



**UNIVERSIDAD CENTRAL DE LAS VILLAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
CENTRO DE ESTUDIOS ELECTROENERGÉTICOS**

**Determinación de la Eficiencia de los Motores
Asincrónicos con Tensiones Desbalanceadas en
Condiciones de Campo**

**TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO CIENTÍFICO DE
DOCTOR EN CIENCIAS TÉCNICAS**

Autor: Ms.C. Julio Rafael Gómez Sarduy

**Tutores: Dr. C. Marcos Alberto de Armas Teyra
Dr. C. Percy Rafael Viego Felipe**

Consultante: Dr. C. Daniel Gálvez Lio

2006

**UNIVERSIDAD CENTRAL DE LAS VILLAS
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
CENTRO DE ESTUDIOS ELECTROENERGÉTICOS**

**Determinación de la Eficiencia de los Motores
Asincrónicos con Tensiones Desbalanceadas en
Condiciones de Campo**

**TESIS PARA OPTAR POR EL GRADO CIENTÍFICO DE
DOCTOR EN CIENCIAS TÉCNICAS**

Autor: Ms.C. Julio Rafael Gómez Sarduy

**Tutores: Dr. C. Marcos Alberto de Armas Teyra
Dr. C. Percy Rafael Viego Felipe**

Consultante: Dr. C. Daniel Gálvez Lio

2006

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS.

Al escribir esta página dejando constancia de mi agradecimiento a todas aquellas personas que han hecho posible el desarrollo de este trabajo, expreso un sentimiento especial de gratitud hacia mis tutores, al Dr. Marcos A. de Armas Teyra, quien definitivamente me ha conducido por los caminos de la ciencia y cuya oportuna asistencia y ayuda tienen un valor inestimable; y al Dr. Percy R. Viego Felipe, que con su sabiduría y experiencia indiscutible fue complemento perfecto para lograr el feliz término de esta investigación. No puede faltar tampoco un pensamiento para sus esposas, Elvira del Cristo Rodríguez y Ada Cárdenas Martínez que durante este tiempo contribuyeron también directamente, muchas veces con su hospitalidad, su preocupación y palabras de aliento.

Muchas gracias al Dr. Daniel Gálvez Lio que desde el primer momento se dispuso a colaborar en esta investigación, cuya ayuda y respaldo me hacen considerarlo como un tutor más.

Agradezco al Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente de la Universidad de Cienfuegos en la persona de su directora Dra. Margarita Lapidó por permitirme disponer del tiempo necesario.

No pueden faltar palabras de agradecimiento para el Ing. José M. Hernández García y para José A. González Manreza por facilitarme las condiciones para la validación experimental.

Por último, palabras de gratitud para mi esposa, que como suyo propio ha experimentado cada sentimiento, ha sufrido cada estado de ánimo, ha disfrutado cada acierto y ha soportado todas las tensiones propias de un trabajo de esta naturaleza.

DEDICATORIA

A Julio César y Marco Antonio

SÍNTESIS

SINTESIS

El trabajo presenta el desarrollo teórico y la validación experimental de un procedimiento para determinar la eficiencia y otros parámetros operacionales de las máquinas asincrónicas, en condiciones de campo, mediante la aplicación de algoritmos genéticos (AG) en presencia de desbalances de tensión, en un ambiente no contaminado con armónicos superiores de tiempo. Se incluye el caso particular de régimen balanceado con desviaciones de tensión y/o frecuencia.

El procedimiento se fundamenta en la metodología del circuito equivalente, lo cual es ventajoso si se considera que el motor puede encontrarse en cualquier punto de su banda de operación en condiciones reales de explotación. Ventajas adicionales son el bajo nivel de invasividad, las limitadas mediciones necesarias y la consideración de parámetros variables, aportando mayor precisión en los resultados obtenidos.

Con el propósito de lograr la rápida convergencia del proceso evolutivo y definir un escenario físico en las fronteras de búsqueda, se introduce un vector de impedancias aproximadas en la población inicial del AG. Con el objetivo de determinar estos parámetros, se pueden utilizar los métodos tradicionales cuando son posibles aplicarlos en la industria, pero se aporta otro que constituye una nueva aproximación en condiciones de campo.

El método desarrollado permite evaluar la eficiencia de las máquinas en condiciones generalizadas, incluyendo aquellas que han sido reparadas, utilizando las componentes simétricas y, a la vez, efectuar otros cálculos de interés (potencia compleja, pérdidas desagregadas, deslizamiento, factor de potencia, etc). Por esta razón, constituye una herramienta fundamental para el análisis técnico y económico de proyectos de mejoramiento de la eficiencia energética y de desarrollo de programas de máquinas de alta eficiencia en la industria y los servicios, así como para reducir el impacto ambiental de las tecnologías energéticas.

-Palabras clave: máquinas asincrónicas, eficiencia, impacto ambiental.

*TABLA DE
CONTENIDOS*

TABLA DE CONTENIDOS

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
1. ASPECTOS GENERALES	8
1.1. Estado actual de la técnica para evaluación de la eficiencia.....	8
1.1.1. <i>Métodos normalizados para la evaluación de la eficiencia</i>	8
1.1.2. <i>Métodos de evaluación de la eficiencia diseñados para condiciones de campo</i>	12
1.1.3. <i>Métodos computarizados y otras técnicas para la estimación de la eficiencia</i>	14
1.2. Generalidades acerca del desbalance de tensión.....	16
1.2.1 <i>Definiciones</i>	16
1.2.2 <i>Desbalance de tensión y operación de motores asincrónicos</i>	19
1.3. Estado del arte sobre computación evolutiva aplicada a la determinación de la eficiencia.....	24
1.4. Conclusiones parciales.....	29
2. MODELO DEL MOTOR ASINCRÓNICO TRIFÁSICO CON TENSIONES DESBALANCEADAS	30
2.1. Simplificaciones utilizadas en el modelo.....	30
2.2. Modelo del motor asincrónico para ambas secuencias.....	31
2.2.1. <i>Modelo d-q</i>	31
2.2.2. <i>Componentes simétricas</i>	34
2.2.3. <i>Circuito equivalente para régimen desbalanceado</i>	36

2.3. Consideración sobre las diferentes pérdidas.....	38
2.3.1. <i>Pérdidas de cobre de los devanados</i>	38
2.3.2. <i>Pérdidas rotacionales</i>	39
2.3.2.1. <i>Pérdidas de fricción y batimiento</i>	40
2.3.2.2. <i>Pérdidas magnéticas</i>	40
2.3.3. <i>Pérdidas adicionales</i>	43
2.3.4. <i>Circuito equivalente modificado</i>	44
2.3.5. <i>Consideraciones sobre el deslizamiento</i>	45
2.4. Corrientes y potencias calculadas.....	45
2.5. Conclusiones parciales.....	47
3. ALGORITMO GENÉTICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA FICIENCIA	
EN CONDICIONES DE CAMPO	48
3.1. Fundamentos de los Algoritmos Genéticos.....	48
3.2. Implementación del algoritmo.....	51
3.2.1. <i>Función de aptitud empleada</i>	51
3.2.2. <i>Tamaño de la población y población inicial</i>	52
3.2.3. <i>Opciones de reproducción y operadores genéticos</i>	53
3.2.4. <i>Criterios de parada y tratamiento de las restricciones</i>	55
3.3. Determinación de la población inicial.....	56
3.3.1. <i>Nueva aproximación para determinar los parámetros de la máquina</i>	57
3.3.2. <i>Adaptación al caso de tensiones desbalanceadas</i>	62
3.3.3. <i>Determinación del ángulo de defasaje entre tensiones y corrientes</i>	63
3.4. Integración del método.....	65

3.5. Conclusiones parciales.....	67
4. RESULTADOS EXPERIMENTALES. CASOS DE ESTUDIO.....	69
4.1. Descripción de los experimentos y análisis de los resultados.....	69
4.1.1. <i>Instalación experimental</i>	69
4.1.2. <i>Los resultados y su interpretación</i>	70
4.1.3. <i>Comparación del método con otros existentes</i>	71
4.1.4. <i>Resultados de la aplicación a régimen balanceado</i>	73
4.1.5. <i>Número de corridas necesarias</i>	74
4.1.6. <i>Hoja de resultados</i>	74
4.2. Información necesaria y requerimientos fundamentales.....	75
4.3. Aplicación industrial. Casos de estudio.....	76
4.3.1. <i>GYDEMA</i>	76
4.3.2. <i>Fábrica de Piensos Balanceados Cienfuegos</i>	77
4.3.3. <i>Empresa Azucarera “Ciudad Caracas”</i>	80
4.4. Conclusiones parciales.....	83
CONCLUSIONES.....	84
RECOMENDACIONES.....	86
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
ANEXOS	

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

El ahorro de energía eléctrica es imprescindible para la economía y el medioambiente. En la actualidad, debido a los precios crecientes y a la exigencia de ahorro de energía como vía hacia el desarrollo sustentable, el valor de la eficiencia juega un papel fundamental. En Cuba cobra mayor significado por lo limitado de sus recursos energéticos y la transformación que se lleva a cabo con la Revolución Energética en este importante sector.

Con el objetivo de disminuir los niveles de consumo se realizan diversos estudios encaminados a soportar, desde bases científicas, las decisiones que tributen a un incremento de la eficiencia energética en la industria y los servicios. En particular, cuando se analiza el consumo, así como las estrategias de reparación o sustitución de las máquinas eléctricas, es muy importante evaluar la eficiencia de los motores asincrónicos en sus propias condiciones de operación, ya que éstos consumen una proporción muy elevada de toda la energía en la industria y los servicios.

Por otra parte, cuando se decide incrementar la eficiencia mediante un programa de mejoramiento energético, difícilmente éste pueda considerarse realizado sin el análisis de los motores más potentes y críticos de la instalación. Por esta razón, es necesario que los ingenieros que desarrollan su actividad en la industria, estén relacionados con los diferentes métodos de evaluación de la eficiencia, con el grado de invasividad de cada uno de éstos, con la precisión que se obtiene, y sobre todo, que puedan establecer un procedimiento de acuerdo con su situación específica.

En la industria existen complicaciones adicionales debido a que las condiciones establecidas por las normas no se repiten en el campo y el límite recomendado de desbalance de tensión, fluctuaciones de frecuencia, etc., puede ser excedido. Así sucede con la diferencia entre la tensión

de placa y el valor real aplicado en muchas situaciones específicas. Además, determinadas técnicas presuponen un elevado grado de invasividad si se necesita detener la producción en la búsqueda de los datos necesarios para calcular la eficiencia, las pérdidas y las potencias, valores que, en muchos casos, son difíciles de determinar.

En general, determinar la eficiencia de un motor eléctrico es un proceso complejo que debe realizarse con una precisión adecuada, que permita incluir el efecto de las condiciones específicas sobre las pérdidas de energía, y a la vez, calcular los gastos económicos y la demanda a la empresa eléctrica por el usuario. El objetivo de evaluar la máquina radica pues, en determinar el estado de carga y la eficiencia con que trabaja con vistas a identificar el potencial de ahorro energético y económico, la capacidad demandada y el impacto ambiental.

En este trabajo se propone un procedimiento que difiere de los métodos normalizados o de otros tradicionales que básicamente determinan la cargabilidad del motor a partir de la corriente, el deslizamiento, la potencia de entrada o se auxilian de la estadística para estimar la eficiencia operacional, con el riesgo de obtener resultados menos precisos.

El procedimiento propuesto utiliza algoritmos genéticos como método de búsqueda estocástica para identificar los parámetros del circuito equivalente de estado estable del motor asincrónico y calcular su potencia de salida y su eficiencia operando en un escenario real con cualquier estado de carga, frecuencia, nivel y desbalance de tensión, en un ambiente industrial, con una forma de onda en la cual los armónicos individuales no superen el 1% del fundamental.

Para acelerar el proceso evolutivo se introduce en la población inicial un vector de solución aproximada, determinado a partir de pruebas efectuadas a la máquina en las propias condiciones de operación o conociendo su catálogo o datos de chapa. Para obtener este vector, se diseñó un método o se toma de estudios realizados por otros investigadores, sin excluir los procedimientos

recomendados por las normas cuando éstos son realizables en un escenario industrial. La investigación que se presenta posee un carácter generalizado y puede aplicarse a diferentes estados de operación incluyendo máquinas que hayan sido reparadas.

Objetivo general:

Desarrollar una herramienta basada en AG que permita, en condiciones de campo, determinar la eficiencia y otros parámetros operacionales de los motores asincrónicos trifásicos trabajando en estado estable con tensiones desbalanceadas.

Objetivos específicos:

1. Obtener un modelo matemático que, a partir de los principios del circuito equivalente y las componentes de secuencia, pueda ser aplicado para la evaluación de estado estable de las máquinas asincrónicas en la industria y los servicios.
2. Desarrollar un método, sobre la base del modelo anterior, para determinar la eficiencia operacional de las máquinas asincrónicas en condiciones de campo.
3. Comprobar experimentalmente el método propuesto y demostrar la factibilidad técnica de su aplicación.

Estas tareas tienen como fin comprobar la **Hipótesis de Trabajo**: Es posible evaluar, mediante procedimientos poco invasivos y en presencia de desbalances y desviaciones de tensión y frecuencia, la eficiencia y otros parámetros operacionales de las máquinas asincrónicas empleadas en un ambiente industrial o de servicios, con adecuada fiabilidad y con resultados apropiados a las necesidades.

Ello corresponde con los lineamientos sobre tareas que deben ser desarrolladas para elevar la eficiencia nacional y acelerar la efectividad de la Revolución Energética *y para el uso más efectivo de la maquinaria en general y la limitación de inversiones y sobre la estricta*

observancia de la legislación y demás regulaciones relacionadas con la protección del medio ambiente, como norma para hacer realidad el principio de desarrollo sustentable [65].

Novedad científica.

La novedad científica de esta investigación es:

Método basado en el empleo de AG para determinar la eficiencia y otros parámetros operacionales de los motores asincrónicos con tensiones desbalanceadas, en condiciones de campo, que permite lograr resultados más precisos que los reportados hasta el momento.

Como aportes del trabajo se tienen:

- Método generalizado para determinar la eficiencia y otros parámetros operacionales de los motores asincrónicos que incluye, como caso particular, el régimen balanceado con desviaciones de tensión y/o frecuencia.
- Generación heurística de la población inicial de un algoritmo genético con el objetivo de reducir el tiempo de convergencia del AG y ubicar la zona de búsqueda en un entorno físico apropiado, cercano a la solución.
- Modificación del modelo de estado estable del motor asincrónico para considerar la simulación de las pérdidas adicionales cuando se opera en régimen desbalanceado.
- Desarrollo de un método para la determinación del defasaje real entre las corrientes y tensiones de línea en redes desbalanceadas a partir de los coeficientes de desbalance complejos.

Partes de este trabajo han sido presentados y discutidos en los siguientes eventos científicos:

- XI Simposio de Ingeniería Eléctrica. SIE 2003. 19-21 de noviembre del 2003. Santa Clara. “Software para el análisis del comportamiento de las máquinas asincrónicas en redes desbalanceadas en condiciones de campo”.
- III Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente. Marzo 2004. Cienfuegos. “Evaluación de las perdidas de energía de un motor asincrónico trabajando en régimen desbalanceado”.
- XII Simposio de Ingeniería Eléctrica. SIE 2005. 21-23 de junio del 2005. Santa Clara. “Análisis de las máquinas asincrónicas en régimen desbalanceado mediante la teoría de los campos rotatorios”.
- XII Simposio de Ingeniería Eléctrica. SIE 2005. 21-23 de junio del 2005. Santa Clara. “Parámetros iniciales de motores asincrónicos con tensiones desbalanceadas para optimización con algoritmos genéticos”.
- IV Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente. Abril 2006. Cienfuegos. “Combinación de mediciones de campo y algoritmos genéticos para la estimación de la eficiencia de motores asincrónicos”.
- IV Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente. Abril 2006. Cienfuegos. “Evaluación energética de máquinas asincrónicas en condiciones de campo mediante la teoría de los campos rotatorios”.
- IV Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente. Abril 2006. Cienfuegos. “Metodología para la evaluación de la eficiencia de máquinas asincrónicas en condiciones de campo. Caso de estudio”.

También partes del trabajo se han publicado en:

- “Efecto del desbalance de tensión sobre la eficiencia de motores asincrónicos. Evaluación en

la estación experimental del Central Ciudad Caracas.” Aprobado a publicar en Revista Centro Azúcar. 2006.

- “Uso de computación evolutiva en identificación de parámetros del motor asincrónico con desbalance de tensión”. Aprobado a publicar en Revista Ingeniería Energética, No.3, 2005.
- “Caracterización de los datos de desbalance de tensión en un sistema de suministro eléctrico industrial”.Aprobado a publicar en Revista Ingeniería Energética, No. 3, 2005.
- “Algoritmo genético para estimación de la eficiencia de motores asincrónicos”. Memorias de la Conferencia Científica Internacional. ELECTRICA 2006. UO. Santiago de Cuba.
- “Metodología para la evaluación de la eficiencia de máquinas asincrónicas en condiciones de campo. Caso de estudio”. Memorias del IV Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente. Abril/2006. Cienfuegos.
- “Evaluación energética de máquinas asincrónicas en condiciones de campo mediante la teoría de los campos rotatorios”. Memorias del IV Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente. Abril/2006. Cienfuegos.
- “Combinación de mediciones de campo y algoritmos genéticos para la estimación de la eficiencia de motores asincrónicos”. Memorias del IV Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente. Abril/2006. Cienfuegos.
- “Parámetros iniciales de motores asincrónicos con tensiones desbalanceadas para optimización con algoritmos genéticos”. Memorias del XII Simposio de Ingeniería Eléctrica. SIE 2005. Junio/2005. Santa Clara.
- “Análisis de las máquinas asincrónicas en régimen desbalanceado mediante la teoría de los campos rotatorios”. Memorias del XII Simposio de Ingeniería Eléctrica. SIE 2005. Junio/2005. Santa Clara.

- “Evaluación de las pérdidas de energía de un motor asincrónico trabajando en régimen desbalanceado”. Memorias del III Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente. Marzo/2004. Cienfuegos.
- “Software para el análisis del comportamiento de las máquinas asincrónicas en redes desbalanceadas en condiciones de campo”. Memorias del XI Simposio de Ingeniería Eléctrica. SIE 2003. Nov/2003. Santa Clara.

Estructura de la tesis

La tesis se concibe organizada en cuatro capítulos, en el siguiente orden:

Capítulo I: “Aspectos Generales”. Se ocupa del estudio crítico de la bibliografía, de las fuentes que sirven de base al desarrollo del trabajo, y se tratan aquellas cuestiones vinculadas con el estado del arte, las investigaciones, los métodos y procedimientos a nivel mundial, sus dificultades y limitaciones en un ambiente industrial.

Capítulo II: “Modelo del motor asincrónico trifásico con tensiones desbalanceadas”. Concierna a los fundamentos teóricos y los diferentes procedimientos analíticos que permiten abordar este tema desde la modelación matemática.

Capítulo III: “Algoritmo genético para la determinación de la eficiencia en condiciones de campo”. En este la atención se dirige al tratamiento de los regímenes operacionales incluido el desbalance, la utilización de la inteligencia artificial y los procedimientos para determinar el vector de población inicial. Se formula el problema de determinación de la eficiencia utilizando el circuito equivalente y un algoritmo genético implementado al efecto.

Capítulo IV: “Resultados experimentales. Casos de Estudio”. Se dedica a los resultados prácticos, tanto en una instalación prototipo como en diversos casos de aplicaciones industriales y de servicio.

CAPÍTULO 1

CAPÍTULO 1

ASPECTOS GENERALES.

Durante la transformación electromecánica de la energía, una parte de esta se disipa en forma de pérdidas. Estas pérdidas definen índices energéticos importantes como la eficiencia, que es necesario tener en cuenta para diversos análisis, sobre todo en el contexto actual donde la energía es un recurso de primerísimo orden.

El uso racional y eficiente de la energía ha sido un tema intensamente investigado en múltiples direcciones, entre ellas, en una diversidad de métodos propuestos para la medición de la eficiencia operacional de los motores asincrónicos.

En este capítulo se expondrá el estado del arte en la temática de la determinación de la eficiencia de esos motores, dirigiendo la atención a aquellos métodos desarrollados específicamente para su aplicación en condiciones industriales y de servicios, sobre todo cuando el motor bajo análisis esté sometido a tensiones desbalanceadas. Con este objetivo, se realizó una búsqueda bibliográfica sobre el tema que incluyó prácticamente todas las publicaciones desde 1980 hasta el 2005 de la IEEE Transactions on Energy Conversion, Transactions on Industry Applications y Transaction on Power Delivery, además de otras publicaciones en Internet, memorias de eventos y publicaciones nacionales.

1.1 Estado actual de la técnica para evaluación de la eficiencia.

1.1.1 Métodos normalizados para la evaluación de la eficiencia.

A partir de la década del sesenta del siglo pasado, se normalizaron métodos por los que se evalúa la eficiencia de los motores asincrónicos. Estas normas establecen consideraciones en cuanto a las pérdidas, tipos de mediciones e instrumentos requeridos, valores de corrección de temperatura

para las resistencias, etc. De estas normas, las principales y que han sido objeto de muchos análisis comparativos son: **IEEE-112**, **IEC 34-2** y **JEC-37** [21, 22, 35, 41, 78, 95].

La **IEC 34-2** es editada por la “International Electrotechnical Commission” y es extensamente aplicada en el mundo, pero especialmente en los países europeos. El método recomendado por ésta clasifica como indirecto, pues se basa en la determinación de las pérdidas totales y con ellas estimar la eficiencia. Las pérdidas totales pueden ser obtenidas por diferentes métodos pero el preferido es el de separación y sumatoria de las pérdidas. Las pérdidas adicionales se asumen como un valor fijo (0,5 % de la potencia de entrada para potencia de salida nominal), independientemente de la potencia nominal del motor y proporcional al cuadrado de la corriente de línea.

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

La **IEEE-112 2004** [54] del “Institute of Electric and Electronic Engineers” es la que tiene mayores exigencias y en ella se establecen cinco métodos denominados **A**, **B**, **C**, **E** y **F** con las variantes **E1**, **F1**, **C/F**, **E/F** y **E1/F1**. Con esta norma armonizan algunas normas nacionales como la NEMA MG1 y la CS-390 aplicadas en EEUU y Canadá, respectivamente.

En el método A la eficiencia se obtiene directamente midiendo las potencias de entrada y salida del motor. Este método es recomendado sólo para máquinas pequeñas.

El método B utiliza la potencia de entrada y salida con segregación de pérdidas y medición indirecta de las pérdidas adicionales. Se recomienda para probar máquinas hasta 180 kW y es el adoptado como referencia por muchos investigadores en estudios comparativos sobre cálculo de

la eficiencia. Ante la mejora continua de los instrumentos de medición y los sensores de momento, se va prefiriendo a los métodos indirectos.

El método C puede ser utilizado cuando se cuenta con máquinas duplicadas, las cuales se acoplan y se conectan a dos fuentes independientes de potencia, una de las cuales es de frecuencia ajustable. Las pérdidas adicionales totales se obtienen por segregación de pérdidas, tanto para la máquina que funciona en régimen de motor como para la que funciona como generador. Las pérdidas adicionales son divididas entre el motor y el generador, proporcionales a las corrientes del rotor.

El método E calcula la eficiencia a partir de la medición de la potencia eléctrica de entrada con segregación de pérdidas. Este es un método indirecto, ya que la potencia de salida no se mide, sino que se obtiene sustrayendo las pérdidas totales de la potencia de entrada. Las pérdidas adicionales son medidas directamente por el método de rotación inversa.

El método F emplea el circuito equivalente de la máquina con medición directa de las pérdidas adicionales. En el caso de las variantes E1 y F1, las pérdidas adicionales son asumidas como un porcentaje de la potencia de salida nominal.

Las otras variantes existentes (C/F, E/F y E1/F1) son métodos adicionales que utilizan el circuito equivalente calibrado a un punto de carga.

Un estudio detallado de estos métodos apunta hacia una serie de complicaciones cuando se implementan en la industria. Esto se debe fundamentalmente a que las condiciones exigidas por las normas no existen en el campo y por tanto, los métodos normalizados no son exactamente aplicables en un ambiente industrial. Las limitantes que invalidan los resultados o la propia ejecución del método, están dadas por la calidad del suministro eléctrico (valores de tensión y/o frecuencia diferentes, así como límites de desbalance de tensión o distorsión de la forma de onda

que superan los recomendados por las normas), el grado de intrusión del método y la no disponibilidad de las fuentes o equipos necesarios para efectuar determinados ensayos.

Lo anterior implica que se hayan desarrollado muchos métodos para la evaluación de la eficiencia en condiciones de campo y que se continúe investigando en este sentido [8, 16, 26, 27, 29, 47, 50, 74, 114].

1.1.2 Métodos de evaluación de la eficiencia diseñados para condiciones de campo.

En condiciones de campo, una evaluación toma un nombre genérico y puede fundarse en la combinación de varios métodos básicos. Estos métodos se han reunido en seis grupos [50, 74]:

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

En todos los casos la eficiencia se calcula como la relación entre la potencia de salida a la potencia eléctrica de entrada. La potencia de salida es la potencia de entrada menos las pérdidas; de la forma en como se determinan las pérdidas depende la exactitud del método aplicado. Entre las mediciones necesarias pueden encontrarse:

1. Lectura de la chapa
2. Medición óptica de la velocidad o deslizamiento
3. Medición de la corriente y tensiones de fase o línea

4. Medición de la potencia de entrada
5. Determinación de la resistencia del estator
6. Temperatura del devanado
7. Medición de momento en el eje
8. Datos de ensayos de vacío y cortocircuito
9. Forma de ondas de la tensión y la corriente
10. 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 IEEE-112, siempre que no sea para el método B, en cuyo caso las exigencias son mayores. Este requisito lo cumplen diferentes tipos de analizadores de redes existentes en el mercado. Si este no es el caso, deben tomarse las máximas precauciones en la adquisición de datos. En particular, en las condiciones de campo, la medición de la velocidad debe realizarse con tacómetros ópticos y el deslizamiento debe medirse con instrumentos estroboscópicos.

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

Los métodos de segregación de pérdidas, diseñados para medir directamente las pérdidas en el motor, en principio deben dar resultados precisos. Sin embargo, el método IEEE 112 E no es útil, pues incluye retirar el rotor y hacer pruebas especiales para determinar las pérdidas adicionales. El método E1 asume un valor de pérdidas adicionales, pero utiliza un ensayo en vacío con

tensión variable, así como ensayos en seis estados de operación. En la gran mayoría de los casos, este procedimiento es inaplicable en el campo, como también lo son algunas modificaciones realizadas al mismo.

El método del circuito equivalente (basado en el método F de la IEEE-112) se fundamenta en el conocimiento de los parámetros del circuito que modela el comportamiento de estado estable del motor asincrónico. Este método es ventajoso para evaluar la eficiencia cuando el motor opera en cualquier estado de carga y posee la flexibilidad suficiente para efectuar diversos análisis. Se complica con la determinación apropiada de los parámetros del circuito. Tiene como inconveniente que no es posible realizar pruebas a rotor trancado en la mayoría de las industrias, como lo establece la IEEE 112 para determinar los parámetros del circuito equivalente, además de ensayos en vacío y pruebas de impedancia a tensión reducida, complicadas e invasivas. Algunas de sus variantes necesitan desacoplar el motor.

Por esta razón, se han desarrollado métodos en los cuales los parámetros se obtienen por otros procedimientos. Un ejemplo que ilustra la combinación con otras técnicas es el propuesto por Costa y Vilaragut en [16, 114], donde se utilizan mediciones de corriente y tensión y la estimación estadística de las pérdidas. Este método, aunque sencillo de aplicar, por no requerir de equipamiento costoso ni ser invasivo, necesita del catálogo del motor. Estos datos en ocasiones no están disponibles, sobre todo para motores viejos y reparados existentes en planta.

Los métodos estadísticos pueden ser muy efectivos cuando no se cuenta con el equipamiento requerido para algún tipo de ensayos. En [27] se reporta una metodología para tal efecto, pero hay que tener presente que todos estos métodos estadísticos generalmente utilizan base de datos de fabricantes obtenidos en el laboratorio, diferentes al ambiente donde operan las máquinas.

El método del momento en el entrehierro requiere de la medición de las tensiones y corrientes de fase instantáneas para determinar ese momento y deducir la potencia de salida en el eje. Este método requiere de una prueba en vacío para calcular las pérdidas de fricción, batimiento y núcleo o estimar las mismas. Además, en algunos casos se necesitan las formas de onda.

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

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

En la literatura [29, 74, 117] se reportan varios métodos para uso práctico en la industria, implementados por medio de programas de computación o instrumentos especiales. Oak Ridge National Laboratory desarrolló el **ORMEL 96** (Oak Ridge Motor Efficiency and Load, 1996), que es un software que utiliza el método del circuito equivalente para estimar el estado de carga y la eficiencia de un motor en servicio. Solamente requiere de los datos de chapa y de la medición de velocidad para calcular tanto la eficiencia como el factor de carga, asumiendo los valores de corriente a rotor trancado y pérdidas de fricción y batimiento para construir el circuito equivalente del motor. Este programa permite al usuario entrar mediciones opcionales, tal como la resistencia del estator, para mejorar el estimado de la eficiencia. La precisión de este método está en dependencia de la validez de los datos de chapa y considera constante los parámetros en toda la banda de operación en que pueda encontrarse el motor.

El software **MotorMaster+** [75] es notable por su flexibilidad, baja invasividad y fácil uso. Este software parte de los datos de chapa y datos de operación para estimar el estado de carga y la eficiencia. Incluye cuatro técnicas para la estimación de la carga, y selecciona la más adecuada en función de los datos de entrada. Las técnicas internas para la estimación de la carga son:

- Método de la potencia de entrada.
- Método del deslizamiento compensado con tensión.
- Método de la corriente compensada con tensión.
- Método ORMEL.

