia de entrada real y la nominal del motor agregado. En los trabajos referidos en la literatura no se tiene en cuenta el factor de carga, pues siempre se supone régimen nominal.

Al considerar el motor agregado por los datos nominales, se obtiene un motor equivalente de la carga instalada pero no de la carga real en funcionamiento, que puede diferenciarse sustancialmente de las condiciones nominales. Los modelos matemáticos siempre consideran que las tensiones son las nominales, balanceadas y no existen deformaciones de la forma de onda de tensión.

1.3. Conclusiones Capítulo 1

1. Los métodos analizados se desarrollan para determinar la eficiencia de motores individuales, sin considerar que en muchas ocasiones, en el área industrial, existen cientos o miles de ellos y la evaluación individual puede resultar tediosa y trabajosa. Entonces, para aplicar estos métodos surge la necesidad de agrupar dichos motores en uno equivalente, denominado motor agregado y utilizarlo con fines energéticos.
2. En la literatura se utiliza el modelo del motor agregado nominal, que representa la capacidad instalada, pero no la carga real en funcionamiento; se desprecian las pérdidas mecánicas y adicionales, aspecto a considerar cuando se utiliza este equivalente para realizar la caracterización energética.

Capítulo 2

*Modelo de motor agregado aplicado a la
caracterización energética*

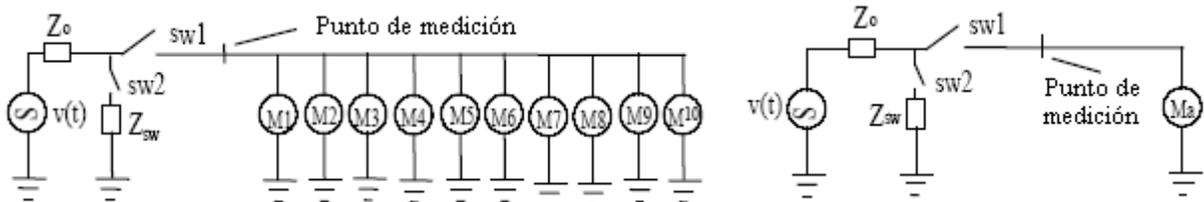
CAPÍTULO 2. MODELO DE MOTOR AGREGADO APLICADO A LA CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA

Introducción.

Este capítulo enfoca su atención en desarrollar un procedimiento para emplear el modelo de motor agregado en la caracterización energética de grupos de motores de inducción en barras de baja tensión. Para ello es necesario adaptar el modelo a las condiciones reales de operación. Con este propósito se ha utilizado el método del momento en el entrehierro en presencia de armónicos y desbalances de forma simultánea en un escenario industrial.

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

La idea central del modelo de motor agregado radica en obtener un motor equivalente al de un conjunto de motores asincrónicos seleccionados en una barra determinada como muestra la Figura 2.1 a) y 2.1 b) y que las características operacionales de ambas representaciones sean similares.



(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 donde existe la posibilidad de agrupar los motores para formar los agregados parte del 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 asociar los motores individuales en un motor equivalente con fines energéticos se establecen determinadas condiciones. Estas son:

1. Motores de inducción en baja tensión.
2. Conexión directa a barra sin que medie ningún elemento de fuerza y/o control, (variadores de velocidad, reactores y transformadores de potencia, entre otros).
3. Pertenecen a una misma barra, sin compensación individual de reactivo.
4. Operar en régimen estable.
5. Se consideran despreciables los procesos transitorios ante pequeñas oscilaciones o cambios del estado de la carga.
6. La barra presenta un alimentador principal.
7. No se consideran los motores en reserva.
8. Régimen de carga continua con proceso de producción normal.
9. Son despreciables las impedancias en los conductores de alimentación a cada motor.
10. El motor equivalente se considera de simple jaula y está conectado en estrella.
11. Se considera que el punto de operación del motor agregado cae en la zona lineal de su característica operacional.

La existencia de un alimentador común permite realizar las mediciones generales para obtener el modelo de motor agregado en las condiciones reales de operación. Este aspecto es útil además, para realizar análisis o valoración sobre el uso de la energía en esa barra.

2.1.1. Derivación del modelo del motor agregado

En el trabajo de Louie (2006) [53] se realiza un balance de potencia entre los motores de inducción individuales y el equivalente para obtener un motor agregado caracterizado por los datos nominales, semejante a los que aparecen en catálogos. Este trabajo considera que el número de polos del motor agregado es igual al número de polos del motor de mayor potencia dentro de los motores individuales y que los mismos están operando bajo condiciones nominales de tensión y frecuencia. No tiene en cuenta las pérdidas mecánicas, adicionales ni en el acero de los motores, por tanto no establece un balance entre las potencias mecánicas.

Para utilizar el modelo del motor agregado en la evaluación de la eficiencia, no sólo en régimen nominal, se deben cumplir los balances energéticos siguientes:

- 1) La potencia aparente de entrada del motor agregado es igual a la suma de la potencia aparente de entrada de cada motor individual.
- 2) La potencia electromagnética del motor agregado es igual a la suma de la potencia electromagnética de cada motor individual.
- 3) La potencia mecánica del motor agregado es igual a la suma de la potencia mecánica para cada motor individual.
- 4) Las pérdidas eléctricas en el rotor del motor agregado es igual a la suma de las pérdidas eléctricas del rotor de cada motor individual.
- 5) La potencia de salida del motor agregado es igual a la suma de la potencia de salida de cada motor individual.

De la primera consideración se deduce que existe un balance de potencia activa y reactiva por separado para obtener la potencia aparente total.

$$\underline{S}_{ag} = \sum_{i=1}^m \underline{S}_{ti}, \quad [\text{VA}] \quad (2.1)$$

$$\underline{S}_{ag} = \sum_{k=A}^C \left(\underline{V}_{ak} \cdot (I_{1ak})^* \right) = P_{ag} + jQ_{ag}, \quad [\text{VA}] \quad (2.2)$$

$$\underline{S}_{ti} = \sum_{k=A}^C \left(\underline{V}_{ik} \cdot (I_{1ik})^* \right) = P_{ti} + jQ_{ti}, \quad [\text{VA}] \quad (2.3)$$

donde: \underline{S}_{ag} y \underline{S}_{ti} son las potencias aparentes que demanda el motor agregado y la potencia aparente total de los motores individuales considerados, en **VA**; V_{ak} y V_{ik} son las magnitudes de tensión del motor agregado y de los motores individuales para cada una de las fases, en **V**; I_{1ak} y I_{1ik} son las magnitudes de corrientes del motor agregado y de los motores individuales, en **A** y m es el número de motores considerados.

Considerando que las tensiones del motor agregado y la de los motores individuales conectados a la misma barra sean las mismas la ecuación (2.1) se plantea en base a las corrientes como (2.4).

$$I_{aaABC} - jI_{arABC} = \sum_{i=1}^m I_{iaABC} - j \sum_{i=1}^m I_{irABC}, \quad [\text{A}] \quad (2.4)$$

donde: I_{aaABC} , I_{arABC} son las componentes activa y reactiva de la corriente por fase del motor agregado, en **A**; I_{iaABC} , I_{irABC} son las componentes activa y reactiva de la corriente por fase de los motores individuales en **A**. Estos valores son iguales respectivamente. Desarrollando por separados cada uno de los componentes se tiene:

$$I_{aaABC} = I_{aABC} \cdot \cos \varphi_{aABC} = \sum_{i=1}^m I_{iABC} \cos \varphi_{iABC}, \quad [\text{A}] \quad (2.5)$$

$$I_{arABC} = I_{aABC} \cdot \sin \varphi_{aABC} = \sum_{i=1}^m I_{iABC} \sin \varphi_{iABC}, \quad [\text{A}] \quad (2.6)$$

donde: φ_{aABC} y φ_{iABC} son los ángulos del factor de potencia del motor agregado y de los motores individuales; I_{aABC} e I_{iABC} son las corrientes totales del motor agregado y de cada motor individual por cada fase en **A**.

A partir de (2.5) y (2.6) la corriente de entrada del motor agregado está dada por:

$$I_{aABC} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^m I_{iABC} \cos \varphi_{iABC} \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^m I_{iABC} \sin \varphi_{iABC} \right)^2}, \quad [\text{A}] \quad (2.7)$$

El factor de potencia fp_{agABC} , por cada fase, se calcula por la relación entre la ecuación definida en (2.5) y (2.7).

$$fp_{agABC} = \cos \varphi_{agABC} = \frac{\sum_{i=1}^m I_{iABC} \cos \varphi_{iABC}}{I_{aABC}}, \quad [\text{pu}] \quad (2.8)$$

El factor de potencia para un sistema trifásico balanceado en tensión y corriente fp_{ag} , se obtiene por la ecuación (2.9), coincidente en el trabajo de Louie (2006) [53].

$$fp_{ag} = \cos \varphi_{ag} = \frac{\sum_{i=1}^m I_i \cos \varphi_i}{I_a}, \quad [\text{pu}] \quad (2.9)$$

La potencia de salida del motor agregado es la suma de las potencias de salidas individuales, entonces para un sistema trifásico balanceado se cumple que:

$$3\eta_{ag} V_{ag} I_{ag} \cos \varphi_{ag} = 3 \sum_{i=1}^m \eta_{ni} V_{ni} I_{ni} \cos \varphi_{ni} \quad (2.10)$$

En un sistema desbalanceado, la ecuación (2.10) no es válida dado que el desbalance de la tensión provoca un desbalance superior en las corrientes de las fases, y aun cuando no sea de magnitud considerable para el momento desarrollado, constituye un

elemento adicional de pérdidas a tener en cuenta para el análisis energético del motor agregado. Este aspecto no ha sido considerado en trabajos anteriores.

La potencia de salida en un sistema desbalanceado está dada por:

$$3\eta_{ag} (V_{agp} I_{agp} \cos \varphi_{agp} + V_{agn} I_{agn} \cos \varphi_{agn}) = 3 \sum_{i=1}^m \eta_i (V_{ip} I_{ip} \cos \varphi_{ip} + V_{in} I_{in} \cos \varphi_{in}) \quad (2.11)$$

donde: η_a y η_i son la eficiencia del motor agregado e individual en condiciones desbalanceadas; V_{agp} y V_{agn} tensiones de secuencias positiva y negativa del motor agregado en **V**; V_{ip} y V_{in} tensiones de secuencias positiva y negativa del motor de inducción i en **V**; I_{agp} y I_{agn} corrientes de secuencias positiva y negativa del motor agregado en **A**; I_{ip} y I_{in} corrientes de secuencia positiva y negativa del motor de inducción i en **A**, respectivamente. Los subíndices p y n , significan secuencia positiva y negativa respectivamente.

Dado que las tensiones en los terminales del motor agregado son iguales a las tensiones en la barra de potencia y en cada motor individual, la eficiencia del motor agregado se obtiene de (2.11), resultando:

$$\eta_{ag} = \frac{\sum_{i=1}^m \eta_i (V_{ip} I_{ip} \cos \varphi_{ip} + V_{in} I_{in} \cos \varphi_{in})}{(V_{agp} I_{agp} \cos \varphi_{agp} + V_{agn} I_{agn} \cos \varphi_{agn})}, \quad [\text{pu}] \quad (2.12)$$

Cuando no exista el desbalance de tensión, aunque se mantenga el desbalance de corriente, en la ecuación (2.12) la tensión de secuencia inversa se anula y la eficiencia viene determinada por la secuencia positiva coincidiendo con los resultados de Louie (2006) [53] para un sistema trifásico balanceado en tensión y corriente, ecuación (2.13):

$$\eta_{ag} = \frac{\sum_{i=1}^m \eta_i I_i \cos \varphi_i}{\sum_{i=1}^m I_i \cos \varphi_i}, \quad [\text{pu}] \quad (2.13)$$

El deslizamiento nominal del motor agregado s_{nag} y el deslizamiento de cada motor bajo operación a plena carga s_{ni} , viene dado por (2.14).

$$s_{nag} = \frac{\omega_o - p\Omega_{nag}}{\omega_o}; \quad s_{ni} = \frac{\omega_o - p_i \Omega_{ni}}{\omega_o}, \quad [\text{pu}] \quad (2.14)$$

donde: ω_o es la frecuencia angular del sistema de potencia en **rad**; Ω_{nag} la velocidad angular del rotor para el motor agregado en **rad/s**; Ω_{ni} la velocidad angular del rotor para el motor i en **rad/s**; p y p_i el número de pares de polos del motor agregado y los individuales.

Las pérdidas por fricción y batimiento del aire p_{fw} , se expresan como una fracción de la capacidad de la máquina k_{fw} y considerando que varían con el cuadrado de la velocidad según Gómez (2006) [61] se calculan por la ecuación (2.15).

$$k_{fw} = 0.052 \cdot P_n^{0.3296}, \quad [\text{pu}] \quad p_{fw} = k_{fw} P_{nag} \left(\frac{\Omega_{ag}}{\Omega_{nag}} \right)^2, \quad [\text{W}] \quad (2.15)$$

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

Tabla 2.1. Valores asumidos de las pérdidas adicionales p_{ad} en la norma **IEC 60034-2**.

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

Fuente: [18]

donde: P_{ab} potencia absorbida por el motor en **kW** y P_n potencia nominal del motor en **kW**.

Dado que la potencia electromagnética del motor agregado es igual a potencia electromagnética total de los motores individuales considerados, también las pérdidas en el circuito del rotor de ambos tienen que ser iguales, entonces manteniendo estas relaciones constantes se obtienen (2.16) y (2.17).

$$P_{ema} = P_{emap} - P_{eman} = \sum_{i=1}^m (P_{emip} - P_{emin}) = \sum_{i=1}^m \frac{(P_{si} + p_{fwi} + p_{adi})}{1 - s_i}, \quad [\text{W}] \quad (2.16)$$

$$s_{ag} P_{ema} = s_{ag} (P_{emp} - P_{emn}) = \sum_{i=1}^m s_i (P_{emip} - P_{emin}) = \sum_{i=1}^m s_i P_{emi} = \sum_{i=1}^m \frac{s_i \omega_o M_{emi}}{p_i}, \quad [\text{W}] \quad (2.17)$$

donde: M_{emi} es el par electromagnético de los motores considerados; $\omega_o M_{emi}/p_i$ y $s_i \omega_o M_{emi}/p_i$ potencia electromagnética y pérdidas en los devanados del rotor para los motores considerados respectivamente.

De las ecuaciones (2.16) y (2.17) se obtiene el deslizamiento para el motor agregado:

$$s_{ag} = \frac{\sum_{i=1}^m s_i (P_{emip} - P_{emin})}{P_{emap} - P_{eman}} = \frac{\sum_{i=1}^m s_i P_{emi}}{P_{ema}} = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{s_i \omega_o M_{emi}}{p_i}}{P_{ema}}, \quad [\text{pu}] \quad (2.18)$$

La ecuación (2.18) considera la existencias de pérdidas adicionales y mecánicas para obtener el deslizamiento del motor agregado, a diferencia de los trabajos referenciados en la literatura que desprecian estas pérdidas [51, 53, 62].

Velocidad del motor agregado

El momento electromagnético del motor agregado M_{ema} , se obtiene a través del balance de pérdidas eléctricas en el rotor:

$$M_{ema} = \frac{p_{ag}}{s_{ag}} \sum_{i=1}^m \frac{s_{ni} M_{emi}}{p_{ii}}, \quad [\text{Nm}] \quad (2.19)$$

Esta ecuación posee dos incógnitas M_{ema} y el número de pares de polos, p_{ag} . En los trabajos reportados en la literatura siempre consideran que el motor de mayor potencia hace predominar la inercia en el grupo y toman el número de polos de este motor como el número de polos del motor agregado, partiendo de que se trata de un análisis dinámico [51, 53, 54, 63, 64].

En este trabajo para determinar el número de pares de polos se formulan las siguientes reglas:

- Si todos los motores individuales que integran la barra de potencia tienen el mismo número de pares de polos, se cumple también el balance de pares electromagnéticos y coincide el número de pares de polos del motor agregado con el de los motores individuales.
- Si todos los motores individuales, que integran la barra de potencia, no tienen la misma cantidad de pares de polos, se toma el valor promedio como número de pares de polos preliminar del motor agregado.

Una vez realizada esta selección se determina un valor preliminar para la velocidad sincrónica del motor agregado Ω_{oag} , según (2.20), obtenida de la potencia electromagnética dada en (2.16):

$$\Omega_{oag} = \frac{P_{ema}}{M_{ema}} = \frac{\sum_{i=1}^m \frac{(P_{si} + p_{fwi} + p_{adi})}{1 - s_i}}{\frac{p_{ag}}{s_{ag}} \sum_{i=1}^m \frac{s_{ni} M_{emi}}{p_{ij}}}, \quad [\text{rad/s}] \quad (2.20)$$

donde: P_{si} , P_{fwi} , p_{adi} y s_i representan las potencias de salidas, las pérdidas mecánicas, las pérdidas adicionales del rotor y deslizamientos de cada motor individual, respectivamente.

Con esta velocidad angular de rotación preliminar, para la frecuencia de 60 Hz, se selecciona el número de polos del motor agregado, según la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Velocidad del campo en función del número de pares de polos a $f - 60 \text{ Hz}$.

P	1	2	3	4	5
$n_{sag} = \frac{60 \cdot f}{p}$ (rev/min)	3600	1800	1200	900	720
$\Omega_{oag} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n_{sag}}{60}$ (rad/s)	377,0	188,5	125,7	94,25	75.40

Con este procedimiento el número de polos no coincide con el del motor de mayor potencia, a diferencia de la literatura [51, 56, 64].

Con el número de pares de polos del motor agregado, la velocidad sincrónica y el deslizamiento nominal, se recalcula la velocidad del rotor, por la relación básica entre ellos (2.21), la cual será utilizada para estimar con mayor precisión la velocidad nominal del motor agregado:

$$\Omega_{nag} = (1 - s_{ag}) \frac{\omega_o}{p}, \quad [\text{rad/s}] \quad (2.21)$$

Debido al volumen de cálculo que se requiere para obtener los datos del motor agregado mediante el procedimiento descrito se desarrolla un algoritmo computarizado.

2.1.2. Diagrama por bloques para obtener el modelo de motor agregado nominal

El diagrama por bloques de la Figura 2.2 corresponde con la secuencia del programa desarrollado en MATLAB empleado para obtener los motores agregados nominales en cada barra. Los datos nominales de los motores individuales y las ecuaciones del epígrafe 2.1.1 constituyen el centro del cálculo de los parámetros nominales del motor agregado.