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

Otras técnicas se basan en la utilización de equipos especiales para la estimación de la eficiencia como es el caso del desarrollado por **Vern Nielsen** [117] que emplea el probador *MAS-1000* producido por Niagara Instruments de New York. Además de este equipo especial, el método requiere de sensor óptico de velocidad. Otro instrumento especial es el *Motor-Check* desarrollado por **Vogelsang & Benning** de Alemania [29, 74, 117], el cual emplea un método que requiere probar el motor para tres estados de carga diferentes. También se reporta el *Vectron Motor Monitor* que emplea un método desarrollado por **ECNZ** (Electric Council of New Zealand) [29, 74, 117] que necesita que el motor se pruebe a factores de carga por debajo del 10% y por encima del 50%. Todos estos instrumentos son genéricos, utilizados solo en compañía del método al cual soportan y requieren que el motor sea temporalmente desacoplado de la carga para una prueba en vacío.

A pesar de que todos los métodos mencionados en los epígrafes 1.1.2 y 1.1.3 pueden representar herramientas valiosas para los especialistas que en la industria llevan a cabo programas de ahorro de energía o participan en la toma de decisiones que requieren estimar la eficiencia operacional de los motores en servicio, están limitados cuando las condiciones de tensión y/o frecuencia se apartan de las nominales.

Ninguno de estos métodos considera adecuadamente la influencia del desbalance de tensión sobre la eficiencia, ya que los pocos que lo hacen, aplican factores de ajuste a la eficiencia que puede conducir a errores significativos por no tener en cuenta el estado de carga, el tipo de desbalance o estar basados en medidas del desbalance de tensión que no reflejan verdaderamente la influencia del mismo sobre los parámetros operacionales del motor.

1.2 Generalidades acerca del desbalance de tensión.

1.2.1 Definiciones.

Un sistema trifásico se dice desbalanceado cuando las magnitudes de las tensiones de línea o de fase son diferentes y el defasaje entre ellas difiere de 120° eléctricos o existen simultáneamente ambas condiciones.

Los sistemas eléctricos trifásicos se diseñan sobre bases balanceadas. Sin embargo, existen asimetrías intrínsecas en la configuración de las componentes del sistema de potencia, tales como transposición incompleta de líneas, transformadores conectados en delta abierta o estrella incompleta, cargas monofásicas mal distribuidas, operación bajo falla de equipos de corrección del factor de potencia, impedancias asimétricas en las redes de alimentación, fallas monofásicas, desperfectos en empalmes, uniones o contactos y asimetrías de las propias fuentes de suministro. Por estas razones, una de las condiciones más generalizadas en los sistemas de suministro eléctrico lo constituye, en mayor o menor grado, el desbalance de tensión. Un ejemplo de esta situación en diferentes instalaciones industriales y de servicios de la Provincia de Cienfuegos se muestra en la Tabla 1.1 [25].

Tabla 1.1 Muestras ilustrativas de desbalance y variaciones de tensión y frecuencia en instalaciones de la Provincia de Cienfuegos.

Empresa	Capacidad	Vnom	Vprom	Vmáx	Vmin	% Tensión	% Desbalance	Frecuencia
Hotel Union	630	380 / 220	228,82	230	226	1,04	1,60	60,7/60
Punta las Cuevas	100 + 50	120/240	242,6	255,3	231	1,01	5,35	60,8/60
Rancho Luna	400	120/240	119,3	120,56	118,7	0,99	1,98	60,2/59,8
Faro Luna	3 x 50	120/240	121,7	123,07	119,6	1,01	3,08	60,1/59,6
Villa Yaguanabo	63	120/208	125,98	129,7	124,5	1,05	3,14	
Yaguacam	3 x 100	120/240	242,66	246	238	1,01	2,27	60,6/60,2
Molino I*	3 x 1600	34,5	34,28	35,4	33,1	0,99	4,23	
Molino II	1000	480	479,5	481,1	474	1,00	2,0	
Pienso	1000	480	430,44	437,7	419,5	0,90	3,63	
Pozo Juraguá	3 x 100	480	454,9	458,06	451,4	0,95	1,89	
Hospital I	3 x 333	480	456,2	465,7	444,3	0,95	3,78	
Hospital Derecha	3 x 333	480	476,38	505,34	453,1	0,99	5,63	
Frigorífico	1000	480	467,9	471,02	462,41	0,97	1,52	
Materno I	100/167/250	120/208	121,04	121,9	119,1	1,01	1,82	
Cayo Loco	1000	480	461,6	471,01	453,7	0,96	3,5	59,9/59,2
Benefactora	3 x 100	120/240	245,9	247,4	239,2	1,02	4,64	
Base Central	630	480	450,26	472	424	0,94	6,12	61/59,8
Azúcar Embarque	750	480	474,6	488,6	458,2	0,99	3,44	60,6/60,1
Astisur	100 + 75	120/240	244,08	245,38	236,34	0,98	5,25	60,1/59,8

Capacidad: KVA nominales de los transformadores instalados.

Vnom, Vprom, Vmáx y Vmin: tensiones nominal, promedio, máxima y mínima de la instalación, en V.

% Tensión: desviación de tensión en % de la nominal.

% Desbalance: porcentaje de desbalance de tensión según definición NEMA.

Frecuencia: frecuencia máxima y mínima registrada, en Hz.

* para este caso las tensiones están en kV.

Se han propuesto diferentes formas de cuantificar el desbalance, que responden a definiciones desarrolladas por distintas instituciones, y mucho se ha publicado sobre la mejor manera de expresarlo sin que se llegue a un consenso [2, 31, 72, 89, 92, 100, 119, 120]. Las definiciones fundamentales existentes y que se emplean en este trabajo son:

1) Factor de desbalance de tensión de línea definido por la NEMA (National Electric Manufacturing Association):

$$FDVL = \frac{Máx\{|V_{ab} - V_{avg}|, |V_{bc} - V_{avg}|, |V_{ca} - V_{avg}|\}}{V_{avg}} \cdot 100\% \quad (1.1)$$

Donde:

$\text{Máx}\{|V_{ab} - V_{avg}|, |V_{bc} - V_{avg}|, |V_{ca} - V_{avg}|\}$ es el valor máximo de la diferencia entre las tensiones de línea (V) y el valor promedio de las tensiones de línea definido como:

$$V_{avg} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3} \quad (\text{V}) \quad (1.2)$$

2) Factor de desbalance de tensión de fase según la IEEE Std. 141:

$$FDVF = \frac{\text{Máx}\{|V_a - V_{avg}|, |V_b - V_{avg}|, |V_c - V_{avg}|\}}{V_{avg}} \cdot 100\% \quad (1.3)$$

Donde:

$\text{Máx}\{|V_a - V_{avg}|, |V_b - V_{avg}|, |V_c - V_{avg}|\}$ es el valor máximo de la diferencia entre las tensiones de fase (V) y el valor promedio de las tensiones de fase definido como:

$$V_{avg} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3} \quad (\text{V}) \quad (1.4)$$

3) Factor de desbalance de tensión definido por la IEC como la relación entre la componente de secuencia negativa V_2 y la componente de secuencia positiva V_1 de la tensión:

$$FDV = \frac{V_2}{V_1} \cdot 100\% \quad (1.5)$$

4) Factor de desbalance de tensión complejo definido como el anterior, pero teniendo en cuenta no solo el valor modular de las componentes de tensión, sino también su ángulo de fase:

$$\bar{K}_V = \frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} \cdot 100\% = k_v \cdot e^{j\theta_v} \quad (1.6)$$

Donde k_v es el módulo y θ_v el ángulo de fase en grados, del factor de desbalance complejo.

De estos factores, el más utilizado en la práctica es el propuesto por la NEMA, ya que aunque no especifica qué tipo de desbalance tiene lugar, evita el uso del álgebra compleja y el trabajo con componentes simétricas, empleando las mediciones del valor rms de las tensiones de línea directamente.

1.2.2 Desbalance de tensión y operación de motores asincrónicos.

Es bien conocido que el desbalance de tensión tiene un efecto perjudicial sobre la mayoría de las aplicaciones eléctricas, motivando que se dediquen esfuerzos a la investigación de este efecto en diversas áreas. Un aspecto que ha interesado a numerosos investigadores es el relacionado con las pérdidas que provoca en las redes eléctricas y sus métodos de cálculo y simulación en diferentes regímenes, incluyendo transitorios [5, 6, 8, 19, 34, 71, 81, 84, 94, 97, 105, 121, 122]. El interés por disminuir los efectos negativos conduce a una amplia cobertura en las investigaciones sobre compensación del desbalance en la última década [4, 14, 46, 48, 49, 52, 55, 73], pero más bien a niveles de transmisión en sistemas de potencia a partir de circuitos electrónicos de potencia de acción rápida. Uno de estos dispositivos es el conocido como STATCOM (compensador estático de reactivo) que actúa para compensar los cambios en las impedancias de las cargas por cada fase, compensando además el déficit de reactivo. Sin embargo, estos son dispositivos costosos, empleados para grandes cargas cuando otras soluciones son insuficientes.

En la industria, el efecto del desbalance sobre los motores asincrónicos atrae particular atención por ser éstos los convertidores electromecánicos mayoritarios en cualquier instalación y una de las cargas más sensibles a este fenómeno. El desbalance de tensión afecta a la máquina asincrónica al incrementar las pérdidas en el estator y rotor, el calentamiento, las vibraciones, el ruido y el consumo de potencia activa. En consecuencia, reduce la eficiencia, la potencia efectiva que puede desarrollar, y, en condiciones habituales de campo, el período de vida útil

[10, 12, 15, 20, 23, 28, 33, 34, 36, 37, 57, 58, 60, 64, 66, 67, 68, 69, 76, 91, 98, 107, 113, 118, 120, 123, 124]. Este problema es agravado por el hecho de que un pequeño desbalance de tensión produce un desbalance de corriente de cinco a diez veces superior en las corrientes de fase y de línea. Esto depende, fundamentalmente, del tipo de desbalance y de las impedancias expresadas en función del deslizamiento y, en consecuencia, de la naturaleza de la carga, sin considerar la influencia que las características del sistema puedan ejercer.

El desbalance de corriente, además de dificultar la protección adecuada de la máquina, decide el calentamiento, la distribución geométrica de las pérdidas, la localización del punto más caliente, los complicados flujos de calor que tienen lugar y determina la potencia que puede desarrollar, el comportamiento de la máquina y el grado y tipo de desbalance de tensión que se puede permitir en un sistema.

En cuanto a la eficiencia en condiciones de desbalance, en [118] se resume el resultado de una serie de pruebas extensivas realizadas a tres motores en condiciones de laboratorio para investigar el efecto del desbalance y las desviaciones de tensión sobre la eficiencia en un amplio rango de carga. Los resultados arrojan sorprendentemente que para dos motores (300 y 50 hp) la eficiencia prácticamente no sufría afectaciones, sin embargo para el de 100 hp, sí era considerable la disminución de la misma. Este estudio no tiene en cuenta el tipo de desbalance aplicado y no constituye un procedimiento aplicable en un ambiente industrial, pero sugiere que el desbalance no afecta en la misma magnitud la eficiencia de motores diferentes, por lo que esta no debe ser inadecuadamente determinada aplicando factores de ajuste estandarizados para todos los motores. Sin embargo, en la literatura se reportan algunos trabajos interesantes en cuanto a factores que caracterizan el comportamiento energético de los motores trabajando en condiciones de desbalance. Tal es el caso del factor de pérdidas por corriente (**LCF**, siglas de *Load Current*

Factor) propuesto por Costa y López [15] basado en las corrientes de línea y no en el desbalance de tensión, pero su determinación práctica se dificulta por requerir del valor de corriente con suministro balanceado al mismo estado de carga mecánica que tiene el motor en régimen desbalanceado. Esta información, por supuesto, solo estará disponible si se tienen curvas de variación de la corriente en función de la carga o los datos de catálogo y además, se conoce el estado de carga al cual está operando el motor en régimen desbalanceado.

Kersting y Phillips publicaron en 1997 [57] un modelo en función de las corrientes de las fases y posteriormente el primero lo emplea en el análisis de un motor alimentado desde una fuente desbalanceada [59]. En este estudio se ilustra el marcado efecto que sobre el incremento de las pérdidas tiene el tipo de desbalance. Esto es, que los índices energéticos del motor difieren según las tensiones varíen en módulo o en ángulo por encima o por debajo de los correspondientes a la condición de balance. Como consecuencia de lo anterior, queda claro que la curva de derating no es universal. El modelo que emplean en este estudio no considera tampoco el efecto pelicular sobre las impedancias de secuencia negativa del rotor y se asume el motor cargado a plena carga, sin tener en cuenta que el efecto del desbalance también es influido por el estado de carga [15].

El efecto del tipo de desbalance sobre el comportamiento operacional de los motores fue más ampliamente abordado en los trabajos publicados por Ching-Yin Lee [10, 11, 12]. Este autor demuestra el efecto sobre la eficiencia, el factor de potencia y la temperatura de un motor sometido a ocho tipos diferentes de condiciones de desbalance con un mismo valor del Factor de Desbalance de Tensión según la definición de la IEC. Esta investigación corrobora que es importante el tipo de desbalance y no solo su magnitud. Basado en estos resultados, Viego y Cogollos [113] se enfocan hacia la posibilidad de encontrar un modelo general en función de la

combinación de varios factores, que de lograrse clasificaría dentro de los métodos estadísticos de estimación de la eficiencia.

Wang [119, 120] enfatiza en los factores de desbalance de tensión y corriente complejos y la sensibilidad del desbalance de corriente evaluada a partir de la relación entre los módulos de estos factores, y la influencia del ángulo del factor de desbalance de tensión complejo sobre el comportamiento del motor. Aunque describe un método analítico para determinar el comportamiento del motor, este se basa en los componentes de secuencia y en su análisis el modelo es incompleto por las simplificaciones que realiza al considerar los parámetros del motor constantes, por no tener en cuenta el efecto pelicular sobre las impedancias del rotor y por no considerar un grupo de pérdidas importantes.

Pillay en el 2002 [87] demuestra que es necesario tener en cuenta en el factor de derating a aplicar, no solo el grado de desbalance de tensión, sino también, los niveles de tensión. En este trabajo se incluye en la curva de derating de la NEMA las desviaciones de sobre y baja tensión a partir del modelo térmico del motor bajo estudio; pero hay que señalar que en el modelo eléctrico que sirve de base para el cálculo de las pérdidas, no considera el efecto pelicular sobre la resistencia y la reactancia del rotor en el circuito de secuencia negativa. Esta simplificación se aparta de la realidad física, sobre todo en máquinas grandes con rotores de jaula profunda.

Ninguno de los trabajos que abordan la operación de motores en redes desbalanceadas tiene en cuenta el efecto económico para el usuario producto del incremento de las pérdidas y la demanda. Solamente en [20] se reporta un análisis económico, pero desde el punto de vista de la disminución de la vida útil sin considerar el componente energético en los costos.

Por supuesto, no solo se ha dirigido la atención al comportamiento de los motores en estado estable alimentados con tensiones desbalanceadas, sino que se han realizado estudios de

simulación e investigaciones experimentales para determinar características del comportamiento dinámico en estas condiciones [43, 44, 63, 108]; y de igual manera, se han dedicado esfuerzos a algunas estrategias y dispositivos de protección [18, 62].

Hay que señalar que en todos estos análisis, ya sea transitorios o para régimen de estado estable, se utilizan modelos que requieren del conocimiento previo de las resistencias e inductancias del motor.

En resumen, puede afirmarse que, si bien la mayoría de los estudios realizados en régimen desbalanceado se han efectuado en laboratorios especializados y están dirigidos al diseño, operación y al estimado del ciclo de vida de la máquina, no ha sido así en condiciones de campo, ni se enfatiza en el uso eficiente de la energía, la demanda al sistema y los costos que deterioran la competitividad empresarial.

Los análisis presentados en la literatura se fundamentan en la teoría clásica de las componentes simétricas, utilizando el criterio de desbalance de la NEMA, la IEEE o factores de desbalance de tensión y corriente complejos, aplicados a los circuitos equivalentes de secuencias positiva y negativa, sin considerar algunos la variación de los parámetros con el orden de secuencia o sin describir las funciones analíticas o empíricas que sustentan estos cambios. Otros concluyen reconociendo la complejidad al determinar la variación de la potencia del motor en función de las corrientes, tensiones, deslizamiento, componentes simétricas y tipo de desbalance, y proponen determinadas ecuaciones para calcular, aplicando factores complejos, reales o mediante modelos aproximados, el comportamiento del motor en condiciones de tensiones sinusoidales desbalanceados.

1.3 Estado del arte sobre computación evolutiva aplicada a la determinación de la eficiencia.

Una solución adecuada es encontrar un método capaz de identificar los parámetros del modelo del motor y con estos, calcular su estado operacional, resolviendo el circuito equivalente. El problema de identificación de parámetros en ingeniería se fundamenta en comparar la respuesta del modelo parametrizado y el sistema físico real, a través de una función de comportamiento que da una medida de cuánto se acerca la respuesta del modelo a la respuesta del sistema. Normalmente esta función de comportamiento es una función de error, de manera que se puede considerar la identificación de parámetros como un problema de búsqueda, reduciéndola a la búsqueda del mínimo error (optimización).

Los métodos de optimización se pueden clasificar en:

- *Métodos basados en cálculos.* Se clasifican a su vez en directos e indirectos. Los directos se mueven de un punto a otro a través del cálculo del gradiente y seleccionan la dirección que tienda al extremo de la función. Los indirectos no trabajan con la función que se desea optimizar sino con una transformación de esta, que normalmente es la derivada; por lo tanto, pueden limitar el problema a tratar. Además, pueden converger a un óptimo local.

- *Métodos enumerativos.* Los métodos enumerativos se basan en la exploración exhaustiva del espacio. Esto permite que siempre encuentren el máximo o el mínimo pero a costa de mucha demora en la búsqueda, por lo que no son efectivos si el espacio de investigación es muy grande.

- *Métodos estocásticos.* Son aquellos que realizan una búsqueda aleatoria del espacio, sin esto querer decir que realicen una búsqueda adireccional. Muchos de estos métodos se han venido desarrollando desde la década del sesenta del siglo pasado, dando como resultado una

serie de procedimientos computacionales heurísticos capaces de resolver problemas con alto grado combinatorio y encontrar buenas soluciones, muy próximas al óptimo. Dentro de estos métodos se encuentran aquellos que clasifican como algoritmos evolutivos, entre los cuales se encuentran los algoritmos genéticos (AG). Sustentado en estas ideas, muchas investigaciones posteriores a 1994 se han dirigido al método del circuito equivalente para determinar las características operacionales del motor asincrónico a partir de la información suministrada por el fabricante, combinada con algoritmos de optimización estocástica. De esta manera, Haque y col. [42] y Nolan y col. [79] utilizaron algoritmos genéticos simples para determinar la resistencia del estator (r_s), la resistencia del rotor (r_r), y una combinación de las reactancias del estator y del rotor (x_s y x_r) utilizando las especificaciones del motor provistas por el fabricante. Entre las especificaciones se necesitan los valores de momento a plena carga, momento de arranque y momento máximo, y se calcula además, la reactancia de magnetización (x_m) a partir del factor de potencia nominal. De manera similar, en un trabajo posterior Nangsue y col. [77] utilizan un algoritmo genético para calcular los parámetros de tres motores a partir de las ecuaciones de momento a plena carga, momento de arranque y momento máximo. Adicionalmente, Nangsue y col. emplean programación genética (PG) como una alternativa, pero sus trabajos no son concluyentes, ya que en ocasiones se obtienen mejores resultados con los AG mientras que en otros la PG se comporta mejor y como ellos mismos especifican, su intención es utilizar estos parámetros en estudios de sistemas donde no se requiere una extrema precisión.

Pillay y col. usan AG en la determinación de parámetros de motores para el cálculo de momentos transitorios [90] y utilizan para ello también los datos de catálogo. Aquí se compara esta técnica con la utilización del método de Newton-Raphson, demostrándose que éste es menos robusto para este propósito, ya que si el estimado inicial de los parámetros no es bueno, puede converger

a resultados completamente erróneos. Otros trabajos recientes también reportan el uso de esta técnica para la obtención de parámetros de modelos dinámicos de máquinas eléctricas [51, 61].

Continuando esta línea de investigación, en 1998 Pillay y col. [86], proponen tres métodos para determinar la eficiencia de los motores asincrónicos, incorporando las ideas básicas del método de segregación de pérdidas, el método del circuito equivalente y AG como técnica para resolver ecuaciones algebraicas no lineales. La utilización de AG en combinación con mediciones de campo tales como corriente y tensión de línea, potencia eléctrica de entrada al motor y velocidad a varios estados de carga para optimizar cierta función de error, permite prescindir de los datos de catálogo pero requiere mayor esfuerzo para implementarlo, además de mediciones de la resistencia del estator. En este trabajo se utiliza un circuito equivalente exacto convencional, que incluye una resistencia para simular las pérdidas adicionales y se concluye que las mediciones propuestas constituyen información suficiente para la determinación precisa de los parámetros del circuito equivalente.

Una variante similar es empleada posteriormente por Charette y col., pero utilizando múltiples puntos de carga a la vez en la función objetivo, lo que mejora el proceso de optimización y logra mayor repetitividad [8]. En este caso se optimiza el error de la impedancia de entrada, y por lo tanto, el método requiere del valor del ángulo de fase entre el tensión y la corriente. Este dato es obtenido de las mediciones de potencia activa y reactiva de entrada, lo que es factible solo en condiciones de operación balanceadas, partiendo de que estas se distribuyen igualmente para cada fase. En los trabajos de Pillay [86] y Charette [8] mencionados, se suponen parámetros del motor constantes para todo el rango de operación y una vez calculados, se afectan las resistencias del estator y del rotor por sus respectivas temperaturas, lo que conduce en el primer caso a corregir las resistencias a la temperatura especificada por la norma para la clase de aislamiento, y en el

segundo, a modelar de manera muy sencilla el incremento de temperatura en función de las pérdidas y de las resistencias térmicas del rotor y del estator que son datos prácticamente desconocidos en la industria.

Las investigaciones más recientes en este tema están encausadas a mejorar el comportamiento de los algoritmos desarrollados. En este sentido, Phumiphak y Chat-uthai en [83], publicado en el 2002, repiten básicamente los trabajos anteriores; pero comparan los resultados de AG cuya población es representada por cadenas binarias con otro que utiliza directamente números reales. Y concluyen que aunque los resultados son similares, se logra economía de cómputo cuando se utilizan números reales.

Escudados en que una de las fortalezas que tiene la técnica de AG es que los resultados no dependen de valores iniciales, en ninguno de los trabajos revisados se ha explorado la creación de la población inicial de manera heurística, ni la utilización de una solución aproximada como punto de partida para mejorar el comportamiento del algoritmo.

También en [83], se propone utilizar el factor de potencia como dato, pero esto puede traer inconvenientes derivados de la conexión del motor y de las condiciones de balance de la fuente de suministro. En este caso los autores emplean como función de error la suma de los errores de potencia y corriente de entrada para tres conjuntos de valores medidos y, por lo tanto, consideran parámetros constantes para cualquier condición de operación. Estos mismos autores, posteriormente, proponen utilizar métodos donde se optimiza en dos puntos de operación (TPT) y en un solo punto (OPT), utilizando también AG [82]. En el primer caso, a partir de dos puntos de operación estiman los parámetros del motor y pueden calcular la eficiencia y otras características operacionales para cualquier punto en todo el rango de carga, con una precisión aceptable. En el segundo caso, calculan la eficiencia del motor solo para el estado de carga que se

mide, siendo estos resultados los que mejor concuerdan con el método B de la IEEE-112 para la determinación de la eficiencia.

En el circuito equivalente propuesto, al igual que en [86], se inserta una resistencia en la rama del rotor para el cálculo de las pérdidas adicionales y además, se recomienda por primera vez, en sus conclusiones, que debe medirse la frecuencia y la velocidad tan preciso como se pueda, aunque en el texto no incluye la frecuencia dentro de las mediciones necesarias ni hace referencia de cómo emplearla.

En este punto es importante destacar que, ninguno de los trabajos anteriores considera, que cuando se calcula el deslizamiento, la desviación de frecuencia puede introducir errores sustanciales debido a la variación de la velocidad sincrónica.

Otra alternativa que se ha explorado para lograr mejor comportamiento de esta técnica, es sustituir los AG simples por otros avanzados. Abdelhadi y col. [1] en el 2005, proponen utilizar AG adaptivos que controlan las fronteras del espacio de búsqueda, adaptándose a ellas a medida que aumentan las generaciones. Como resultado se logra una convergencia más rápida y se logra mayor precisión en la obtención de parámetros. En este caso se emplean valores de la corriente del estator en función del deslizamiento del motor y un vector de cinco parámetros de la máquina. Las corrientes activa y reactiva de referencia son obtenidas del diagrama circular ordinario trazado a partir de los ensayos en vacío y rotor trancado llevados a cabo en laboratorios. El procedimiento, además de que no incluye las pérdidas rotacionales y adicionales, tiene el inconveniente de la dificultad para su ejecución industrial.

Mientras hoy la operación del motor con tensiones balanceadas es considerada una condición normal, en la práctica muchos motores funcionan de manera temporal o permanentemente con desbalance de tensión. En este estado, ninguno de los métodos

descritos anteriormente es adecuado. En las investigaciones actuales es importante introducir los fenómenos de calidad de la energía más comunes, encontrados en los sistemas de suministro, entre ellos el desbalance y la desviación de tensión y frecuencia en el cálculo de la eficiencia.

1.4 Conclusiones parciales.

1. Los métodos desarrollados de evaluación y determinación de la eficiencia de las máquinas asincrónicas no incorporan los efectos de la calidad de la energía como el desbalance y la desviación de tensión y frecuencia como una condición muy común que existe en los escenarios industriales. Este hecho debe ser considerado cuando se propone evaluar el comportamiento de éstas máquinas en condiciones de campo.
2. Una parte considerable de los métodos más precisos propuestos necesitan de la realización de ensayos y/o datos que no siempre están disponibles en un ambiente industrial, sitio donde finalmente tiene lugar el consumo de uso final de la energía eléctrica y hacia donde debe dirigirse el esfuerzo por el ahorro y uso racional de la energía.
3. Ninguno de los métodos que emplean algoritmos genéticos para la determinación de los parámetros del circuito equivalente, se han diseñado para identificar los parámetros del modelo de estado estable del motor alimentado con tensiones desbalanceadas, por lo que presentan las mismas limitaciones en cuanto a su aplicación bajo este tipo de condición.
4. En la literatura consultada no se encuentran referencias relacionadas con el estudio de máquinas en las condiciones de campo propuestas. Este objetivo es fundamental cuando se pretende desarrollar programas de mejoramiento energético, de empleo de máquinas de alta eficiencia o remodelar y perfeccionar un sistema eléctrico de suministro. También es importante cuando se desea determinar la demanda y el impacto económico sobre el sistema.

CAPÍTULO 2

CAPÍTULO 2

MODELO DEL MOTOR ASINCRÓNICO TRIFÁSICO CON TENSIONES DESBALANCEADAS.

Existe todo un abanico de posibilidades para modelar las máquinas asincrónicas con diferentes resultados, de acuerdo con el propósito que se desee. El problema que plantean las tensiones desbalanceadas en la operación estable de las máquinas asincrónicas, puede ser analizado aplicando la teoría general de componentes simétricas para sistemas polifásicos o de manera más directa utilizando la teoría de los campos rotatorios [23]. En este trabajo se obtienen los circuitos equivalentes del motor asincrónico utilizando la transformación de Fortescue que divide un sistema desbalanceado en dos sistemas balanceados de secuencia positiva y negativa. A partir de esta transformación se adopta el modelo convencional d-q para cada secuencia y posteriormente se aplica superposición para obtener los resultados globales [111].

A continuación se expone el modelo que se aplica en esta investigación, así como el tratamiento dado al cálculo de las diferentes pérdidas.

2.1 Simplificaciones utilizadas en el modelo.

El análisis y la modelación de la máquina asincrónica trifásica es un tema complejo con procesos y parámetros variables, en los cuales no es posible emplear una descripción exacta desde el punto de vista de la física de los fenómenos, sin complicar excesivamente la solución o perder claridad de lo esencialmente importante en la operación de la máquina. Por esta razón se imponen ciertas simplificaciones o restricciones que definan el ámbito de validez de la representación del escenario real con el cual se trabaja. Para este caso se consideran las suposiciones generales siguientes:

- 1- El análisis está limitado a la operación en estado estable.
- 2- Se considera solo la componente fundamental de la onda de tensión, o sea, ondas no distorsionadas o con un contenido armónico en el cual la magnitud de cada armónico superior sea igual o menor al 1% del fundamental (Anexo A).
- 3- Se desprecia la no linealidad introducida por la histéresis y la saturación.
- 4- La distribución espacial de la f.m.m. producida por las corrientes en cada una de las fases es prácticamente sinusoidal.
- 5- El rotor de la máquina puede ser de rotor bobinado o de jaula de ardilla, pero se supone por simplicidad (como se hace convencionalmente) que el número de fases del rotor son iguales a los del estator.

Posteriormente se demostrará que cualquier error que estas simplificaciones pudieran introducir, con la aplicación de las técnicas de AG se llega a resultados en el cálculo de las pérdidas y la eficiencia que obvian casi completamente esos problemas.

2.2 Modelo del motor asincrónico para ambas secuencias.

2.2.1 Modelo d-q.

Las ecuaciones clásicas para los circuitos del estator y del rotor del motor asincrónico en términos de las fases, se obtienen aplicando Kirchoff [32, 88] y pueden escribirse en forma matricial como:

$$[v] = \begin{bmatrix} [v_s] \\ [v_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [r_s] & [0] \\ [0] & [r_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [e_s] \\ [e_r] \end{bmatrix} = [r][i] + [e] \quad (2.1)$$

Donde:

$[v]$ Vector de tensiones aplicadas a las fases del estator y rotor, en V.