En el programa se inserta un procedimiento para obtener las impedancias del circuito equivalente en \mathbf{T} y los parámetros para la simulación del motor asincrónico. Los resultados se presentan en ficheros generados por la aplicación: datos nominales de los agregados; parámetros nominales del circuito equivalente en \mathbf{T} ; y parámetros de simulación de cada agregado.

En la literatura existen varios procedimientos para determinar los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción [57, 65-69]. Algunos de ellos incluyen la resistencia del estator como parámetro principal a determinar [70-73]. En este trabajo los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción se obtienen partiendo de los datos nominales por el algoritmo desarrollado por Romero *et al.* (2008) [74]. Al determinar estos parámetros se parte de la resistencia del estator con valor cero o se puede estimar por expresiones empíricas según Steele, *et al.* (2005) [29].

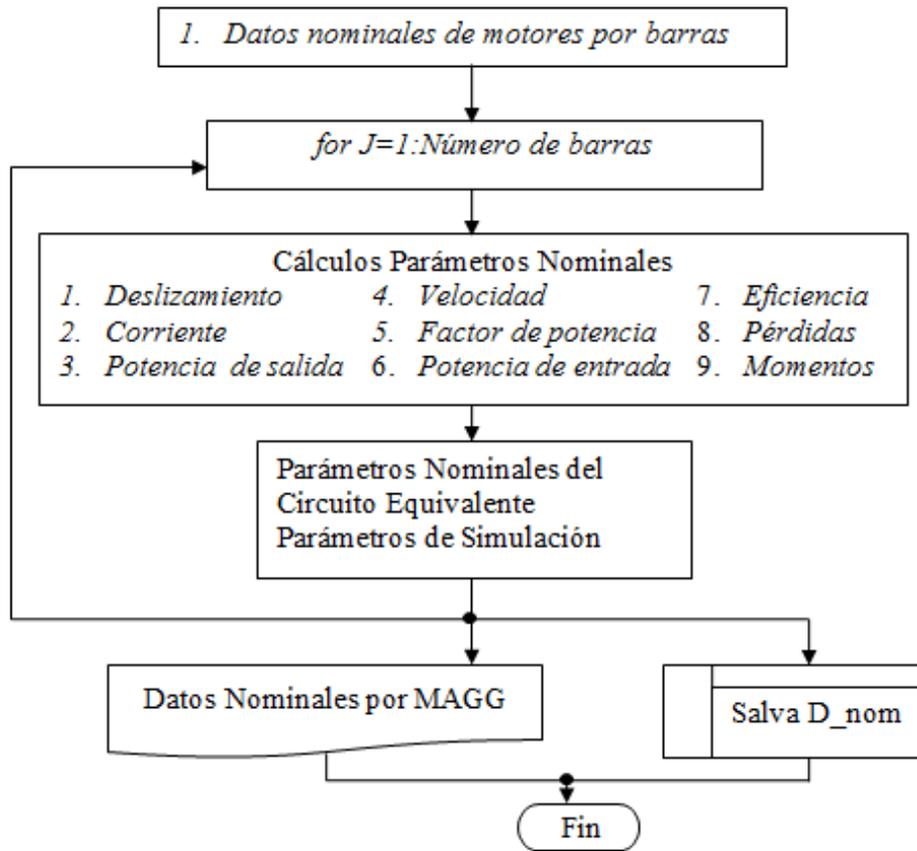


Figura 2.2. Diagrama por bloques del algoritmo para obtener motores agregados. En el **Anexo 2** se presenta el Algoritmo de cálculo de los parámetros del circuito equivalente.

2.2. Validación y simulación teórica del motor agregado y sus componentes

Para validar la teoría del motor energético agregado expuesta, primeramente, se realiza en condiciones de simetría y sin la presencia de armónicos con el objetivo de obtener la respuesta del motor agregado ante cambios en la carga de cada motor individual. Se presentan a manera de ejemplos los resultados obtenidos para el motor agregado Magg, formado por tres motores individuales: motor auxiliar M1 de 18 kW; motor del ventilador de pulverización M2 de 85 kW; y motor de aire primario M3 de 90 kW. Los datos nominales de cada motor agregado, arrojados al emplear el algoritmo de la Figura 2.2, son mostrados en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3. Datos nominales del motor agregado Magg y los individuales.

No	P_n (kW)	U_n (V)	I_n (A)	n_n (rpm)	$\cos\phi_i$	E_f	p	J (kg.m ²)	R_s (Ohm)
Magg	193	440	322.99	1175.91	0.859	0.91	3	5.177	0.0160
M1	18	440	32.00	1175	0.850	0.87	3	0.597	0.2675
M2	85	440	141.00	1176	0.860	0.92	3	2.290	0.0194
M3	90	440	150.00	1176	0.860	0.91	3	2.290	0.0185

A partir de las impedancias nominales del circuito equivalente se obtienen las inductancias para la simulación dada en la Tabla 2.4. Estos datos son necesarios para poder realizar la simulación del sistema que representan.

Tabla 2.4. Parámetros para la simulación del motor agregado Magg y los individuales.

No	R_s (Ohm)	L_{ss} (mH)	R_r (Ohm)	L_{sr} (mH)	R_m (Ohm)	L_m (mH)
Magg	0.0164	0.2252	0.0163	0.3378	6.4936	1567.4
M1	0.2675	2.314	0.1783	3.471	56.997	146.3
M2	0.0194	0.53	0.0374	0.795	16.314	690.26
M3	0.0185	0.5004	0.0353	0.7505	15.216	730.87

El momento de los diferentes mecanismos puede ser expresado en función de la velocidad como se plantea en la ecuación (2.22), donde M_o es el momento de marcha en vacío en **Nm**; M_{nom} momento para carga nominal en **Nm**; ω velocidad angular del motor en **rad/s**; ω_{nom} velocidad angular del rotor nominal en **rad/s**; ν índice que depende del tipo de carga accionada donde $\nu = (-1 \dots 2)$ según [48].

$$M_r = M_o + (M_{nom} - M_o) \left(\frac{\omega}{\omega_{nom}} \right)^\nu, \quad [\text{Nm}] \quad (2.22)$$

Para efectuar la simulación y comparar los resultados entre los motores individuales M1, M2 y M3 con el motor agregado Magg se realizó una modelación utilizando el *Toolbox SimPowerSystems* de MATLAB según muestra la Figura 2.3. En este diagrama, los parámetros eléctricos de potencias activa y reactiva, tensión y corriente

se miden por los bloques “Medición del agregado” y “Medición al grupo de motores” para el agregado y los motores individuales, respectivamente.

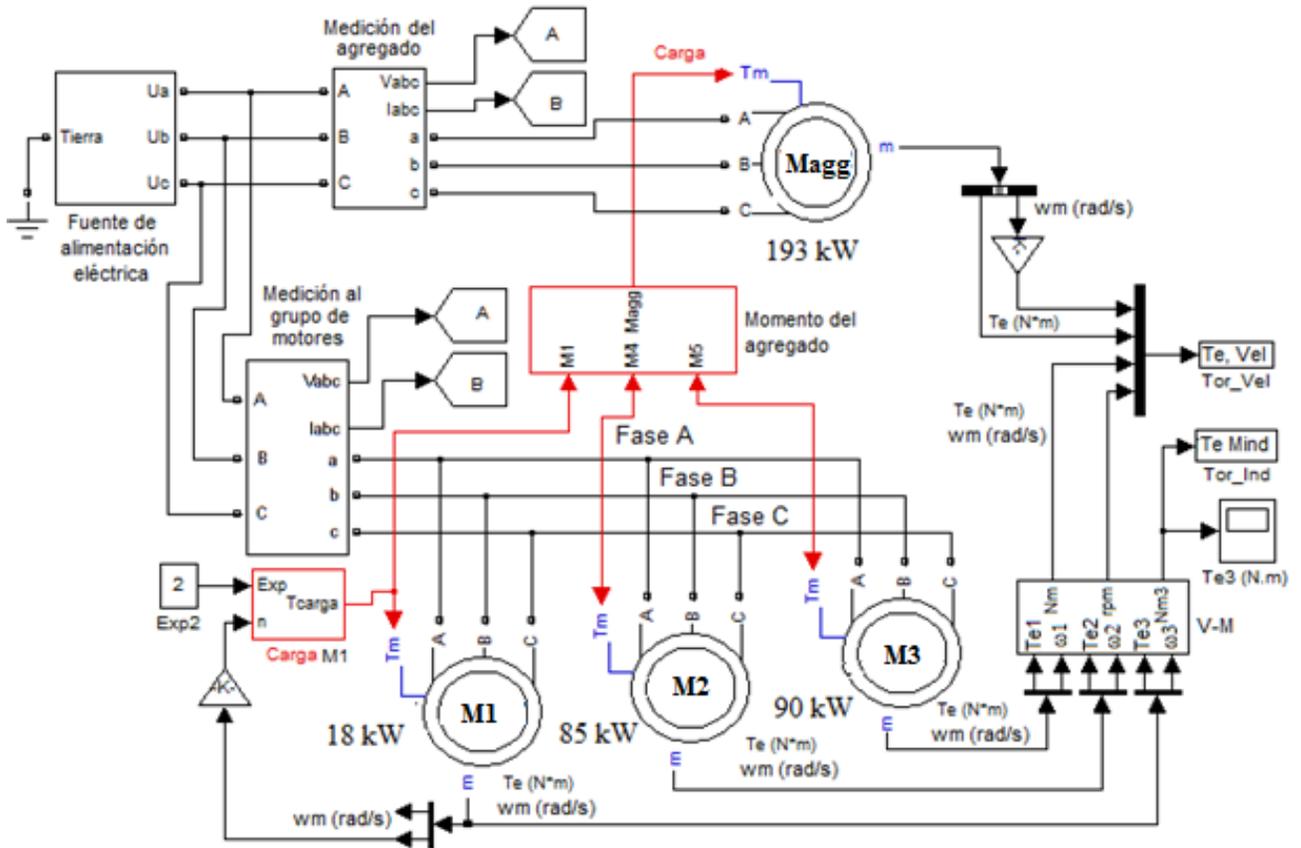


Figura 2.3. Esquema de simulación de los motores individuales y el agregado.

Las magnitudes mecánicas de velocidad y momento electromagnético se miden a cada motor por el bloque de medición propio. Estas variables de cada motor individual se conectan al subsistema “V-M” que permite su visualización y almacenamiento.

El subsistema “Momento del agregado” utiliza la ecuación (2.22) para determinar el momento de la carga del motor agregado. Esto se realiza a partir de la carga individual de cada motor, formando subsistemas como el denominado “Carga M1”. Debe considerarse que para el motor agregado la carga es una combinación de las cargas individuales y es dada por (2.23).

$$M_{ag} = p_{ag} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{M_i}{p_{ij}}, \quad [\text{Nm}] \quad (2.23)$$

donde p_{ag} es el número de pares de polos para el motor agregados y p_i para los individuales i , respectivamente; M_{ag} es el momento de salida para el motor agregado y M_i para los individuales i , en **Nm**.

La simulación se realizó para varias combinaciones de cargas, con ayuda de un menú de selección, donde los números entre paréntesis significan el tipo de carga según v .

1. Carga Lineal (1 1 1)
2. Carga Cuadrática (2 2 2)
3. Carga Inversa (-1 -1 -1)
4. Carga Constante (0 0 0)
5. Carga Combinada (1 2 -1)
6. Carga Combinada (-1 0 2)
7. Carga Combinada (0 2 1)

La carga a cada motor individual presenta una realimentación de velocidad ω y se añade el exponente v para caracterizar las diferentes condiciones como se muestra en la Figura 2.4. Este esquema se realiza para todos los motores individuales y constituye el subsistema “V-M”.

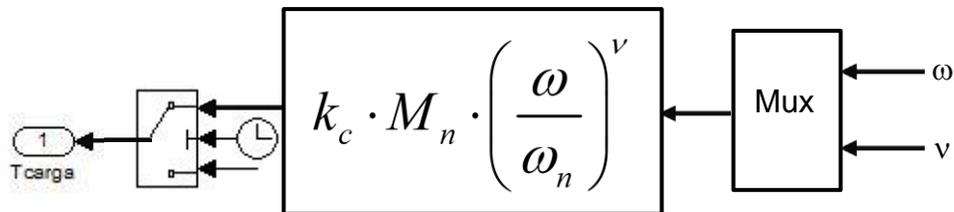


Figura 2.4. Esquema de simulación de la carga por cada motor individual.

Por el coeficiente k_c se toman cinco estados de carga para cada motor individual que van desde 1/8 hasta 3/4 de su potencia nominal y se escoge arbitrariamente el tiempo en el cual se conmutan los valores según aparece en la Tabla 2.5 con ayuda del reloj del interruptor.

Tabla 2.5. Tiempo de conmutación por cada motor individual según coeficiente de carga.

		Tiempo de conmutación para cada motor en s.				
Coeficientes de cargas		kc1	kc2	kc3	kc4	kc5
Motores		1/8	1/6	1/4	1/2	3/4
M1 (18 kW)		1,1	1,8	2,8	3,3	4,8
M2 (85 kW)		1,3	2,5	3,2	4,2	5,5
M3 (90 kW)		1,3	2,2	3,8	4,6	5,1

Dada la similitud del comportamiento estacionario ante las diferentes combinaciones de cargas, a cada motor se aplicó una carga cuadrática para coincidir con el proceso.

Los valores promedios del momento en el eje por cada motor durante la conmutación en los cinco estados de carga se muestran en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6. Momento en régimen estacionario de cada motor individual en Nm.

	Momento en el eje en Nm				
M1 (18 kW)	18,60	25,18	37,48	74,51	110,60
M2 (85 kW)	89,44	118,65	177,34	351,28	520,06
M3 (90 kW)	93,28	125,86	187,77	369,77	552,38

La Figura 2.5 representa la variación del momento en el eje de cada motor de inducción y los cambios que experimentan durante la simulación según el tiempo de conmutación.

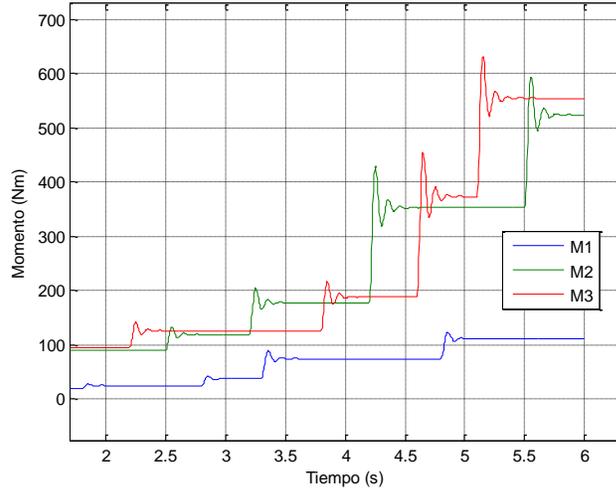


Figura 2.5. Cambios en los momentos de motores individuales.

2.2.1. Resultados de la simulación del agregado y los motores individuales

Los resultados de la simulación son mostradas de la Figura 2.6 a la Figura 2.9. En ellas pueden observarse la potencia activa, eficiencia, momento electromagnético y factor de potencia.

En este análisis se considera que el motor se encuentra operando en régimen estable. La comparación se realiza tomando los valores promedios de cada magnitud en este régimen, las diferencias absolutas y en por ciento con respecto al motor agregado [75]. Las respuestas se han dividido en intervalos para conservar las propiedades de los cambios que experimenta la carga en cada motor individual.

La Figura 2.6 muestra que las potencias activas del agregado y del conjunto prácticamente se funden en una sola gráfica ante los cambios en las cargas de los motores individuales.

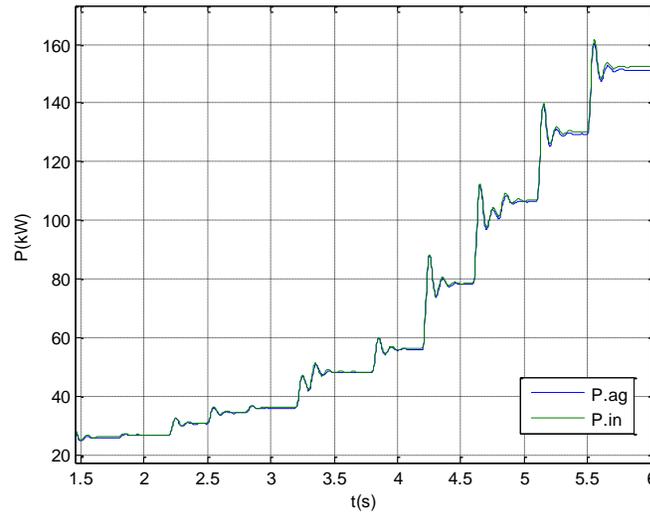


Figura 2.6. Potencias activas del agregado y la suma de individuales (P_{ag} y P_{in}).

La diferencia absoluta entre la potencia activa del motor agregado y la suma de motores individuales tiene un valor máximo de 1,08 kW que representa 0,72 % de la potencia que demanda el agregado Tabla 2.7. Existe una tendencia a la disminución de la diferencia a medida que aumenta la carga durante la simulación.

Tabla 2.7. Potencia activa del motor agregado y el conjunto de motores individuales.

	Resultados de la simulación								
kc (%)	13,3	14,8	17,9	21,5	26,2	35,3	50,2	62,8	76,3
P_{1ag} (kW)	26,10	28,97	34,87	41,74	51,18	68,69	97,95	123,40	150,74
P_{1in} (kW)	26,32	29,19	35,11	41,98	51,38	68,99	98,45	124,06	151,82
$P_{1ag}-P_{1in}$ (kW)	0,22	0,22	0,24	0,24	0,20	0,30	0,50	0,66	1,08
$(P_{1ag}-P_{1in})/ P_{1ag}$ (%)	0,83	0,76	0,69	0,57	0,39	0,43	0,52	0,53	0,72

Existe una equivalencia entre la potencia reactiva del motor agregado y la equivalente de motores individuales según se observa en la Figura 2.7. Los mayores valores para el

grupo de motores individuales se deben a la consideración de un solo núcleo magnético por el motor agregado.

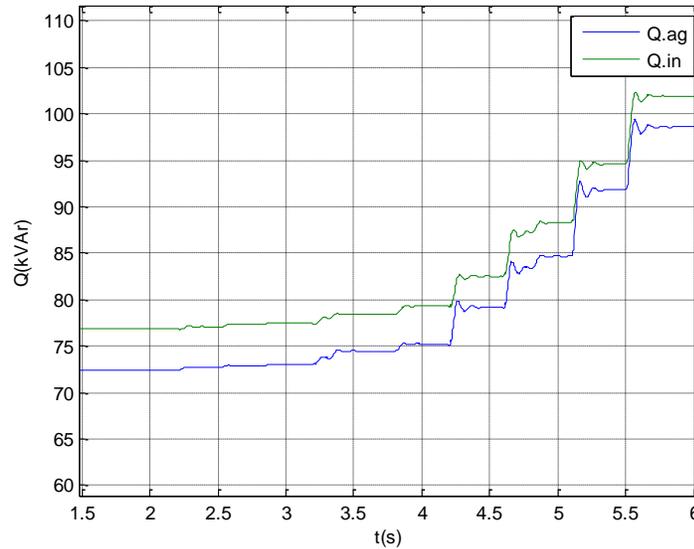


Figura 2.7. Potencias reactiva del agregado y la suma de motores individuales (Q_g y Q_{in}).

Durante la simulación la mayor diferencia se obtuvo para la carga más baja y a medida que esta aumenta la diferencia se reduce a menos del 7 % Tabla 2.8.

Tabla 2.8. Potencia reactiva del motor agregado y el conjunto de motores individuales.

---	Resultados de la simulación								
kc (%)	13,3	14,8	17,9	21,5	26,2	35,3	50,2	62,8	76,3
Q_{ag} (kVAR)	72,40	72,56	72,94	73,61	74,73	77,33	82,65	89,69	98,15
Q_{In} (kVAR)	76,86	76,99	77,33	77,84	78,72	80,93	86,22	92,65	101,39
$Q_{ag}-Q_{In}$ (kVAR)	4,46	4,42	4,39	4,23	4,00	3,60	3,57	2,97	3,24
$(Q_{ag}-Q_{In})/ Q_{ag}$ (%)	6,16	6,10	6,02	5,74	5,35	4,66	4,32	3,31	3,30

Similares resultados a los obtenidos anteriormente se observan para el momento del motor agregado y la suma de motores individuales representados en la Figura 2.8.

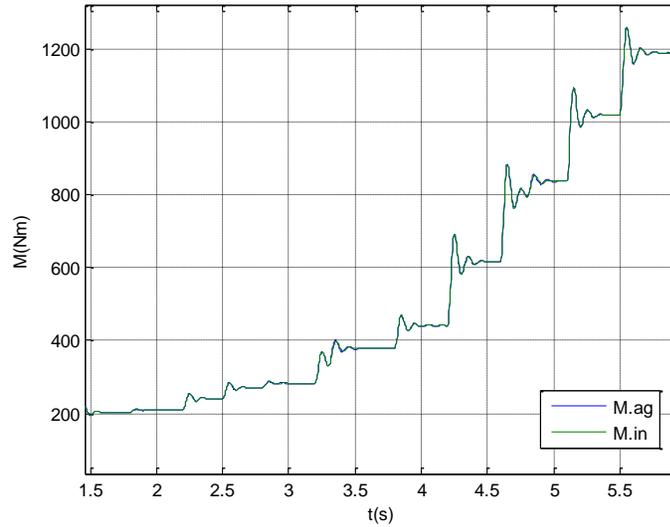


Figura 2.8. Momentos del motor agregado y la suma de motores individuales (M_{ag} y M_{in}).

Durante la simulación la diferencia entre el momento del motor agregado y la suma de motores individuales es despreciable según los resultados en la Tabla 2.9

Tabla 2.9. Momento del motor agregado y el conjunto de motores individuales.

---	Resultados de la simulación								
kc (%)	13,3	14,8	17,9	21,5	26,2	35,3	50,2	62,8	76,3
M_{ag} (Nm)	204,98	227,70	274,57	328,75	402,86	541,28	771,83	970,98	1185,69
M_{in} (Nm)	205,00	227,72	274,52	328,60	402,88	541,28	771,80	971,14	1185,78
$M_{ag}-M_{in}$ (Nm)	0,02	0,02	0,05	0,15	0,02	0,00	0,02	0,17	0,08
$(M_{ag}-M_{in})/$ M_{ag} (%)	0,01	0,01	0,02	0,05	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01

El factor de potencia del motor agregado y la suma de motores individuales se grafican en la Figura 2.9 donde se observa una equivalencia entre ellos. La mayor diferencia se

obtiene para la carga más baja, y a medida que aumenta la carga la diferencia se reduce a menos de 0,02 en valores absolutos.

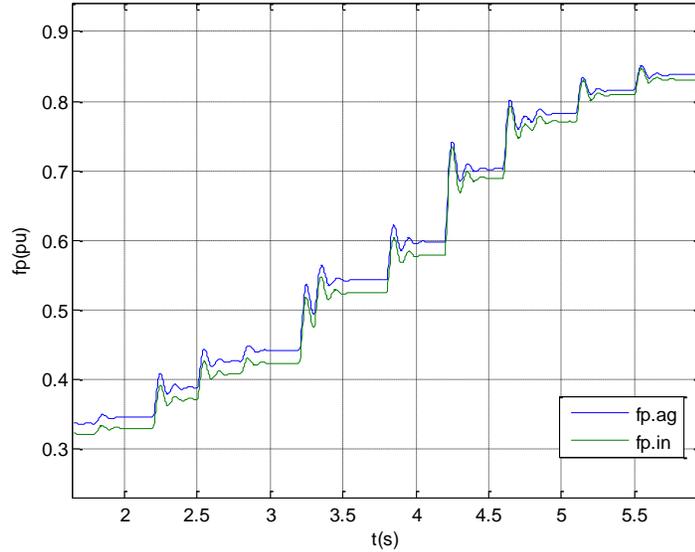


Figura 2.9. Factor de potencia del motor agregado fp_{ag} y la suma de individuales fp_{in}

Los resultados de la Tabla 2.10 precisan lo representado en la figura para el factor de potencia. Estas diferencias concuerdan con los resultados de la potencia reactiva.

Tabla 2.10. Factor de potencia del motor agregado y el conjunto de motores individuales.

---	Resultados de la simulación								
	13,3	14,8	17,9	21,5	26,2	35,3	50,2	62,8	76,3
kc (%)	13,3	14,8	17,9	21,5	26,2	35,3	50,2	62,8	76,3
fp_{ag}	0,34	0,37	0,43	0,49	0,56	0,66	0,76	0,81	0,84
fp_{in}	0,32	0,35	0,41	0,47	0,55	0,64	0,75	0,80	0,83
$fp_{ag}-fp_{in}$	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01

En todos los resultados anteriores se observan diferencias absolutas bajas en las diferentes magnitudes, demostrando que el motor agregado responde de forma satisfactoria a los cambios que experimenten los motores individuales.

En la aplicación del modelo de motor agregado a la caracterización energética es necesario adaptarlo a las condiciones reales de operación, para tener en cuenta el grado de carga de los motores individuales que forman el equivalente, en este trabajo se utiliza el método del momento en el entrehierro considerando la presencia de desbalance y deformaciones en las ondas de corrientes y tensiones, además de considerar las ondas en su forma natural, la cual puede contener todos los armónicos y componente de directa por ser asimétrica con respecto al eje de abscisa. Este aspecto diferencia el trabajo de las consideraciones básicas (ondas simétricas) reportadas en las literaturas [1, 4, 38, 39, 42].

2.3. Adaptación del motor agregado a las condiciones reales de operación

El método del momento en el entrehierro ha sido verificado por varios experimentos, resultando ser efectivo para estimar la eficiencia [1, 33, 76, 77]. 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_{core} y las pérdidas por fricción y batimiento del aire p_{fw} , es necesario un ensayo en vacío, constituyendo una de las dificultades de este método, junto a los requerimientos de velocidad y resistencia del estator.

Para minimizar estas dificultades y convertir el momento en el entrehierro en un método de bajo nivel de intrusión, la ecuación se desarrolla haciendo transformaciones en el método original. Esto mantiene una precisión satisfactoria y reduce grandemente el nivel de intrusión [4].

1. La velocidad del rotor se estima con alta precisión (0,005 p.u.) por el análisis espectral de la corriente del motor, extrayendo los armónicos de las ranuras de las corrientes del estator [78].

2. La resistencia del estator puede ser medida en línea o fuera de línea o estimada a través de los datos nominales de acuerdo con las condiciones reales de carga [74].
3. Los datos del ensayo en vacío pueden ser estimados por los valores empíricos con el uso de los datos nominales, similar a los métodos OHME y ORMEL96 [2]. Al especificar un poco más, las pérdidas combinadas de vacío se asumen como 3,5 % de la potencia de salida nominal, las pérdidas por fricción y batimiento del aire 1,2 % de la potencia de salida nominal o por (2.15); y las pérdidas adicionales con la carga se estiman por la norma IEC 60034-2-1 del 2007 [18], Tabla 2.1.

2.3.1. Momento en el entrehierro y eficiencia

La potencia en términos de tensiones de líneas y corrientes en las fases se calcula por (2.24):

$$p = -u_{ab}i_b - u_{ca}(i_a + i_b) = u_{ca}i_c - u_{ab}i_b, \quad [\text{VA}] \quad (2.24)$$

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

El sistema de ecuaciones para el estator en el sistema dq está dado por (2.25),

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega_{me} \lambda_{qs} \\ v_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega_{me} \lambda_{ds} \end{aligned}, \quad [\text{V}] \quad (2.25)$$

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 la 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 (2.26).

$$\begin{aligned}\lambda_{ds}^e &= \int (v_{ds}^e - R_s i_{ds}^e) dt \\ \lambda_{qs}^e &= \int (v_{qs}^e - R_s i_{qs}^e) dt\end{aligned} \quad [\text{Wb}] \quad (2.26)$$

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**.

La potencia instantánea p_{in} , a través de las magnitudes en el sistema dq viene dada por (2.27),

$$p_{in} = \frac{3}{2} (u_{ds}^e i_{ds}^e + u_{qs}^e i_{qs}^e + 2u_0 i_0), \quad [\text{VA}] \quad (2.27)$$

y el momento en el entrehierro se expresa por (2.28),

$$M_{em} = \frac{3 \text{ polos}}{2} (\lambda_{ds}^e i_{qs}^e - \lambda_{qs}^e i_{ds}^e), \quad [\text{Nm}] \quad (2.28)$$

Desarrollando (2.28) para un sistema de referencia estacionario a través de magnitudes trifásicas se obtiene (2.29), ecuación muy utilizada en la literatura [1, 3, 4, 79].

$$M_{em} = \frac{\sqrt{3} \text{ polos}}{6} \left\{ \begin{aligned} &(2i_a + i_b) \int [v_{ab} - R_s (i_a - i_b)] dt \\ &+ (i_a - i_b) \int [v_{ca} + R_s (2i_a + i_b)] dt \end{aligned} \right\}, \quad [\text{Nm}] \quad (2.29)$$

donde:

polos - Número de polos del motor.

i_a, i_b - Corriente instantánea de la fase A y B respectivamente, [A].

R_s - Resistencia del devanado del estator, [Ohm].

v_{ab}, v_{ca} - Tensión entre las líneas AB y CA respectivamente, [V].

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

Cálculo de la eficiencia

La potencia de salida en el eje del motor P_{eje} es el producto del momento en el eje M_{eje} y la velocidad del rotor ω_r . El momento en el eje dado por (2.30) es la diferencia entre el

momento en el entrehierro M_{em} y el momento correspondiente a las pérdidas mecánicas y del núcleo p_{fwn} y las pérdidas adicionales p_{adr} producidas por la corriente del rotor.

$$M_{eje} = M_{em} - \frac{P_{fwn}}{\omega_r} - \frac{P_{adr}}{\omega_r}, \quad [\text{Nm}] \quad (2.30)$$

$$P_{eje} = M_{eje} \cdot \omega_r \quad [\text{W}] \quad (2.31)$$

Las pérdidas adicionales del rotor se asumen por la norma **IEC 60034-2-1** del 2007, Tabla 2.1. La eficiencia η está dada por:

$$\eta = \frac{P_{eje}}{P_{ent}} \quad [\text{pu}] \quad (2.32)$$

donde:

p_{fwn} - Pérdidas mecánicas en **W**.

p_{adr} - Pérdidas adicionales del rotor con la carga en **W**.

La implementación del método del momento en el entrehierro que considere la asimetría de las ondas con respecto al eje de abscisa requiere de un gran volumen de cálculos y operaciones complejas, por ello se realiza una aplicación auxiliar con el software MATLAB.

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

Para implementar el algoritmo de cálculo basado en el método del momento en el entrehierro se requiere de un trabajo previo para llevar las bases de datos al formato adecuado de modo que puedan ser interpretados por la aplicación en MATLAB.

1. Realizar las mediciones de las formas de ondas de tensión, de la corriente y de la frecuencia.
2. Tomar los datos nominales característicos de los motores de inducción.
3. Tomar las mediciones de velocidad, si está disponible.
4. Salvar en un archivo ***.mat** las mediciones junto a los datos nominales en forma de estructura.

En la Figura 2.10 se representa el esquema en bloques del algoritmo de evaluación de motores de inducción en presencia de armónicos y asimetría.

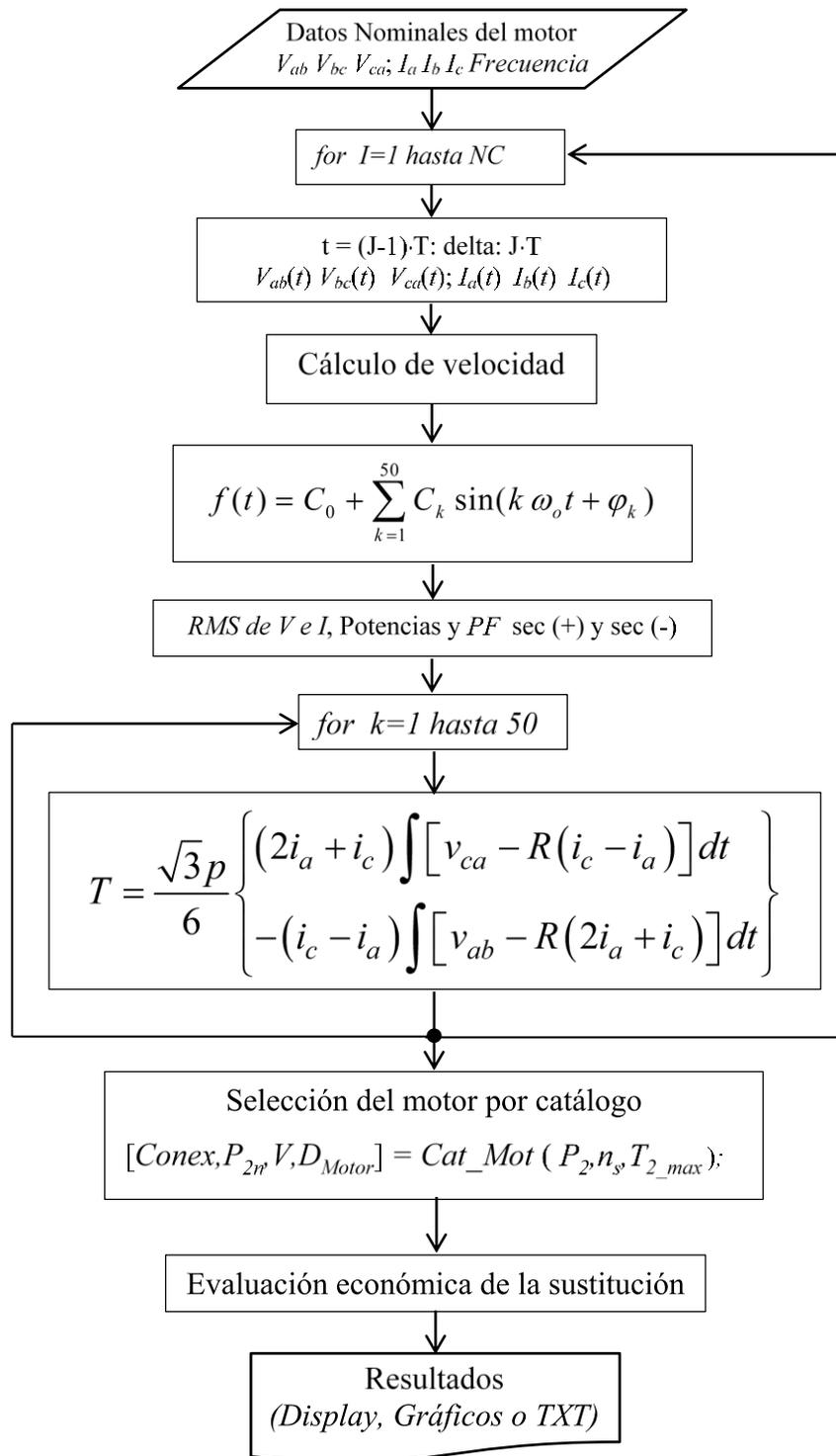


Figura 2.10. Esquema por bloques del algoritmo de evaluación de motores de inducción en presencia de armónicos y asimetría.

El algoritmo aquí presentado desarrolla el método del momento en el entrehierro 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 y alimentado por señales de diferentes frecuencias. Este procedimiento se realiza aplicando la transformada rápida de Fourier, descompone las ondas resultantes en una suma de componentes de diferentes frecuencias y magnitudes, además se descompone cada armónica en secuencias positiva y negativa evitando la presencia de secuencia cero en las formas de ondas.

En el trabajo de Eguiluz *et al.* (1999) [80] se determina el comportamiento del motor de inducción y las variaciones de sus parámetros con la frecuencia y el tipo de secuencia en presencia de las deformaciones de ondas y desbalance de tensión, basado en el circuito equivalente, aplicando el principio de superposición para cada efecto y estratificando los armónicos [80]. En este caso los armónicos en las ondas de corrientes son una consecuencia directa de los armónicos en las ondas de tensión, sin considerar los efectos internos del motor.

El método del momento en el entrehierro implícitamente contempla las desviaciones y el desbalance de tensión. Es posible incorporarle la presencia armónica y las perturbaciones anteriores de forma unísona [81].

2.4.1. Criterios de decisión para la selección del motor agregado al análisis individual

Existen magnitudes consideradas básicas para realizar un estudio del comportamiento energético de motores de inducción de forma individual, entre ellas el factor de carga y la eficiencia, además de tener en cuenta las características del proceso donde están aplicados, aunque cada factor presenta incertidumbre en su determinación [82].

Cuando se analiza el comportamiento energético de motores agregados el coeficiente de carga y la eficiencia se refieren a grupos de motores y tienen en cuenta la carga real de cada uno de ellos.