$[i]$ Vector de corrientes que circulan por cada fase del estator y rotor, en A.

$[e]$ Vector de fuerzas electromotrices inducidas por el acoplamiento magnético de todas las fases, en V.

$[r]$ Matriz cuadrada de 6x6 con las resistencias de cada fase del estator y del rotor en la diagonal principal y el resto de los elementos nulos, en Ω .

Es necesario tener en cuenta que en la expresión 2.1 todas las magnitudes del rotor están referidas al devanado del estator, aunque se omita el factor de reducción.

Si se considera que existe una dependencia lineal entre las concatenaciones de flujo y las corrientes que circulan por las fases se puede plantear:

$$[\lambda] = [L][i] = \begin{bmatrix} [\lambda_s] \\ [\lambda_r] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [L_{sr}] \\ [L_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [i_s] \\ [i_r] \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Donde:

$[L_s]$, $[L_r]$ y $[L_{sr}]$ son las matrices de inductancias debidas a los acoplamientos propios y mutuos entre las bobinas del estator, del rotor y debidas a los acoplamientos mutuos entre las bobinas del estator y las bobinas del rotor, respectivamente, en H.

El vector de fuerzas electromotrices $[e]$ se obtiene derivando la expresión (2.2) con respecto al tiempo lo que se corresponde con la aplicación de la ley de Faraday a un circuito acoplado magnéticamente:

$$[e] = \frac{d}{dt} [\lambda] \quad (2.3)$$

Sustituyendo (2.3) en (2.1) y aplicando la transformación de Park [32, 88], las cantidades en términos de las fases abc se convierten a valores en los ejes d-q, resultando el siguiente sistema de ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes constantes:

Para el devanado del estator:

$$\bar{V}_{sd} = \bar{I}_{sd} \cdot r_s + p\bar{\lambda}_{sd} - \omega\bar{\lambda}_{sq} \quad (2.4)$$

$$\bar{V}_{sq} = \bar{I}_{sq} \cdot r_s + p\bar{\lambda}_{sq} - \omega\bar{\lambda}_{sd} \quad (2.5)$$

Para el devanado del rotor:

$$\bar{V}_{rd} = \bar{I}_{rd} \cdot r_r + p\bar{\lambda}_{rd} - s\omega\bar{\lambda}_{rq} \quad (2.6)$$

$$\bar{V}_{rq} = \bar{I}_{rq} \cdot r_r + p\bar{\lambda}_{rq} - s\omega\bar{\lambda}_{rd} \quad (2.7)$$

Donde:

\bar{V}_{sd} , \bar{I}_{sd} , $\bar{\lambda}_{sd}$ y \bar{V}_{rd} , \bar{I}_{rd} , $\bar{\lambda}_{rd}$ son las proyecciones sobre el eje d de las tensiones, en V; las corrientes, en A y las concatenaciones de flujo de los devanados del estator y del rotor respectivamente, en Wb-vueltas.

\bar{V}_{sq} , \bar{I}_{sq} , $\bar{\lambda}_{sq}$ y \bar{V}_{rq} , \bar{I}_{rq} , $\bar{\lambda}_{rq}$ son las proyecciones sobre el eje q de las tensiones, en V; las corrientes, en A y las concatenaciones de flujo de los devanados del estator y del rotor respectivamente, en Wb-vueltas.

r_s y r_r son las resistencias de las fases del estator y del rotor respectivamente, en Ω .

s es deslizamiento, en p.u.

ω la velocidad sincrónica, en rad/seg.

p es el operador $\frac{d}{dt}$

En estado estable, los términos $p\lambda$ se anulan y las ecuaciones (2.4) a (2.7), como se razona en [32] se transforman en:

$$\begin{aligned}\bar{V}_s &= \bar{I}_s r_s + j\bar{I}_s x_s + j\bar{I}_m x_m \\ 0 &= \bar{I}_r \frac{r_r}{s} + j\bar{I}_r x_r + j\bar{I}_m x_m\end{aligned}\quad (2.8)$$

$$\bar{I}_m = \bar{I}_s + \bar{I}_r$$

Donde:

x_s y x_r son las reactancias de dispersión por fase del estator y del rotor respectivamente, en Ω .

x_m es la reactancia de magnetización, en Ω .

\bar{V}_s es la tensión de fase del estator, en V.

\bar{I}_s e \bar{I}_r son las corrientes por las fases del estator y del rotor respectivamente, en A.

\bar{I}_m es la corriente de magnetización por fase, en A.

En condición de desbalance, los tres vectores de fase no tienen la misma amplitud o el ángulo de fase entre ellos difiere. Como el modelo de Park es válido solamente para un sistema balanceado, se emplea la transformación de Fortescue para generar tres componentes simétricas (componentes de secuencia cero, positiva y negativa) [111].

2.2.2 Componentes simétricas.

El método de las componentes simétricas aplica el principio de superposición descomponiendo el sistema de tensiones desbalanceados en tres sistemas o componentes. Si se define la matriz $[A]$ como en [40]:

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \text{ y su inversa } [A]^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

Donde:

$a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$: operador complejo.

Entonces, las componentes de secuencia de las tensiones de línea estarán dadas por:

$$[\bar{V}_{L012}] = [A]^{-1} [\bar{V}_L] \quad (2.9)$$

Donde:

$[\bar{V}_{L012}]$ es el vector de las tensiones de línea de secuencia cero, positiva y negativa, en V.

$[\bar{V}_L]$ es el vector de las tensiones de línea originales, en V.

La ecuación anterior puede escribirse para las corrientes en lugar de las tensiones como:

$$[\bar{I}_{L012}] = [A]^{-1} [\bar{I}_L] \quad (2.10)$$

Donde:

$[\bar{I}_{L012}]$ es el vector de las corrientes de línea de secuencia cero, positiva y negativa, en A.

$[\bar{I}_L]$ es el vector de las corrientes de línea originales, en A.

En la práctica se trata de determinar las componentes de secuencia de fase de las tensiones y las corrientes a partir de los valores de línea \bar{V}_L e \bar{I}_L conocidos. Los ángulos de estas tensiones y corrientes se calculan de acuerdo con Pitágoras generalizado, empleando como referencia la tensión de línea V_{ab} para las tensiones y la corriente I_a para las corrientes. Comoquiera que estas dos cantidades no están en fase, el defasaje real entre ellas se determina mediante el empleo de los coeficientes de desbalance complejos según procedimiento descrito en el epígrafe 3.3.3.

La conexión del motor a la fuente no posibilita la circulación de corrientes de secuencia cero, ya que es usual que estas máquinas se conecten en delta o en estrella con el neutro aislado. En el caso de estar conectado en delta, las componentes de secuencia cero no están presentes en la

línea, ya que para todo estado la suma de las tensiones de línea es cero ($V_{L0} = 0$). Si la máquina es constructivamente simétrica, la suma de las fem de fase también es cero y no circulan internamente corrientes de secuencia cero de frecuencia fundamental. Por esta razón, solo se tienen en cuenta las componentes de secuencia positiva y negativa. La relación entre las tensiones y corrientes de secuencia de fase y de línea para el motor conectado en estrella es:

$$\begin{aligned} [\bar{V}_{F012}] &= [T] \cdot [\bar{V}_{L012}] \\ [\bar{I}_{F012}] &= [\bar{I}_{L012}] \end{aligned} \quad (2.11)$$

Donde:

$$[T] = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} e^{-j\frac{\pi}{6}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} e^{j\frac{\pi}{6}} \end{bmatrix}$$

En el caso de conexión delta se tiene:

$$\begin{aligned} [\bar{V}_{F012}] &= [\bar{V}_{L012}] \\ [\bar{I}_{F012}] &= [T]^* \cdot [\bar{I}_{L012}] \end{aligned} \quad (2.12)$$

Donde $[T]^*$ es la conjugada de $[T]$

2.2.3 Circuito equivalente para régimen desbalanceado.

Las componentes de secuencia positiva y negativa definen dos sistemas de tensiones y corrientes balanceadas impuestas a los devanados del motor que producen campos magnéticos rotando en sentidos opuestos. La componente de secuencia negativa rota en sentido contrario al giro del motor y la frecuencia de la fem inducida en el rotor es $f_2 = (2 - s_1)f_1$, siendo s_1 el deslizamiento correspondiente al campo de secuencia positiva. Por esta razón, al aplicar las transformaciones

de Park descritas anteriormente a cada uno de estos sistemas, hay que tener en cuenta la diferencia entre las impedancias del rotor para ambas secuencias. Esto es producto de considerar el efecto pelicular debido a las altas frecuencias de las corrientes de secuencia negativa inducidas en el rotor. Finalmente, se obtienen las ecuaciones (2.13) y (2.14) para el estator y para el rotor en estado estable, desacopladas para cada secuencia:

Secuencia positiva:

$$\begin{aligned}\bar{V}_{s1} &= \bar{I}_{s1}r_s + j\bar{I}_{s1}x_s + j\bar{I}_{m1}x_m \\ 0 &= \bar{I}_{r1}\frac{r_{r1}}{s_1} + j\bar{I}_{r1}x_{r1} + j\bar{I}_{m1}x_m\end{aligned}\tag{2.13}$$

$$\bar{I}_{m1} = \bar{I}_{s1} + \bar{I}_{r1}$$

Secuencia negativa:

$$\begin{aligned}\bar{V}_{s2} &= \bar{I}_{s2}r_s + j\bar{I}_{s2}x_s + j\bar{I}_{m2}x_m \\ 0 &= \bar{I}_{r2}\frac{r_{r2}}{s_2} + j\bar{I}_{r2}x_{r2} + j\bar{I}_{m2}x_m\end{aligned}\tag{2.14}$$

$$\bar{I}_{m2} = \bar{I}_{s2} + \bar{I}_{r2}$$

Los términos en (2.13) y (2.14) tienen el mismo significado que en (2.8) pero el orden de la secuencia se especifica con el subíndice 1 para secuencia positiva y 2 para secuencia negativa. Estas ecuaciones son las que representan los circuitos equivalentes clásicos de la Figura 2.1, empleados para el análisis del comportamiento del motor asincrónico en estado estable alimentado con tensiones sinusoidales desbalanceadas.

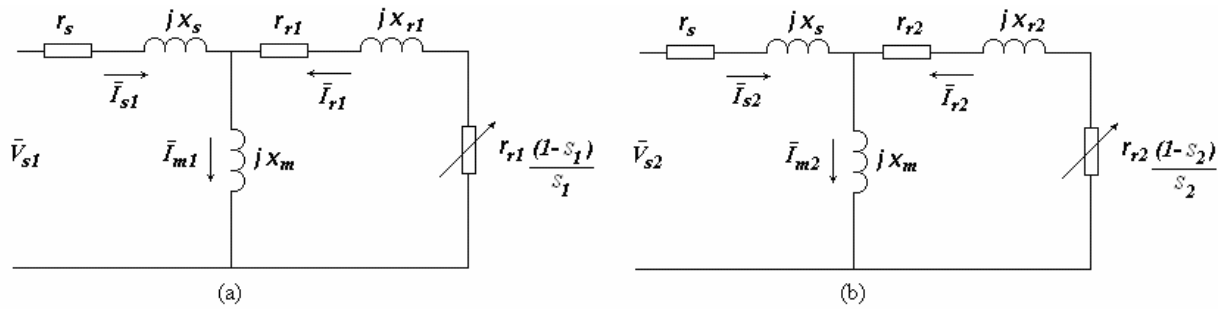


Figura 2.1. Circuitos equivalentes del motor para secuencia positiva (a) y negativa (b).

2.3. Consideración sobre las diferentes pérdidas.

Las pérdidas en las máquinas asincrónicas se clasifican en pérdidas constantes y variables. Las pérdidas constantes dependen muy poco del estado de carga de la máquina y dentro de ellas se agrupan las pérdidas magnéticas y las mecánicas. El resto de las pérdidas, que dependen de la carga en mayor grado, se deben a la disipación de calor por efecto Joule en los devanados del estator y del rotor y se conocen como pérdidas de cobre. Existe además, dentro de las pérdidas variables, las que se conocen como pérdidas adicionales. Estas comprenden, fundamentalmente, las pérdidas en la superficie del rotor debidas a los armónicos de f.m.m. del estator provocados por su estructura dentada; las debidas a las corrientes parásitas en los conductores del estator, en el material ferromagnético y en los elementos estructurales de la máquina, provocados por los flujos de dispersión pulsantes.

2.3.1 Pérdidas de cobre de los devanados.

Estas son proporcionales al cuadrado de los valores eficaces de las corrientes que circulan por los enrollados de las fases del estator y del rotor, así como a los respectivos valores de resistencia. Se calculan como:

Para el estator:

$$P_{cus} = 3 \cdot r_s \cdot (I_{s1}^2 + I_{s2}^2) \quad (\text{W}) \quad (2.15)$$

Para el rotor:

$$P_{cur} = 3 \cdot (I_{r1}^2 \cdot r_{r1} + I_{r2}^2 \cdot r_{r2}) \quad (\text{W}) \quad (2.16)$$

En el circuito de la Figura 2.1 solo están representadas estas pérdidas independientemente y el resto se consideran cubiertas por la potencia mecánica desarrollada por el motor. De esta manera, en las resistencias de carga variables en función del deslizamiento, se simula globalmente, la potencia de salida y el resto de las pérdidas.

2.3.2 Pérdidas rotacionales.

Parte de las pérdidas consideradas constantes, son las pérdidas magnéticas que dependen de los correspondientes valores de la inducción que se tiene en las diferentes partes del circuito magnético. Otra componente de estas pérdidas son las pérdidas mecánicas debidas al rozamiento y a la ventilación. El conjunto de estas pérdidas se conoce como pérdidas de fricción, batimiento y núcleo y es común deducirlas de la salida y simularlas por la potencia disipada en una resistencia r_m insertada en la rama de magnetización por la cual circula la corriente I_m [32, 60].

Las pérdidas constantes pueden calcularse como:

$$P_{fbnCal} = 3 \cdot r_m \cdot (I_{m1}^2 + I_{m2}^2) \quad (\text{W}) \quad (2.17)$$

La variación de estas pérdidas con el desbalance es despreciada por algunos autores como Abreu y Emanuel en [20] que plantean que, para situaciones prácticas donde el desbalance es menor que el 5%, su variación es despreciable, ya que el campo rotacional ligeramente elíptico provoca en algunas regiones del núcleo del estator un menor incremento de la densidad de flujo, mientras que en el resto del núcleo sucede lo contrario. Sin embargo, otros autores sí consideran esta variación en sus modelos [87], así como su dependencia con el nivel de tensión. El hecho de que esta componente de pérdidas tenga una magnitud considerable dentro de las pérdidas globales, además de que dependa poco de la carga, permite utilizarla como una referencia adicional en la

identificación de los parámetros del modelo según se verá en el capítulo 3. Con este objetivo se calculan según razonamientos descritos a continuación.

2.3.2.1 Pérdidas de fricción y batimiento.

En [93] se plantea que las pérdidas de fricción y batimiento; (P_{fb}), pueden expresarse como una fracción (K_{fb}) de la capacidad de la máquina, que en p.u. se ajusta a la siguiente ecuación:

$$K_{fb} = 0.5052 \cdot P_n^{-0.3296} \quad (2.18)$$

Donde:

P_n : Potencia nominal, en W

De esta manera, cuando no se conocen exactamente estas pérdidas por la dificultad de medirlas con ensayos in situ, y considerando además que varían con el cuadrado de la velocidad, se pueden calcular entonces como:

$$P_{fb} = K_{fb} \cdot P_n \cdot \left(\frac{w_r}{w_n} \right)^2 \quad (W) \quad (2.19)$$

Siendo w_r y w_n la velocidad a la cual se encuentra girando la máquina y la velocidad nominal respectivamente, en rpm.

2.3.2.2 Pérdidas magnéticas.

En un campo magnético alterno, las pérdidas en los elementos del circuito magnético se clasifican en pérdidas por histéresis y pérdidas por corrientes parásitas. Estas se determinan según:

$$P_{fe} = (k_h \cdot f + k_e \cdot f^2) \cdot B_m^2 \quad (W) \quad (2.20)$$

Donde:

k_h y k_e son las constantes de pérdidas de histéresis y por corrientes parásitas del material, respectivamente [60].

f : frecuencia del campo magnético alterno, en Hz.

B_m : máxima densidad de flujo, en Wb/m².

Cuando el motor se alimenta desde una fuente con tensiones desbalanceadas, el campo magnético resultante es elíptico debido a que cada componente de secuencia de las corrientes generan sus propias ondas de f.m.m., estableciendo campos que giran en sentidos contrarios uno con respecto al otro y que tienen sus correspondientes inducciones B_{m1} y B_{m2} . Estas componentes son proporcionales a las f.e.m. de secuencia inducidas en el entrehierro, por lo que pueden expresarse con relación al campo circular fundamental, creado por las corrientes simétricas de excitación nominal, como:

$$\frac{B_{m_i}}{B_{m_n}} = \frac{E_{m_i}}{E_{m_n}} \approx \frac{V_i}{V_n} \quad (2.21)$$

Donde:

E_m : f.e.m. inducida en el entrehierro, en V.

V : tensión de fase, en V.

El subíndice i se refiere a la secuencia; 1 para secuencia positiva y 2 para secuencia negativa. El subíndice n indica valores nominales.

Aplicando (2.20) y (2.21) a los elementos del circuito magnético del motor se puede plantear

que:

$$P_{fe} = P_{feNOM} \left[\left(\frac{V_1}{V_n} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{V_2}{V_n} \right)^2 \right] \quad (W) \quad (2.22)$$

Siendo:

P_{fe} : Pérdidas de núcleo en régimen desbalanceado, en W.

P_{feNOM} : Pérdidas de núcleo nominales, medidas por una prueba de vacío o calculadas, en W.

La ecuación (2.22) es una expresión aproximada que se sugiere cuando no se tienen los datos de los materiales ferromagnéticos. Ella no precisa qué parte de las pérdidas pertenece a las pérdidas histerésicas y cuál a las parásitas. El factor 2 surge al considerar iguales las pérdidas de núcleo de secuencia negativa del rotor a las correspondientes del estator.

Para calcular P_{feNOM} se parte de la potencia desarrollada en régimen nominal, que está dada por:

$$P_{des} = P_n + p_a + P_{fb} \quad (\text{W}) \quad (2.23)$$

Donde:

P_n es la potencia nominal, en W.

p_a son las pérdidas adicionales nominales evaluadas según valores recomendados por el fabricante en la determinación de la eficiencia [95], en W.

P_{fb} son las pérdidas de fricción y batimiento calculadas según (2.19), en W.

La potencia electromagnética que se transfiere al rotor en régimen nominal será:

$$P_{emn} = \frac{P_{des}}{(1 - s_n)} \quad (\text{W}) \quad (2.24)$$

donde s_n es el deslizamiento nominal, en p.u.

Si se calculan las pérdidas de cobre del estator nominales como:

$$P_{cusn} = 3 \cdot I_{Fn}^2 \cdot r_{sh} \quad (\text{W}) \quad (2.25)$$

Donde:

I_{Fn} es la corriente de fase nominal, en A.

r_{sh} es la resistencia de fase del estator (r_s) corregida a la temperatura de trabajo, en Ω .

Entonces, las pérdidas de núcleo nominales se determinan como:

$$P_{feNOM} = \frac{P_n}{\eta_n} - P_{emn} - P_{cusn} \quad (\text{W}) \quad (2.26)$$

Donde:

η_n es la eficiencia nominal, en p.u.

De la suma de las expresiones (2.19) y (2.22) resultan las pérdidas de fricción, batimiento y núcleo (P_{fbn}) calculadas para una condición de desbalance o desviación de tensión.

$$P_{fbnEst} = P_{fe} + P_{fb} \quad (\text{W}) \quad (2.27)$$

2.3.3 Pérdidas adicionales.

La evaluación de las pérdidas adicionales es un problema complejo sobre el cual existen diversos puntos de vista. En muchos análisis, se consideran de magnitud relativamente pequeña y no son tenidas en cuenta [70]. Incluso, como se ha expuesto, la norma JEC-37 las ignora en la determinación de la eficiencia. Despreciar estas pérdidas introduce un error significativo, y la manera de considerarlas es definitoria en cuanto a la precisión de los resultados en el cálculo de la eficiencia [22, 95].

Los procedimientos para medirlas son muy complejos [54, 56] y no son apropiados para ser aplicados en condiciones de campo. Por esta razón, es necesario asumirlas de acuerdo a la recomendación de alguna de las normas internacionales e incorporarlas al modelo. Acorde a los valores propuestos en la norma IEEE-112 (sección 5.7.4) [54] para el procedimiento de determinación de la eficiencia con pérdidas adicionales asumidas, es posible simularlas en el circuito equivalente mediante una resistencia insertada en la rama del rotor [82, 86] (Ver Anexo B). Esta resistencia adicional puede ser expresada como:

$$r_{ad} = k_{ad} \cdot r_{r1} \cdot \left(\frac{1-s_n}{s_n} \right) \quad (\Omega) \quad (2.28)$$

Donde:

k_{ad} es la fracción de la potencia nominal del motor que se asume como pérdidas adicionales nominal según [54], en p.u.

r_{r1} es la resistencia del rotor de secuencia positiva, en Ω .

s_n es el deslizamiento nominal, en p.u.

De esta manera las pérdidas adicionales se calculan como:

$$P_{ad} = 3 \cdot r_{ad} \cdot (I_{r1}^2 + I_{r2}^2) \quad (\text{W}) \quad (2.29)$$

2.3.4 Circuito equivalente modificado.

A partir de lo expresado en los epígrafes 2.3.2 y 2.3.3, los circuitos equivalentes de la Figura 2.1 se modifican como se propone en la Figura 2.2.

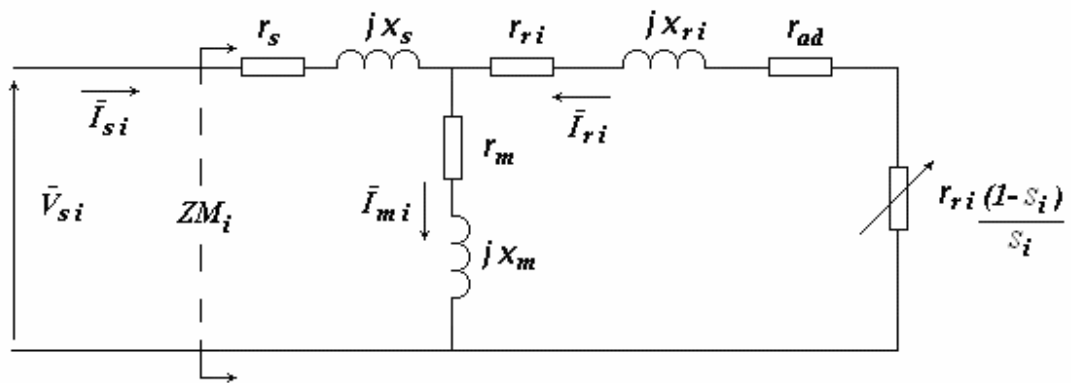


Figura 2.2. Circuito equivalente del motor para ambas secuencias.
i=1: secuencia positiva, i=2: secuencia negativa.

En este circuito, la potencia de salida en el eje de la máquina está representada por la resistencia de carga en la rama del rotor, variable con el deslizamiento, y puede expresarse como:

$$P_{out} = 3 \cdot \sum_{i=1}^2 \left(I_{ri}^2 \cdot r_{ri} \cdot \frac{1-s_i}{s_i} \right) \quad (\text{W}) \quad (2.30)$$

Donde:

s_i es el deslizamiento para cada secuencia, en pu.

$$s_1 = \frac{(w - w_r)}{w} \quad (\text{p.u.}) \quad (2.31)$$

$$s_2 = 2 - s_1 \quad (\text{p.u.}) \quad (2.32)$$

w y w_r son la velocidad sincrónica y la velocidad real del rotor respectivamente, en rpm

2.3.5. Consideraciones sobre el deslizamiento.

El valor del deslizamiento está definido por expresión (2.31). La velocidad sincrónica depende de la frecuencia de la red (f_i). Cuando se mide la velocidad del rotor y se calcula el deslizamiento, para otros cálculos y propósitos se hace considerando la frecuencia constante, igual a la nominal. De esta manera, se está asumiendo que la velocidad sincrónica también es constante y la correspondiente a la frecuencia nominal, en dependencia del número de polos de la máquina. Esto puede traer errores en el cálculo de la eficiencia y la carga, sobre todo cuando el motor trabaja muy subcargado y la velocidad de trabajo se acerca mucho a la sincrónica [86], ya que a los errores que pudiera introducir la medición de velocidad se incorpora la suposición de que la velocidad sincrónica es constante. Por esta razón, para obtener mayor precisión, en este trabajo se calcula la velocidad sincrónica con una corrección por frecuencia según:

$$w = \frac{120 \cdot f_{1n}}{p} \cdot \frac{f_i}{f_{1n}} \quad (\text{rpm}) \quad (2.33)$$

Donde:

f_{1n} es la frecuencia nominal de la red, en este caso 60 Hz.

f_i es la frecuencia real de la red, en Hz.

p es el número de polos.

2.4 Corrientes y potencias calculadas.

Del circuito equivalente de la Figura 2.2, las corrientes de fase del estator para cada secuencia pueden ser calculadas como:

$$\bar{I}_{si} = \frac{\bar{V}_{si}}{\bar{ZM}_i} \quad (\text{A}) \quad (2.34)$$

Donde:

\bar{V}_{si} es la tensión de fase de secuencia i , en V.

\bar{ZM}_i es la impedancia total de fase para el circuito de secuencia i , en Ω .

De esta manera, pueden reescribirse las corrientes de secuencia de fase como:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{F012} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{I}_{s1} \\ \bar{I}_{s2} \end{bmatrix} \quad (\text{A}) \quad (2.35)$$

Las corrientes de línea para cada secuencia $[\bar{I}_{L012}]$ se obtienen aplicando (2.11) o (2.12) en dependencia de la conexión del motor y con ellas se calculan las corrientes de línea desbalanceadas según:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{LCalc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{I}a_{Calc} \\ \bar{I}b_{Calc} \\ \bar{I}c_{Calc} \end{bmatrix} = [A] \cdot [\bar{I}_{L012}] \quad (\text{A}) \quad (2.36)$$

La potencia eléctrica de entrada en función de las impedancias del circuito equivalente puede ser calculada a partir de la suma de las expresiones (2.15), (2.16), (2.17), (2.29) y (2.30) que finalmente puede expresarse como:

$$P_{inCalc} = 3 \cdot \sum_{i=1}^2 \left(I_{si}^2 \cdot r_s + I_{mi}^2 \cdot r_m + I_{ri}^2 \cdot \left(\frac{r_{ri}}{s_i} + r_{ad} \right) \right) \quad (\text{W}) \quad (2.37)$$

Como se plantea en el epígrafe 1.3, los parámetros del circuito equivalente se estiman usando mediciones de corrientes de línea y potencia eléctrica de entrada como referencia para compararlos con los valores calculados por las expresiones (2.36) y (2.37). Aunque las pérdidas de fricción, batimiento y núcleo no constituyen un parámetro de entrada, se emplea como una

restricción adicional en el algoritmo propuesto a partir de su valor calculado por la expresión (2.27).

Una vez identificados los parámetros del circuito equivalente para ambas secuencias utilizando el algoritmo genético descrito en el próximo capítulo, se calcula el comportamiento energético del motor utilizando las mismas expresiones anteriores para las pérdidas y la potencia de salida. La eficiencia está dada por:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \cdot 100 \quad (\%) \quad (2.38)$$

2.5 Conclusiones parciales

1- El modelo del motor que se utiliza se deriva de la aplicación de las componentes simétricas y del modelo del motor en el marco d-q restringido a la operación de estado estable. Como se reporta en la literatura internacional, el tratamiento de las diferentes pérdidas ha sido incluido en el modelo a partir de resistencias óhmicas que permiten contabilizarlas, pero adaptadas al caso de tensiones desbalanceadas.

2- En el modelo se tiene en cuenta la frecuencia de la red para un cálculo del deslizamiento más preciso. Por esta razón, se debe incluir en las mediciones de campo, sobre todo cuando se emplean analizadores de redes que dan esta posibilidad.

CAPÍTULO 3

CAPÍTULO 3

ALGORITMO GENÉTICO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA EN CONDICIONES DE CAMPO.

En este capítulo se describe el método propuesto para estimar las pérdidas y la eficiencia de los motores considerando condiciones no nominales en los terminales de alimentación, específicamente desbalances y desviaciones de tensión y frecuencia. Para este propósito se emplea un AG como núcleo de la aplicación. El AG constituye la técnica para resolver el circuito equivalente del motor y determinar las pérdidas y la eficiencia.

3.1 Fundamentos de los Algoritmos Genéticos.

La solución de problemas de cómputo complejos ha llevado a la necesidad de desarrollar técnicas no convencionales, entre las que se encuentran aquellas inspiradas en modelos biológicos. Un modelo que explica la destreza de los organismos vivos para perpetuarse a través de una descendencia exitosa es el proceso de evolución natural. Este modelo ha servido para proponer soluciones novedosas a diversos problemas en el campo de la ingeniería a partir de métodos de computación evolutiva, dentro de los que se encuentran los AG.

Los AG constituyen una representación del modelo evolutivo, de manera que un problema específico actúa como medio ambiente dentro del cual se desempeña una población formada por individuos que son soluciones candidatas del problema en cuestión. Cada uno de estos individuos (fenotipo), está formado por la información contenida en su genoma (genotipo) y que bien pueden ser las variables independientes cuyo valor se desea conocer.