En presencia de varias barras hay que seleccionar en cuál o cuáles de ellas se realizará el trabajo de precisar en cada motor individual. Decidir por la eficiencia más baja, puede

ocultar el criterio del estado de carga cuando se trata de motores por encima de los 100 kW con relación de potencia de 2 a 1 o iguales debido a que los valores de eficiencia que presentan estos motores son altos aun para bajo estado de carga. Cuando la relación de potencias está por encima de 2 a 1 los motores de menor potencia generalmente experimentan valores disminuidos de eficiencia, aunque tengan un mayor coeficiente de carga.

Definir por el estado de carga, de acuerdo con las recomendaciones de considerar solo aquellos casos que se encuentren por debajo del 50 %, impediría analizar algunas posibilidades reales existentes debido a la variedad de potencia que pueden presentarse en las barras.

Por lo anterior, la decisión del motor agregado al análisis individual (la barra a seleccionar) se realiza a partir de la eficiencia, el factor de carga y la potencia. Se adiciona a la toma de decisión el factor de incidencia individual ($k_{incidencia}$) definido como la relación entre la potencia demandada por el motor agregado individual y la demanda total de la barra [83].

$$k_{incidencia} = \frac{P_{1i}}{\sum_{i=1}^{n_{ma}} P_{1i}} \cdot 100, \quad [\%] \quad (2.33)$$

donde: n_{ma} es el número de motores agregados y P_{1i} la potencia que demanda cada motor en **W**.

La ecuación (2.33) garantiza que predominen los motores agregados que demandan mayor potencia y disminuye el número de ellos a considerar.

El coeficiente de incidencia medio ($k_{incidencia_medio}$) define la relación entre la potencia media demandada por los motores agregados y la demanda total de la barra (2.34).

$$k_{incidencia_medio} = \frac{1}{n_{ma}} \frac{\sum_{i=1}^{n_{ma}} P_{1i}}{\sum_{i=1}^{n_{ma}} P_{1i}} \cdot 100, \quad [\%] \quad (2.34)$$

Los motores a seleccionar para la investigación individual son aquellos que sus coeficientes de incidencias sean iguales o mayores que el factor de incidencia medio del conjunto de motores agregados. Luego de la selección de los principales motores

agregados de acuerdo con el coeficiente de incidencia, estos se organizan por la eficiencia. La investigación individual se inicia por los motores con las eficiencias más bajas, ya que junto a las potencias demandadas constituyen los principales parámetros que caracterizan energéticamente al motor agregado.

La mayor importancia de considerar los agregados más generales aparece cuando se trata de decidir entre barras principales, habitualmente presentadas como subestaciones en baja tensión. En este caso sólo se comparan los motores agregados más generales y se selecciona la barra, luego se establece el coeficiente de incidencia para los motores agregados del primer nivel. Cuando se incluyen motores agregados obtenidos a través de otros agregados se realiza de la misma forma, solo que se incluyen en la evaluación un número mayor de motores y la decisión puede tener un significado más intermedio. Para evitar este inconveniente es recomendable trabajar con motores agregados del primer nivel.

2.5. Procedimiento para la caracterización energética con el modelo del motor agregado

La Figura 2.11 resume los elementos fundamentales para determinar el comportamiento de la carga con motores de inducción en barras de potencias eléctricas a través del modelo de motor agregado [83]. Se inicia con los datos nominales de los motores de inducción y las mediciones de las principales magnitudes eléctricas en cada barra.

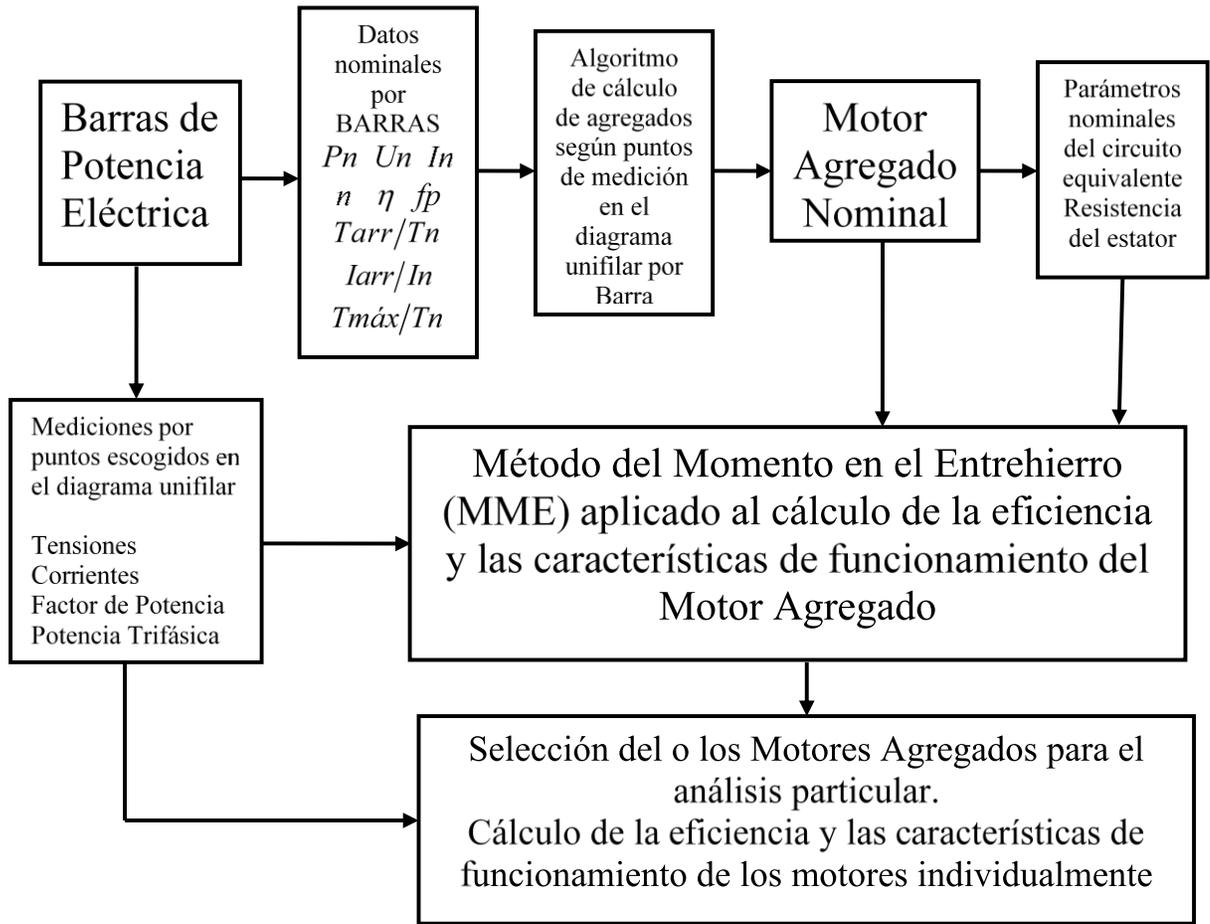


Figura 2.11. Diagrama general del procedimiento para la caracterización energética con el uso del modelo del motor agregado.

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 modelo de motor agregado.
2. Tomar los datos nominales de los motores que integran las barras.
3. Obtener el modelo del motor agregado nominal según el algoritmo de la Figura 2.2.
4. Tomar las mediciones de las formas de ondas de tensiones y corrientes en el alimentador.

5. Aplicar el método del momento en el entrehierro modificado para adaptar el modelo de motor agregado a las condiciones reales existentes en el campo de las mediciones.
6. Definir el o los agregados al análisis particular.
7. Determinar el potencial de ahorro existente en barras.
8. Particularizar para los motores de inducción que integran el agregado seleccionado.

El trabajo finaliza con la evaluación energética individual de cada motor de inducción que componen la barra o motor agregado seleccionado. En este caso se aplica nuevamente el método del momento en el entrehierro debido a las ventajas que ofrece. En reiteradas ocasiones al decidir sobre nuevas inversiones se toma en consideración solamente el costo de adquisición e instalación de un sistema, sin embargo el costo inicial de muchos sistemas energéticos representa una fracción pequeña del costo total a lo largo de la vida útil del sistema [84].

El Costo del Ciclo de Vida (CCV) constituye un método que permite evaluar opciones de conservación de la energía a lo largo de la vida de un equipo o sistema desde la adquisición, instalación, operación y mantenimiento hasta el desmontaje y disposición final del mismo. La esencia del método del Costo del Ciclo de Vida radica en llevar a valor presente todos los costos a lo largo de la vida del sistema y sumarlos [85]. Este método posibilita realizar comparaciones entre diferentes alternativas para lograr un mismo fin productivo o de servicio. Esto es particularmente útil en los casos en que no resulta factible determinar los ingresos que genera un proyecto dado como pueden ser las inversiones en equipos de proceso específicos.

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

2.6. Conclusiones Capítulo 2

1. En este capítulo se establecen las condiciones que deben cumplir los motores de inducción individuales para formar el motor agregado a utilizar en el análisis energético del grupo, destacándose la existencia de un alimentador común.
2. Las variaciones en las magnitudes del motor agregado reflejan los cambios en las cargas de los motores individuales, con errores menores al 5 %, aún en presencia de cargas de diferentes características, que demuestra la validez de utilizar un motor agregado para el análisis energético de grupos de motores individuales.
3. El método del momento en el entrehierro permite adaptar el agregado nominal a las condiciones reales. El algoritmo desarrollado para su implementación considera la presencia de armónicos, desbalance y asimetría de las ondas, apartándose de lo establecido en las principales literaturas al respecto, descompone las ondas originales en componentes de diferentes frecuencias que permite caracterizar el comportamiento energético y distinguir las pérdidas por armónicos y asimetría, aspecto con dificultad en métodos anteriores.
4. Se estableció el procedimiento a seguir para la caracterización energética de grupos de motores a partir del modelo de motor agregado, donde el coeficiente de incidencia define en la selección del motor a realizarle el análisis individual, además de considerar la influencia de la eficiencia y el factor de carga.

Capítulo 3

Aplicación del modelo de motor agregado. Caso de estudio

CAPÍTULO 3. APLICACIÓN DEL MODELO DE MOTOR AGREGADO. CASO DE ESTUDIO

Introducción

Los objetivos específicos de este capítulo son los siguientes:

1. Aplicar la caracterización energética de grupos de motores de inducción en barras de baja tensión con el empleo del motor agregado.
2. Seleccionar la barra donde debe realizarse el análisis individual y demostrar la equivalencia del comportamiento energético entre el motor agregado y la suma de sus motores individuales.

Este capítulo se desarrolla por etapas. En la **primera etapa** se determinan los motores agregados correspondientes a cada barra, los cuales se caracterizan por sus datos nominales. Como resultado se transforma y se simplifica el diagrama unifilar original de la barra objeto de estudio (epígrafe 3.1). En la **segunda etapa** se determina el comportamiento energético de los motores agregados por cada barra con la utilización del método del momento en el entrehierro combinado con los datos nominales y las mediciones en los puntos señalados. Se determina el consumo de energía asociado a la barra y se valora la selección del o los motores agregados por el factor de incidencia (epígrafe 3.2). La **tercera etapa** realiza un análisis particular del agregado seleccionado previamente entre los de mayores incidencias; determina el comportamiento energético particular de este agregado, valorando las potencialidades de ahorro de energía. En esta etapa se compara el consumo de energía que se obtiene por el motor agregado versus el obtenido por los motores individuales (epígrafe 3.3). Por último la **cuarta etapa** particulariza en uno o varios motores individuales de la barra y se determina la eficiencia y otras magnitudes que definen el comportamiento energético para el motor agregado seleccionado (epígrafe 3.4).

3.1. Barra OH-1, UG-5 y sus componentes como objeto de estudio

La Empresa Comandante Pedro Sotto Alba está estructurada en doce plantas: Pulpa; Espesadores; Lixiviación; Termoeléctrica; Acido; Sulfuro; Hidrogeno; Neutra; Lavaderos;

H₂O; Coral y Secado. La planta de **Agua A** se localiza ceca del río Moa y un gran embalse de agua, que suministra este líquido a varias plantas de la empresa.

El tratamiento de agua consiste en el ablandamiento con cal y equipos para la clarificación, filtros por gravedad con carbón como medio filtrante. El agua es almacenada antes de ser bombeada como agua de reposición a las torres de enfriamiento y a la planta de tratamiento de **Agua B**.

En la planta de **Agua B** el agua es sometida a intercambio catiónico e intercambio aniónico antes de ser enviada al lugar donde se almacena; desmineralizada se utiliza en las calderas de plantas Eléctricas, Ácido y en los enfriadores de la planta de Lixiviación. Dada la importancia de planta de **Agua A** para la empresa y la potencia de los motores de inducción instalados, se toma como ejemplo para realizar un análisis en detalle y demostrar la efectividad del método propuesto.

El suministro eléctrico a esta planta se realiza desde termoeléctrica por la subestación 345-SG-1 de 13,8 kV a través de dos alimentadores OH-1 y UG-5, los mismos alimentan dos transformadores, 345-TN-1A y 345-TN-2A de 13,8/0,48 kV con una potencia individual de 1500 kVA, que suministran tensión a las barras principales de 480 V, Figura 3.1.

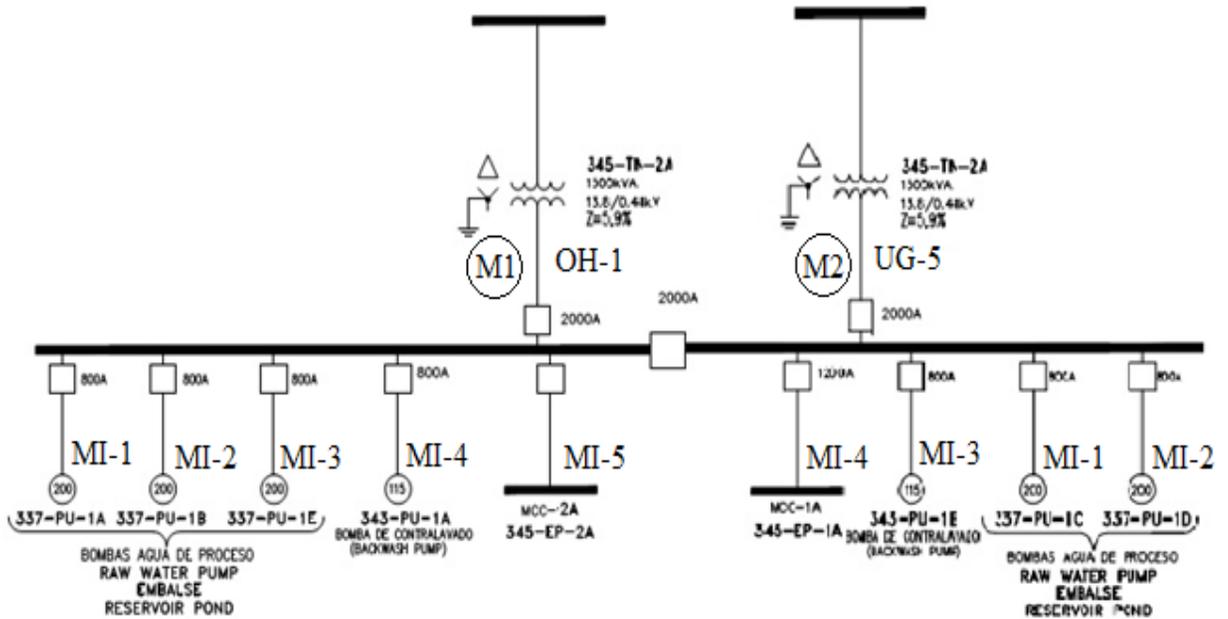


Figura 3.1. Diagrama unifilar de la subestación 345-SG-1

Las características de la subestación 345-SG-1 se observan en la Figura 3.1 existen dos barras principales, una por cada transformador identificada como OH-1 y UG-5. Los centros de control de motores (CCM), MCC-1A y MCC-2A se verán como un motor equivalente. Cada motor de inducción se identifica de acuerdo con el mecanismo que accionan. En el diagrama unifilar se muestran los puntos de medición: M1 representa el motor agregado que corresponde con la barra OH-1; M2 el de la barra UG-5. Por MI-1 hasta MI-5 los motores de inducción individuales conectados a cada barras. La cantidad de motores agregados coincide con el total de barras con alimentación común (2) con un total de nueve motores asíncronicos individuales.

Los datos nominales de los motores de inducción que integran la barra OH-1 y UG-5 se muestran en la, Tabla 3.1 junto a la nomenclatura que identifica el punto de medición y el tipo de mecanismo.

Tabla 3.1. Datos nominales de los motores de la barra OH-1 y UG-5.

Puntos	Motor	P_n (kW)	U_n (V)	I_n (A)	n_n (rev/min)	$\cos\phi$ (pu)	η (pu)	$\frac{T_m}{T_n}$	p (pu)
M1 OH-1	337 PU-1A	151	460	235	1785	0.85	0.95	2	2
	337 PU-1B	151	460	235	1785	0.85	0.95	2	2
	337 PU-1E	151	460	235	1785	0.85	0.95	2	2
	343-PU-1A	86	460	140	1185	0.83	0.93	2	3
	MCC-2A	319.50	460	492.29	3565.78	0.892	0.913	2.14	1
M2 UG5	337-PU-1C	151	460	235	1785	0.85	0.95	2	2
	337-PU-1D	151	460	235	1785	0.85	0.95	2	2
	343-PU-1B	86	460	140	1185	0.83	0.93	2	3
	MCC-1A	319.50	460	492.29	3564.78	0.892	0.913	2.14	1

Los datos nominales son: 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 - rendimiento; p - número de pares de polos; y $k_s = T_m/T_n$ - coeficiente de sobrecarga.

3.1.1. Composición de motores agregados para la barra OH-1 y UG-5.

Para la obtención de los modelos agregados por barra se utilizó el algoritmo desarrollado en MATLAB mostrado en el esquema de bloques de la Figura 2.2. Como resultado se obtienen los parámetros nominales del motor agregado.

Una vez agrupados los motores individuales que forman los centros de control de motores, la subestación 345-SG-1 se transforma a un sistema equivalente más simple como se muestra en la Figura 3.2; ahora figuran motores que se corresponden con las cargas que existen por barras.

Los motores agregados de las barras principales OH-1 y UG-5 agrupan todos los motores conectados a la subestación 345-SG-1. Para el punto de medición OH-1 se obtiene el motor agregado M1 y para UG-5 el agregado M2.

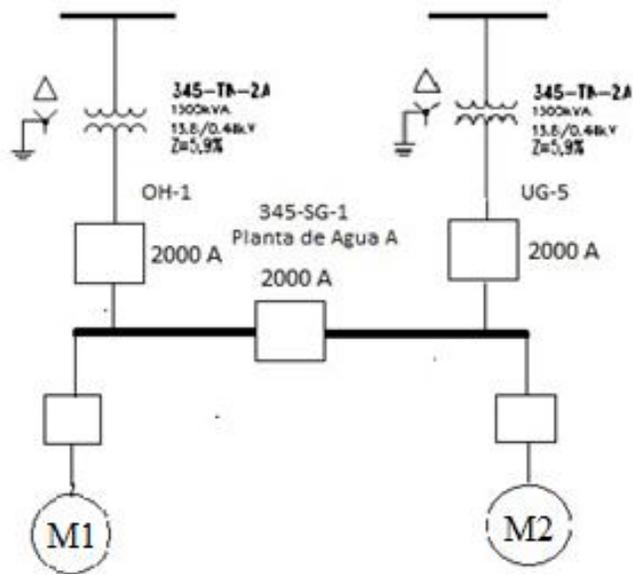


Figura 3.2. Unifilar de la subestación 345-SG-1 con motores agregados.

En la Tabla 3.2 aparecen los datos para los motores agregados, en los puntos de medición M1 y M2, que corresponden a las barras OH-1 y UG-5.

Tabla 3.2. Datos nominales de los motores agregados principales.

<i>M. Agg</i>	<i>Barras</i>	P_n (kW)	U_n (V)	I_n (A)	n_n (rev/min)	$\cos\varphi$ (pu)	η (pu)	$\frac{T_m}{T_n}$
M1	OH-1	858.5	460	1335,88	3566.55	0,864	0,934	2.05
M2	UG-5	707.50	460	1100.99	3565.81	0,867	0,930	2.06

3.2. Comportamiento de los motores agregados en condiciones reales

Las mediciones básicas necesarias están dadas por las formas de ondas de tensiones y corrientes. De acuerdo con la teoría, del momento electromagnético en el entrehierro, solo se necesitan dos pares: las corrientes de las fases i_a e i_b , y las tensiones de líneas V_{ab} y V_{ca} .

El registro de las mediciones que se sugiere para estudios energéticos se debe realizar a intervalos máximos de 10 minutos, durante las 24 horas y siempre obteniendo la

forma de ondas con 128 muestra por ciclo. Esto garantiza un adecuado muestreo y que se conserven las particularidades y propiedades de las magnitudes medidas [86]. Junto a estas mediciones se registran los valores efectivos de tensiones y corrientes, la potencia activa trifásica total, el factor de potencia, la frecuencia, y si es posible, las mediciones de velocidad y momento si se trata de un motor de inducción específico.

Se comprueba que la suma de las tensiones de líneas y la suma de las corrientes en el sistema trifásico sean iguales a cero, cumpliendo 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 corrientes.

En una industria de régimen continuo de trabajo, como sucede en la empresa Comandante Pedro Sotto Alba de Moa o en otras similares, es de esperar que las magnitudes varíen ligeramente. Estas variaciones se deben a distintas causas; pueden existir 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 del programa desarrollado en Matlab, la base de datos se genera en formato de una estructura:

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

donde: DE1.DO - matriz de las formas de ondas de tensiones y corrientes; DE1.Df - matriz de frecuencia; DE1.Dnr - matriz de velocidad; DE1.DN - celda de datos nominales de los motores agregados e individuales.

Un resumen, de los resultados de las mediciones en valores promedios por cada motor agregado aparece en la Tabla 3.3. Las magnitudes fundamentales que caracterizan estas barras son: tensión, desbalance de tensión y factor de potencia. De esta forma las mediciones no se identifican con el tipo de carga que se caracteriza (motor de

inducción) y sucede sin tener en cuentas las pérdidas, el factor de carga y la eficiencia de las cargas conectadas. La información más importante que se deduce de esta tabla es el alto factor de potencia con un promedio de 0.91; esto indica la racionalidad del nivel de potencia en el suministro para obtener la potencia útil en la barra. Sin embargo no explica acerca de la eficiencia de la transformación de potencia en la barra.

Tabla 3.3. Valores promedios de las mediciones principales para la barra OH-1 y UG-5.

<i>Magg</i>	Denominación de Barras	<i>I_a</i> (A)	<i>I_b</i> (A)	<i>I_c</i> (A)	<i>U_{ab}</i> (V)	<i>U_{bc}</i> (V)	<i>U_{ca}</i> (V)	<i>Des_b</i> (%)	<i>P</i> (kW)	<i>cosφ</i> (pu)
M1	OH-1	940.39	885.53	949.72	474.54	476.25	470.20	0.76	650.67	0.906
M2	UG-5	810.80	749.32	811.24	478.70	479.95	473.27	0.85	561.36	0.921

La información completa de las mediciones en cada punto aparece en el **Anexo 3**. En ellas se sitúan por columnas: tiempo; tensión y corriente por fase. Las mediciones para las 24 h se estructuran en forma de gráfico de cargas promedios.

En la presente investigación se utiliza el modelo de motor agregado para considerar la presencia de una carga dada por motores de inducción, y para obtener las características de funcionamiento de cada motor agregado ajustadas a las condiciones reales se aplica el método del momento en el entrehierro con las mediciones que se realizan. Los resultados, en valores promedios, de las características de servicios de cada motor agregado correspondiente a la barra OH-1 y UG-5 se muestran en la Tabla 3.4, organizadas según el factor de incidencia.

Tabla 3.4. Características de funcionamiento de los motores agregados OH-1 y UG-5.

<i>Magg</i>	Denominación de Barras	<i>P₁</i> (kW)	<i>P₂</i> (kW)	<i>T_{ag}</i> (Nm)	<i>Z_p</i> (kW)	<i>n_r</i> (rpm)	<i>I_m</i> (A)	<i>k_c</i> (pu)	<i>η</i> (pu)	<i>k_{incd}</i> (%)
M1	OH-1	581.38	545.24	1532.01	36.145	3570.08	790.45	0.771	0.938	46.25
M2	UG-5	675.64	632.23	1778.32	43.404	3571.05	925.22	0.736	0.936	53.75

En la Tabla 3.4: *k_{incd}* - factor de incidencia del motor agregado; *P_n* - potencia nominal del motor agregado; *P₁* - potencia real medida en el alimentador común de la barra; *Z_p* -

pérdidas totales; I_1 - corriente por el estator; P_2 - potencia de salida del agregado; η - eficiencia del motor agregado y k_c – coeficiente de carga actual del motor agregado.

Al caracterizar energéticamente un conjunto de motores agrupado en una barra eléctrica por el modelo de motor agregado se adiciona el factor de carga, la eficiencia, las pérdidas y el factor de incidencia de las cargas conectadas, Tabla 3.4 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 coeficiente de carga promedio (0,752) explica una utilización del 75 % del total de carga instalada.

Después de caracterizar energéticamente todos los motores agregados es necesaria la selección de aquellos que serán objeto de un análisis particular de cada una de las máquinas que lo componen.

3.2.1. Determinación del potencial de ahorro en las barras OH-1 y UG-5.

Después de adaptar los motores agregados a las condiciones reales se determina el potencial de ahorro de energía asociado a cada motor, para ello se utiliza el método que analiza el costo del ciclo de vida, partiendo de los siguientes datos:

- Vida útil del motor 12 años
- Tasa de Descuento 0,12 pu
- Costo de la Energía 0,08 USD/kWh

El motor agregado se caracteriza por datos y magnitudes que corresponden a motores reales existentes. Este hecho posibilita desarrollar programas de sustitución o reemplazo de motores y estimar el potencial de ahorro de energía. Para las barras OH-1 y UG-5 cada motor agregado identificado en el diagrama unifilar por los puntos de mediciones (Motor en Servicio, Figura 3.1) se somete a un programa de sustitución de motores y resultan nuevas propuestas (Motor Propuesto). Al motor en servicio y al motor propuesto se le aplica el mismo gráfico de carga y la diferencia de consumo de energía anual entre los dos motores representa el ahorro de energía [83]. Para las

barras OH-1 y UG-5 se representa en la Tabla 3.5 un estimado de ahorro anual por cada agregado.

Tabla 3.5. Evaluación del ahorro de energía para OH-1 y UG-5 por los agregados.

<i>Motores agregados</i>	<i>Denominación de las Barras</i>	<i>Consumo de energía anual</i>		<i>Ahorro de energía</i>
		<i>Motor Actual</i> (MWh)	<i>Motor Propuesto</i> (MWh)	<i>Anual</i> (MWh)
M2	UG-5	209,752	200,463	9,288
M1	OH-1	242,132	232,413	9,718
Resumen del total de energía consumida y ahorrada por año				
Total en Barra		451.884	432.876	19.006

En la Tabla 3.5 por “Motor Actual” se entiende el agregado adaptado a las condiciones existentes en el campo de aplicación y por “Motor Propuesto” el seleccionado para sustituir al actual.

El coeficiente de incidencia en la barra OH-1 es de 53.75 % y para UG-5 es 46.25 %. En este caso se seleccionan previamente el agregado OH-1 que su coeficiente de incidencia es superior al valor medio en barra 50%.

3.3. Comportamiento del motor agregado M1 (OH-1) en condiciones reales

El motor agregado M1 corresponde a la barra OH-1, está formado por cinco motores de inducción individuales: tres de 151 kW, uno de 86 kW y otro de 319.5 kW. Se tienen los datos nominales y las mediciones de las formas de ondas de tensión y corriente a cada motor individual y del conjunto en la estructura realizada con MATLAB “MAgregado_1.mat”.

Para el motor agregado M1 la estructura tiene la siguiente información:

```
DE1 = 1x6 struct array with fields (una estructura con 6 campos)
DE1(3)=
    DO: [3072x6 double] (Matriz de formas de ondas)
    Df: [24x1 double]   (Datos de frecuencia por mediciones)
    Dnr: []              (Datos de velocidad)
    DN: [1x13 cell]     (Datos nominales)
```

Esta estructura incluye los datos resumidos de seis motores: un motor agregado DE1(1) y cinco motores de inducción individuales DE1(2), DE1(3), DE1(4), DE1(5) y DE1(6). La matriz de velocidad está vacía porque no se dispone de estas mediciones.

Tanto el motor agregado OH-1 (M1) como sus integrantes MI-1; MI-2; MI-3; MI-4 y MI-5 se caracterizan por un gráfico de carga, que se obtiene cuando se aplica el método del momento en el entrehierro.

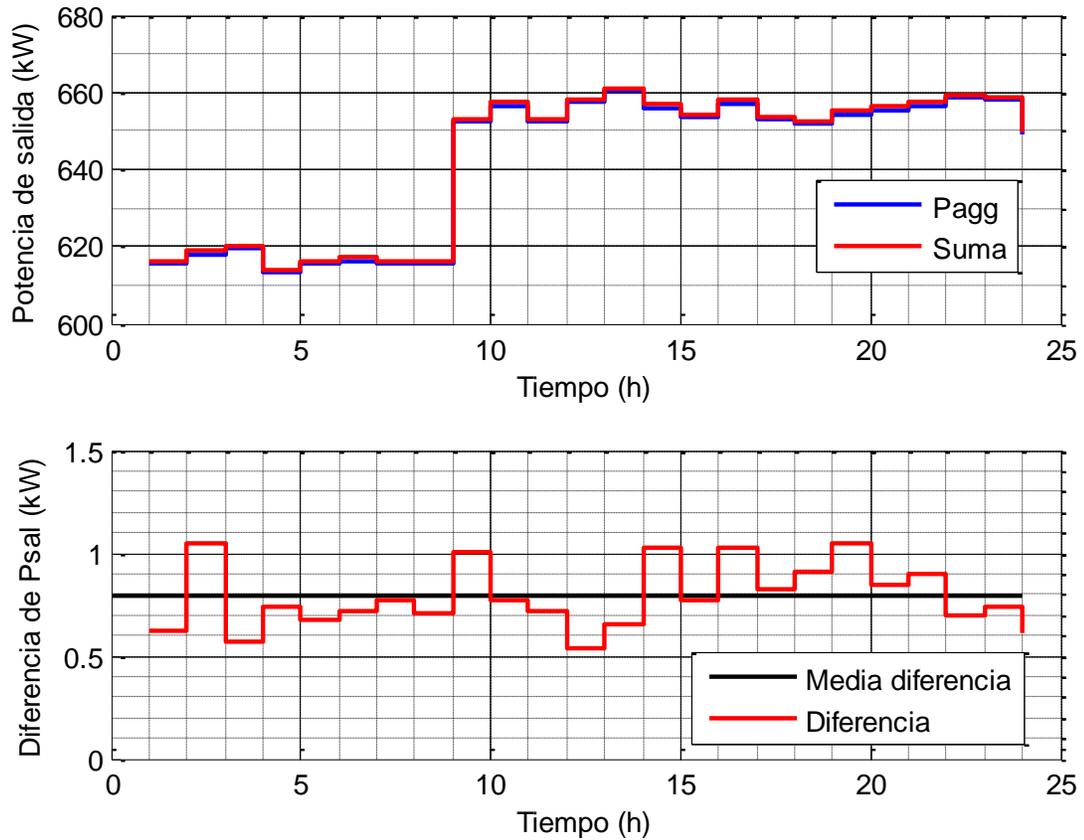


Figura 3.3. Potencia de salida por suma de motores individuales vs agregado OH-1

La Figura 3.3, en la parte superior, muestra las potencias de salidas del motor OH-1 obtenidas a través del agregado directamente (Pagg) con valor medio igual a 642,12 kW; y por suma de la potencia de salida de cada motor individual (Suma) con promedio de 642,91 kW, resultados de la aplicación del método del momento en el entrehierro; en la parte inferior la diferencias entre ambas vías, con valor medio de 0,79 kW o 0,12 % con respecto a la potencia obtenida por suma.

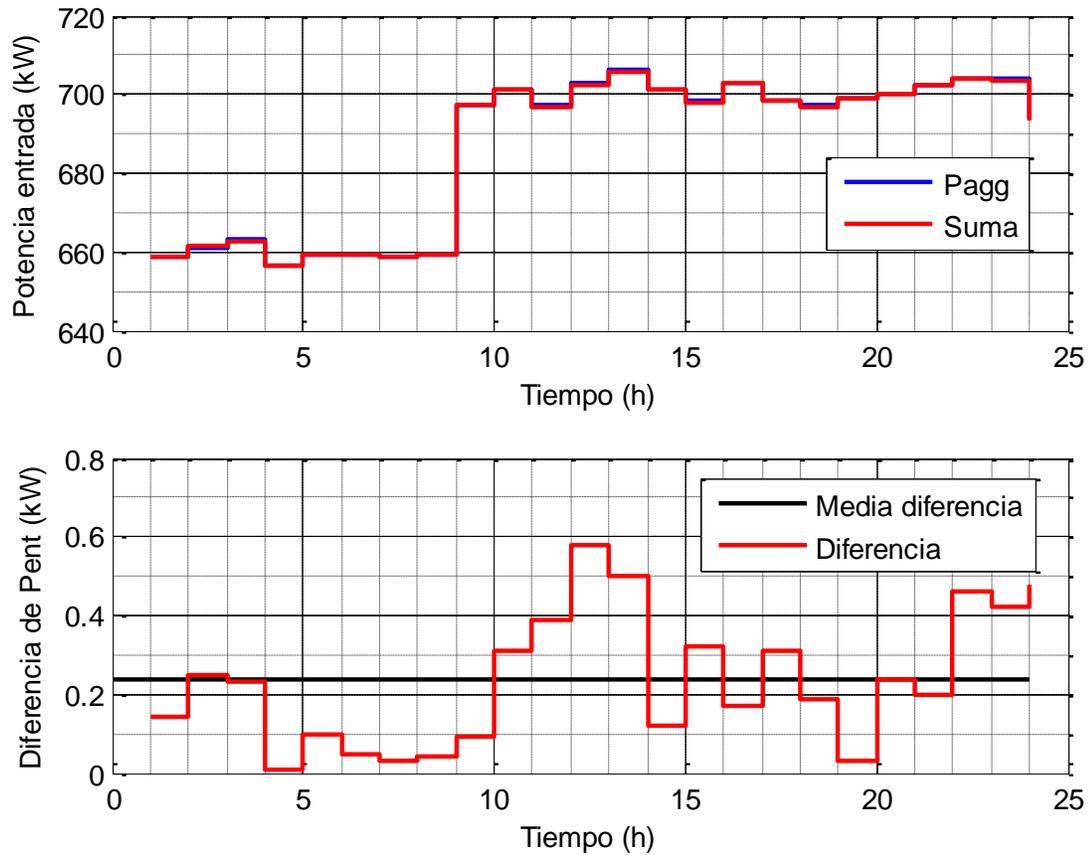


Figura 3.4. Potencia de entrada por suma de motores individuales vs agregado OH-1

La Figura 3.4, en la parte superior, muestra las potencias de entradas del motor OH-1 obtenidas a través del agregado directamente (Pagg) con valor medio igual a 686,87 kW, y por suma de la potencia de salida de cada motor individual (Suma) con media de 686,65 kW; en la parte inferior la diferencias entre ambas vías, con valor medio de 0,24 kW o 0,034 % con respecto a la potencia obtenida por suma. Tanto en la Figura 3.3 como en la Figura 3.4 existe una correspondencia entre el agregado y el equivalente por suma de motores individuales, en el comportamiento de las potencias de salida y de entrada, respectivamente; también existirá correspondencia en la eficiencia y las pérdidas que dependen directamente de estas magnitudes.

Los resultados promedios de aplicar el método del momento en el entrehierro resumen las características que dan el comportamiento energético del motor agregado OH-1 como se muestran en la Tabla 3.6, ordenadas según el coeficiente de incidencia.

Tabla 3.6. Características de funcionamiento de los motores individuales del OH-1.