Similarmente a como se propone para la evolución natural, los AG tienden a encontrar mejores soluciones al problema de manera progresiva, gracias a la “renovación del material genético” en

la población por medio de los llamados operadores genéticos. La adaptación de los individuos a su ambiente, se determina por la función de aptitud (función *fitness*), la cual constituye una medida de la calidad de la solución.

Los elementos básicos de un AG son: la selección de las soluciones basados en sus bondades, la reproducción por cruzamiento, y la mutación para cambiar aleatoriamente los genes. La combinación adecuada de estos elementos aplicada iterativamente sobre una población de individuos ofrece un mecanismo de evolución que nos acerca a la solución del problema.

En general, el AG procede como sigue:

1-Generación aleatoria o heurística de una población inicial, $P(0)$.

2-En cada ciclo evolutivo t (generación), se selecciona un subconjunto de individuos $P'(t)$, después de ser evaluados bajo el criterio predefinido por la función de aptitud para reproducirse. Los individuos más aptos tienen más posibilidades de reproducirse, mientras los menos aptos tienden a desaparecer.

3-Se modifica la población seleccionada, para encontrar nuevos puntos en el espacio de búsqueda, aplicando operadores genéticos como el cruzamiento y la mutación.

4-Se introducen los nuevos individuos $P''(t)$ en la población de la siguiente generación $P(t+1)$ y se repite el proceso a partir de la selección de los más aptos.

5-El fin de la búsqueda queda condicionada a un número determinado de generaciones, a la obtención de un valor aceptable de la función de aptitud, etc.

El pseudocódigo de un AG básico es el siguiente [30, 96]:

comenzar

$t=0$

inicializar $P(t)$

evaluar $P(t)$

mientras (no condición de término) hacer:

$t=t+1$

seleccionar $P(t)$ a partir de $P(t-1)$

cruzamiento y/o mutación $P(t)$

evaluar $P(t)$

fin

fin

El cruzamiento permite al proceso evolutivo moverse hacia mejores regiones en el espacio de búsqueda, mientras que la mutación previene de una convergencia prematura hacia óptimos locales, al muestrear aleatoriamente nuevos puntos del espacio de búsqueda.

Los elementos de búsqueda que se combinan en los AG (búsqueda determinística y estocástica) presentan algunas ventajas con relación a otros métodos basados en gradientes, aleatorios, exhaustivos, etc. Entre las ventajas de los AG se pueden mencionar las siguientes:

- No necesitan un conocimiento auxiliar del problema, tales como derivadas o buenas suposiciones iniciales.
- Exploran simultáneamente muchos puntos del espacio de búsqueda y por tanto, evitan más fácilmente la convergencia hacia un óptimo local.
- Alcanzan un buen equilibrio entre la explotación de las mejores soluciones y la exploración del espacio de búsqueda.

Para aprovechar estas ventajas, se utilizan las funciones de AG del toolbox del Matlab 7.0 para resolver el circuito equivalente y determinar las pérdidas y la eficiencia operacional de un motor eléctrico.

3.2 Implementación del algoritmo.

3.2.1 Función de aptitud empleada.

La función de aptitud juega un papel fundamental en la clasificación potencial de las soluciones en términos de sus características; es el criterio de optimización y evaluación de la calidad de los individuos. Se desarrolla a partir de los valores del fenotipo y da como resultado la calidad o aptitud del individuo.

El objetivo del AG es minimizar los errores entre los valores medidos y calculados de potencia eléctrica de entrada y corrientes de línea para el estado de carga considerado, lo que implica que los parámetros identificados solo sean representativos de la operación del motor en este estado. Se utiliza como restricción adicional las pérdidas rotacionales. Esto básicamente constituye un problema de optimización multiobjetivo. Por lo tanto, las funciones de error que se emplean en el AG, cada una de las cuales constituye una función objetivo, son las siguientes:

$$f_1 = (I_{a_{Calc}} - I_{a_{Med}}) \times 100 / I_{a_{Med}} \quad (3.1)$$

$$f_2 = (I_{b_{Calc}} - I_{b_{Med}}) \times 100 / I_{b_{Med}} \quad (3.2)$$

$$f_3 = (I_{c_{Calc}} - I_{c_{Med}}) \times 100 / I_{c_{Med}} \quad (3.3)$$

$$f_4 = (P_{inCalc} - P_{inMed}) \times 100 / P_{inMed} \quad (3.4)$$

$$f_5 = (P_{fbnCalc} - P_{fbnEst}) \times 100 / P_{fbnEst} \quad (3.5)$$

Donde:

$I_{aCalc}, I_{bCalc}, I_{cCalc}$ son las tres corrientes de línea calculadas según (2.36) para cada individuo de la población, en A.

$I_{aMed}, I_{bMed}, I_{cMed}$ son las corrientes medidas para el estado de carga analizado, en A.

P_{inCalc} es la potencia eléctrica de entrada calculada según (2.37), en W.

P_{inMed} es la potencia eléctrica de entrada medida, en W.

$P_{fbcCalc}$ pérdidas de fricción, batimiento y núcleo calculadas por (2.17), en W.

P_{fbcEst} pérdidas de fricción, batimiento y núcleo estimadas según (2.27) o medidas en el caso de que esto sea posible, en W.

Y la función de aptitud a minimizar es:

$$error = \sum_{i=1}^5 |f_i| \quad (3.6)$$

El cálculo del error se repite para cada nuevo individuo (nuevo conjunto de parámetros del circuito equivalente del motor) hasta que se cumplen los requisitos de parada del AG.

3.2.2 Tamaño de la población y población inicial.

La población es construida usando individuos. Cada individuo representa una posible solución al problema y constituye un vector de solución en el espacio del problema. La codificación empleada para representar las impedancias del motor es una cadena \vec{Y} de variables reales. El individuo k de la generación t es definido por:

$$\vec{Y}_k^t = (y(1,k), y(2,k), y(3,k), \dots, y(8,k)) \quad \text{para } 1 \leq k \leq n \quad (3.7)$$

Donde $y(i,k)$ son los genes del individuo y cuyos valores numéricos son los valores de resistencias y reactancias del modelo del motor asincrónico. La Figura 3.1 muestra la matriz para

n individuos y las ocho impedancias que intervienen en el circuito equivalente del motor para ambas secuencias.

		Impedancias							
		r_s	x_s	r_m	x_m	r_{r1}	x_{r1}	r_{r2}	x_{r2}
I n d i v i d u o s	1	$y(1,1)$	$y(2,1)$	$y(3,1)$	$y(4,1)$	$y(5,1)$	$y(6,1)$	$y(7,1)$	$y(8,1)$
	2	$y(1,2)$	$y(2,2)$	$y(3,2)$	$y(4,2)$	$y(5,2)$	$y(6,2)$	$y(7,2)$	$y(8,2)$
	3	$y(1,3)$	$y(2,3)$	$y(3,3)$	$y(4,3)$	$y(5,3)$	$y(6,3)$	$y(7,3)$	$y(8,3)$
	·	·	·	·	·	·	·	·	·
	·	·	·	·	·	·	·	·	·
	·	·	·	·	·	·	·	·	·
	·	·	·	·	·	·	·	·	·
	n	$y(1,n)$	$y(2,n)$	$y(3,n)$	$y(4,n)$	$y(5,n)$	$y(6,n)$	$y(7,n)$	$y(8,n)$

Figura 3.1 Código empleado para la población del AG con n individuos.

El tamaño de la población (número de individuos) afecta la solución del AG y la eficiencia de la simulación. Una gran población casi siempre está asociada con un tiempo de la simulación más largo, que influye en la razón de convergencia. Con una población pequeña, se corre el riesgo de converger a un óptimo local. En el Anexo C se muestra el efecto del tamaño de la población en el comportamiento del AG propuesto. Como se explica en el epígrafe 3.3, por razones de calidad física y tiempo de convergencia, la población inicial no se define de manera completamente aleatoria.

3.2.3 Opciones de reproducción y operadores genéticos.

Las opciones de reproducción indican como el algoritmo genético crea la próxima generación.

Estas opciones son:

- *Operador elitista:* Este operador conserva las mejores soluciones encontradas, manteniendo un grupo de ellas en la próxima generación. Esta permanencia asegura que la mejor solución no se pierda cuando se pasa de una generación a otra. La mejor solución reemplaza a un individuo seleccionado aleatoriamente en la próxima generación. En este trabajo se emplea el predeterminado en el Matlab para la función *Elitecount*, cuyo valor es 2.
- *Fracción de cruzamiento:* Especifica que fracción de la próxima generación, que no sean los individuos élites, son obtenidos por cruzamiento. También en este análisis se emplea la predeterminada, o sea, $\text{CrossoverFraction} = 0.8$.

Operador de selección: Este operador aporta a la técnica de búsqueda mayor potencia y robustez. Se emplea una función de selección *uniforme estocástica*. Esta es la función predefinida en el toolbox de algoritmo genético del Matlab 7.0, la cual traza una línea en la que cada padre corresponde a una sección de la línea, de longitud proporcional a su valor escalado. El algoritmo se mueve a lo largo de la línea con pasos de igual tamaño. A cada paso, el algoritmo localiza un padre de la sección en la cual se detiene. El primer paso es un número aleatorio uniforme menos el tamaño del paso.

Operador de cruzamiento: Las opciones de cruzamiento especifican cómo el algoritmo genético combina a dos individuos, o padres, para crear un nuevo individuo para la próxima generación. La función de cruzamiento empleada es *heurística* con una proporción $R = 1,5$. Si $p1$ y $p2$ son los individuos seleccionados para reproducirse y $p1$ es el padre con mejor función de aptitud, la función de cruzamiento *heurística* devuelve como nuevo individuo: $p3 = p2 + R \cdot (p1 - p2)$.

Operador de mutación: El propósito de la mutación es introducir una perturbación ligera para aumentar la diversidad de individuos después del cruzamiento, previniendo a los individuos de

aglomerarse y causar convergencia prematura de solución. Se toma como probabilidad de mutación 0,01.

3.2.4 Criterios de parada y tratamiento de las restricciones.

Como se conoce, el algoritmo va obteniendo progresivamente mejores soluciones y detiene la búsqueda cuando cumple los requerimientos de parada impuestos. En este caso se especifica como criterio de parada un *fitness límite* con un valor adecuadamente pequeño ($1 \cdot 10^{-15}$), o sea, cada corrida cesa cuando el valor de la función de aptitud del mejor individuo está por debajo de este valor. Esto significa convergencia y obtención de parámetros del modelo que garantizan un error prácticamente igual a cero de los valores de corrientes y potencias calculados con relación a los valores de referencia.

También el algoritmo se detiene cuando no hay cambios en el valor de la función de aptitud del mejor individuo durante un número de generaciones igual a 50, especificada por la función *StallGenLimit*.

Por último, existe la opción de detener el proceso por decisión del usuario mediante el botón *stop* en la ventana de gráfico que muestra el comportamiento del algoritmo para cada generación.

La penalización se aplica frecuentemente para manejar restricciones en los algoritmos evolutivos. Esta técnica convierte el problema original en un problema sencillo, castigando las violaciones de las condiciones especificadas como restricciones.

El método de penalización es simple en su concepto y aplicación. En el caso de este trabajo, es posible que aparezcan conjuntos de combinaciones en las cuales existan valores de impedancias negativos. Estos constituyen individuos no factibles o ilegales que deben ser desechados, pues no tienen sentido físico. Para manejar estos individuos se penaliza la función de aptitud cuando encuentre valores de reactancia o resistencia negativas en el modelo.

La penalización consiste en asignar valores extremadamente altos a las corrientes de línea y a la potencia calculada si algún elemento $y(i,k) < 0$, lo que hace que la función de error se aleje del mínimo. Además, el conocimiento previo del modelo dicta que se especifique también el cumplimiento de que:

$$r_s \leq y(1,k) \leq r_{sh}, \quad y(4,k) \leq (3,5Zb), \quad y(7,k) > y(5,k), \quad y(8,k) < y(6,k), \quad y(2,k) \geq y(6,k).$$

Donde:

r_s y r_{sh} son las resistencias de fase del estator sin y con corrección por temperatura, respectivamente, de acuerdo a la clase de aislamiento del motor, en Ω .

Zb es la impedancia base, definida como la relación entre la tensión y corriente nominal de fase del motor, en Ω .

Otra forma de considerar las restricciones consiste en la aplicación de procedimientos que obliguen a su cumplimiento, los que se desarrollan para el problema específico que se quiere resolver. Utilizando la función f_5 como una restricción adicional, se logra que los parámetros de la rama de magnetización garanticen que la partida de pérdidas rotacionales se mantenga muy cercana a los valores calculados según epígrafe 2.3.2.

3.3 Determinación de la población inicial.

Aunque teóricamente los AG son capaces de encontrar óptimos globales, en problemas de optimización es importante que la población inicial contenga individuos con material genético de buena calidad. En la mayoría de las aplicaciones de AG, la población inicial se genera aleatoriamente. En el caso de este trabajo, esta se construye heurísticamente implantando repetidamente en la misma, un individuo que constituye una solución aproximada del problema. El paso de la repetición de la solución implantada es 10, aunque esto no es determinante, ya que

el elitismo empleado garantiza que solo se conserven en la próxima generación los dos mejores individuos encontrados.

Existen diferentes métodos descritos en la literatura para identificar parámetros del motor en dependencia de la aplicación y de los datos disponibles; y bien puede ser utilizado cualquiera con el propósito de mejorar el comportamiento del AG, ya que como se aprecia en el Anexo D se reduce el tiempo de convergencia. Además, se establece la búsqueda en un entorno con significado físico real del modelo del motor asincrónico. El procedimiento para obtener este vector de solución aproximada se describe a continuación.

3.3.1 Nueva aproximación para determinar los parámetros de la máquina.

Como resultado de esta investigación se propone un nuevo procedimiento en [38] que permite minimizar las mediciones eléctricas de campo a valores de tensiones y corrientes de línea, la potencia de entrada P_{inMed} y a la medición de la resistencia r_s del estator. Las tres primeras mediciones se pueden obtener con instrumentos tradicionales o con un analizador de redes conectado a los terminales de entrada del motor. El valor de la resistencia se mide entre dos terminales y se determina la resistencia de una de fase, debiendo ser corregida a la temperatura especificada (r_{sh}). Si no se tiene el valor de temperatura a carga nominal, se corrige según los valores recomendados en la sección 5-2.1 de la norma IEEE-112 [54] para la clase de aislamiento del motor. Es necesario conocer la velocidad w_r , obtenida con un tacómetro óptico según recomienda [54]. Como se comprende, estas mediciones no requieren esfuerzo adicional ya que son las mismas que utiliza el AG y se emplean en una aplicación de Matlab para estimar un juego de parámetros aproximados.

Aunque en la actualidad los métodos de cálculo numéricos pueden no necesitar, para muchas aplicaciones, el diagrama circular determinado por el lugar geométrico de la corriente del estator,

este diagrama brinda información sobre aspectos importantes con gran simplicidad y es universalmente conocido. El método propuesto emplea los datos de chapa y el punto de carga medido como dos estados operacionales para construir este diagrama circular y a partir de él calcular un juego de parámetros del circuito equivalente del motor.

En primer lugar es necesario determinar las componentes de secuencia de las tensiones y corrientes de fase. En la Figura 3.2, el punto A está dado por el extremo del vector de corriente de fase nominal I_n que se defasa un ángulo φ_n de la tensión de fase V_n , correspondiente al ángulo del factor de potencia nominal.

De las mediciones se determina el punto B correspondiente a la componente de secuencia positiva de la corriente de operación real por la fase (I_{s1}) y su ángulo de defasaje (φ_{s1}) con relación a la componente de secuencia positiva de la tensión de fase (V_{s1}), que se toma como referencia en fase con V_n .

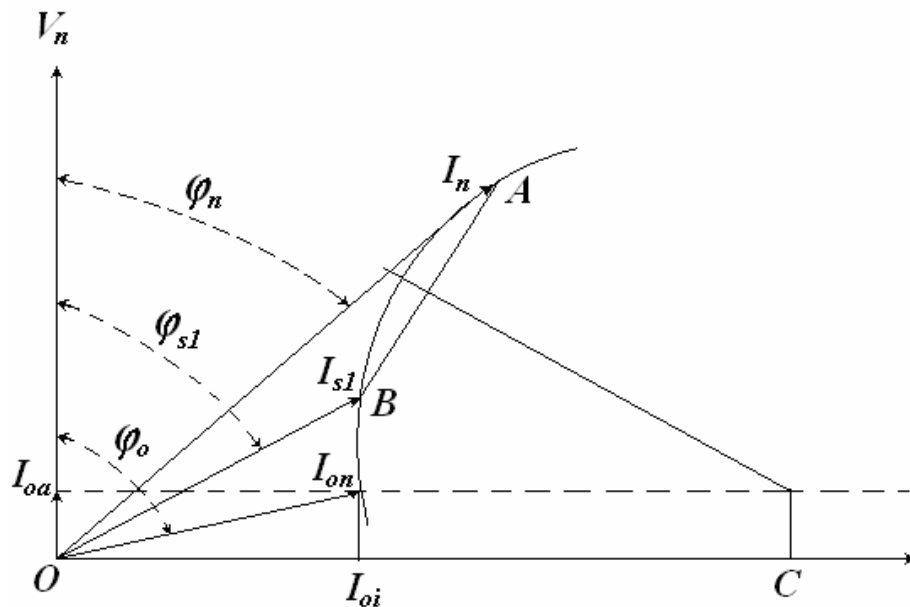


Figura 3.2 Diagrama circular obtenido a partir de las mediciones de campo para el cálculo aproximado de la corriente en vacío.

Debido a que puede ser no deseable una prueba en vacío, se hace necesario estimar las pérdidas de núcleo según (2.26) y sumarle las pérdidas de fricción y batimiento estimadas por (2.19) para calcular la corriente en vacío nominal I_{on} .

La componente activa de la corriente en vacío I_{oa} estará dada por:

$$I_{oa} = I_{on} \cdot \cos \varphi_o = \frac{(P_{fbNOM} + P_{fb})}{3 \cdot 0,95 \cdot V_n} \quad (A) \quad (3.8)$$

y este valor de la componente activa de la corriente en vacío, fija el eje de la circunferencia dibujado con líneas discontinuas en el diagrama de la Figura 3.2, a 90° en atraso al vector de referencia V_n .

La distancia \overline{OC} desde el origen O define el centro de la circunferencia, que significa el lugar geométrico de las corrientes de fase en el diagrama circular. Este punto se determina a partir de las componentes activas y reactivas de las corrientes nominal y real como sigue:

$$\overline{OC} = I_{s1} \cdot \text{sen} \varphi_{s1} + 0,5(I_n \cdot \text{sen} \varphi_n - I_{s1} \cdot \text{sen} \varphi_{s1}) - \frac{I_{s1} \cdot \cos \varphi_{s1} + 0,5(I_n \cdot \cos \varphi_n - I_{s1} \cdot \cos \varphi_{s1}) - I_{oa}}{\tan \left(90 + \tan^{-1} \left(\frac{I_n \cdot \cos \varphi_n - I_{s1} \cdot \cos \varphi_{s1}}{I_n \cdot \text{sen} \varphi_n - I_{s1} \cdot \text{sen} \varphi_{s1}} \right) \right)} \quad (A) \quad (3.9)$$

La componente reactiva de la corriente en vacío estará dada por:

$$I_{oi} = I_{on} \cdot \text{sen} \varphi_o = \overline{OC} - \sqrt{(I_{ni} - \overline{OC})^2 + (I_{na} - I_{oa})^2} \quad (A) \quad (3.10)$$

Siendo I_{na} e I_{ni} la componente activa y reactiva de la corriente nominal respectivamente, en A.

Obtención de los parámetros.

Con este diagrama circular, se determinan los parámetros del circuito equivalente del motor asincrónico con la rama de magnetización colocada a la entrada de alimentación, como se muestra en la Figura 3.3.

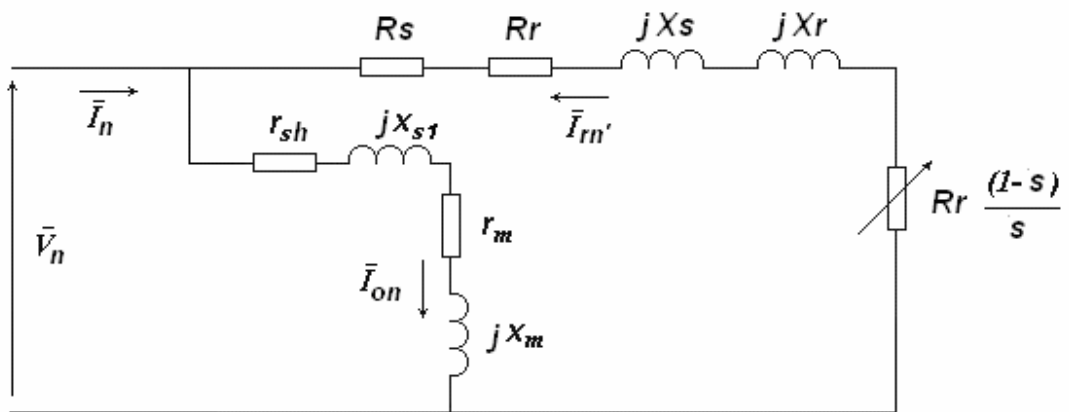


Figura 3.3 Circuito equivalente que responde al diagrama circular del motor.

De este circuito, la corriente nominal por la rama principal es:

$$\bar{I}_{m'} = \bar{I}_n - \bar{I}_{on} \quad (\text{A}) \quad (3.11)$$

El valor de la reactancia de cortocircuito se define como:

$$X_s + X_r = \frac{V_n}{2 \cdot \sqrt{(I_{ni} - OC)^2 + (I_{na} - I_{oa})^2}} \quad (\Omega) \quad (3.12)$$

En este punto se distribuyen las reactancias según diseño NEMA como:

$$X_s = k \cdot X_r \quad (\Omega) \quad (3.13)$$

Donde: $k = 1$ para diseños A, D y rotor bobinados, $k = 2/3$ para diseño B y $k = 3/7$ para diseño C.

En caso de desconocer el diseño se toma $X_s = X_r$ ya que cualquier desviación produce errores mínimos [112]; pero, lo que es más importante, estos parámetros sólo serán usados en la generación heurística de la población inicial como punto de partida para el AG.

La impedancia de la rama de vacío se calculan como:

$$\bar{Z}_m = \frac{\bar{V}_n}{\bar{I}_{on}} \quad (\Omega) \quad (3.14)$$

de donde:

$$r_m = \text{Re} |\bar{Z}_m| - r_{sh} \quad (\Omega) \quad (3.15)$$

$$x_m = \text{Im} |\bar{Z}_m| - x_s \quad (\Omega) \quad (3.16)$$

De [60] se conoce que el coeficiente de reducción de los parámetros al circuito equivalente exacto se calcula con precisión adecuada como:

$$\sigma = 1 + \frac{x_s}{x_m} \quad (3.17)$$

El valor de σ está comprendido entre 1,04 y 1,08 para máquinas reales, por lo que se sigue un proceso iterativo para calcular σ , x_s y x_m , como se muestra en el Anexo F.

Una vez calculado los parámetros del circuito de vacío y σ , se continúa calculando el resto de los parámetros:

$$x_{r1} = \frac{Xr}{\sigma^2} \quad (\Omega) \quad (3.18)$$

La resistencia del rotor se calcula a partir de las pérdidas de cobre nominales y se reduce para llevarla al circuito equivalente exacto:

$$Rr = \frac{P_{curn}}{3 \cdot (I_{rn'})^2} = \frac{P_{emn} \cdot S_n}{3 \cdot (I_{rn'})^2} \quad (\Omega) \quad (3.19)$$

$$r_{r1} = \frac{Rr}{\sigma^2} \quad (\Omega) \quad (3.20)$$

De esta manera, se dispone de todos los parámetros del circuito representado en la Figura 3.4.

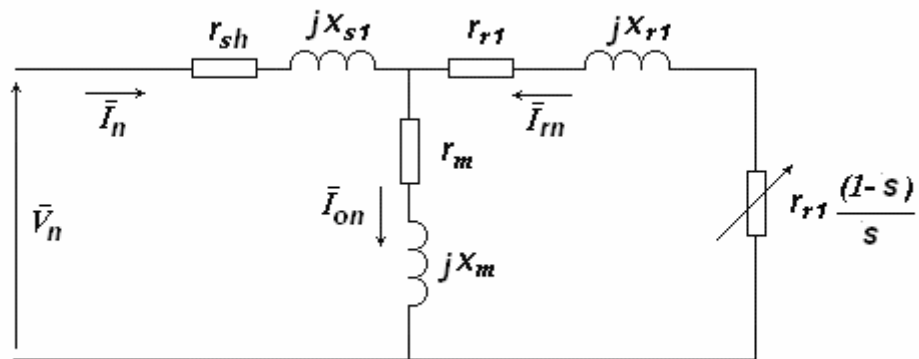


Figura 3.4 Circuito equivalente exacto del motor asincrónico.

3.3.2 Adaptación al caso de tensiones desbalanceadas

Para determinar los parámetros del motor en condiciones de desbalance de tensión se emplea el modelo convencional, compuesto por dos circuitos equivalentes similares al de la Figura 3.4, pero con parámetros diferentes en la rama del rotor, debido fundamentalmente al efecto que sobre la resistencia y la reactancia tiene la frecuencia.

El procedimiento consiste en determinar las tensiones y las corrientes de fase del estator de secuencia positiva y negativa \bar{V}_{s1} , \bar{V}_{s2} , \bar{I}_{s1} , \bar{I}_{s2} , ya que por el motor no circularán componentes de secuencia cero; y con las componentes de secuencia positiva, calcular como se describe en el epígrafe 3.3.1 los parámetros del circuito de esta secuencia. Posteriormente, se mantienen los valores de las impedancias del estator y de la rama de magnetización (r_{sh} , x_s , r_m , x_m) y se determina la impedancia del circuito del rotor para secuencia negativa como:

$$\bar{Z}_{r2} = \frac{\bar{V}_{s2} - \bar{I}_{s2} \cdot (r_{sh} + jx_{s1})}{\bar{I}_{s2} - \frac{\bar{V}_{s2} - \bar{I}_{s2} \cdot (r_{sh} + jx_{s1})}{r_m + jx_m}} \quad (\Omega) \quad (3.21)$$

La resistencia y la reactancia del circuito del rotor para secuencia negativa será entonces:

$$r_{r2} = \operatorname{Re} \left| \bar{Z}_{r2} \right| \cdot s_2 \quad (\Omega) \quad (3.22)$$

$$x_{r2} = \operatorname{Im} \left| \bar{Z}_{r2} \right| \quad (\Omega) \quad (3.23)$$

Cuando se sigue este procedimiento, es necesario determinar de manera precisa el ángulo de defasaje correcto entre las corrientes de secuencia de fase y sus respectivas tensiones de secuencia de fase. En este caso, en que existe asimetría de corrientes, tensiones y potencias, no se puede utilizar el factor de potencia como indicador de este defasaje.

Lo anterior se hace más crítico si el motor se encuentra conectado en delta, en cuyo caso, aunque algunos instrumentos como los analizadores de redes, dan los factores de potencia por fase, esto solo tiene valor indicativo y no significa que puedan ser empleados en algún cálculo preciso.

3.3.3 Determinación del ángulo de defasaje entre tensiones y corrientes.

El defasaje real entre las corrientes y las tensiones de secuencia se determina a partir de los coeficientes de desbalance complejos de corriente y de tensión, para lo cual también se necesita medir la potencia total de entrada al motor.

Por definición (epígrafe 1.2.1), el coeficiente complejo de desbalance de tensión se escribe como:

$$\bar{K}_V = \frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} = k_V \cdot e^{j\theta_V} \quad (3.24)$$

Donde:

\bar{V}_1 y \bar{V}_2 son las componentes secuencia positiva y negativa de la tensión de fase, en V, considerando su módulo y ángulo calculados a partir de la tensión de línea V_{ab} como referencia.

k_V es el valor modular del coeficiente complejo de desbalance de tensión.

θ_V es ángulo del coeficiente complejo de desbalance de tensión.

De igual forma, el coeficiente complejo de desbalance de corriente es:

$$\bar{K}_I = \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1} = k_I \cdot e^{j\theta_I} \quad (3.25)$$

Donde:

\bar{I}_1 y \bar{I}_2 son las componentes secuencia positiva y negativa de la corriente de fase, en A, considerando su módulo y ángulo calculados a partir de la corriente de línea I_a como referencia.

k_I es el valor modular del coeficiente complejo de desbalance de corriente.

θ_I es ángulo del coeficiente complejo de desbalance de corriente.

Debido a que la potencia es una magnitud conservativa independientemente de las transformaciones que se hagan para representar el sistema, se puede expresar la misma en función de la componente de tensión de secuencia positiva (ver Anexo E) como:

$$S = P + jQ = 3 \cdot \bar{V}_1 \cdot \bar{I}_{eq}^* \quad (\text{VA}) \quad (3.26)$$

La conjugada de la corriente equivalente \bar{I}_{eq}^* se calcula como:

$$\bar{I}_{eq}^* = \bar{I}_1^* \cdot \left(1 + \bar{K}_V \cdot \bar{K}_I^* \right) \quad (\text{A}) \quad (3.27)$$

la potencia real medida P es igual a:

$$P = \text{Re} | S | = 3 \cdot V_1 \cdot I_{eq} \cdot \cos(\varphi_{eq}) \quad (\text{W}) \quad (3.28)$$

De esta expresión se determina el ángulo φ_{eq} que es el ángulo de defasaje entre la tensión de secuencia positiva V_1 y la corriente equivalente I_{eq} .

Utilizando las expresiones (3.26) y (3.27), se calcula el ángulo real de la corriente de secuencia positiva y de esta forma queda fijado también el ángulo de las corrientes de secuencia negativa.