<i>M. Ind.</i>	<i>Denominación del motor</i>	P_1 (kW)	P_2 (kW)	T_{ag} (Nm)	Z_p (kW)	n_r (rpm)	I_m (A)	k_c (pu)	η (pu)	k_{incd} (%)
M4	343-PU-1A	79.37	74.78	633.18	4.588	1185.18	109.37	0.870	0.942	11.559
M1	337-PU-1A	138.67	130.09	730.50	8.584	1785.45	188.68	0.862	0.938	20.195
M2	337-PU-1B	147.57	138.67	777.51	8.894	1784.51	201.42	0.918	0.940	21.491
M3	337-PU-1E	150.66	141.38	792.42	9.277	1784.08	206.04	0.936	0.938	21.941
M5	MCC2	170.39	157.98	452.97	12.403	3577.92	237.37	0.494	0.927	24.814
Magg		686.87	642.12	1805.16	44.747	3570.88	942.89	0.748	0.935	

Para valorar el comportamiento del motor agregado y los motores individuales se incluye la selección de nuevos motores, que con las mismas cargas aplicadas en el eje sea posible obtener las características de servicios. La selección se realiza con la aplicación del método de la potencia equivalente. La Figura 3.5 muestra las potencias de entrada para el motor agregado OH-1 (Magg) y los motores que lo integran (MI-1, MI-2, MI-3, MI-4 y MI-5), 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.

La diferencia entre la potencia de entrada del motor agregado nominal, en servicio, con respecto a la potencia real que se demanda establece un bajo coeficiente de carga (0,748). El resultado para el agregado se refleja en el motor individual que lo integra MI-5, destacándose el bajo coeficiente de carga (0,49).

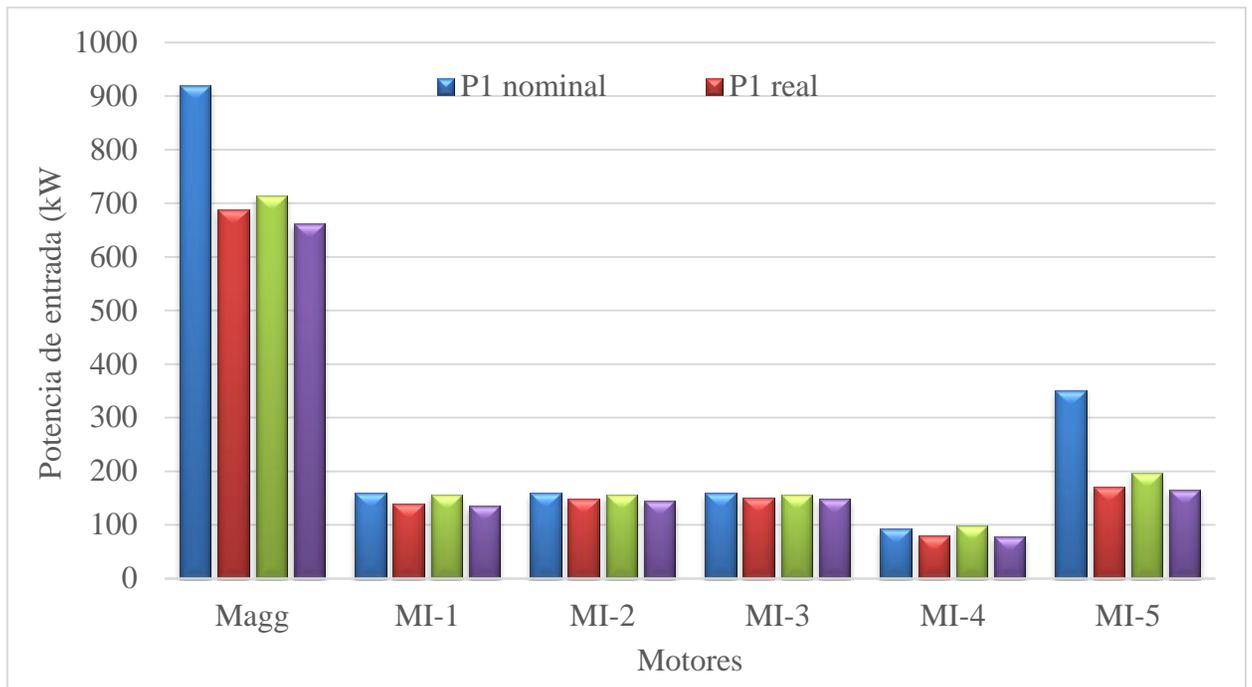


Figura 3.5. Potencia para el agregado OH-1 y los motores individuales.

Es de notar que la eficiencia es alta a pesar de un coeficiente de carga bajo como sucede en motores de inducción de potencia nominal superior a los 20 kW, a pesar que en las nuevas propuestas, siempre existe una correspondencia con alto factor de carga.

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.

3.3.1. Potencial de ahorro asociado al motor agregado M1 (OH-1)

Al determinar el potencial de ahorro asociado al motor agregado M1 (OH-1) se utiliza el método que analiza el costo del ciclo de vida. Aquí son necesarios los elementos de selección de motores, ya que a este motor equivalente lo integran máquinas de inducción individuales.

Los resultados de la evaluación del potencial de ahorro de energía del motor agregado M1 (OH-1) se muestran en la Tabla 3.7. La energía consumida por el motor agregado actual es 5934,527 **MWh** y la suma de los motores individuales 5932,702 **MWh** para una diferencia entre las dos vías de 1,82 **MWh** y un error relativo a la suma de 0.031 %. Semejantes resultados se obtienen para el motor propuesto con un error relativo entre ambas vías de 0.116 %. El potencial de ahorro 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 M1 (OH-1) es 5.95%, menor al 10 % establecido como criterio estándar. Esto demuestra la efectividad del motor agregado como equivalente del grupo de motores en comportamiento energético.

Tabla 3.7. Potencial de ahorro de energía del motor agregado M1 (OH-1).

<i>Motor</i>	<i>Denominación del motor</i>	<i>Consumo energía anual</i>		<i>Ahorro de energía</i>	
		Motor Actual (MWh)	Motor Propuesto (MWh)	Anual (MWh)	PRI (años)
M1	337-PU-1A	1198,121	1170,744	27,377	5,43
M2	337-PU-1B	1274,985	1249,039	25,945	5,73
M3	337-PU-1E	1301,681	1273,809	27,872	5,33
M4	343-PU-1A	685,772	681,098	4,674	25,39
M5	MCC2	1472,143	1428,750	43,392	3,55
Suma y porcentajes					
Suma		5932,702	5803,440	129,262	
Agregado		5934,527	5810,166	124,361	
Error (%)		-0,031	0,116	-3,791	

El coeficiente de incidencia medio para los motores individuales tiene un valor de 20 %, según aparece en la Tabla 3.7. También se ha reflejado en la Tabla 3.7 el período de recuperación de la inversión (PRI) como elementos a considerar en la evaluación energética de motores de inducción. Estos factores permiten priorizar en el análisis de

los motores individuales que integran al motor agregado OH-1, al motor del centro de control de motores MCC2 con un coeficiente de incidencia de 43.392 % y un PRI de 3.55 años; también coincide con un bajo coeficiente de carga 0.494 y el de menor eficiencia.

3.4. Adaptación del motor agregado M2 (UG-5) a las condiciones reales

El motor agregado M2 corresponde al UG-5 y está formado por cuatro motores de inducción individuales dos de 151 kW, uno de 86 kW y el otro de 319.5 kW. Se tienen los datos nominales y las mediciones de las formas de ondas de tensión y corriente a cada motor individual y del conjunto en la estructura realizada con MATLAB "MAgregado_2.mat".

Para el motor agregado M2 la estructura tiene la siguiente información:

```
DE1 = 1x4 struct array with fields (una estructura con 5 campos)
DE1(3) =
    DO: [3072x6 double] (Matriz de formas de ondas)
    Df: [24x1 double]   (Datos de frecuencia por mediciones)
    Dnr: []             (Datos de velocidad)
    DN: [1x13 cell]     (Datos nominales)
```

Esta estructura incluye los datos resumidos de cuatro motores: un motor agregado DE1(1) y cuatro motores de inducción individuales DE1(2), DE1(3), DE1(4) y DE1(5). La matriz de velocidad está vacía porque no se dispone de estas mediciones.

Tanto el motor agregado UG-5 (M2) como sus integrantes MI-1; MI-2; MI-3 y MI-4 se caracterizan por un gráfico de carga, que se obtiene cuando se aplica el método del momento en el entrehierro.

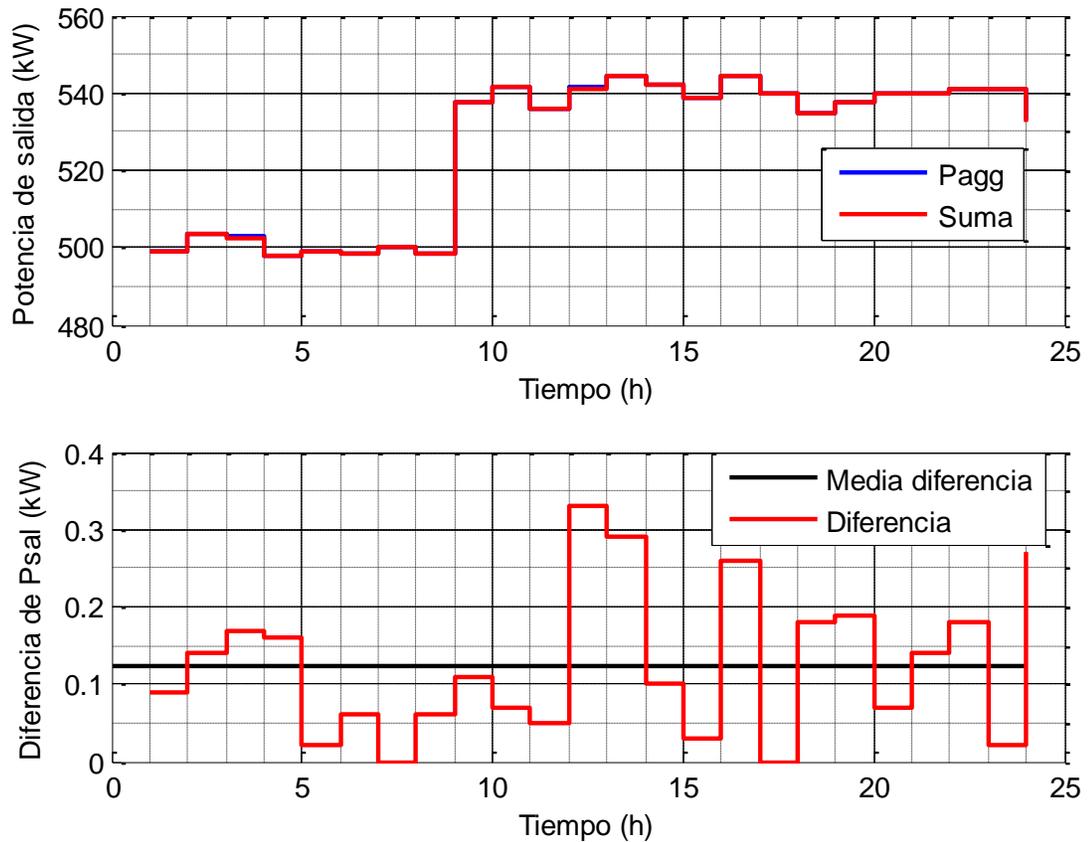


Figura 3.6. Potencia de salida por suma de motores individuales vs agregado UG-5.

La Figura 3.6, en la parte superior, muestra las potencias de salidas del motor UG-5 obtenidas a través del agregado directamente (Pagg) con valor medio igual a 526,37 kW; y por suma de la potencia de salida de cada motor individual (Suma) con promedio de 526,32 kW, resultados de la aplicación del método del momento en el entrehierro; en la parte inferior la diferencias entre ambas vías, con valor medio de 0,13 kW o 0,024 % con respecto a la potencia obtenida por suma.

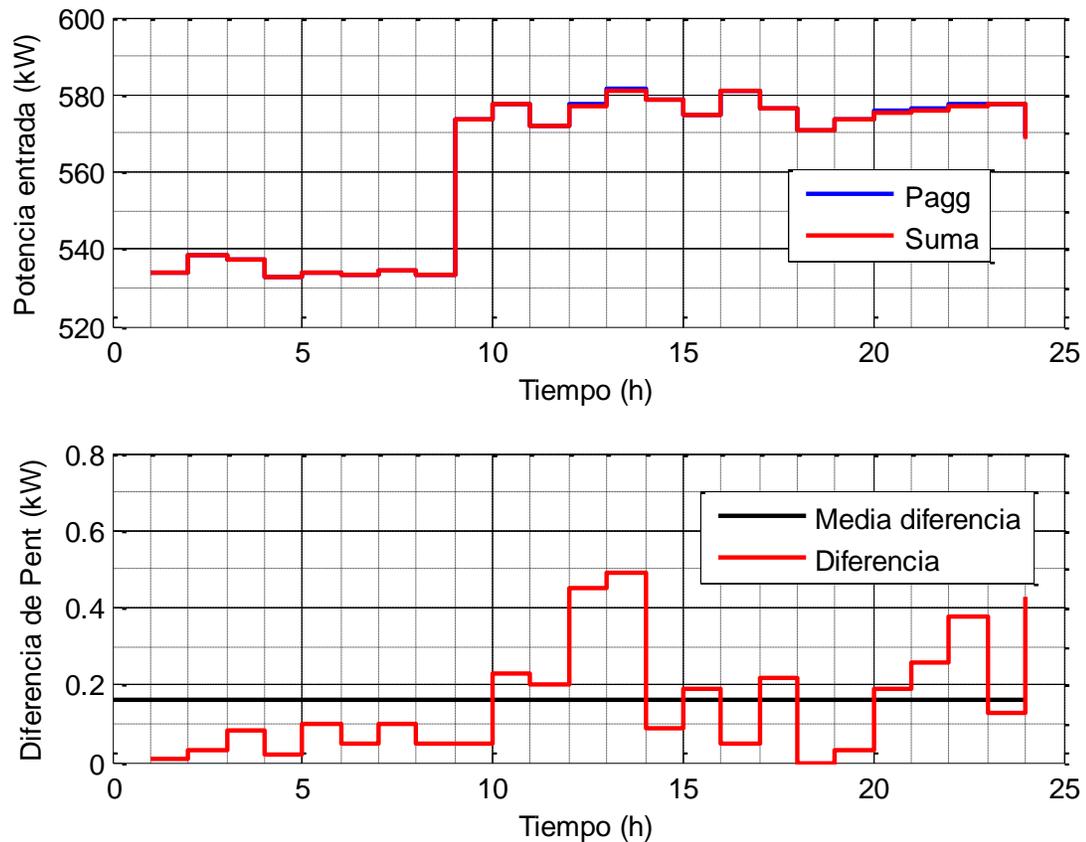


Figura 3.7. Potencia de entrada por suma de motores individuales vs agregado UG-5

La Figura 3.7, en la parte superior, muestra las potencias de entradas del motor UG-5 obtenidas a través del agregado directamente (Pagg) con valor medio igual a 562,14 kW, y por suma de la potencia de salida de cada motor individual (Suma) con media de 562,01 kW; en la parte inferior la diferencias entre ambas vías, con valor medio de 0,16kW o 0,028 % con respecto a la potencia obtenida por suma. Tanto en la Figura 3.6 como en la Figura 3.7 existe una correspondencia entre el agregado y el equivalente por suma de motores individuales, en el comportamiento de las potencias de salida y de entrada, respectivamente; también existirá correspondencia en la eficiencia y las pérdidas que dependen directamente de estas magnitudes.

Los resultados promedios de aplicar el método del momento en el entrehierro resumen las características que dan el comportamiento energético del motor agregado UG-5 como se muestran en la Tabla 3.8, ordenadas según el coeficiente de incidencia.

Tabla 3.8. Características de funcionamiento de los motores individuales del UG-5.

<i>M. Ind.</i>	<i>Denominación del motor</i>	P_1 (kW)	P_2 (kW)	T_{ag} (Nm)	Z_p (kW)	n_r (rpm)	I_m (A)	k_c (pu)	η (pu)	k_{incd} (%)
M3	343-PU-1B	85.39	80.18	678.05	5.208	1184.07	117.12	0.932	0.939	15.193
M1	337-PU-1C	148.30	139.52	782.19	8.780	1784.33	202.31	0.924	0.941	26.388
M2	337-PU-1D	157.93	148.63	832.09	9.304	1783.40	215.66	0.984	0.941	28.101
M4	MCC2	170.39	157.98	452.97	12.403	3577.92	237.37	0.494	0.927	30.317
Magg		562.14	526.37	1480.95	35.768	3570.20	772.46	0.744	0.936	

Para valorar el comportamiento del motor agregado y los motores individuales se incluye la selección de nuevos motores, que con las mismas cargas aplicadas en el eje sea posible obtener las características de servicios. La selección se realiza con la aplicación del método de la potencia equivalente. La Figura 3.8 muestra las potencias de entrada para el motor agregado UG-5 (Magg) y los motores que lo integran (MI-1, MI-2, MI-3 y MI-4), 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.

La diferencia entre la potencia de entrada del motor agregado nominal, en servicio, con respecto a la potencia real que se demanda establece un bajo coeficiente de carga (0,748). El resultado para el agregado se refleja en el motor individual que lo integra MI-4, destacándose el bajo coeficiente de carga (0,49).

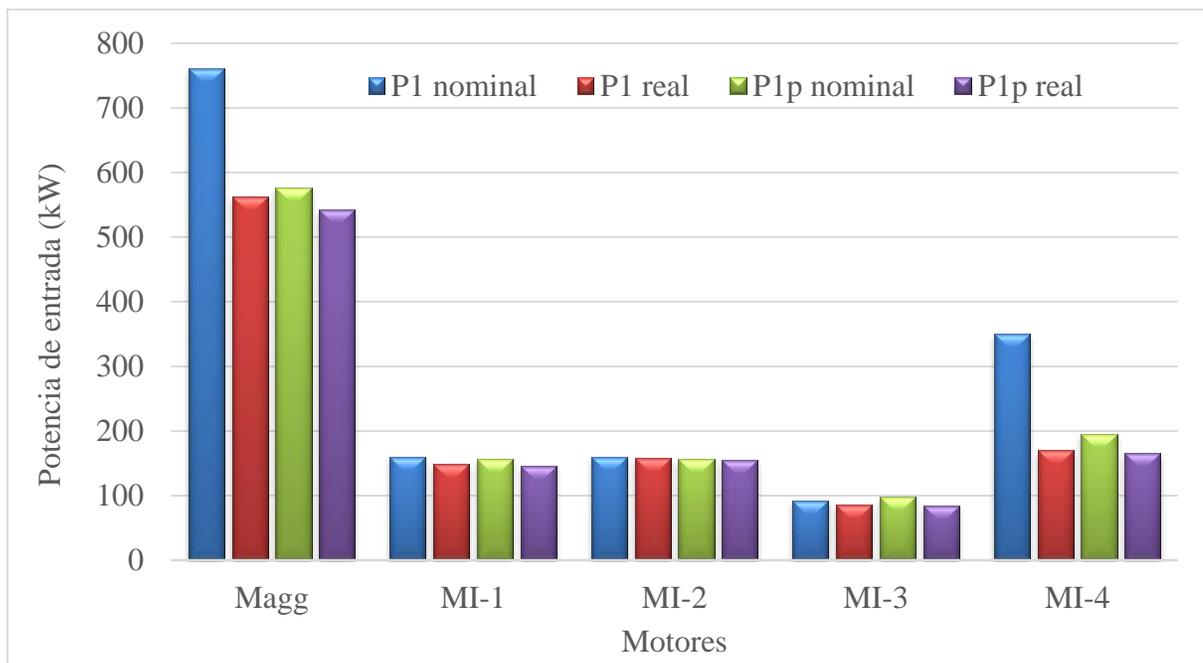


Figura 3.8. Potencia para el agregado UG-5 y los motores individuales.