3.4 Integración del método.

El método descrito se desarrolló aprovechando la librería de AG que existen en el toolbox del Matlab 7.0. Un diagrama de bloques que lo resume se muestra en la Figura 3.5. Los pasos fundamentales del método propuesto son los siguientes:

1-Descomponer en componentes de secuencia las tensiones y corrientes de línea medidas y obtener los correspondientes valores de fase. El defasaje entre los sistemas de secuencia se determina según se describe en 3.3.3.

2-Con las componentes de secuencia positiva, los datos nominales y aplicando el procedimiento descrito en 3.3.1, calcular las impedancias aproximadas del circuito de secuencia positiva.

3-Con las impedancias de la rama del estator y de la rama de magnetización obtenidos para secuencia positiva, y con las componentes de secuencia negativa de las tensiones y corrientes, calcular las impedancias de secuencia negativa del rotor según 3.3.2.

4-Generar una población en la cual se inserta repetidamente un vector conteniendo la solución aproximada calculada anteriormente.

5-Utilizando los valores de referencia (mediciones de potencia eléctrica y corrientes de línea, además del cálculo de las pérdidas de fricción, batimiento y núcleo), la información de chapa del motor y como población inicial la obtenida según el punto anterior u otro método aplicable, se corre el AG para identificar las impedancias de los circuitos de secuencia que ajusten el modelo a los valores de referencia.

6-Con el circuito equivalente obtenido se calcula la eficiencia y otras características operacionales para el estado de carga analizado, según se describe en el capítulo 2.

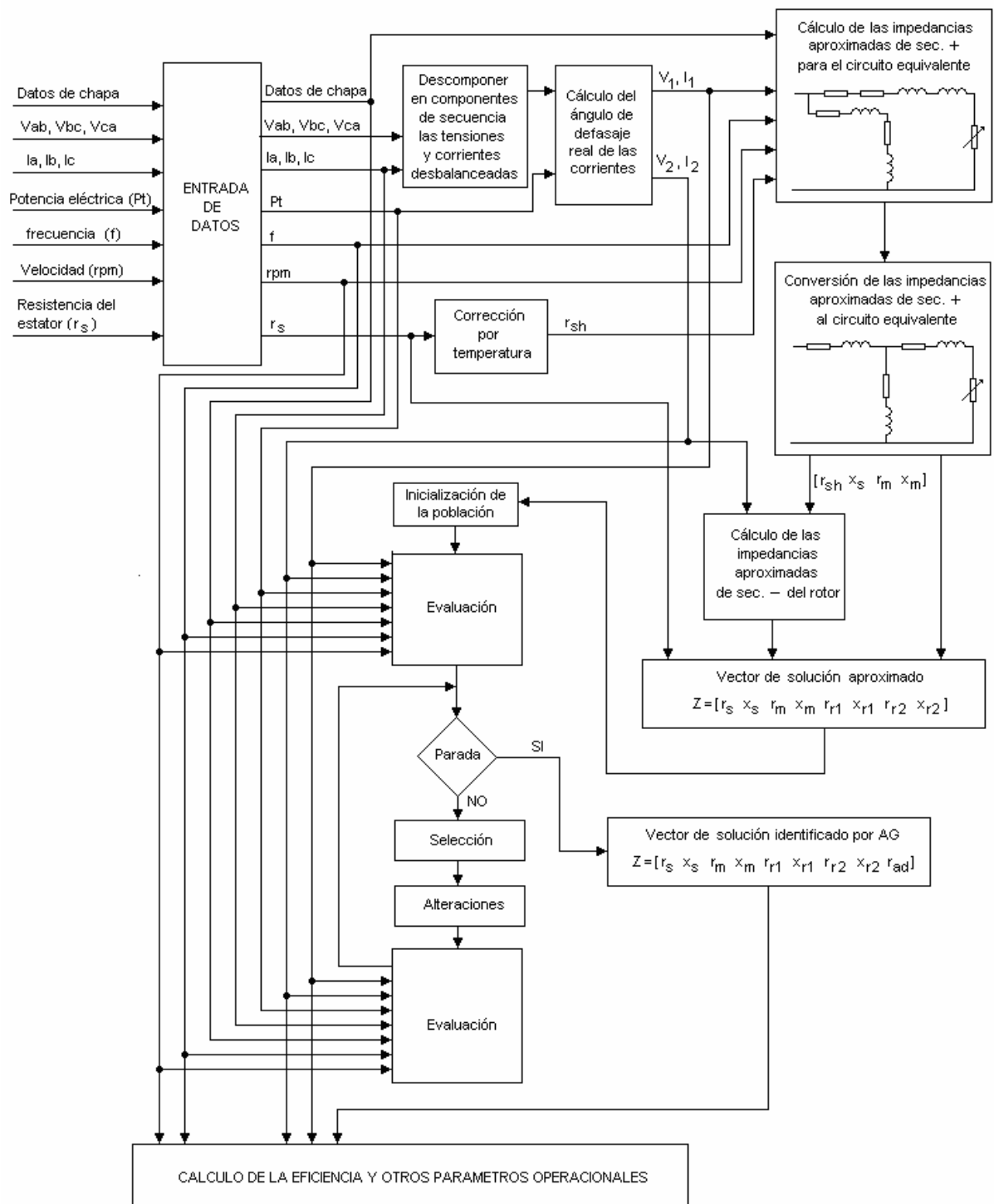


Figura 3.5. Diagrama de bloques que describe el procedimiento de determinación de la eficiencia del motor en régimen desbalanceado incluyendo el uso de AG.

3.5 Conclusiones parciales.

1- Se aplica con carácter novedoso un AG como técnica de búsqueda en la identificación de las impedancias de secuencia positiva y negativa del modelo de estado estable del motor asincrónico en régimen desbalanceado. Un tratamiento similar no se reporta en la literatura consultada.

2- A diferencia de otros casos en los que se emplea AG, se genera la población inicial de manera heurística insertando repetidamente en la misma un juego de parámetros aproximados del motor que garantiza mejor comportamiento del algoritmo. La solución implantada en la población inicial se obtienen a partir de un nuevo método aproximado propuesto como resultado de esta investigación.

3- Se aprovecha el conocimiento previo del modelo para evitar generar soluciones no factibles, empleando como tratamiento a las restricciones la penalización y el valor calculado de las pérdidas rotacionales en la función de adaptación.

4- La optimización del error de las corrientes y las potencias con relación a los valores de referencia se realiza para un solo punto (estado de carga actual), por lo que el método propuesto solo permite emplear los parámetros del circuito equivalente obtenidos con el AG para estimar la eficiencia precisamente para ese estado de carga.

5- El empleo de los coeficientes de desbalance complejos permite determinar el defasaje real entre las corrientes y las tensiones de fase, aspecto necesario cuando no se cuenta con un instrumento capaz de dar esta información y cuyo cálculo tampoco se trata de esta forma en la literatura consultada. Este defasaje es utilizado por el AG para la obtención de las corrientes desbalanceadas y la potencia de entrada que posteriormente se emplean en la función de adaptación.

6-El método propuesto evita las pruebas y procedimientos costosos como son ensayos de vacío y cortocircuito, a la vez que reduce la necesidad de información del fabricante que muchas veces no se encuentra disponible. Solo son necesarias mediciones de tensiones y corrientes de línea, potencia de entrada y velocidad y la información que ofrece los datos de chapa. Esto permite que sea una herramienta poderosa en la estimación rápida de la eficiencia con un mínimo de disturbios para el servicio, sobre todo cuando estas máquinas están sometidas a desbalance de tensión.

CAPÍTULO 4

CAPÍTULO 4

RESULTADOS EXPERIMENTALES. CASOS DE ESTUDIO.

El propósito de los resultados experimentales que se presentan en este capítulo, es confirmar la hipótesis planteada al inicio de esta investigación, esto es, demostrar que con el método propuesto se puede caracterizar energéticamente un motor asincrónico con mayor precisión que con los métodos existentes, cuando este opera con desbalance de tensión y otras condiciones presentes en ambientes industriales. Un segundo propósito es comprobar la factibilidad de su aplicación en el campo, mostrando los resultados alcanzados en varios casos de estudio.

4.1 Descripción de los experimentos y análisis de los resultados.

4.1.1 Instalación experimental.

El método se comprobó en una instalación de prueba preparada al efecto que utiliza un conjunto motor-generator como se muestra en la Figura 4.1. En esta estación, el generador trabaja como un generador shunt excitado independiente y alimentando una carga compuesta por un banco de resistencias, las cuales se agregan o retiran a voluntad según el nivel de carga requerido. Para una corriente de excitación constante y conociendo la velocidad, tensión y corriente de armadura, se calcula la potencia eléctrica que entrega como generador y sus pérdidas totales, que están dadas por la suma de las pérdidas rotacionales y las pérdidas de cobre en la armadura, en los interpolos y en la resistencia de contacto de las escobillas. La determinación indirecta de la potencia mecánica que entrega el motor, se realiza a partir de la medición y cálculo de las pérdidas que tienen lugar en el generador, más la potencia eléctrica que entrega. Con este valor, y con la medición de la potencia eléctrica de entrada al motor, se calcula su eficiencia operacional.

Los motores ensayados son asíncronos de jaula de ardilla que se alimentan desde una fuente trifásica, constituida por un regulador de inducción de 250 kVA que permite variar la tensión de línea desde 0 a 880 V y establecer desbalances de sobre y baja tensión insertando resistencias indistintamente en las líneas. Todas las características de las máquinas utilizadas se muestran en el Anexo G.

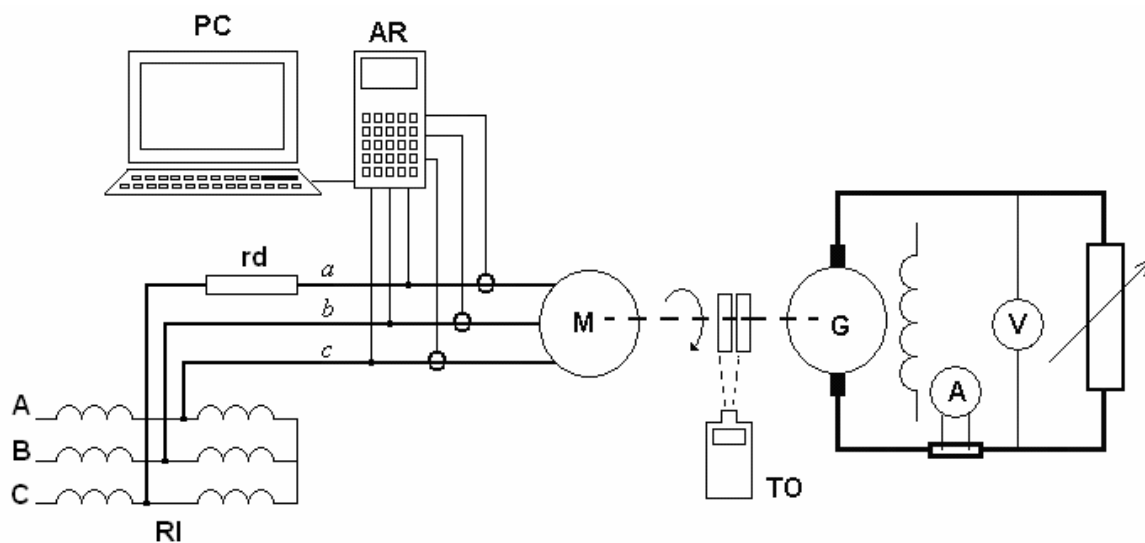


Figura 4.1 Diagrama de la instalación experimental (PC-computadora personal, RI-regulador de inducción, rd-resistor para desbalance, AR-analizador de redes, M-motor asíncrono, G-generator dc, TO-tacómetro óptico, A-amperímetro, V-voltímetro).

4.1.2 Los resultados y su interpretación.

Empleando la instalación descrita se ensayaron los motores prototipos Motor 1 (22 kW) y Motor 2 (45 kW). Para esto se varió la carga controlando la tensión de salida con la excitación del generador dc y se realizaban simultáneamente las mediciones de velocidad con el registro de todas las variables medidas con el analizador de redes. Aplicando el método propuesto basado en AG se estima la potencia de salida, las pérdidas y la eficiencia operacional en cada caso, y se comparan con los valores obtenidos experimentalmente. Las mediciones realizadas y los

resultados obtenidos se muestran en el Anexo I. Solamente con el propósito de ilustrar y aclarar, en la Tabla 4.4 se muestran los resultados de tres casos seleccionados al azar para ambos motores. La determinación experimental de la eficiencia se realiza a partir de la máquina calibrada y en el Anexo J se muestra la incertidumbre en estos cálculos.

Tabla 4.4 Muestra comparativa de resultados obtenidos en la validación experimental.

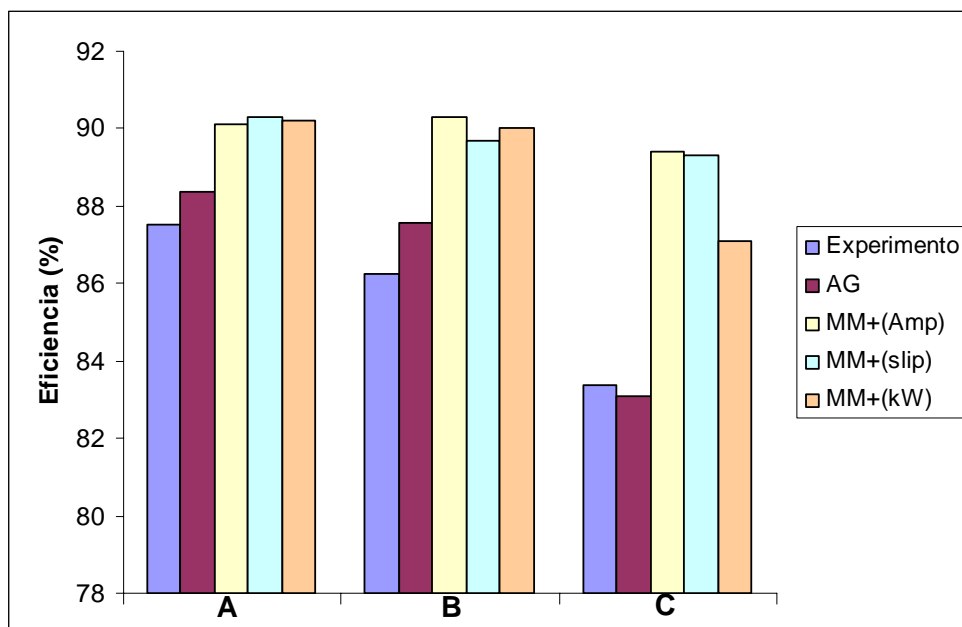
Motor	Tensiones de línea (V)			Potencia de salida (W)			Pérdidas totales (W)			Eficiencia (%)			
	Vab	Vbc	Vca	Exp.	AG	%error	Exp.	AG	%error	Exp.	AG	%error	
1	A	461,30	443,10	453,00	18939	19124	0,98	2702	2517	-6,84	87,52	88,37	0,98
	B	464,30	449,50	458,30	14614	14838	1,53	2328	2104	-9,61	86,26	87,58	1,53
	C	468,00	459,50	471,30	8789	8758	-0,35	1754	1784	1,75	83,36	83,07	-0,35
2	D	443,00	454,30	440,00	21017	21162	0,69	2729	2584	-5,31	88,51	89,12	0,69
	E	432,40	448,30	433,00	28860	28558	-1,04	2628	2930	11,48	91,65	90,70	-1,04
	F	437,70	456,50	436,80	27881	27953	0,26	3178	3106	-2,27	89,77	90,00	0,26

Los errores relativos en la determinación de la eficiencia con relación al experimento no superan el 2% en el 98% de los experimentos y solo un caso alcanza el 3%. Estos coinciden con el error relativo en la potencia de salida, ya que se calcula la eficiencia como la relación entre potencia de salida a potencia de entrada y esta última es la misma para el AG y para el experimento, debido a que es una función cuyo error es minimizado por el procedimiento.

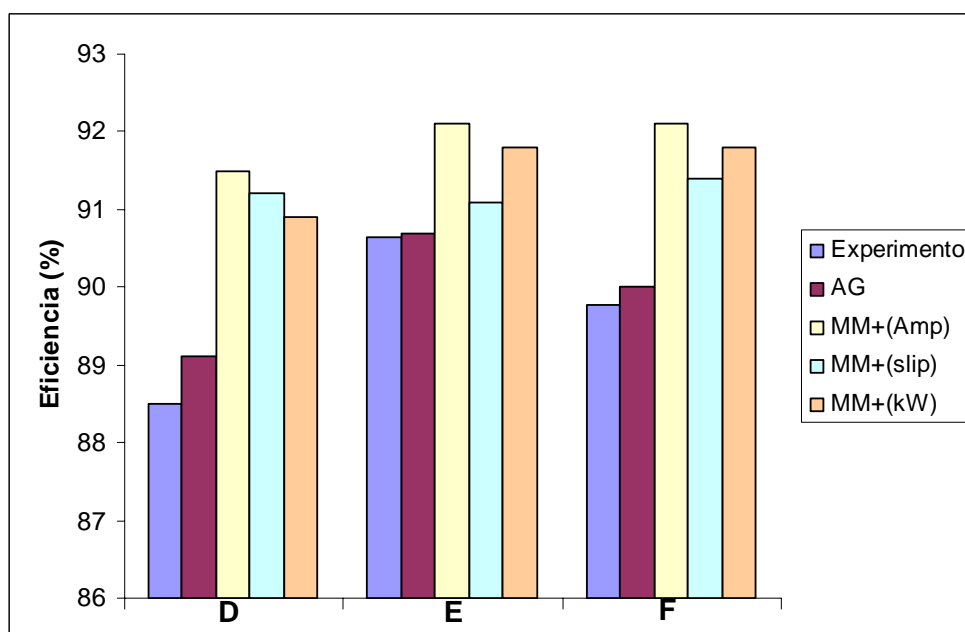
4.1.3 Comparación del método con otros existentes.

En la literatura se reportan varios métodos para su uso práctico en la industria, implementados por medio de programas de computación o instrumentos especiales. En las Figura 4.2 se muestra una comparación de los resultados obtenidos con el procedimiento propuesto y los métodos implementados en el **MotoMaster+** para los casos mostrados en la Tabla 4.4. En estas gráficas

se destaca la mayor concordancia con el experimento de los resultados obtenidos por el método propuesto.



(a)



(b)

Figura 4.2 Resultados comparativos. (a) Motor 1. (b) Motor 2.

4.1.4 Resultados de la aplicación a régimen balanceado.

El Motor 2 fue sometido a experimentos con niveles de desbalance de tensión *FDVL* inferiores al 1%, que puede considerarse en un ambiente industrial como régimen cercano a la condición de balance. Esto se repite para varios estados de carga (Anexo I, estados 63 al 68, Tabla I.4 – I.6) y se compara también con los métodos anteriores y con el experimento. En la Figura 4.3 puede apreciarse que la mayor coincidencia con el experimento se obtiene cuando empleamos AG.

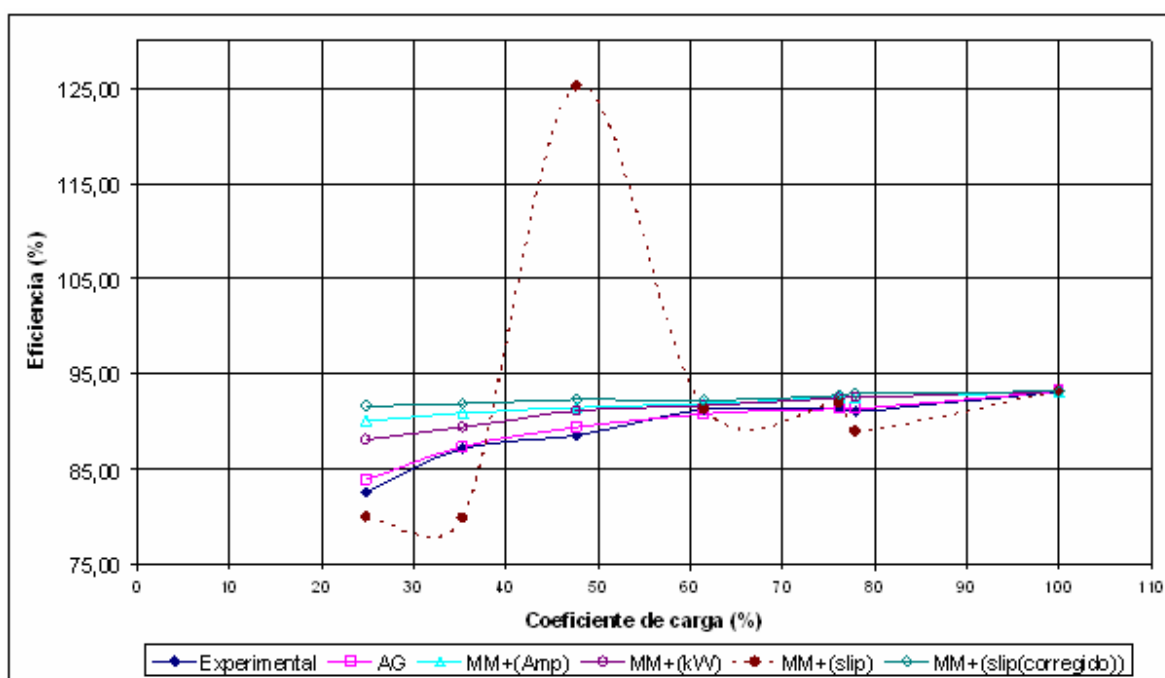


Figura 4.3 Curvas de eficiencia contra carga para el Motor 2 obtenidas por varios métodos.

Experimental: resultados del experimento, AG: método con algoritmo genético, MM+(Amp): método de la corriente del Motormaster+, MM+(kW): método de la potencia del Motormaster+, MM+(slip): método del deslizamiento del Motormaster+, MM+(slip(corregido)): método del deslizamiento del Motormaster+ con el deslizamiento corregido de acuerdo a la frecuencia.

Además, es de destacar que el método del deslizamiento da valores erráticos debido a que calcula el mismo a partir de la medición de velocidad y de la velocidad sincrónica para condiciones nominales, sin considerar el error que introduce la magnitud de desviación de frecuencia que pudiera estar presente. Una corrección de la velocidad por frecuencia mejora los resultados de este método.

Estos resultados corroboran la fortaleza del método propuesto, aún para condiciones de tensiones balanceadas.

4.1.5 Número de corridas necesarias.

Dado que el AG arroja un conjunto de buenas soluciones, los resultados que se exhiben normalmente son el promedio de varias corridas. El número de corridas necesarias se determina estadísticamente mediante una prueba de hipótesis, como se muestra en el Anexo K. Para esto se realizan 30 corridas y se obtiene la desviación estándar σ del parámetro eficiencia.

Utilizando el STATGRAPHICS 5.1 se determina el tamaño de muestra para que la media normal de la eficiencia sea representativa de la media hipotética fijando un error de un $\pm 2\%$, garantizando además, que sea un error superior a la incertidumbre con la cual se calcula la eficiencia experimentalmente.

Como media hipotética se considera el valor calculado experimentalmente y se emplea como σ asumida la que se calcula para la muestra de tamaño 30.

4.1.6 Hoja de resultados.

Una vez aplicado el método, el programa devuelve los resultados en un formato como el mostrado en el Anexo L, brindando información acerca de los parámetros operacionales siguientes: módulo y ángulo de las tensiones y corrientes de línea, módulo y ángulo del factor de desbalance complejo, el deslizamiento al que está trabajando el motor, las pérdidas desagregadas con carácter indicativo, las pérdidas totales, la eficiencia, las demandas de potencia por cada una de las fases, las demandas totales de potencia activa, reactiva y aparente, el factor de potencia y la potencia de salida del motor.

Estos resultados brindan una información muy completa del comportamiento del motor en sus condiciones operacionales, que puede ser empleada para realizar análisis de gestión eficiente de

necesario que el personal que lo emplee esté debidamente capacitado en todo lo relacionado con su aplicación.

4.3 Aplicación industrial. Casos de estudio.

Aunque con el método propuesto pueden ser evaluados todos los motores de una instalación, en este estudio se aplicó a aquellos que más inciden en el consumo de las áreas productivas de las empresas GYDEMA (Glucosa y Derivados del Maíz), Fábrica de Piensos Balanceados y E.A. “Ciudad Caracas”; todas de la provincia de Cienfuegos [106], según se recomienda en la Tecnología de Gestión Eficiente de la Energía [7]. Los resultados fundamentales se muestran a continuación.

4.3.1 GYDEMA.

En esta empresa se aplicó al área de refinación y separación de glucosa. La estructura de consumo se muestra en la Figura 4.4. De los 9 motores existentes en esta área, el motor que más incidencia tiene es el que acciona la bomba de vacío del filtro de hidrolizado. Los datos nominales del motor que acciona esta carga y las mediciones se muestran en el Anexo M. La Tabla 4.2 tiene los resultados obtenidos para este motor donde se puede observar, que el motor trabaja con un factor de carga como promedio del 85,72% y una eficiencia del 88,62%, lo que permite concluir que su uso es adecuado.

Teniendo en cuenta que el motor estudiado es de eficiencia estándar, se recomienda analizar en caso de falla, las alternativas entre repararlo o cambiarlo por uno de alta eficiencia [74]. El cambio del motor reportará beneficios económicos si el ahorro de energía reportado, su costo, y el número de trabajo de horas en el año, compensan el costo capital de la máquina de alta eficiencia.

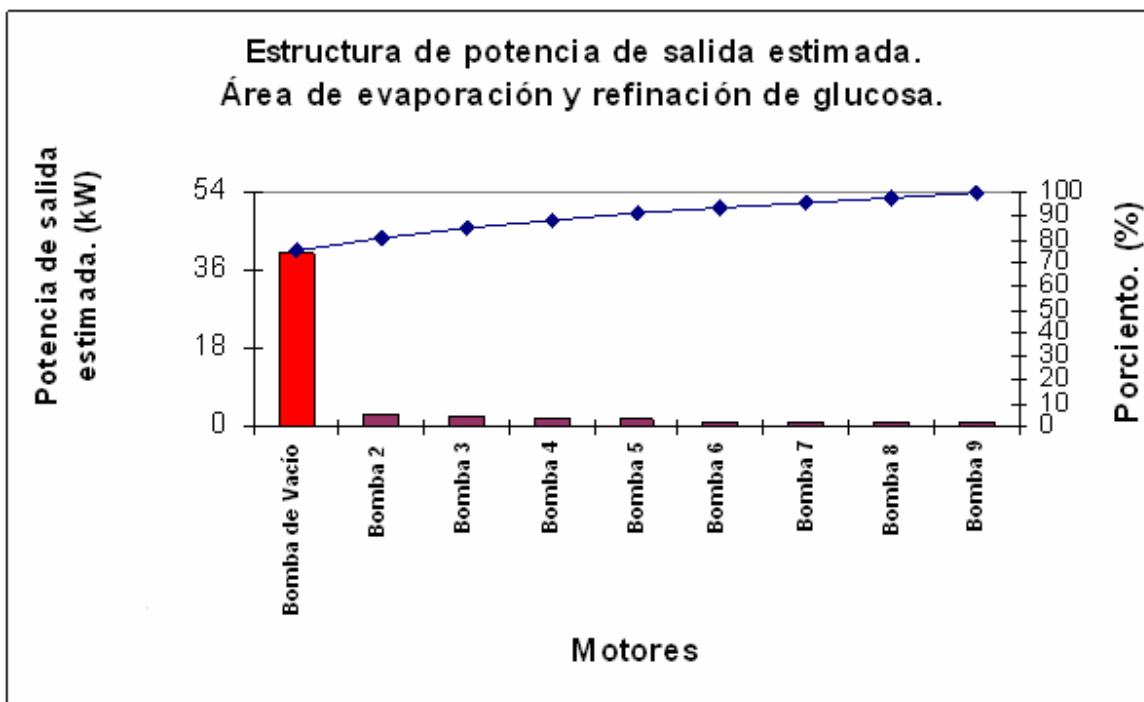


Figura 4.4. Estructura de potencia de salida estimada.

Tabla 4.2. Resultados del programa.

Est	ΔP (kW)	P (kW)	η (%)	Kc (%)
1	4,67	36,64	88,70	86,22
2	4,71	36,70	88,62	86,33
3	4,60	36,80	88,89	86,59
5	4,70	36,80	88,59	86,58
7	4,70	36,70	88,67	86,36
14	4,44	37,40	89,39	88,05
15	4,82	37,00	88,43	86,87
20	4,71	35,60	88,30	83,73
24	4,63	35,70	88,51	83,96
36	4,72	35,00	88,13	82,51
		Promedio	88,62	85,72

4.3.2 Fábrica de Piensos Balanceados Cienfuegos.

La selección de los motores, se realizó mediante la información aportada por especialistas técnicos, quienes propusieron a los cuatro molinos por ser las cargas de mayor demanda de la fábrica. Para la fundamentación de la propuesta, se procedió a la comparación entre las mediciones de la potencia demandada por cada molino, y la demanda máxima reportada por las

facturas eléctricas en el período comprendido entre octubre de 2005 y febrero de 2006. Los molinos representan el 78,8% de la máxima demanda de la fábrica, como se aprecia en la Tabla 4.3. Los datos de estos motores y las mediciones se muestran en el Anexo M.

Tabla 4.3. Demanda eléctrica de los molinos de la fábrica de piensos.