Es de notar que la eficiencia es alta a pesar de un coeficiente de carga bajo como sucede en motores de inducción de potencia nominales superiores a los 20 kW, a pesar que en las nuevas propuestas, siempre existe una correspondencia con alto factor de carga.

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.

3.4.1. Potencial de ahorro asociado al motor agregado M2 (UG-5)

Al determinar el potencial de ahorro asociado al motor agregado M2 (UG-5) se utiliza el método que analiza el costo del ciclo de vida. Aquí son necesarios los elementos de selección de motores, ya que a este motor equivalente lo integran máquinas de inducción individuales.

Los resultados de la evaluación del potencial de ahorro de energía del motor agregado M2 (UG-5) se muestran en la Tabla 3.9. La energía consumida por el motor agregado actual es 4856,862 **MWh** y la suma de los motores individuales 4855,778 **MWh** para una diferencia entre las dos vías de 1.084 **MWh** y un error relativo a la suma de -0.22 %. Semejantes resultados se obtienen para el motor propuesto con un error relativo entre ambas vías de 0,097 %. El potencial de ahorro 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 M2 (UG-5) es -3,57 %, menor al 10 % establecido como criterio estándar. Esto demuestra la efectividad del motor agregado como equivalente del grupo de motores en comportamiento energético.

Tabla 3.9. Potencial de ahorro de energía del motor agregado M2 (UG-5).

<i>Motor</i>	<i>Denominación del motor</i>	<i>Consumo energía anual</i>		<i>Ahorro de energía</i>	
		Motor Actual (MWh)	Motor Propuesto (MWh)	Anual (MWh)	PRI (años)
M1	337-PU-1A	1281,334	1256,802	24,531	6,06
M2	337-PU-1B	1364,546	1340,354	24,192	6,14
M3	337-PU-1E	737,755	730,769	6,986	16,99
M4	MCC2	1472,143	1428,750	43,392	3,55
Suma y porcentajes					
Suma		4855,778	4756,675	99,103	
Agregado		4856,862	4761,301	95,561	
Error (%)		-0.22	0,097	-3,57	

El coeficiente de incidencia medio para los motores individuales tiene un valor de 20 %, según aparece en la Tabla 3.9. También se ha reflejado en la Tabla 3.9 el período de recuperación de la inversión (PRI) como elementos a considerar en la evaluación energética de motores de inducción. Estos factores permiten priorizar en el análisis de

los motores individuales que integran al motor agregado UG-5, al motor del centro de control de motores MCC2 con un coeficiente de incidencia de 43.392 % y un PRI de 3.55 años; también coincide con un bajo coeficiente de carga 0.494 y el de menor eficiencia.

3.5. Conclusiones Capítulo 3

1. En la caracterización energética de barras eléctricas donde concurren gran cantidad de motores asíncronos, el uso de motores agregados reduce el número de carga en el análisis y el volumen de cálculo a realizar, si se compara con caracterizar energéticamente cada motor individualmente.
2. La combinación de las mediciones en los puntos de alimentación común, los parámetros del motor agregado y el algoritmo del método del momento en el entrehierro, permiten obtener las características que determinan el comportamiento energético a cualquier estado de carga, definiendo el factor de incidencia que simplifica la cantidad de motores a realizarle el análisis energético individual, al mismo tiempo que selecciona el de mayor peso en la carga real.
3. La diferencia entre la energía consumida por el motor agregado M1 (OH-1) y la suma de los motores individuales tiene un error relativo a la suma de -0,031 %. El error de estimar el potencial de ahorro por motores individuales o por el motor agregado OH-1 es 0,116 %, menor al 10 % establecido como criterio estándar. Esto demuestra la efectividad del motor agregado como equivalente del grupo de motores en comportamiento energético.

Conclusiones y Recomendaciones

CONCLUSIONES GENERALES

1. Los métodos desarrollados para determinar la eficiencia y el grado de carga de las máquinas asincrónicas se desarrollan para evaluación de motores individuales, sin tener en cuenta que cuando el número de motores es elevado, no es representativa para la industria, sitio donde finalmente tiene lugar el consumo y uso final de la energía eléctrica, de aquí surge la necesidad de agruparlo en uno equivalente denominado motor agregado y utilizarlo con fines energéticos, aplicación sin referencia en la literatura.
2. El procedimiento propuesto combina la utilización de un balance de potencia y el modelo matemático del motor de inducción, para obtener motores agregados en barras de potencia eléctrica caracterizados por sus principales datos nominales y los parámetros de circuito equivalente, reduciendo el número de carga a analizar y el volumen de cálculo a realizar.
3. La combinación de las mediciones en barras, los parámetros del motor agregado y el algoritmo del método del momento en el entrehierro, permiten adaptar el motor agregado a las condiciones reales de operación en barras, obtener las características energéticas a cualquier estado de carga (potencia en el eje, eficiencia, etc.).
4. Las diferencias relativas entre la energía consumida y la potencia demandada por el motor agregado con la suma de los motores de inducción individuales, no alcanzan el 10 %, demostrando que el motor agregado puede representar el comportamiento energético del conjunto de motores ubicados en una misma barra de potencia eléctrica, y junto al método del momento en el entrehierro ofrece la posibilidad de identificar potenciales de ahorro en cargas con motores de inducción, sin la necesidad de analizar individualmente cada uno de ellos, disminuyendo el tiempo de trabajo y el volumen de cálculo a realizar.

RECOMENDACIONES

1. Extender el procedimiento de la caracterización energética con el uso del motor agregado a los accionamientos polimotóricos.
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] HSU, J. S.; SCOGGINS, B. P., "Field Test of Motor Efficiency and Load Changes Through Air-Gap Torque". *IEEE Transaction on Energy Conversion*, September 1995, vol. 10, no. 3, p. 477- 483.
- [2] HSU, J. S.; KUECK, J. D.; *et al.*, "Comparison of induction Motor Field Efficiency Evaluation Methods". *IEEE Transacctions on Industry Applications*, Jan/Feb 1998, vol. 34, no. 1, p. 117-125.
- [3] HSU, J. S.; SORENSON, P. J., "Field Assessment of Induction Motor Efficiency through Air-Gap Torque". *IEEE Transsaction on Energy Conversion*, September 1996, vol. 11, no. 3, p. 489–494.
- [4] BIN, L.; HABETLER, T., G. ; HARLEY, R., 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, vol. 3, p. 1533-1540.
- [5] BIN, L.; HABETLER, T., G.; HARLEY, R., G., "A survey of efficiency-estimation methods of in-service induction motors". *IEEE Transaction on Industry Applications*, Jul./Aug 2006, vol. 42, no. 4, p. 924-933.
- [6] FERREIRA, F.; DE ALMEIDA, A., "Considerations on In Field Induction Motor Load Estimation Methods". In *18th Inter. Conf. on Electrical Machines (ICEM'08), Conf. Proc.* Vilamoura, Portugal, 2008.
- [7] GÓMEZ, J.; QUISPE, E.; *et al.*, "Estimation of induction motor efficiency in-situ under unbalanced voltages using genetic algorithms.". *Proc. IEEE Int. Conf. Electr. Mach.*, 2008, p. 1-4.
- [8] HERNDLER, B.; BARENDSE, P.; KHAN, M. A., "Error analysis of efficiency estimation methods for induction motors". In *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2011 IEEE International*. Niagara Falls, ON 2011, p. 1498 - 1503
- [9] SIRAKI, A. G.; PILLAY, P., "An In Situ Efficiency Estimation Technique for Induction Machines Working With Unbalanced Supplies.". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2012, vol. 27, no. 1, p. 85-95.

- [10] CUMMINGS, P. G.; BOWERS, W. D.; MARTINY, W. J., "Induction motor efficiency test methods". *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, May/June 1981, vol. IA, no. 17, p. 253–272.
- [11] BONNETT, A. H., "An update on ac induction motor efficiency". *IEEE Transaction Industrial Application*, Sept./Oct. 1994, vol. 30, p. 1362–1372.
- [12] HSU, J. S.; OTADUY, P. J.; KUECK, J. D., "Efficiency and reliability assessments of retrofitted high-efficiency motors". In *Conf. Rec. IEEEIAS Annu. Meeting*. Lake Buena Vista, 1995, p. 2745–2751.
- [13] GRAY, G. G.; MARTINY, W. J., "Efficiency testing of medium induction motors. A comment on IEEE Std 112-1991". *IEEE Transaction on Energy Conversion*, September 1996, vol. 11, no. 3, p. 495-499.
- [14] NILSSON, N. E., "A comparison of ANSI and IEC standards for power station polyphase induction (asynchronous) motors". *IEEE Transaction on Energy Conversion*, September 1996, vol. 11, no. 3, p. 500-507.
- [15] GHAI, N. K., "IEC and NEMA standards for large squirrel-cage induction motors. A comparison". *IEEE Transaction on Energy Conversion*, September 1999, vol. 14, no. 3, p. 545-552.
- [16] RENIER, B.; HAMEYER, K.; BELMANS, R., "Comparison of standards for determining efficiency of three phase induction motors". *IEEE Transaction on Energy Conversion*, September 1999, vol. 14, no. 3, p. 512–517.
- [17] DE ALMEIDA, A.; FERREIRA, F., "Efficiency Testing of Electric Induction Motors". 2006. Available from Internet:<http://www.clasponline.org/download/Energy_Testing/2000/116/Almeida_paper.pdf>.
- [18] IEC 60034-2-1, "Rotatory Electrical Machines part 2-1, Standard Methodes For Determiny Losses And Efficient From Tests.". In. Switzerland: Suiza, 2007.
- [19] MARTINEZ, E.; TORRENT, M., "Determinación del rendimiento en motores de inducción trifásicos según la Norma IEC 60034-2-1". *Técnica Industrial*, Julio - Agosto 2009, vol. 282, p. 36 – 41.
- [20] IEEE STANDARD 112., "IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators.". In *American National Standard*. New York, USA, 2004.

- [21] NEMA, "Standards Publication MG 1-2003, Revision 1-2004, Motors and Generators". In. Washington, D.C, 2004.
- [22] DOUGLAS, J. G., "Efficacy of methods for estimating in-service motor efficiency". 1997. Available from Internet:<<http://www.dynamics-research.com/MAS1000/ITMAS-1000.htm>>.
- [23] DE LA ROSA, E. V., "Metodología para la determinación y mejoramiento de los motores asincrónicos en la industria". In. Camagüey: Universidad de Camagüey, 1998.
- [24] MOTOR CHALLENGE, "Determining electric motor load and efficiency". In ENERGY, F. S. A. P. O. T. U. S. D. O., 1999.
- [25] COSTA M, A.; VILARAGUT, M., "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.
- [26] HOLMQUIST, J. R.; ROOKS, J. A.; RICHTER, M. E., "Practical Approach for Determining Motor Efficiency in the Field Using Calculated and Measured Values". *IEEE Transaction on Industry Applications*, january/february 2004, vol. 40, no. 1, p. 242-248.
- [27] VILARAGUT, M.; COSTA, A.; *et al.*, "Métodos para la determinación de la eficiencia energética en los motores de inducción trifásicos". *Ecosolar*, octubre-diciembre 2004, no. 10.
- [28] BECNEL, C. L.; AL., E., "Determining motor efficiency by field testing". *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, May/June 1987, vol. IA, no. 23, p. 440–443.
- [29] STEELE, B.; MINHAZ, R.; L'HEUREUX, G., "Field Estimation of Induction Motor Efficiency". *Project proposal submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Bachelor of Science in Electrical and Computer Engineering in the Faculty of Engineering of the University of Manitoba* [Type of Work]. 2005. Available from Internet:<[http://www.ee.umanitoba.ca/.../coursehome/c24400/24_400/2006-07/FinalReports/G19 Final Report 2006.pdf](http://www.ee.umanitoba.ca/.../coursehome/c24400/24_400/2006-07/FinalReports/G19%20Final%20Report%202006.pdf)>.

- [30] MCCOY, G. A.; LITMAN, T.; *et al.*, "Energy-Efficient Electric Motor Selection Handbook". Washington: Olympia 1993. 52 p.
- [31] RUBIN, N.; HARLEY, R.; DIANA, G., "Evaluation of Various Slip Estimation Techniques for an Induction Machine Operating Under Field-Oriented Control Conditions". *IEEE Transactions on Industry Applications*, November / December 1992, vol. 28, no. 6.
- [32] BOGLIETTI, A.; FERRARIS, P.; *et al.*, "Induction motor equivalent circuit parameters determination from standard tests made with inverter supply". In.: Sixth International Conference, 1993, vol. Issue, p. 271 – 276.
- [33] KUECK, J. D.; GRAY, R. J.; *et al.*, "Assessment of Available Methods for Evaluating In-Service Motor Efficiency". In.: ORNL/TM-13237, 1996.
- [34] CATHEY, J. J., "Electric Machines: Analysis and Design Applying MATLAB". New York USA: McGraw-Hill, 2003.
- [35] COSTA, M. A.; VILARAGUT, L. M.; *et al.*, "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.
- [36] DE ALMEIDA, A. I., "Characterization of Motor Systems in the EU. Improving the Penetration of Energy Efficient. Motors and Drives. SAVE II Study.". 2006. Available from Internet:<www.iea.org/textbase/work/2006/motor/De%20ALMEIDA%20IEA-Motor-Part-I-15-May-06-Final.pdf>.
- [37] DE LEÓN, C., "Metodologías para el análisis energético de los motores en servicio y del empleo de accionamientos eficientes". In. Santa Clara: Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, UCLV, 2002.
- [38] FIGURA, R.; SZYCHTA, E.; SZYCHTA, L., "In-Service Efficiency Estimation with the use Modified Air-Gap Torque Method for Squirrel-Cage Induction Motor". *Electronics and Electrical Engineering*, 15/02/2011 2011, vol. 8, no. 114, p. 51 - 56.

- [39] HERNDLER, B.; BARENDSE, P.; KHAN, M. A., "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, p. 1516 - 1521
- [40] VAN ROY, P.; BELMANS, R., "Assessment of Efficiency of Low Voltage, Three Phase Motors". In *Proceedings of Energy Efficiency in Motor Driven Systems (EEMODS'02) 2002*, p. 6.
- [41] ZHANG, H.; ZANCHETTA, P.; *et al.*, "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, p. 913 - 917
- [42] BIN, L.; WENPING, C.; *et al.*, "Non-Intrusive Efficiency Determination of In-Service Induction Motors using Genetic Algorithm and Air-Gap Torque Methods". In *Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE*. New Orleans, LA 2007, p. 1186 - 1192
- [43] HURST, K. D.; HABETLER, T. G., "Sensorless Speed Measurement Using Current Harmonic Spectral Estimation in Induction Machine Drives". *IEEE Transactions on Power Electronics*, 1996, vol. 11, no. 1, p. 66-73.
- [44] HENAO, H.; RAZICK, H.; CAPOLINO, G. A., "Analytical Approach of the Stator Current Frequency Harmonics Computation for Detection of Induction Machine Rotor Faults". *IEEE Transaction on Industry Application*, Jun 2005, vol. 41, no. 3.
- [45] BENSALAM, Y.; ABOUD, W.; *et al.*, "A Sensorless Neural Network Speed Control of Induction Motor Drive". *International Journal of Signal Control and Engineering Application*, 2008, vol. 1, no. 2, p. 150 158.
- [46] AKBABA, M.; FAKHRO, S. Q., "New model for single-unit representation of induction motor loads, including skin effect, for power system transient stability studies". *IEEE Proceedings-5*, November 1992, vol. 139 no. 6.
- [47] AREE, P., "Effects of Static and Dynamic Load Models on Power Svstem Load Representation". *Thammasat Int. J. Sc. Tech.*, Sep-Dec 2002, vol. 7, no. 3.
- [48] VENIKOV, V. A., "Procesos transitorios electromecánicos en los sistemas eléctricos de potencia". Moscú: Mir, 1988. 502 p. ISBN 5-03-000084-4.

- [49] PILLAY, P.; SABUR, S. M., "Use of reduced order models to calculate reclosing transients in a refinery". In *Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting IEEE*. 1995, vol. 3, p. 2180 - 2188.
- [50] PARVEEN, T.; LEDWICH, G., "Decomposition of aggregated load: Finding induction motor fraction in real load". In *Power Engineering Conference, 2008. AUPEC '08. Australasian Universities*. Syney, NSW: ISBN 978-0-7334-2715-2, 2008, p. 1-6.
- [51] PILLAY, P.; SABUR, S.; HAQ, M., "A model for induction motor aggregation for power system studies". *Electric Power System Research*, 1997, vol. 42, p. 225-228.
- [52] PEDRA, J.; SAINZ, L.; CÓRCOLES, F., "Study of Aggregate Models for Squirrel-Cage Induction Motors". *IEEE Transactions on Power Systems*, August 2005, vol. 20, no. 3, p. 1519-1527.
- [53] LOUIE, K.-W., "A New Way to Represent the Aggregate Effects of Induction Motors at a Same Bus in a Power System". *International Journal of Applied Science and Engineering*, 2006, vol. 4, no. 1, p. 91-102.
- [54] ROGERS, G. J.; MANNO, J. D.; ALDEN, R. T., "An Aggregate Induction Motor Model for Industrial Plants". *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1984, vol. 103, no. 4, p. 683-690.
- [55] RICHARDS, G. G., "Reduced order models for an induction motor group during bus transfer". *IEEE Trans. Power Syst.*, May 1989, vol. 4, no. 2, p. 494-498.
- [56] KATAOKA, T. H.; UCHIDA, S.; *et al.*, "A method for aggregation of a group of induction motor loads". In *Proc. POWERCON Perth*. Australia, 2000, p. 1683-1688.
- [57] STEPHAN, J.; BODSON, M.; CHIASSON, J., "Real-Time Estimation of the Parameters and Fluxes of Induction Motors". *IEEE Transactions on Industry Applications*, May/Jun 1994, vol. 30, no. 3, p. 746-759. .
- [58] STANKOVI, A. M.; LESIEUTRE, B. C., "A Probabilistic Approach to Aggregate Induction Machine Modeling". *IEEE Transactions on Power Systems*, November 1996, vol. 11, no. 4, p. 1983-1989.