Motores	Demanda (kW)
Molino 1	84,75
Molino 3	80,70
Molino 4	75,90
Molino 2	63,57
Total (kW)	304,92
Máxima demanda según tarifa (kW)	386,96
Porcentaje (%)	78,80

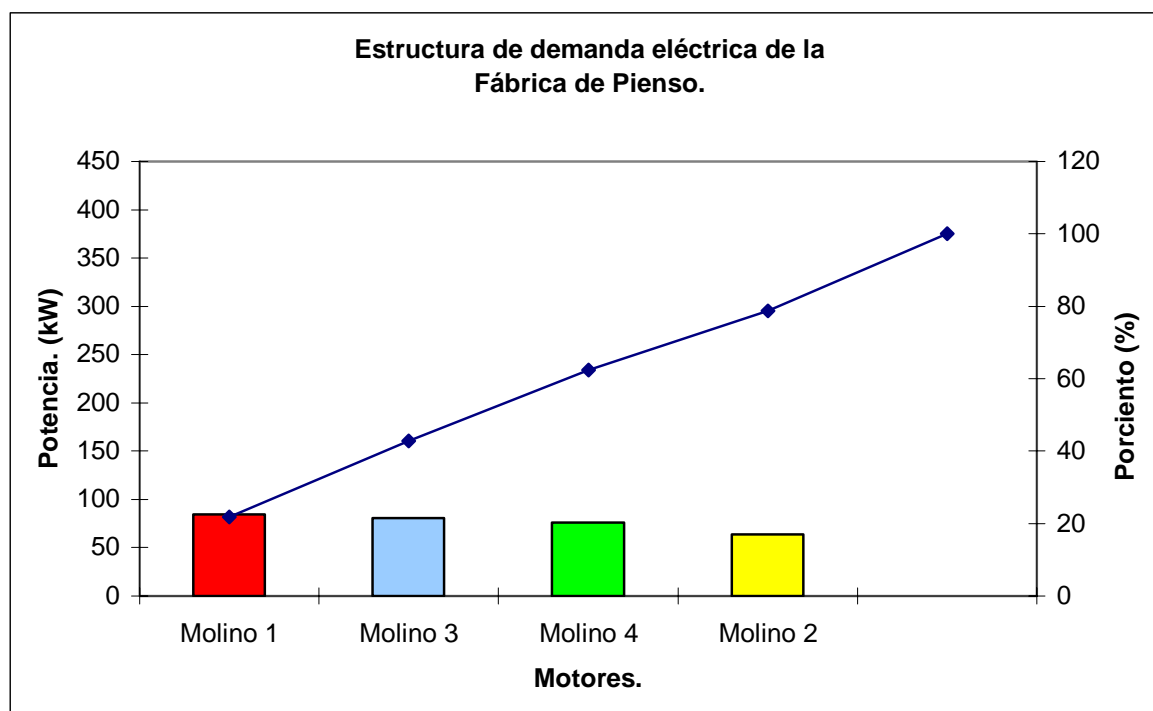


Figura 4.5. Estructura de consumo según Tabla 4.3

Resultados de la aplicación del método:

Tabla 4.4. Resultados del molino 1.

Est	ΔP (kW)	P (kW)	η (%)	Kc (%)
1	9,5	67,8	87,7	61,6
2	9,1	75,6	89,3	68,7
10	9,8	77,2	88,8	70,2
13	10,7	77,1	87,8	70,0
15	8,3	79,8	90,6	72,5
24	7,7	73,5	90,5	66,8
25	7,2	71,8	90,8	65,3
28	8,1	72,8	90,0	66,1
30	7,6	73,1	90,6	66,5
32	7,9	77,6	90,8	70,6
Promedio			89,69	67,83

Tabla 4.6. Resultado del molino 3.

Est	ΔP (kW)	P (kW)	η (%)	Kc (%)
1	7,3	68,7	90,34	62,4
3	7,4	65,5	89,88	59,6
5	7,8	70,2	89,97	63,8
7	7,4	72,0	90,65	65,5
9	7,4	74,5	90,91	67,7
10	7,4	77,3	91,28	70,3
11	7,6	79,4	91,28	72,2
13	7,7	78,6	91,13	71,5
15	7,6	76,1	90,88	69,2
17	7,6	76,6	90,92	69,7
Promedio			90,72	67,19

Tabla 4.5. Resultado del molino 2.

Est	ΔP (kW)	P (kW)	η (%)	Kc (%)
1	6,7	57,2	89,47	52,0
2	6,8	56,7	89,32	51,5
3	6,7	56,7	89,37	51,5
4	7,0	57,0	89,07	51,8
5	6,9	57,1	89,28	51,9
6	6,8	57,0	89,33	51,8
8	7,0	56,7	88,97	51,5
10	6,7	56,8	89,49	51,6
12	6,7	56,4	89,31	51,3
18	6,5	56,6	89,71	51,4
Promedio			89,33	51,63

Tabla 4.7. Resultados del molino 4.

Est	ΔP (kW)	P (kW)	η (%)	Kc (%)
1	6,9	70,7	89,47	78,6
3	6,8	70,6	89,32	78,5
4	6,8	70,5	89,37	78,3
8	7,0	70,6	89,07	78,4
10	7,0	68,1	89,28	75,7
13	6,9	67,7	89,33	75,2
16	6,9	67,2	88,97	74,7
20	6,8	69,4	89,49	77,2
21	6,8	70,0	89,31	77,8
29	6,9	68,7	89,71	76,4
Promedio			89,33	77,08

Las simulaciones realizadas arrojaron como resultado, que los molinos 1, 3 y 4 están trabajando con un factor de carga por encima del 67% y con eficiencias del orden del 90%. El molino 2 se encuentra subcargado, por lo que se recomienda en caso de falla, analizar económicamente la factibilidad de su cambio por un motor de eficiencia superior y de potencia adecuada [74].

4.3.3 Empresa Azucarera “Ciudad Caracas”

Se realizó el estudio en el área de generación de vapor. La estructura de consumo de esta área define los motores que accionan los ventiladores de tiro inducido (VTI), ventiladores de tiro forzado VTF y ventiladores de aire secundario (VAS) de las calderas como los principales consumidores. El porcentaje que representa la potencia total demandada por estos motores, respecto a la máxima potencia demandada medida en la PGD de la subestación, es de un 79%.

Tabla 4.8. Estructura de consumo de la subestación de generación de vapor.

Motores	Pd (kW).
VTI 60T	201,7
VTI Retal.	118,9
VTF 60T	107,8
VAS 60T	58,2
VAS Retal.	57,3
VTF Retal.	49,4
Demanda Total (kW)	593,2
Demanda Total de la PGD (kW)	750,5
Porcentaje (%)	79

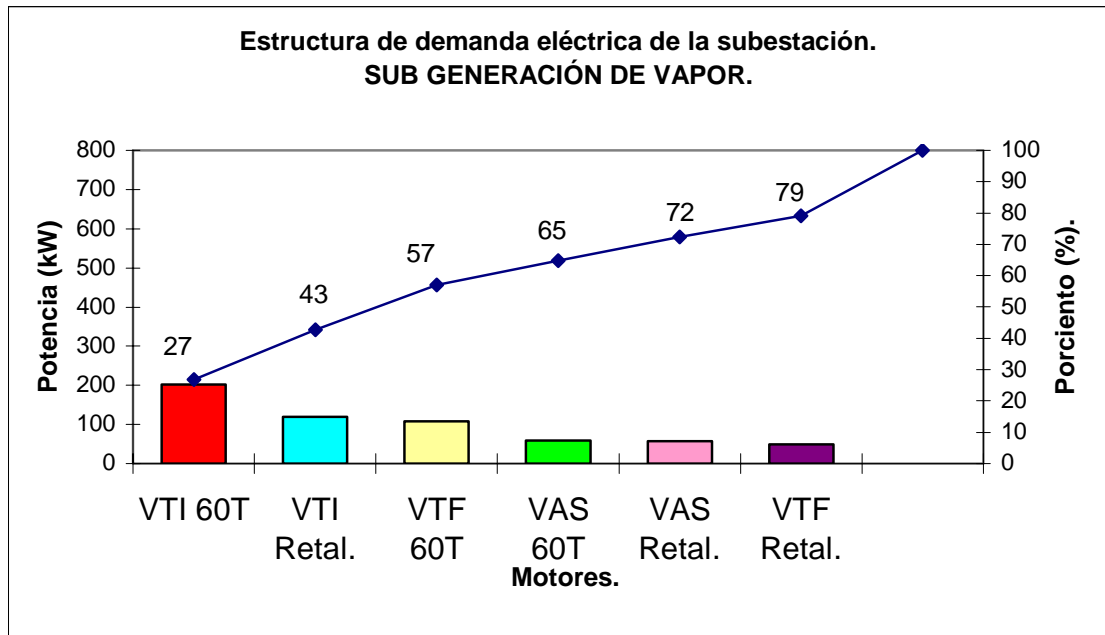


Figura 4.6. Estructura de consumo de la subestación de generación de vapor.

Los datos de estos motores y las mediciones se muestran en el Anexo M. De las mediciones realizadas, se aprecia que el motor VAS, correspondiente al generador de vapor 60T, trabaja con baja tensión de hasta el 7,32%, mientras que el motor VTI del generador de vapor RETAL lo hace con un desbalance de tensión sostenido por encima del 1%. Los resultados se muestran en las Tablas 4.9 a 4.14.

Como puede apreciarse, el motor VTF 60T se encuentra moderadamente subcargado, por lo que en caso de falla debe estudiarse la posibilidad de ser cambiarlo por otro de mayor eficiencia y de la capacidad adecuada. Los motores VTF Retal y VAS Retal, están trabajando con un factor de carga inferior al 50% en detrimento de sus índices energéticos. Por lo tanto, debe realizarse un análisis sobre la factibilidad del cambio por motores con una potencia adecuada y mejor eficiencia [74]. Es importante prestar atención a la baja tensión con que se encuentra trabajando el motor VAS 60T y el desbalance de tensión de la VTI del generador de vapor RETAL.

Tabla 4.9. Resultados del VTI 60T.

Est	ΔP (kW)	P (kW)	η (%)	Kc (%)
1	12,1	183,7	93,83	70,70
5	13,0	183,1	93,35	70,40
7	11,1	183,9	94,31	70,70
8	10,8	183,5	94,42	70,60
9	11,9	181,8	93,88	69,90
15	12,0	192,6	94,13	74,10
17	11,7	196,1	94,38	75,40
19	12,8	192,5	93,78	74,00
21	12,3	194,4	94,04	74,80
23	12,3	191,6	93,98	73,70
		Promedio	94,01	72,43

Tabla 4.11. Resultados del VAS 60T.

Est	ΔP (kW)	P (kW)	η (%)	Kc (%)
1	5,2	53,0	91,11	70,60
3	5	52,5	91,37	70,00
5	5,2	52,3	90,89	69,80
7	4,9	52,9	91,59	70,60
9	4,9	52,8	91,52	70,40
11	4,9	53,6	91,55	71,40
13	5,1	53,8	91,40	71,70
15	5,3	52,6	90,90	70,10
17	5,1	53,1	91,25	70,80
19	4,9	53,1	91,49	70,80
		Promedio	91,31	70,62

Tabla 4.10. Resultados del VTF 60T.

Est	ΔP (kW)	P (kW)	η (%)	Kc (%)
1	9,4	98,4	91,25	53,17
3	9,6	95,7	90,92	51,70
5	10,2	98,8	90,67	53,43
7	9,2	97,4	91,33	52,63
9	9,4	97,5	91,25	52,72
11	8,8	98,1	91,74	53,00
13	9,0	97,5	91,57	52,71
15	8,1	98,2	92,39	53,10
17	9,3	97,5	91,31	52,71
19	9,3	97,7	91,34	52,83
		Promedio	91,38	52,80

Tabla 4.12. Resultados del VTI Retal.

Est	ΔP (kW)	P (kW)	η (%)	Kc (%)
10	13,9	106,0	88,37	70,64
12	14,1	105,3	88,20	70,21
14	14,4	103,8	87,80	69,18
15	13,9	102,9	88,07	68,60
17	14,0	104,1	88,15	69,39
24	14,2	102,6	87,81	68,41
26	11,9	106,4	89,96	70,93
28	14,2	106,7	88,26	71,10
29	14,1	105,2	88,17	70,14
30	13,8	104,4	88,34	69,60
		Promedio	88,31	69,82

Tabla 4.13. Resultados del VTF Retal.

Est	ΔP (kW)	P (kW)	η (%)	Kc (%)
1	4,7	45,1	90,61	50,15
3	4,7	44,2	90,38	49,06
5	4,8	45,0	90,34	49,99
7	4,9	45,1	90,21	50,07
11	4,8	44,8	90,41	49,76
13	4,5	45,1	90,83	50,08
15	4,8	44,6	90,26	49,52
17	4,7	44,8	90,46	49,83
19	4,9	44,7	90,09	49,66
21	4,9	44,2	90,06	49,16
		Promedio	90,37	49,73

Tabla 4.14. Resultados del VAS Retal.

Est	ΔP (kW)	P (kW)	η (%)	Kc (%)
1	4,4	53,8	92,46	40,78
3	4,4	53,6	92,46	40,6
5	4,9	53,0	91,54	40,19
7	4,5	53,5	92,16	40,50
9	4,6	53,1	92,06	40,23
11	4,6	52,6	91,94	39,83
13	4,5	53,3	92,20	40,36
15	4,7	52,9	91,83	40,07
17	4,6	52,9	92,02	40,04
19	4,6	52,8	92,06	39,98
		Promedio	92,07	40,26

4.4 Conclusiones parciales.

- 1- El método propuesto ha sido validado basado en la concordancia entre los valores de la eficiencia, las pérdidas y la potencia de salida estimados y los valores calculados experimentalmente para los prototipos empleados.
- 2- El método propuesto para estimar el comportamiento energético de los motores asíncronos empleando AG es superior a los métodos existentes, aún en régimen balanceado.
- 3- La aplicación de los métodos aproximados de la corriente, potencia y deslizamiento para estimar la carga y la combinación de estos con métodos estadísticos en casos donde exista problemas de desbalance y desviación de tensión y frecuencia, así como de motores subcargados, arroja resultados menos precisos que pueden conducir a decisiones inadecuadas.
- 4- La aplicación satisfactoria del método propuesto en diferentes ambientes industriales valida su aplicabilidad en condiciones de campo con los instrumentos disponibles actualmente.

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES.

- Los métodos que anteceden a este trabajo para determinar la eficiencia no incorporan el desbalance de tensión, exigen ensayos complicados y poseen menor precisión que el propuesto en esta investigación para ser aplicado en condiciones de campo.
- Se obtiene el modelo matemático a emplear fundamentado en el circuito equivalente y las componentes simétricas, incorporando en el mismo una corrección del deslizamiento por desviación de frecuencia, así como el cálculo de las pérdidas adicionales y las rotacionales para condiciones de desbalance y se considera la variación de las impedancias del rotor para ambas secuencias, debidas al efecto superficial que está presente en estas condiciones.
- Se desarrolló un método basado en el empleo de AG para determinar la eficiencia en estado estable del motor asincrónico en régimen desbalanceado y en condiciones de campo y que incluye como caso particular, el régimen balanceado con desviaciones de tensión y/o frecuencia.
- Se reduce el número de generaciones para las cuales el AG converge al generar una población inicial con parámetros implantados, que se obtienen a partir de un nuevo método propuesto como resultado de esta investigación.
- El empleo de los coeficientes de desbalance complejos permite determinar el defasaje real entre las corrientes y las tensiones de fase, aspecto necesario cuando no se cuenta con un instrumento capaz de dar esta información y cuyo cálculo tampoco se trata de esta forma en la literatura consultada.
- El método propuesto, además de evitar pruebas y procedimientos costosos, solo requiere de los datos de chapa y de mediciones de tensiones y corrientes de línea, potencia de entrada, frecuencia, velocidad y resistencia de fase del estator, que se obtienen con instrumentos

disponibles actualmente.

- Los resultados expuestos han sido validados experimentalmente con diferentes regímenes de carga y desbalances de tensión arrojando errores relativos para la eficiencia y la potencia de salida que no superan el 2% para el 98% de los casos y nunca el 3%.
- A partir de los estudios de casos realizados en tres industrias, se demuestra que el método propuesto constituye una herramienta factible de aplicar y útil para la evaluación energética de los motores en servicio.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

Como recomendaciones de este trabajo se dan las siguientes:

1. Aplicar el método resultado de esta investigación de manera inmediata en la evaluación energética de motores en servicio.
2. Desarrollar un software en un lenguaje de programación que permita obtener ejecutables y prescindir del Matlab.
3. Utilizar el algoritmo desarrollado como base matemática para la construcción del un equipo específico para la determinación de la eficiencia, potencia de salida y otros indicadores energéticos de las máquinas asincrónicas en servicio.
4. Investigar cuáles son los mejores operadores genéticos a emplear en el AG para lograr una disminución de los recursos computacionales, sobre todo si se pretende una aplicación “on line”.
5. Continuar la investigación para incorporar al modelo las modificaciones que permitan considerar junto al desbalance, cuando exista, la distorsión de la onda de tensión en el cálculo de los parámetros operacionales de las máquinas asincrónicas.

*REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS*

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

1. Abdelhadi, B., y col., “Application of genetic algorithm with a novel adaptive scheme for the identification of induction machine parameters”, IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 20, no. 2, June 2005., pp. 284-291.
2. Aguado, J., Maya, H., “Indicadores de la calidad de la potencia eléctrica”, II Simposio Internacional sobre calidad de la Energía Eléctrica. Bogotá, Colombia, Oct. 30 – Nov. 1, 2003, Memorias SICEL 2003, pp 261-265.
3. Arseneau, R., y col., “Practical definitions for powers in systems with nonsinusoidal waveforms and unbalanced loads: a discussion”, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 11, no. 1, January 1996., pp. 79-101.
4. Bhavaraju, V.B., Enjeti, P.N., “An active line conditioner to balance voltages in a three-phase system”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 32, no. 2, march/april 1996., pp. 287-292.
5. Bollen, M.H.J., “Algorithms for characterizing measured three-phase unbalanced voltage dips”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 3, july 2003., pp. 937-944.
6. Bollen, M.H.J., “Voltage recovery after unbalanced and balanced voltage dips in three-phase systems”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 4, october 2003., pp. 1376-1381.
7. CEEMA, Colectivo de Autores, “Gestión Energética Empresarial”, Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos, 2001, pp. 80-83.
8. Charette, A., y col., “The use of the genetic algorithm for in-situ efficiency measurement of an induction motor”, Power Engineering Society Winter Meeting, 2000., IEEE, Volume: 1, 23-27 Jan. 2000., pp. 392-397.

9. Chen, T.-H., "Evaluation of line loss under load unbalance using the complex unbalance factor", *Generation, Transmission and Distribution, IEEE Proceedings-*, Volume: 142, Issue: 2, March 1995., pp. 173-178.
10. Ching-Yin Lee., "Effects of Unbalanced Voltage on the Operation Performance of a Three-Phase Induction Motor", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 14, no. 2, June 1999., pp. 202-208.
11. Ching-Yin Lee, y col., "Effects of various unbalanced voltages on the operation performance of an induction motor under the same voltage unbalance factor condition", *Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1997., Conference Record, Papers Presented at the 1997 Annual Meeting, IEEE 1997 , 11-16 May 1997.*, pp.51 – 59.
12. Chin-Yin Lee; Bin Kwie Chen; Wei Jen Lee; Yeng Feng Hsu. "Effects of various unbalanced voltages on the operation performance of an induction motor under the same voltage unbalance factor condition." *IEEE Publication, 1997.*
13. Chin-Yin Lee, Wei Jen Lee., "Effects of nonsinusoidal voltages on the operation performance of a three-phase induction motor", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 14, no. 2, June 1999., pp. 193-201.
14. Chomat, M., Schreier, L., "Compensation of unbalanced three-phase voltage supply in voltage source inverter", *IECON 02 [28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society, IEEE 2002]* , Volume: 2 , 5-8 Nov. 2002., pp. 950-955.
15. Costa Montiel, A., López Fernández, X. M., "Effects of Unbalanced Power Supply on Efficient Performance of Three Phase Induction Motors", *Proceedings of XL International Symposium on Electrical Machines SME'2004, 15 - 18 June, Hajnowka, Poland.*

16. Costa, A., Vilaragut, M., “Determinación del comportamiento energético del motor de inducción a partir de sus datos de catálogo y la lectura de las corrientes del estator”, III Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente, Cienfuegos, Cuba, Abril 2004.
17. Cummings, P. G., “Estimating the effect of system harmonic on losses and temperature rise of squirrel-cage motors”, IEEE, 32nd Petroleum and Chemical Ind. Conf. Houston. TX, Sept.1985.
18. Cummins, P. B., y col., “Protection of induction motors against unbalanced voltage operation”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol IA-21, no. 4, May/June 1985., pp 778-792,
19. Czarnecki, L.S., “Power related phenomena in three-phase unbalanced systems”, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 10, no. 3, july 1995., pp. 1168-1176.
20. de Abreu, J.P.G., Emanuel, A.E., “Induction motor thermal aging caused by voltage distortion and imbalance: loss of useful life and its estimated cost”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 1, january/february 2002., pp. 12-20.
21. de Almeida, A., Ferreira, F., “Efficiency Testing of Electric Induction Motors” Disponible: http://www.clasponline.org/download/Energy_Testing/2000/116/Almeida_paper.pdf
Visitado: Junio 2005.
22. de Almeida, A.I., y col., “Comparative analysis of IEEE 112-B and IEC 34-2 efficiency testing standards using stray load losses in low-voltage three-phase, cage induction motors”. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 38, no. 2, march/april 2002., pp. 608-614.
23. de Armas Teyra, M. A., Gómez Sarduy, J., Viego Felipe, P., “Análisis de las máquinas asincrónicas en régimen desbalanceado mediante la teoría de los campos rotatorios”,

- Memorias SIE 2005. (XI Simposio de Ingeniería Eléctrica), 21-23 junio del 2005., Santa Clara, Cuba.
24. de Armas, M., Máquina Asíncrona Multipropósito, Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central de Las Villas, Cuba, 1999.
 25. de Armas, M. A., Cayón Mendez, A., “Consideraciones sobre la calidad de la energía en la provincia de Cienfuegos”, Memorias FIE 2002, Julio 2002., Santiago de Cuba.
 26. De la Rosa, E. V., “Metodología para la determinación y mejoramiento de de los motores asíncronos en la industria”, Tesis presentada en opción al título de Master en Ingeniería Eléctrica, Universidad de Camagüey, Camagüey, 1998.
 27. De León, C., “Metodologías para el análisis energético de los motores en servicio y del empleo de accionamientos eficientes”, Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, UCLV, Santa Clara, 2002.
 28. DOE, “Eliminate Voltage Unbalance”,
Disponible: <http://www.oit.doe.gov/bestpractices/pdfs/motor2.pdf>. Visitado: Junio 2005.
 29. Douglas, J. G., “Efficacy of methods for estimating in-service motor efficiency”, June 1997., Disponible: <http://www.dynamics-research.com/MAS1000/ITMAS-1000.htm>
Visitado: Junio 2005.
 30. Estévez Valencia, P., “Optimización mediante algoritmos genéticos”, Anales del Instituto de Ingenieros de Chile, Agosto 1997., pp 83-92.
 31. Faiz, J.; Ebrahimpour, H.; Pillay, P., “Influence of Unbalanced Voltage on the Steady-State Performance of a Three-Phase Squirrel-Cage Induction Motor”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 19, no. 4, December 2004., pp 657-661.
 32. Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., Electric Machinery, Segunda Edición, ER, Habana 1970.

33. Gafford, W., Duesterhoeft, C., Mosher, C. C., "Heating on induction motors on unbalanced voltages", AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol PAS-78, June 1959., pp 282-297.
34. Galey, M. E., "Benefits of performing unbalanced voltage calculations", IEEE Transactions on Industry Applications, vol IA-24, no. 1, Jan/Feb 1988., pp 15-24.
35. Ghai, N. K., "IEC and NEMA standards for large squirrel-cage induction motors. A comparison", IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 14, no. 3, September 1999., pp. 545-552.
36. Gómez Sarduy, J., de Armas Teyra, M. A., Viego Felipe, P., "Evaluación de las pérdidas de energía de un motor asincrónico trabajando en régimen desbalanceado", Memorias III Taller Caribeño de Energía y Medio Ambiente, Marzo 2004., Cienfuegos, Cuba.
37. Gómez Sarduy, J., de Armas Teyra, M. A., Viego Felipe, P., "Software para el análisis del comportamiento de las máquinas asincrónicas en redes desbalanceadas en condiciones de campo", Memorias SIE 2003, (XI Simposio de Ingeniería Eléctrica), 19-21 noviembre del 2003., Santa Clara, Cuba.
38. Gómez Sarduy, J., y col., "Parámetros iniciales de motores asincrónicos con tensiones desbalanceadas para optimización con algoritmos genéticos", Memorias SIE 2005. (XI Simposio de Ingeniería Eléctrica), 21-23 junio del 2005., Santa Clara, Cuba.
39. Gómez Sarduy, J., y col., "Combinación de mediciones de campo y algoritmos genéticos para la estimación de la eficiencia de motores asincrónicos", Memorias del IV Taller Internacional de Energía y Medio Ambiente, Cienfuegos, Abril 2006., Cuba.
40. Grainger, J. J., Stevenson, W. D., Análisis de Sistemas de Potencia, McGraw-Hill/Interamericana de México, 1996.

41. Gray, G. G., Martiny, W. J., "Efficiency testing of medium induction motors. A comment on IEEE Std 112-1991", IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 11, no. 3, September 1996., pp. 495-499.
42. Haque, T., y col., "Parameter determination for induction motors", Southeastcon '94., 'Creative Technology Transfer - A Global Affair'. Proceedings of the 1994 IEEE , 10-13 April 1994., pp. 45-49.
43. Harley, R.G., y col., "Induction motor model for the study of transient stability in both balanced and unbalanced multi-machine networks", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 7, no. 1, march 1992., pp. 209-215.
44. Harley, R.G.; Makram, E.B.; Duran, E.G. "The effects of unbalanced networks and unbalanced faults on induction motor transient stability". IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 3, no. 2, june 1988. pp. 398-403.
45. Hink, K. M., "18-Pulse Drives and Voltage Unbalance", Disponible: <http://www.mtecorp.com/18pulse.pdf>. Visitado: Septiembre 2005.
46. Hochgraf, C., Lasseter, R.H., "Statcom controls for operation with unbalanced voltages", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, no. 2, april 1998., pp. 538-544.
47. 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, vol. 40, no. 1, january/february 2004., pp.242-248.
48. Hongfa, D., Xianzhong, D., "A new method for multi-bus unbalanced voltages synthetic compensation", Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE, Volume: 4, 23-27 Jan. 2000., pp. 2607-2612.

49. Hosseini, S. H., Zare, K., “An efficient a-b-c reference frame-based algorithm in an active power filter for reactive power compensation under unbalanced conditions”, Disponible: <http://www.eleco.emo.org.tr/ELECO2003/asession/A1-12.pdf>. Visitado: Septiembre 2005.
50. Hsu, J. S., y col., “Comparison of induction Motor Field Efficiency Evaluation Methods”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol 34, no. 1, january/february 1998.
51. Huang, K. S., Wu, Q. H., “Effective identification of induction motor parameters based on fewer measurements”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 17, no. 1, march 2002., pp 55-60.
52. Idsøe Næss, B., Undeland, T. M., Gjengedal, T., “Methods for Reduction of Voltage Unbalance in Weak Grids Connected to Wind Plants”, Disponible: <http://www.elkraft.ntnu.no/en/Papers2002/Tore-Bjarne.pdf>. Visitado: Junio 2005.
53. IEEE Industry Applications Society/Power Engineering Society, IEEE Std. 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical systems, New York: IEEE Press, 1993.
54. IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators, IEEE Standard 112-2004.
55. Jacobina, C.B., y col., “Modeling and control of unbalanced three-phase systems containing PWM converters”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, no. 6, november/december 2001., pp. 1807-1816.
56. Jimoh, A.A., “Thermal effects of stray load losses in induction machines”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, no. 4, july/august 2000., pp. 1085-1093.

57. Kersting, W. H., Phillips, W. H., “Phase frame analysis of the effects of voltage unbalance on induction machines”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol IA-33, no. 2, March/April 1997., pp 415-420.
58. Kersting, W.H., “Causes and effects of unbalanced voltages serving an induction motor”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 37, no. 1, january/february 2001., pp. 165-170.
59. Kersting, W.H., Ratbbun, J. S., “The analysis of an undergrounded wye-delta transformer bank serving an induction motor and single-phase lighting loads”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, no. 1, january/february 2000., pp. 39-45.
60. Kostenko, M. P., Piotrovsky, L., Máquinas eléctricas. Tomo II. Editorial MIR . Moscú. 1976.
61. Lai, L.L., Ma, J.T., “Application of evolutionary programming to transient and subtransient parameter estimation”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 11, no. 3, September 1996., pp. 523-530.
62. Lerley, P., “Applying unbalance detection relays with motor loads”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol IA-35, no. 2, May/June 1999., pp 689-693.
63. Li Wang, Lih-Shyh Liu, “ Analyses of unbalanced voltages on startup transients of a three-phase induction motor using EMTP MODELS”, Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE , Volume: 1 , 23-27 Jan. 2000., pp.308-312.
64. Linders, J. R., “Effects of power supply variations on ac motor characteristics”, Transactions on Industry Applications, vol. IA-8, no. 4, July/August 1972., pp. 383-400.
65. Lineamientos económicos del Quinto Congreso del Partido Comunista de Cuba, La Habana, 1997.

66. López Fernández, X. M., Pérez Donsión, M., “Relation between unbalanced power supply and temperature rise in an induction motor considering the influence of ventilation”, Proceeding of International Conference on Electrical Machines, ICEM 98, 2-4 September 1998., Istanbul, Turkey.
67. López Fernández, X. M., Pérez Donsión, M., “Thermal performance of a three phase induction motor under single phase operation”, Proceedings of the International Conference on Electrical Machines”, Istambul, Turkey, 2-8 September 1998.
68. López, X. M., Pérez-Donsión, M., “Influencia de un terminal de alimentación abierto en el calentamiento de un motor de inducción trifásico”, Conferencia Internacional del Área Andina del IEEE, Septiembre 1999., Porlamar, Venezuela.
69. Marrero Pérez, B., “Efecto del desbalance de las máquinas asincrónicas de la Fábrica de Helados. Alternativas energéticas en el Combinado Lácteo Escambray”, Tesis presentada en opción al título de Master en Eficiencia Energética, Universidad de Cienfuegos, CEEMA, Febrero 2003.
70. Masi, V., Chassande, J.P., “Dimensionamiento de un motor de inducción para su utilización con variador de frecuencia”, Revista de la Comisión de Integración Eléctrica Regional (CIER), Montevideo, Uruguay, Año V, No. 16, junio 1996., pp. 55-59.
71. Melhorn, C. J., McGranaghan, M. F., “Interpretation and analysis of power quality measurements”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol 31, no 6, Nov/Dec 1995., pp 1363-1370.
72. Moor Neto, J.A., y col., “Development and implement of a prototype to measure the unbalance voltage level”, Proceedings. PowerCon 2000, International Conference on Power System Technology, 2000, Volume: 3, 4-7 Dec. 2000., pp. 1609-1612.

73. Morán, L., y col., “Series active power filter compensates current harmonics and voltage unbalance simultaneously”, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol 147, No 1, January 2000., pp. 31-36.
74. Motor Challenge Program, “Determining electric motor load and efficiency”, Fact Sheet. pp-16. 1999. Disponible: <http://www.motor.doe.gov>. Visitado: Mayo 2005.
75. Motor Challenge Program, “Manual del MotorMaster+ 3.0”. 1997. Disponible: <http://www.motor.doe.gov>. Visitado: Mayo 2005.
76. Mukundan, T.R., Kundu, P., “Method of reducing the effect of supply unbalance on induction motors”, Power Engineering Review, IEEE , Volume: 20 , Issue: 5 , May 2000., pp. 70-71.
77. Nangsue, P., Pillay, P., Conry, S. E., “Evolutionary algorithms for induction motor parameter determination”, IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 14, no. 3, September 1999., pp. 447-453.
78. Nilsson, N. E., “A comparison of ANSI and IEC standards for power station polyphase induction (asynchronous) motors”, IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 11, no. 3, September 1996., pp. 500-507.
79. Nolan, R., Pillay, P., Haque, T., “Application of genetic algorithms to motor parameter determination”, Industry Applications Society Annual Meeting, 1994., Conference Record of the 1994 IEEE , 2-6 Oct. 1994., pp. 47-54.
80. Penrose, H.W., “Motor circuit analysis for energy, reliability and production cost improvements”, Disponible: http://www.alltestpro.com/pdf/Reliability_Article.pdf. Visitado: Junio 2005.

81. Pérez, I., “Flujo de potencia trifásico para redes asimétricas industriales y de servicio”, Memorias XI Simposio de Ingeniería Eléctrica, SIE 2005., 21-23 junio del 2005., Santa Clara, Cuba.
82. Phumiphak, T., Chat-uthai, C., “Effective estimation of induction motor field efficiency based on on-site measurements”, Disponible: <http://www.eng.mut.ac.th/uploadfile/research/84.pdf>. Visitado: Noviembre 2005.
83. Phumiphak, T., Chat-uthai, C., “Estimation of induction motor parameters based on field test coupled with genetic algorithm”, Proceedings of 2002 International Conference on Power System Technology, PowerCon 2002, vol 2, Kunming, China, Oct. 2002., pp 1119-1203, Disponible: http://www.eng.mut.ac.th/upload_file/product/43.pdf. Visitado: Junio 2005.
84. Pierrat, L., Morrison, R.E., “Probabilistic modeling of voltage asymmetry”, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 10, no. 3., july 1995., pp. 1614-1620.
85. Pillay, P., Brzexinski, J., “Induction motor performance when fed from single to three phase converters”, Industry Applications Society Annual Meeting, 1990., Conference Record of the 1990 IEEE , 7-12 Oct. 1990., pp. 45-50.
86. Pillay, P., y col., “In-situ induction motor efficiency determination using the genetic algorithm”, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 13, No. 4, December 1998.
87. Pillay, P., Hoffman, P., Manyage, M., “Derating of induction motors operating with a combination of unbalanced voltages and over or undervoltages”, IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 17, no. 4, December 2002., pp. 485-491.

88. Pillay, P., Levin, V., "Mathematical models for induction machines". Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95., Conference Record of the 1995 IEEE , vol. 1, 8-12 Oct. 1995., pp. 606-616.
89. Pillay, P., Manyage, M., "Definitions of voltage unbalance", Power Engineering Review, IEEE , vol. 21, no. 5 , May 2001., pp. 50-51.
90. Pillay, P., Nolan, R., Haque, T., "Application of genetic algorithms to motor parameter determination for transient torque calculations", IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 33, no. 5, september/october 1997., pp. 1273-1282.
91. Pinto, J. A., y col., "Influence of the neutral in the thermal performance of a three phase induction motor under unbalanced power supply using finite element approach", The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering (COMPEL), vol 17, no. 1,2,3, 1998.
92. Power Quality Center, "Voltage Unbalance", Thecnical Note No.6, October 2002., Disponible: <http://www.elec.uow.edu.au/pqc/files/technote6.pdf> Visitado: Junio 2005.
93. Rai, H. M., Principles of Electrical Machine Design, Satya Prakashan, New Delhi, 1991, p. 401.
94. Redondo, F., García, J. M., Redondo, N., "Desequilibrio y pérdidas en las instalaciones eléctricas", Energía, Abril, 2000., Disponible: <http://www.energuia.com>. Visitado: Mayo 2005.
95. Renier, B., y col., "Comparison of standards for determining efficiency of three phase induction motors", IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 14, no. 3, September 1999.

96. Restrepo García, H. F., Peña Reyes, C. A., Pérez Uribe, A., “Hacia el desarrollo de nuevas máquinas computacionales: lecciones que aprendemos de la naturaleza”. *Energía y Computación*, vol. IX, no. 2, Segundo semestre de 2000.
97. Santos Valois, P.V., Vieira Tahan, C.M., Kagan, N., Arango, H., “Voltage unbalance in low voltage distribution networks”, *Electricity Distribution*, 2001., Part 1: Contributions. CIRED. 16th International Conference and Exhibition on (IEE Conf. Publ No. 482), vol. 2, 18-21 June 2001., pp. 5.
98. Schmitz, N. L., Berndt, M. M., “Derating polyphase induction motors operated with unbalanced line voltages”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Feb 1963., pp 680-686.
99. Sen, P. K., Landa, H., “Derating of induction motors due to waveform distortion”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 26, no. 6, november/decemder 1990, pp. 1102-1107.
100. Seung-Gi Jeong, “Representing line voltage unbalance”, 37th IAS Annual Meeting Conference, Record of the Industry Applications Conference 2002., vol. 3 , 13-18 Oct. 2002., pp. 1724-1732.
101. Shiun Chen, “A quantitative analysis of the data acquisition requirements for measuring power quality phenomena”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 18, no. 4, october 2003., pp. 1575-1577.
102. Simpson, R.H., “Instrumentation, measurement techniques, and analytical tools in power quality studies”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, no. 3, may/june 1998., pp. 534-548.

103. Simpson, R.H., "Power quality and symmetrical component analysis", Pulp and Paper Industry Technical Conference, 1993., Record of 1993 Annual Conference, 21-25 June 1993., pp. 1-11.
104. Smith, D.R., Braunstein, H.R., Borst, J.D., "Voltage unbalance in 3 and 4 wire delta secondary system", IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 3, no. 2, april 1988., pp. 733-741.
105. Song, H., Park, H., Nam, K., "An Instantaneous Phase Angle Detection Algorithm under Unbalanced Line Voltage Condition", Disponible: <http://www.postech.ac.kr/ee/ant/publications>. Visitado: Junio 2005.
106. Sousa, V., "Determinación de la eficiencia de motores asincrónicos en condiciones de campo y en presencia de desbalance de tensión", Tesis presentada en opción al título de Master en Eficiencia Energética, Universidad de Cienfuegos, Cuba, 2006.
107. Souto, O.C.N., y col., "Power quality impact on performance and associated costs of three-phase induction motors", Proceedings of 8th International Conference on Harmonics And Quality of Power, 1998., vol. 2 , 14-16 Oct. 1998., pp. 791-797.
108. Stankovic, A. M., Sanders, S. R., Aydin, T., "Dynamic Phasors in modelling and analysis of unbalanced polyphase ac machines", IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 17, no. 1, March 2002., pp. 107-113.
109. Tongxin Zheng, Makram, E.B., Girgis, A.A., "Evaluating power system unbalance in the presence of harmonic distortion", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 18, no. 2, April 2003., pp. 393-397.
110. Tutorial discussion on Voltage Imbalance assessment, Disponible: <http://www.grouper.ieee.org/groups/1159/1/VUFAss>. Visitado: Septiembre 2005.

111. Vahedi, A., Izadian, A., “Performance analysis of 3-phase induction motor fed by unbalanced voltage”, Proceeding of International Conference on Electrical Machines, ICEM 02, 2002.
112. Viego, P., Diseño óptimo de motores monofásicos de inducción en las condiciones de Cuba, Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central de Las Villas, Cuba, 1978.
113. Viego, P., Cogollos, J. B., “Efecto del tipo de desbalance sobre las pérdidas en los motores asíncronos”, Memorias de FIE 2002, Julio 2002., Santiago de Cuba.
114. Vilaragut, M., Costa, A., García, A., Ayala, A.C., “Métodos para la determinación de la eficiencia energética en los motores de inducción trifásicos”, Ecosolar, no. 10, octubre-diciembre 2004.
115. Voldek, A. I., Máquinas eléctricas, Tomo I., Editorial Pueblo y Educación, Cuba, 1985.
116. Von Jouanne, A., Banerjee, B., “Assessment of voltage unbalance”, IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 16, no. 4, October 2001., pp. 782-790.
117. Wallace, A., y col., “A laboratory assessment of in-service motor efficiency testing methods”, 1997 IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record, May 18-21, 1997., Milwaukee, Wisconsin, USA, 1997.
118. Wallace, A.K., y col., “The measured effects of under-voltage, over-voltage and unbalanced voltage on the efficiency and power factor of induction motors over wide ranges of load”, 1997 Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives, (Conf. Publ. no. 444) , 1-3 Sept. 1997., pp. 258 – 262.

119. Wang, Y. J., “An analytical study on steady-state performance of an induction motor connected to unbalanced three-phase voltage”, Power Engineering Society Winter Meeting, 2000., IEEE, vol. 1, 23-27 Jan. 2000., pp. 159-164.
120. Wang, Y. J., “Analysis of effects of three-phase voltage unbalance on induction motors with emphasis on the angle of the complex voltage unbalance factor”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 16, no. 3, september 2001., pp.270-275.
121. Wang, Y. J., “Simulation of Random Variation of Three-phase Voltage Unbalance Resulting from Load Fluctuation Using Correlated Gaussian Random Variables”, Disponible: <http://www.nr.stic.gov.tw/ejournal/ProceedingA/v24n3/216-225.pdf>. Visitado: Septiembre 2005.
122. Wang, Y.J., “Modelling of random variation of three-phase voltage unbalance in electric distribution systems using the trivariate Gaussian distribution”, Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings- , vol. 148, no. 4, July 2001., pp. 279-284.
123. Williams, J. W., “Operation of three phase induction motors on unbalanced voltages", AIEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol PAS-73, April 1954., pp 125-133.
124. Woll., R. F., “Effect of unbalanced voltage in the operation of polyphase induction motors”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol IA-11, no. 1, pp 38-42, Jan/Feb 1975.
125. Wong, K.T., “Fast calculation of negative phase sequence in 3-phase systems for rapid unbalance assessment”, Safeguarding Industrial Plant During Power System Disturbances, IEE Colloquium on , 4 Dec 1989., pp. 4/1 – 4/4.
126. Yamazaki, K., Haruishi, Y., “Stray Load Loss Analysis of Induction Motor—Comparison of Measurement Due to IEEE Standard 112 and Direct Calculation by Finite-Element

Method”, IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 40, no. 2, march/april 2004., pp.543-549.

127. Zynovchenko, A., Xie, J., “Correction of input circuits errors by measurements of three-phase current or voltage system unbalance”, Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific. IEEE/PES, vol. 1, 6-10 Oct. 2002., pp. 454-458.

ANEXOS

ANEXO A

CONSIDERACIONES SOBRE EL EFECTO DE ALIMENTACION NO SINUSOIDAL.

La forma de onda no sinusoidal de la tensión produce efectos negativos en la operación del motor, y su distorsión se mide de acuerdo a la definición dada en la norma IEEE-519 [53] como:

$$THD_V = \sqrt{\frac{\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2}{V_1^2}} \cdot 100\% \quad (A.1)$$

Donde:

THD_v es la distorsión total armónica en %.

$\sum_{k=2}^{\infty} V_k^2$ es la suma de los cuadrados de las amplitudes de todos los armónicos de tensión.

V_1^2 es el cuadrado de la amplitud de la tensión fundamental.

La cantidad de distorsión de la tensión debida al armónico de orden k se calcula como:

$$FDV_k = \frac{V_k}{V_1} \cdot 100\% \quad (A.2)$$

Donde:

FDV_k es el factor de distorsión de la tensión producto del k -ésimo armónico, en %.

V_k es la amplitud del armónico de tensión de orden k , en V.

V_1 es la amplitud de la tensión fundamental, en V.

El THD ha sido utilizado para establecer límites del contenido armónico. De esta manera, en un sistema eléctrico industrial el THD_v debe ser inferior a un 5%. Sin embargo, no se especifican límites relacionados con el contenido armónico individual. En [99] se demuestra la necesidad de considerar el efecto de los armónicos individuales y no solamente el THD. En [13] se realiza un estudio similar, y para demostrar el efecto de los armónicos individuales sobre la eficiencia del motor se emplearon espectros con contenidos armónicos individuales de 5, 10 y 15%.

En un sistema trifásico con una forma de onda de la tensión que no sea simétrica con relación al eje de las abscisas, aparecen armónicos pares. La conexión del motor (delta o estrella sin neutro) impide la circulación del tercer armónico y sus múltiplos, aunque en el caso de que exista desbalance, pueden existir trazas de secuencia negativa y positiva de terceros armónicos

circulando por el motor [13]. Por estas razones se considera en este análisis el caso general en que estén presentes todos los armónicos.

Efecto de la alimentación no sinusoidal sobre las pérdidas de núcleo del motor.

A continuación se realiza un análisis similar al realizado en [20] con algunos cambios en la nomenclatura. Las pérdidas de núcleo del estator son una función de las concatenaciones de flujo máximo. Si la tensión no sinusoidal de la tensión de fase tiene la expresión:

$$v(t) = \sum_k \sqrt{2} \cdot V_k \cdot \cos(k\omega t + \alpha_k) \quad (\text{A.3})$$

El flujo que concatena con la fase será:

$$\lambda = \int v(t) \cdot dt = \sum_k \frac{\sqrt{2} \cdot V_k}{k \cdot \omega} \cdot \text{sen}(k\omega t + \alpha_k) \quad (\text{A.4})$$

El valor máximo es:

$$\lambda_{MAX} \leq \sum_k \frac{\sqrt{2} \cdot V_k}{k \cdot \omega} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_1}{\omega} \left(1 + \sum_{k \neq 1} \frac{V_k}{k \cdot V_1} \right) \quad (\text{A.5})$$

Donde:

k es el orden del armónico.

V_k y V_1 son los valores rms de la tensión del k -ésimo armónico y del fundamental respectivamente.

$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ es la frecuencia angular.

La tensión de fase nominal (V_n) produce una concatenación de flujo máxima de:

$$\lambda_{nMAX} = \frac{\sqrt{2} \cdot V_n}{\omega} \quad (\text{A.6})$$

Si el valor rms de la tensión no sinusoidal es igual a la tensión nominal y considerando la expresión (A.1) se puede plantear que:

$$V = V_n = \sqrt{\sum_k V_k^2} = V_1 \cdot \sqrt{1 + (THD_v)^2} \quad (\text{A.7})$$

Combinando las expresiones de la (A.5) a la (A.7) resulta:

$$\frac{\lambda_{MAX}}{\lambda_{nMAX}} \leq \frac{1 + \sum_{k \neq 1} \frac{V_k}{k \cdot V_1}}{\sqrt{1 + (THD_v)^2}} \quad (A.8)$$

En [20] se plantea que para los espectros de tensión típicos en sistemas eléctricos de 60 o 50 Hz, donde la distorsión de los armónicos superiores $FDV < 5\%$, la relación dada por (A.8) es menor que 1,05 lo que tiene un efecto insignificante sobre las pérdidas de núcleo.

Evalutando la expresión anterior para el caso hipotético de que estén presentes todos los armónicos desde el 2 hasta el 50 y que además, todos tengan una amplitud del 1% del fundamental, se tiene:

$$\frac{\lambda_{MAX}}{\lambda_{nMAX}} < 1,03$$

Este valor es inferior al planteado en las investigaciones de De Abreu y Eigeles [20] de manera que se puede despreciar el incremento de las pérdidas de núcleo en presencia de una onda de tensión con el espectro propuesto.

Pérdidas mecánicas.

Las pérdidas mecánicas comprenden las pérdidas de fricción y batimiento y son aproximadamente proporcionales al cuadrado de la velocidad y al área de la superficie de contacto. Se asume que no son afectadas por la distorsión armónica de la tensión [99].

Efecto sobre las pérdidas en los devanados.

Cuando el motor está operando en la zona de trabajo con velocidades cercanas a la sincrónica, el circuito equivalente armónico es similar al circuito equivalente de rotor bloqueado para el armónico particular que se considere [64, 99].

La reactancia de magnetización del k-ésimo armónico será:

$$x_{mk} = k \cdot x_m$$

Como esta reactancia es mucho mayor que la impedancia del rotor Z_{rk} , entonces se puede despreciar la rama de magnetización quedando el circuito para el armónico k como se muestra:

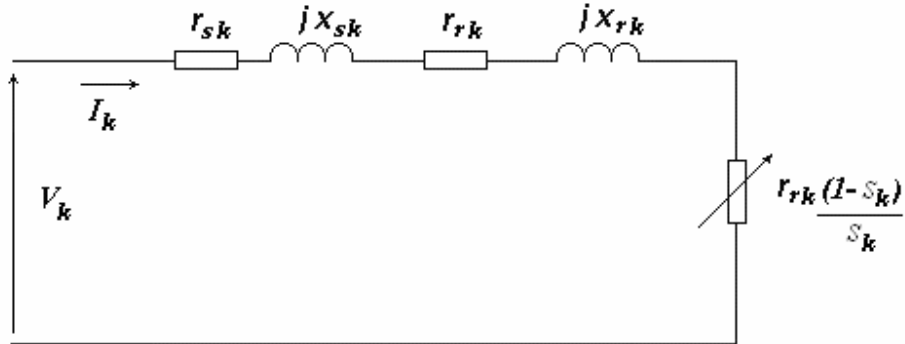


Fig. A1. Circuito equivalente del motor para el k -ésimo armónico.

La corriente estará dada por:

$$I_k = \frac{V_k}{\sqrt{(r_{sk} + r_{rk})^2 + (x_{sk} + x_{rk})^2}} \quad (\text{A.9})$$

Donde:

V_k es la tensión debido al k -ésimo armónico, en V.

r_{sk} y r_{rk} son las resistencias del estator y del rotor para el armónico k , en Ω .

x_{sk} y x_{rk} son las reactancias del estator y del rotor para el armónico k , en Ω .

s_k es el deslizamiento para el armónico k , que en función del deslizamiento fundamental (s) y del orden del armónico se expresa como:

$$s_k = \frac{k \mp (1-s)}{k} = 1 \mp \frac{(1-s)}{k} \quad (\text{A.10})$$

Donde el signo menos se emplea para los armónicos de secuencia positiva y el signo más para los armónicos de secuencia negativa.

La frecuencia del armónico en el estator será:

$$f_{sk} = k \cdot f_1 \quad (\text{A.11})$$

La frecuencia inducida en el rotor por el armónico k será:

$$f_{rk} = k \cdot f_1 \cdot s_k = f_1 \cdot (k \mp (1-s)) \quad (\text{A.12})$$

La reactancia de dispersión de los devanados del estator se calcula como:

$$x_{sk} = k \cdot x_{s1} \quad (\text{A.13})$$

La resistencia del estator considerando el efecto pelicular puede aproximarse según [70] como:

$$r_{sk} = r_{s1} (0,4 + 0,6 \cdot \sqrt{k}) \quad (\text{A.14})$$

Para el caso de los parámetros del devanado de jaula, el efecto pelicular sobre la resistencia y la reactancia de dispersión del rotor se tiene en cuenta a partir de los coeficientes k_{rk} y k_{xk} que se determinan según [60]:

$$k_{rk} = \xi \cdot \frac{\sinh(2\xi) + \sin(2\xi)}{\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)} \quad (\text{A.15})$$

$$k_{xk} = \frac{3}{2\xi} \cdot \frac{\sinh(2\xi) - \sin(2\xi)}{\cosh(2\xi) - \cos(2\xi)} \quad (\text{A.16})$$

Donde :

$\xi = \frac{h}{h_p}$ es la altura virtual de la barra de los conductores del rotor.

h es la altura física de la barra, en m.

$h_p = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot f_r \cdot \mu_o}}$ es la profundidad de penetración del campo, en m.

ρ es la resistividad del material, para el aluminio a 50°C es igual a 0.038 $\Omega\text{-m}^2/\text{m}$.

f_r es la frecuencia de la corriente inducida en el rotor, en Hz.

$$\mu_o = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m.}$$

Cuando se evalúa el parámetro ξ para los diferentes armónicos y considerando que las corrientes armónicas inducidas en el rotor para la primera serie espacial tienen una frecuencia dada por la expresión (A.12) se tiene:

$$\xi_k = \xi_1 \cdot \sqrt{\frac{k \mp (1-s)}{s}} \quad (\text{A.17})$$

Un análisis similar en [24] plantea que cuando se trata el armónico fundamental, es posible considerar que la profundidad de penetración del campo es $h_{p1} \approx h$; $\xi_1 \approx 1$ y $k_{r1} \approx k_{x1} \approx 1$. Por otra parte, cuando $\xi > 2$, lo cual es el caso para los armónicos superiores en la expresión (A.17), las expresiones (A.15) y (A.16) se pueden aproximar a las siguientes [60]:

$$k_{rk} \approx \xi_k \quad (\text{A.18})$$

$$k_{xk} \approx \frac{3}{2\xi_k} \quad (\text{A.19})$$

Como el efecto pelicular se manifiesta solamente en las barras del rotor, la diferencia entre los valores de resistencia está dada por:

$$\begin{aligned} \Delta r_r &= K_{rs} \cdot r_b \cdot (\xi_k - 1) \quad \text{y:} \\ r_{rk} &= r_{r1} (1 + K_{rs} \cdot r_b \cdot (\xi_k - 1)) \end{aligned} \quad (\text{A.20})$$

Donde:

r_b es la resistencia de la barra, en Ω .

K_{rs} es el coeficiente de reducción de la resistencia de la jaula al devanado del estator.

Si se acepta como en [24] que $K_{rs} \cdot r_b \approx 0,7 \cdot r_{r1}$, se puede plantear que:

$$r_{rk} = r_{r1} \cdot \left(0,3 + 0,7 \cdot \sqrt{\frac{k \mp (1-s)}{s}} \right) \quad (\text{A.21})$$

La reactancia de dispersión del rotor se compone de las reactancias de ranura, la frontal y la de dispersión diferencial. De maneara similar al análisis de la resistencia y asumiendo como en [24] que estas tres reactancias son del mismo orden, se tiene:

$$x_{rk} = x_{r1} \cdot \left(0,67 + \frac{0,5}{\sqrt{\frac{k \mp (1-s)}{s}}} \right) \quad (\text{A.22})$$

Con las expresiones (A.13), (A.14), (A.21) y (A.22) se determinan las impedancias del circuito equivalente para cada armónico k y las pérdidas en los devanados por fase producto de las corrientes armónicas se calculan como:

$$P_{cuk} = \sum_{k=2}^{\infty} I_k^2 \cdot \left(r_{sk} + \frac{r_{rk}}{s_k} \right) \quad (\text{A.23})$$

El porcentaje de incremento en las pérdidas de cobre debidas a las corrientes armónicas se calcula como:

$$\Delta P_{cu} = \frac{P_{cuk}}{I_1^2 \left(r_s + \frac{r_r}{s} \right) + P_{cuk}} \cdot 100\% \quad (\text{A.24})$$

A modo de ilustración del comportamiento de las pérdidas de cobre ante alimentación armónica, se utilizan las características de motores de inducción dadas en [99] y que se reproducen a continuación:

Tabla A.1 Valores de impedancias de motores de inducción.

Potencia (hp)	Deslizamiento (%)	Resistencias y reactivancias en pu basadas en los KVA de plena carga y tensión nominal.				
		r_s	r_r	x_m	x_s	x_r
Hasta 5	4,5	0,055	0,055	1,9	0,048	0,072
5-25	3,0	0,040	0,040	2,6	0,064	0,096
25-200	2,5	0,030	0,030	3,2	0,068	0,102
200-1000	1,75	0,025	0,020	3,6	0,068	0,102

Con estos datos y para el caso hipotético en que estén presentes todos los armónicos desde el 2 hasta el 50, y que además, todos tengan una amplitud del 1% del fundamental, se puede calcular el porcentaje que representan las pérdidas debida a las corrientes armónicas circulando por los devanados según la expresión (A.24). Se realizan los mismos cálculos en el caso de que no se consideren los terceros armónicos. Los resultados son los siguientes:

Potencia (hp)	ΔP_{cuk} (%)	ΔP_{cuk} ($k \neq 3$) (%)
Hasta 5	1,3	0,9
5-25	1,5	1,0
25-200	1,3	0,87
200-1000	1,4	0,94

Como puede apreciarse, para el espectro armónico que se sugiere, las pérdidas de cobre solo se incrementan en un 1,5% para el peor de los casos.

Pérdidas adicionales.

Las pérdidas adicionales son difíciles de determinar y aunque los armónicos de tensión afectan significativamente estas pérdidas, ellas en sí representan aproximadamente solo un 16% de las pérdidas totales por lo que su incremento no lo consideraremos en este análisis.

Pérdidas totales.

Hasta aquí se ha planteado un análisis de la influencia de un espectro hipotético sobre cada una de las pérdidas individuales. Una expresión aproximada para el incremento de las pérdidas totales provocadas por los armónicos fue publicada por Cummings en [17], esta es:

$$\Delta W_T \approx 35 \sum_{k=5}^{\infty} \frac{1}{k^2} \left(\frac{V_k}{V_n} \right)^2 \quad (\text{pu}) \quad (\text{A.25})$$

Si el valor rms de la tensión no sinusoidal es igual a la tensión nominal se puede sustituir (A.7) en (A.25) y tenemos:

$$\Delta W_T \approx \frac{35}{(1 + THD^2)} \sum_{k=5}^{\infty} \frac{1}{k^2} \left(\frac{V_k}{V_1} \right)^2 \quad (\text{pu}) \quad (\text{A.26})$$

Considerando todos los armónicos por encima del 5to y para el caso hipotético planteado de que su amplitud sea del 1% el resultado será:

$$\Delta W_T \approx 0,0007 \text{ pu}$$

En resumen, este resultado corrobora lo expuesto hasta aquí y justifica la consideración de que espectros de la onda de tensión con distorsión armónica individual máxima del 1% tienen un efecto poco significativo en el incremento de las pérdidas del motor. Además, el hecho de considerar igual factor de distorsión para todos los armónicos permite obtener obviamente resultados conservadores. Esto da mayor seguridad en lo planteado, ya que en la realidad la amplitud de los armónicos decrece con su orden por lo que basta por ejemplo, que el 2do armónico sea del 1% del fundamental para asegurar que todos los demás tengan amplitudes menores.

ANEXO B

RESISTENCIA PARA PÉRDIDAS ADICIONALES.

Tabla B.1 Valores asumidos de las pérdidas adicionales según la norma IEEE-112 2004 sección 5.7.4.[54]

Potencia nominal de la máquina (kW)	k_{ad} =Pérdidas adicionales como porcentaje de la potencia nominal.
1-90	1,8%
91-375	1,5%
376-1850	1,2%
Mayores de 1851	0,9%

De esta manera se puede plantear que las pérdidas adicionales nominales se consideran como:

$$P_{adn} = 3 \cdot k_{ad} \cdot P_n \quad (\text{W}) \quad (\text{B.1})$$

Del circuito equivalente modificado se tiene que la potencia de salida nominal se puede expresar como:

$$P_n = 3 \cdot I_{nr}^2 \cdot r_r \cdot \left(\frac{1-s_n}{s_n} \right) \quad (\text{W}) \quad (\text{B.2})$$

Donde:

I_{nr} es la corriente nominal por fase del rotor, en A.

s_n es el deslizamiento nominal, en pu.

r_r es la resistencia de fase del rotor referida al estator, en Ω .