- [59] PILLAY, P.; REFOUFI, L., "Calculation of slip energy recovery induction motor drive behavior using the equivalent circuit". In *Industry Applications Society Annual Meeting, IEEE*. 1992, vol. 1, p. 10 – 17.
- [60] QUISPE, E.; GONZÁLEZ, G.; CASTRILLÓN, R., "Medición en sitio de la eficiencia de su motor. Una comparación de metodologías prácticas". *Papel y tisú* [Type of Work]. 2006. Available from Internet:<<http://www.latinpressinc.com>>.
- [61] GÓMEZ, S. J. R., "Determinación de la Eficiencia de los Motores Asíncronos con Tensiones Desbalanceadas en Condiciones de Campo". Tesis para optar por el grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Santa Clara, 2006.
- [62] HONGBIN, Z.; QIYU, L.; XIAOHUA, W., "The aggregation method of induction motors with distribution network". In *Intelligent Systems and Knowledge Engineering (ISKE), 2010 International Conference on*. Hangzhou: ISBN 978-1-4244-6791-4, 2010, p. 445-449.
- [63] TALEB, M.; AKBABA, M.; AHDULLAH, E., "Aggregation of induction machines for power system dynamic studies". In *IEEE/ PES 1994 Winter Meet*. New York, 1994.
- [64] LOUIE, K. W.; MARTI, J. R.; DOMMEL, H. W., "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: ISBN 1-4244-1020-7, 2007.
- [65] DE SOUZA, R. L. A.; BRANDÃO, J. C.; NOGUEIRA, L. A., "Linear Parameter Estimation for Induction Machines Considering the Operating Conditions". *IEEE Transactions on Power Electronics*, January 1999, vol. 14, no. 1.
- [66] BRANDÃO, J. C.; EDGAR, C. J.; NOGUEIRA, L. M. A., "Estimating the Parameters of Induction Machines at Standstill". *IEEE Transaction on Energy Conversion*, March 2002, vol. 17, no. 1, p. 85-89.
- [67] HUANG, K. S.; WU, Q. H., "Effective identification of induction motor parameters based on fewer measurements". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, march 2002, vol. 17, no. 1, p. 55-60.

- [68] COSTA M, A.; LOPEZ FERNANDEZ, X. M.; *et al.*, "Cálculo de los Parámetros del Motor de Inducción a partir de Datos de Catálogo". *Energía y Computación*, Julio 2004, no. 01.
- [69] WANG, K.; CHIASSON, J.; *et al.*, "A Nonlinear Least-Squares Approach for Identification of the Induction Motor Parameters". *IEEE Transactions on automatic Contro*, October 2005, vol. 50, no. 10.
- [70] BOSE, B. K.; PATEL, N. R., "Quasi-fuzzy estimation of stator resistance of induction motor". *Power Electronics IEEE Transactions*, May 1988, vol. 13, no. Issue 3, p. 401 - 409.
- [71] ZAMORA, J. L.; GARCÍA-CERRADA, A., "Online Estimation of the Stator Parameters in an Induction Motor Using Only Voltage and Current Measurements". *IEEE Transactions on Industry Applications*, May/June 2000, vol. 36, no. 3, p. 805 – 816.
- [72] HA, I.-J.; LEE, S.-H., "An Online Identification Method for Both Stator and Rotor Resistances of Induction Motors without Rotational Transducers". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, August 2000, vol. 47, no. 4.
- [73] MARTINEZ, J. A.; JOHNSON, B.; GRANDE-MORAN, C., "Parameter Determination for Modeling System Transients—Part IV: Rotating Machines". *IEEE Transaction on Energy Conversion*, July 2005, vol. 20, no. 3, p. 2063 - 2072.
- [74] ROMERO, I.; PÉREZ, B., "Algoritmo para la determinación de los parámetros del motor de inducción por datos nominales". *Energética*, 2008, vol. XXIX, no. 3, p. 10-17.
- [75] ROMERO, I.; PÉREZ, B.; GÓMEZ, J., "Modelo de motor de inducción agregado aplicado en caracterización energética". *Ingeniería Mecánica*, septiembre-diciembre 2012, vol. 15, no. 3, p. 213-223.
- [76] HSU, J. S.; WOODSON, H. H.; WELDON, W. F., "Possible errors in measurement of air-gap torque pulsations of induction motors". *IEEE Transaction on Energy Conversion*, March 1992, vol. 7, no. 1, p. 202–208.
- [77] HSU, J. S., "Monitoring of defects in induction motors through air-gap torque observation". *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, Sept./Oct. 1995, vol. 31, p. 1016–1021.

- [78] BLASCO, R.; SUMNER, M.; ASHER, G. M., "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, p. 470-475.
- [79] DE ARMAS, M.; GÓMEZ, J.; VIEGO, P., "Evaluación de Motores en Servicio". In *Convención de Ingeniería Eléctrica CIE2011*. Santa Clara, Cuba, 2011.
- [80] EGUILUZ, L. I.; LAVANDERO, P.; *et al.*, "Performance Analysis of a Three-phase Induction Motor under Non-sinusoidal and Unbalanced Conditions". 1999. Available from Internet:<http://www.diee.unican.es/pdf/gijon99_2.pdf>.
- [81] ROMERO, I.; DE ARMAS, M.; *et al.*, "Evaluación energética de motores asincrónicos ante armónicos y desbalance de voltaje en una empresa minera". *Minería y Geología*, Enero - Marzo 2012, vol. 28, no. 1, p. 47-59.
- [82] DE LA ROSA, M. E.; VIEGO, F. P.; COSTA, M. A., "Incertidumbre en la evaluación del ahorro de energía por sustitución de motores eléctricos.". *Ingenierías*, Abril-Junio 2007, vol. X, no. 35, p. 27-31.
- [83] ROMERO, I.; VILARAGUT, M.; *et al.*, "Evaluación energética de motores de inducción a través del modelo de motor agregado". *Ingeniería Energética*, Mayo - Agosto 2012, vol. XXXIII, no. 2, p. 156-170.
- [84] BORROTO N., A. E.; MONTEGAUDO Y., J. P., "Gestión y Economía Energética.". Cienfuegos, Cuba: Universitaria Cienfuegos, 2006. ISBN ISBN 959-257-114-7.
- [85] PROCOBRE, "Selección Económica y Energéticamente Eficiente de Motores Eléctricos. Evamotor 1.0. Manual del Usuario". *Procobre Chile* [Type of Work]. 2005. Available from Internet:<http://www.procobre.org/procobre/pdf/inst_electricas_uso_eficiente.pdf>.
- [86] MEDARAMETLA, J. B.; COX, M. D., "Calculations and measurements of the unity plus three-phase induction motor". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, December 1992, vol. 7, no. 4.

- [87] KUECK, J. D., "Development of a method for estimating motor efficiency and analyzing motor condition". In *IEEE Pulp and Paper Ind. Tech. Conf.*, 1998, p. pp. 67-72.
- [88] WALLACE, A., Y COL., "A laboratory assessment of in-service motor efficiency testing methods". In *IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record*. Milwaukee, Wisconsin, USA, 1977.
- [89] DELL'AQUILA, A.; SALVATORE, L.; SAVINO, M., "A new test method for determination of induction motor efficiency". *IEEE Trans. Power App. Syst.*, 1984, vol. PAS-103, no. 10, p. 2961-2973.

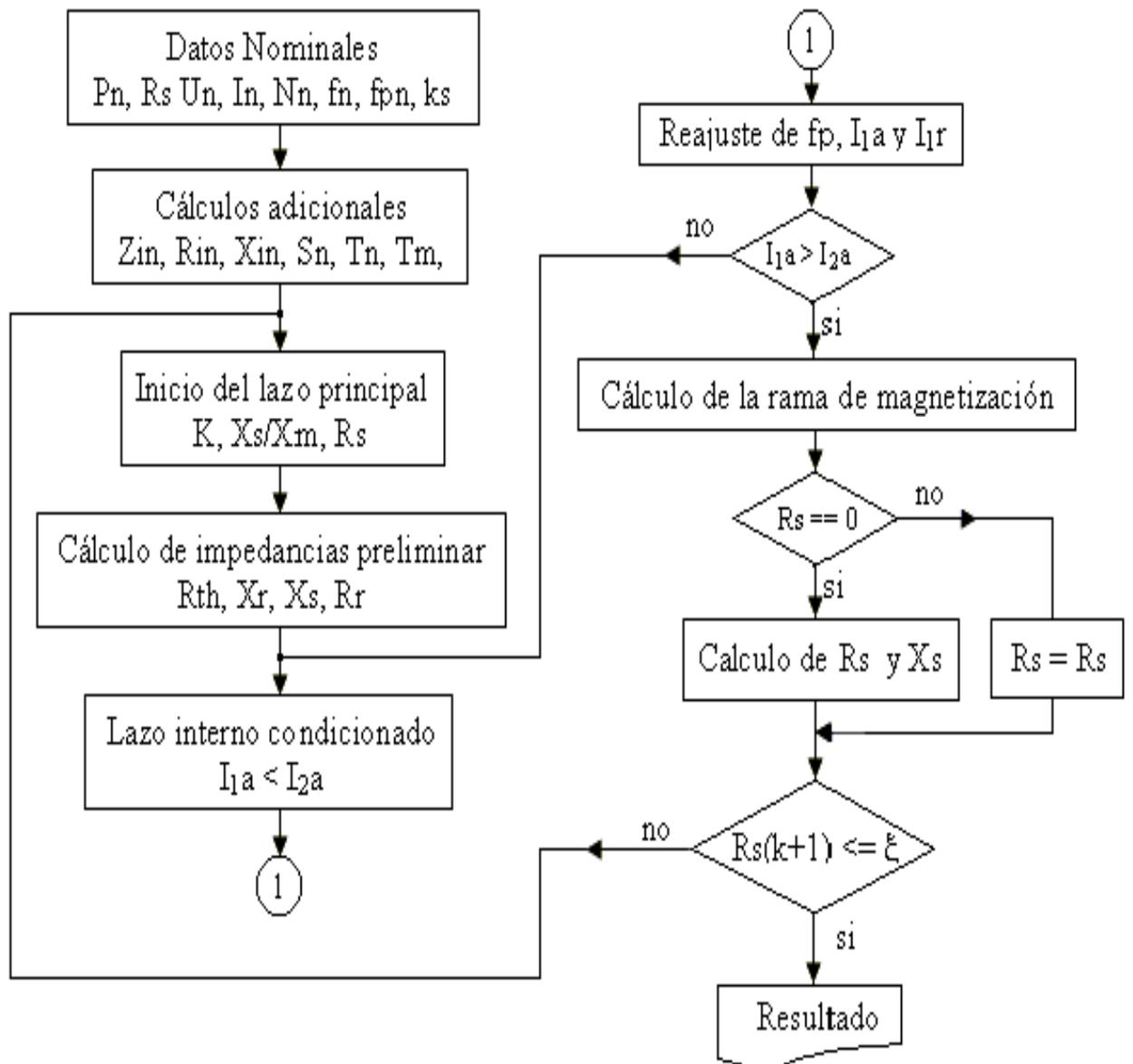
Anexos

ANEXOS

Anexo1. Resumen de los métodos de evaluación de la eficiencia en motores de inducción.

Método de evaluación de eficiencia	Ensayos y mediciones/Estimaciones Requeridas								Comportamiento	
	Vacío	Plena carga	Sin alimentación	V/f Variable	Velocidad del rotor	Momento en el eje	Datos de placa	Resistencia del estator	Nivel de intrusión	Pronostico de Error
Datos de chapa	No	No	No	No	No	No	Si	No	Baja	10% [33]
V & B Método I	Si	No	Si	No	Medida	No	No	Medida	Alta	N/A
V & B Método II	No	No	Si	No	Medida	No	Si	Medida	Media	2.5%
Deslizamiento estándar	No	No	Si	No	Medida	No	Si	Medida	Baja	7% [33]
Deslizamiento límite superior	Si	No	Si	No	Medida	No	Si	Medida	Media	8% [87]
Corriente	Si	No	No	No	No	No	Si	No	Media	6% [33]
IEEE-Std-112 Metodo F	Si	No	Si	Si	Medida	No	Si	Medida	Alta	5% [33]
Método ORMEL96	No	No	Opcional	No	Medida	No	Si	Opcional	Baja	4% [88]
Rockwell Eff. Wizard	Opcional	No	No	No	Medida	No	Si	Medida	Media	1% [89]
Rotor trancado	Si	No	No	Si	Medida	No	Si	No	Alta	N/A
Standstill Eff. Resp.	Si	No	Si	Si	Medida	No	No	Medida	Alta	N/A
IEEE Std-112 Method E	Si	Si	Si	Si	Medida	No	Si	Medida	Alta	3% [33]
OHME	No	No	No	No	Medida	No	Si	Medida	Media	2-3% [88]
Momento en el entrehierro	Si	No	No	No	Medida	Se estima	No	Medida	Alta	0.5% [88]
Momento en el eje	No	No	No	No	Medida	Medida	No	No	Alta	<0.5% [33]

Anexo 2. Algoritmo de cálculo de los parámetros del circuito equivalente.



Anexo 3. Mediciones principales para la barra OH-1 y UG-5.

M1 (OH-1)

Time	Vab	Vbc	Vca	Vm	FD	Ia	Ib	Ic	Im
(S)	(V)	(V)	(V)	(V)	(%)	(A)	(A)	(A)	(A)
1	474.93	476.64	470.40	473.99	0.76	911.42	858.28	920.47	896.72
2	473.78	475.51	469.22	472.84	0.77	914.18	860.80	923.33	899.44
3	474.64	476.27	470.17	473.69	0.74	916.71	863.42	925.72	901.95
4	474.94	476.62	470.45	474.00	0.75	909.49	856.52	918.47	894.83
5	475.27	477.09	470.92	474.43	0.74	912.75	859.31	921.48	897.85
6	475.32	477.17	470.71	474.40	0.78	908.74	855.47	917.91	894.04
7	475.12	476.86	470.67	474.22	0.75	912.30	859.03	921.20	897.51
8	474.28	475.90	469.79	473.32	0.75	910.95	858.00	919.96	896.30
9	475.12	476.76	470.55	474.14	0.76	950.93	895.61	960.44	935.66
10	474.66	476.32	470.14	473.71	0.75	954.97	899.38	964.46	939.60
11	474.56	476.31	469.96	473.61	0.77	951.03	895.47	960.60	935.70
12	474.24	476.04	469.73	473.34	0.76	959.99	903.81	969.48	944.42
13	473.85	475.48	469.37	472.90	0.75	962.15	906.21	971.64	946.67
14	474.17	475.93	469.68	473.26	0.76	955.11	899.29	964.53	939.65
15	474.31	476.07	469.70	473.36	0.77	952.25	896.59	961.86	936.90
16	474.80	476.49	470.21	473.83	0.77	955.99	900.26	965.60	940.62
17	474.09	475.84	469.56	473.16	0.76	952.58	896.93	962.06	937.19
18	474.89	476.56	470.34	473.93	0.76	949.83	894.51	959.30	934.55
19	474.91	476.71	470.41	474.01	0.76	953.04	897.27	962.46	937.59
20	474.54	476.36	470.05	473.65	0.76	955.87	899.90	965.28	940.35
21	474.16	475.89	469.65	473.23	0.76	952.64	897.03	962.08	937.25
22	474.01	475.69	469.51	473.07	0.75	960.79	904.82	970.32	945.31
23	474.03	475.56	469.46	473.02	0.75	958.31	902.79	967.93	943.01
24	474.29	476.04	469.80	473.37	0.76	947.44	892.11	956.79	932.11
Medio	474.54	476.25	470.02	473.60	0.76	940.39	885.53	949.72	925.22

M2 (UG-5)

Time (S)	Vab (V)	Vbc (V)	Vca (V)	Vm (V)	FD (%)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	Im (A)
1	478.70	479.92	473.14	477.25	0.86	810.13	749.69	811.29	790.37
2	479.14	480.52	473.45	477.70	0.89	810.92	750.11	812.29	791.11
3	479.02	480.24	473.67	477.64	0.83	810.02	749.38	811.57	790.32
4	479.13	480.39	473.82	477.78	0.83	809.50	748.89	811.06	789.82
5	478.80	480.18	473.36	477.45	0.86	809.14	748.37	810.62	789.37
6	478.98	480.24	473.46	477.56	0.86	808.22	747.92	809.85	788.66
7	478.63	479.81	473.16	477.20	0.85	810.91	749.41	811.78	790.70
8	478.87	480.13	473.51	477.50	0.84	812.57	748.92	811.34	790.94
9	478.91	480.17	473.44	477.51	0.85	813.11	749.13	811.86	791.37
10	478.95	480.09	473.47	477.50	0.84	812.23	748.92	811.49	790.88
11	478.31	479.49	472.88	476.90	0.84	813.00	749.38	811.90	791.43
12	478.42	479.81	473.12	477.12	0.84	812.47	748.88	811.63	790.99
13	478.69	479.90	473.34	477.31	0.83	809.96	747.64	810.23	789.28
14	478.55	479.68	473.12	477.12	0.84	810.60	748.28	811.17	790.02
15	478.48	479.78	473.17	477.14	0.83	809.17	747.00	809.76	788.64
16	478.41	479.71	472.89	477.00	0.86	812.30	750.96	812.79	792.02
17	478.46	479.56	473.08	477.03	0.83	811.15	750.62	811.78	791.18
18	478.36	479.46	472.94	476.92	0.84	810.37	750.18	810.96	790.50
19	478.46	479.60	473.03	477.03	0.84	811.58	750.88	811.86	791.44
20	478.82	480.13	473.56	477.50	0.83	811.41	750.81	811.76	791.33
21	478.88	480.35	473.62	477.62	0.84	810.71	750.29	811.23	790.75
22	478.70	479.92	473.39	477.34	0.83	810.05	749.62	810.45	790.04
23	478.15	479.57	472.47	476.73	0.89	809.45	748.90	810.19	789.51
24	478.96	480.25	473.48	477.56	0.85	810.16	749.61	810.84	790.21
Medio	478.70	479.95	473.27	477.31	0.85	810.80	749.32	811.24	790.45