Debido a que las pérdidas adicionales de carga son proporcionales al cuadrado de la corriente del rotor, a cualquier estado de carga diferente del nominal se puede plantear [54]:

$$P_{ad} = P_{adn} \cdot \left(\frac{I_r}{I_{nr}} \right)^2 \quad (\text{W}) \quad (\text{B.3})$$

Sustituyendo (B.2) en (B.1) y el resultado en (B.3) se tiene:

$$P_{ad} = 3 \cdot I_r^2 \cdot k_{ad} \cdot r_r \cdot \left(\frac{1-s_n}{s_n} \right) \quad (\text{W}) \quad (\text{B.4})$$

En la expresión anterior, el término $k_{ad} \cdot r_r \cdot \left(\frac{1-s_n}{s_n} \right)$ puede ser considerado como una resistencia ficticia en la cual se disipa la potencia P_{ad} cuando por ella circula la corriente del rotor I_r , o sea:

$$P_{ad} = 3 \cdot I_r^2 \cdot r_{ad} \quad (\text{W}) \quad (\text{B.5})$$

$$\text{Siendo } r_{ad} = k_{ad} \cdot r_r \cdot \left(\frac{1-s_n}{s_n} \right) \quad (\Omega) \quad (\text{B.6})$$

Como en régimen desbalanceado la corriente del rotor por cada una de las fases es diferente se puede reescribir la expresión (B.5) como:

$$P_{ad} = (I_{ar}^2 + I_{br}^2 + I_{cr}^2) \cdot r_{ad} \quad (\text{W}) \quad (\text{B.7})$$

Expresando las corrientes en términos de sus componentes de secuencia y resolviendo tenemos:

$$P_{ad} = 3 \cdot (I_{r1}^2 + I_{r2}^2) \cdot r_{ad} \quad (\text{B.8})$$

ANEXO C

COMPORTAMIENTO DEL AG PARA DIFERENTES TAMAÑOS DE POBLACION.

Una población pequeña (100 individuos) aunque consume menos memoria, implica un mayor número de generaciones para alcanzar la convergencia. Una población excesivamente grande (1000 individuos) no produce mejoras significativas con relación al caso en que se empleen 500 individuos, ya que como se aprecia convergen en aproximadamente igual número de generaciones pero por supuesto, mayor cantidad de individuos implica mayor consumo de memoria.

En la Figura C1 se muestra la evolución de una corrida para un caso con diferentes tamaños de población.

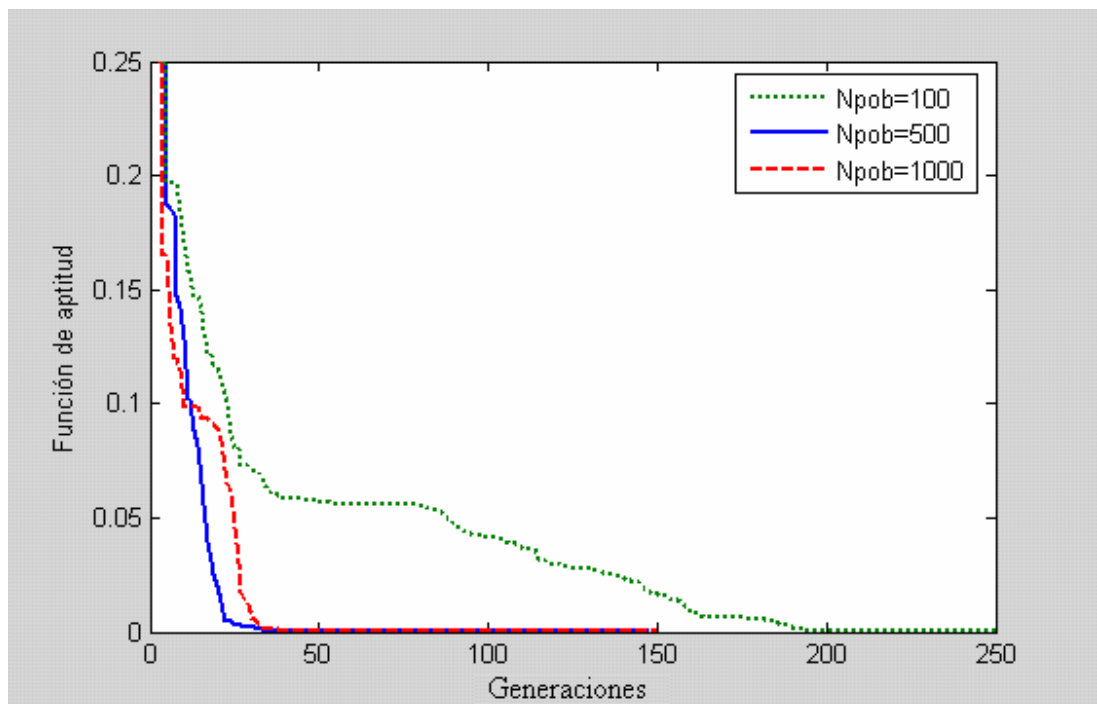
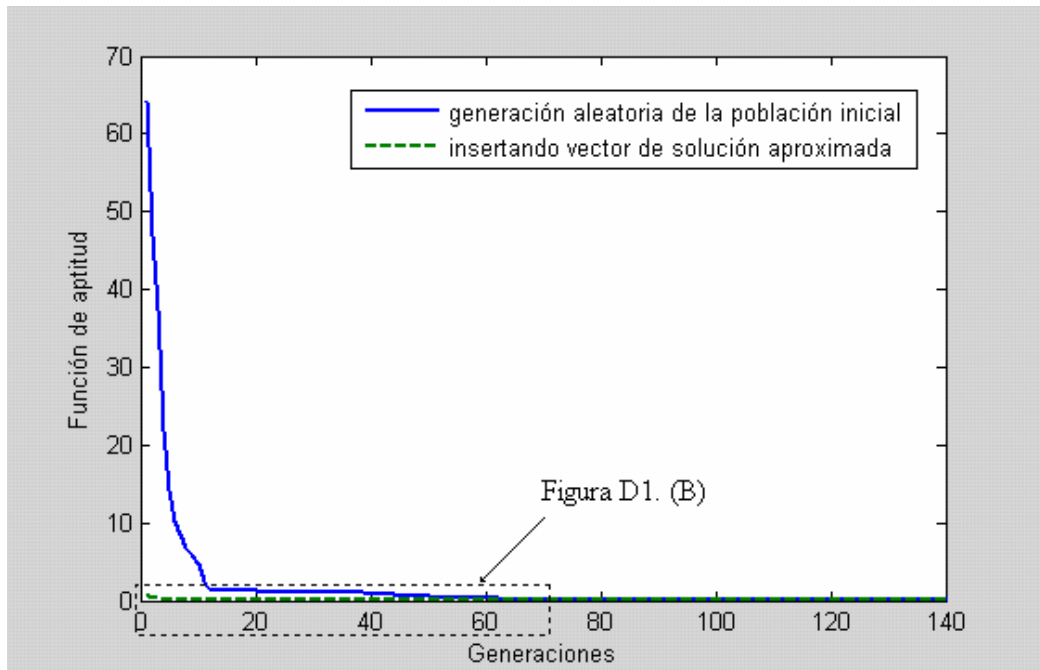


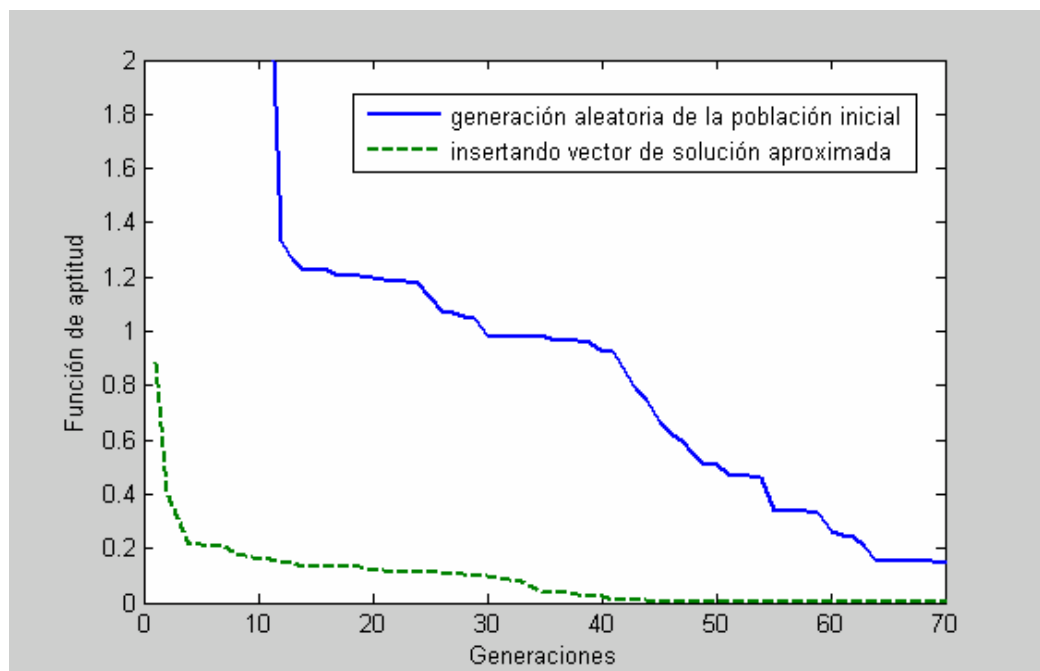
Figura C1. Evolución de una corrida del AG para el mismo caso con diferentes tamaños de población.

ANEXO D

EFFECTO DE LA GENERACION HEURÍSTICA DE LA POBLACION INICIAL



(a)



(b)

Figura D1. El AG se acelera si se inserta una solución aproximada del problema.

ANEXO E

CALCULO DEL ANGULO DE DEFASAJE DE LAS CORRIENTES Y TENSIONES.

Cuando se conocen los valores rms de las tensiones trifásicas, que en el caso más general se suponen desbalanceadas en lo adelante, el defasaje entre ellas puede determinarse aplicando Pitágoras generalizado a partir de asumir como referencia una tensión cualquiera. Si se tienen los valores rms de las tensiones de línea V_{ab} , V_{bc} y V_{ca} y se toma como referencia la tensión V_{ab} entonces:

$$\theta_{ab} = 0^\circ$$

el ángulo de fase de las tensiones restantes se calculan como:

$$\alpha = \cos^{-1} \left(\frac{V_{ca}^2 - V_{ab}^2 - V_{bc}^2}{-2 \cdot V_{ab} \cdot V_{bc}} \right) \quad (E.1)$$

$$\beta = \cos^{-1} \left(\frac{V_{bc}^2 - V_{ab}^2 - V_{ca}^2}{-2 \cdot V_{ab} \cdot V_{ca}} \right) \quad (E.2)$$

$$\theta_{bc} = \alpha - \pi \quad (E.3)$$

$$\theta_{ca} = \pi - \beta \quad (E.4)$$

De esta manera se tiene:

$$\bar{V}_{ab} = V_{ab} \cdot e^{j0}$$

$$\bar{V}_{bc} = V_{bc} \cdot e^{j\theta_{bc}}$$

$$\bar{V}_{ca} = V_{ca} \cdot e^{j\theta_{ca}}$$

De igual manera se procede con las corrientes. Conociendo las tensiones y las corrientes con sus ángulos se descomponen en componentes simétricas para el resto de los análisis y se determinan las componentes de secuencia de fase. **En este punto hay que considerar que se obtuvieron estos sistemas de tensiones y corrientes tomando como referencia una tensión y una corriente a los que se asignó por conveniencia ángulo cero.** Para determinar el defasaje real entre ellos se propone considerar la potencia compleja. Como la potencia es una magnitud conservativa, esta debe ser igual antes y después de la transformación por componentes simétricas [40] y teniendo en cuenta además que por el motor no circulan componentes de secuencia cero, se tiene que:

$$S = P + jQ = \bar{V}_a \cdot \bar{I}_a^* + \bar{V}_b \cdot \bar{I}_b^* + \bar{V}_c \cdot \bar{I}_c^* = 3 \cdot \left(\bar{V}_1 \cdot \bar{I}_1^* + \bar{V}_2 \cdot \bar{I}_2^* \right) \quad (\text{E.5})$$

Si el factor de desbalance complejo de tensión es:

$$\bar{K}_V = \frac{\bar{V}_2}{\bar{V}_1} = k_V \cdot e^{j\theta_V} \quad (\text{E.6})$$

Y el factor de desbalance complejo de corriente es:

$$\bar{K}_I = \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1} = k_I \cdot e^{j\theta_I} \quad (\text{E.7})$$

El ángulo de estas dos cantidades complejas es independiente de la referencia ya que está dado por el defasaje que exista entre las componentes de secuencia positiva y negativa de una misma fase.

Despejando las componentes de secuencia negativa en (E.6) y (E.7) y sustituyéndolas en (E.5) se tiene:

$$S = P + jQ = 3 \cdot \left(\bar{V}_1 \cdot \bar{I}_1^* + \bar{V}_1 \cdot \bar{K}_V \cdot \bar{I}_1^* \cdot \bar{K}_I^* \right) \quad (\text{E.8})$$

De esta expresión se puede plantear que:

$$S = 3 \cdot \bar{V}_1 \cdot \bar{I}_1^* \cdot \left(1 + \bar{K}_V \cdot \bar{K}_I^* \right) \quad (\text{E.9})$$

Se define el término complejo

$$\bar{F}D = \left(1 + \bar{K}_V \cdot \bar{K}_I^* \right) = FD \cdot e^{j\gamma} \quad (\text{E.10})$$

y el producto $\bar{I}_1^* \cdot \left(1 + \bar{K}_V \cdot \bar{K}_I^* \right)$ como la conjugada de una corriente de fase equivalente balanceada de secuencia positiva que transfiere la misma potencia que el sistema desbalanceado original, entonces:

$$S = 3 \cdot \bar{V}_1 \cdot \bar{I}_1^* \cdot \bar{F}D = 3 \cdot \bar{V}_1 \cdot \bar{I}_{eq}^* \quad (\text{E.11})$$

La potencia activa total estará dada por:

$$P = \text{Re} | S | = 3 \cdot V_1 \cdot I_{eq} \cdot \cos(\varphi_{eq}) \quad (\text{E.12})$$

Donde:

φ_{eq} es el ángulo de defasaje entre la tensión de secuencia positiva y la corriente equivalente.

$$\varphi_{eq} = \cos^{-1} \left(\frac{P}{3 \cdot V_1 \cdot I_{eq}} \right) \quad (E.13)$$

Si se suma a este defasaje el ángulo de la tensión de secuencia positiva φV_1 , de (E.10) y (E.11) se tiene que:

$$\bar{I}_1 = \frac{I_{eq} \cdot e^{j(-\varphi_{eq} + \varphi V_1)}}{FD \cdot e^{j\gamma}} = \frac{I_{eq}}{FD} \cdot e^{j(-\varphi_{eq} + \varphi V_1 - \gamma)} \quad (E.14)$$

De la expresión (E.14) se deduce que el ángulo de defasaje real de la corriente de secuencia positiva con relación a la referencia de tensión V_{ab} es:

$$\varphi I_1 = \varphi V_1 - \varphi_{eq} - \gamma \quad (E.15)$$

A partir de este valor queda fijado también el ángulo real de la componente de secuencia negativa de la corriente utilizando la expresión (E.7)

$$\varphi I_2 = \varphi I_1 + \theta_l \quad (E.16)$$

ANEXO F

CALCULO ITERATIVO DE LAS IMPEDANCIAS DE LA RAMA DE MAGNETIZACIÓN.

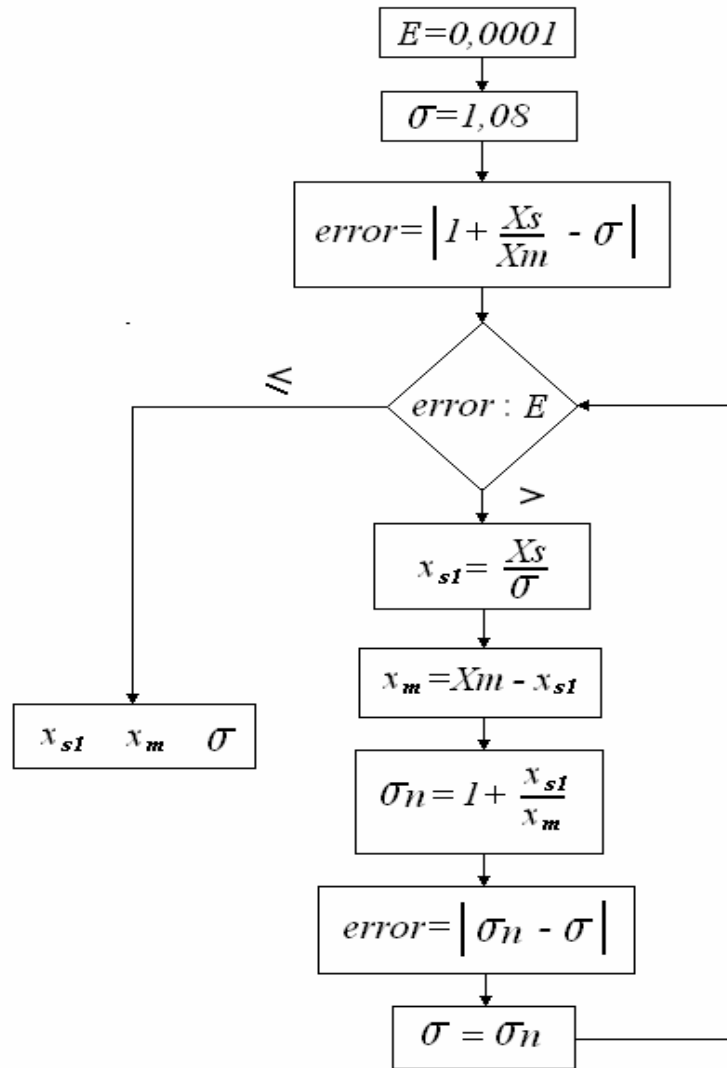


Figura F1. Diagrama de bloques para el proceso iterativo de cálculo de las reactancias de la rama de magnetización y del estator.

ANEXO G

INFORMACION SOBRE COMPONENTES DE LA INSTALACION EXPERIMENTAL.

Tabla G.1 Características del generador dc utilizado como carga para el motor en la instalación experimental.

Marca y Fabricante	Super Line, Mitsubishi Elect. Co./Japón.
Tipo	SD-EF
Potencia	31 kW
Tensión	110 V
Corriente	282 A
Velocidad	1770 rpm
Conexión	shunt
Resistencia de Armadura (corregida a 75°C)	0,0117 Ω
Resistencia de los interpolos (corregida a 75°C)	0,0053 Ω
Clase de aislamiento	B

Tabla G.2 Característica de magnetización.

$w = 1794$ rpm

Ascendente

I _{exc}	0,0	0,1	0,3	0,5	0,6	0,8	1,1	1,5	1,9	2,3	2,6	3,0
V _{arm}	7,5	9,7	17,6	25,5	29,9	36,6	45,5	59,2	72,0	83,0	93,8	105,0
I _{exc}	3,4	3,7	4,0	4,3	4,6	5,0	5,2	5,3				
V _{arm}	117,0	125,0	133,0	141,3	148,0	158,8	163,0	166,0				

Descendente

I _{exc}	0,0	0,2	0,6	1,1	1,6	2,1	2,6	3,2	3,6	4,1	4,6	4,9
V _{arm}	8,0	19,3	35,0	51,0	68,0	82,0	97,0	114,5	126,0	141,0	151,3	159,5

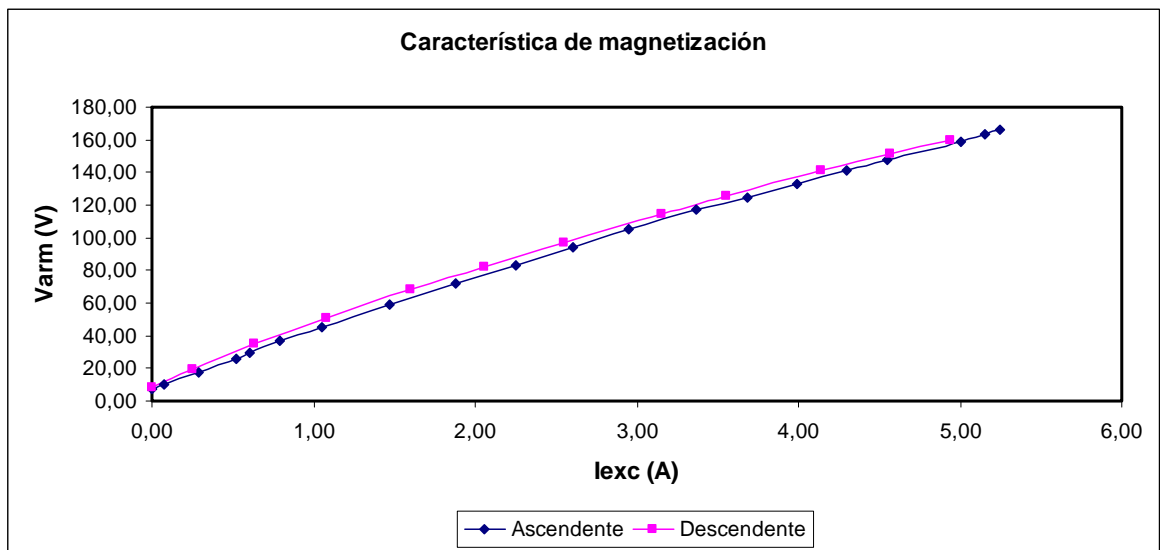


Figura G.1 Característica de magnetización del generador dc tipo SD-EF de 31 kW.

Determinación de las pérdidas rotacionales por el método de marcha en vacío.
 El esquema utilizado es el siguiente:

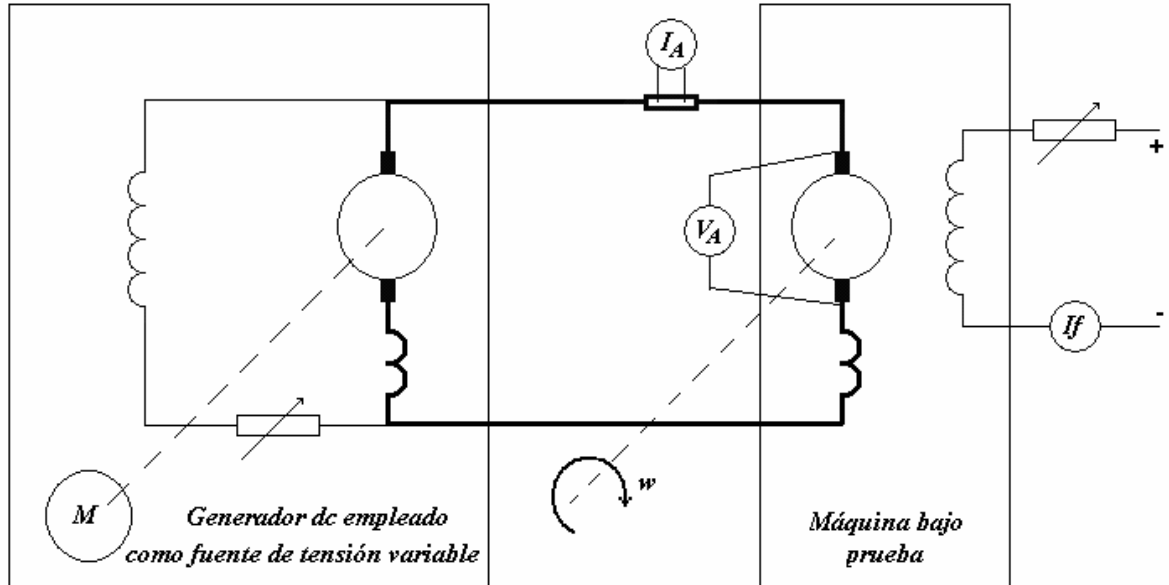


Figura G2. Esquema para la determinación de las pérdidas rotacionales.

La máquina calibrada consiste en un generador dc con separación experimental de sus pérdidas, para lo cual, se pone en marcha como motor en vacío, excitado independiente, se regula la tensión en los bornes y por consiguiente, la velocidad. Rodando la máquina de esta forma, a diferentes velocidades ω , se pueden determinar las pérdidas en vacío según:

$$W_o = W_\rho + W_h + W_w = (V_A - I_A \cdot R_A - \Delta V_e) \cdot I_A \quad (G.1)$$

Donde:

W_ρ son las pérdidas por rozamiento en los cojinetes, en W.

W_h son las pérdidas por histéresis, en W.

W_w son las pérdidas por corrientes parásitas, en W.

ΔV_e es la caída de tensión en las escobillas, en V.

R_A es la resistencia del devanado de armadura corregida a 75 °C, en Ω .

V_A es la tensión en los bornes de las escobillas, en V.

I_A es la corriente de armadura, en A.

Se mide V_A e I_A repetidamente para diferentes velocidades y corrientes de excitación I_f , se aplica la expresión (G.1) para determinar las pérdidas rotacionales. En este caso, como se desconoce la característica voltamperica de las escobillas, se utiliza el valor de $\Delta V_e=1$ V recomendado por [115] para cada contacto de escobillas.

Con los valores de W_o se obtienen las pérdidas rotacionales con relación a la velocidad $\frac{W_o}{w}$ en W/rpm y se realiza un ajuste para encontrar la expresión que define estas pérdidas dando el siguiente resultado:

$$\frac{W_o}{w} = 0,1957 + 0,0425 \cdot If + 3,36 \cdot 10^{-7} \cdot w^2 \quad (G.2)$$

Los datos experimentales y el resumen de la regresión se muestran a continuación.

Tabla G.3 Mediciones realizadas.

X1=If (A)	w (rpm)	X2=w²	W_o (W)	Y=W_o/w (W/rpm)
3,90	602,50	363006,25	274,88	0,46
3,90	1032,00	1065024,00	741,22	0,72
3,90	1337,00	1787569,00	1310,96	0,98
3,90	1423,00	2024929,00	1481,58	1,04
3,90	1815,00	3294225,00	2626,88	1,45
3,70	615,00	378225,00	292,04	0,47
3,70	966,40	933928,96	647,28	0,67
3,70	1490,00	2220100,00	1671,43	1,12
3,70	1720,00	2958400,00	2329,92	1,35
3,70	1943,00	3775249,00	3162,60	1,63
3,55	739,50	546860,25	399,50	0,54
3,55	1153,00	1329409,00	946,88	0,82
3,55	1429,00	2042041,00	1472,60	1,03
3,55	1691,00	2859481,00	2224,32	1,32
3,55	1845,00	3404025,00	2779,22	1,51
3,05	793,60	629800,96	417,40	0,53
3,05	1121,00	1256641,00	834,56	0,74
3,05	1455,00	2117025,00	1479,56	1,02
3,05	1798,00	3232804,00	2524,60	1,40
3,05	1903,00	3621409,00	2867,85	1,51
2,50	732,30	536263,29	353,54	0,48
2,50	1539,00	2368521,00	1660,62	1,08
2,50	1877,00	3523129,00	2782,59	1,48
2,00	835,00	697225,00	416,55	0,50
2,00	1264,00	1597696,00	1040,64	0,82
2,00	1851,00	3426201,00	2648,61	1,43
1,40	959,80	921216,04	539,49	0,56
1,40	1315,00	1729225,00	1103,85	0,84
1,40	1607,00	2582449,00	1805,59	1,12
1,40	1988,00	3952144,00	3090,44	1,55
1,05	1029,00	1058841,00	611,54	0,59
1,05	1299,00	1687401,00	1056,81	0,81
1,05	1524,00	2322576,00	1582,10	1,04
1,05	1948,00	3794704,00	2992,59	1,54

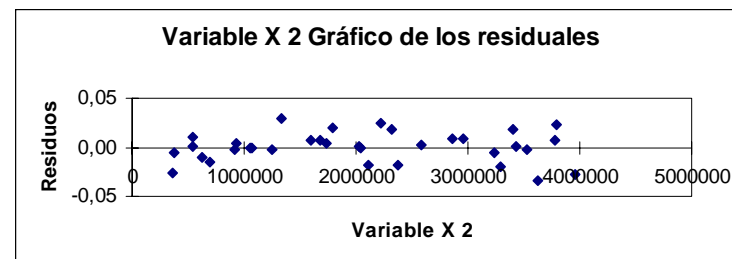
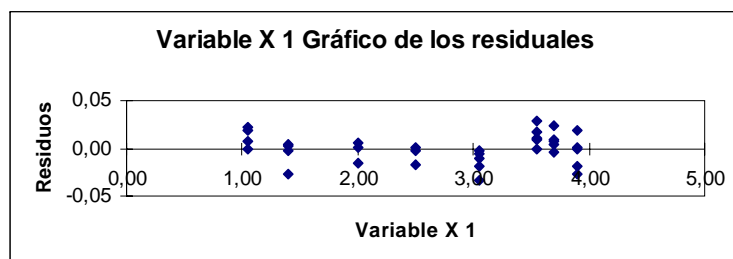
Resumen

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coefficiente de correlación múltiple	0,999227
Coefficiente de determinación R ²	0,998455
R ² ajustado	0,998355
Error típico	0,015483
Observaciones	34

ANÁLISIS DE VARIANZA

	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>F</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>Valor crítico de F</i>
Regresión	4,802491	2	10016,524325	2,401245	0,000000
Residuos	0,007432	31		0,000240	
Total	4,809922	33			

	<i>Error típico</i>	<i>Coefficientes</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Estadístico t</i>	<i>Inferior 95%</i>	<i>Superior 95,0%</i>
Intercepción	0,009527	0,195672	1,308409E-19	20,537784	0,176241	0,215103
Variable X 1	0,002613	0,042466	1,018338E-16	16,249833	0,037136	0,047796
Variable X 2	2,371395E-09	3,356208E-07	3,824512E-45	141,528837	3,307843E-07	3,404573E-07



Motores utilizados como prototipos.

Motor 1: WEG; 22 kW; 460 V; 34,9 A; $\cos\phi=0,88$; $\eta=90\%$; 1180 rpm; conexión Δ ; resistencia del estator 0,3705 Ω /fase a 28°C; aislamiento clase F.

Parámetros obtenidos a partir de los ensayos de rotor libre y rotor trancado a frecuencia industrial

r_s	r_m	X_m	r_r	X_s+X_r
0,4368*	6,335	54,663	1,849	2,722

*resistencia del estator corregida a 75°C

Motor 2: Super Line; 45 kW; 440 V; 71 A; $\cos\phi=0,88$; $\eta=93,2\%$; 1770 rpm; conexión Δ ; resistencia del estator 0,1163 Ω /fase a 29°C; aislamiento clase B.

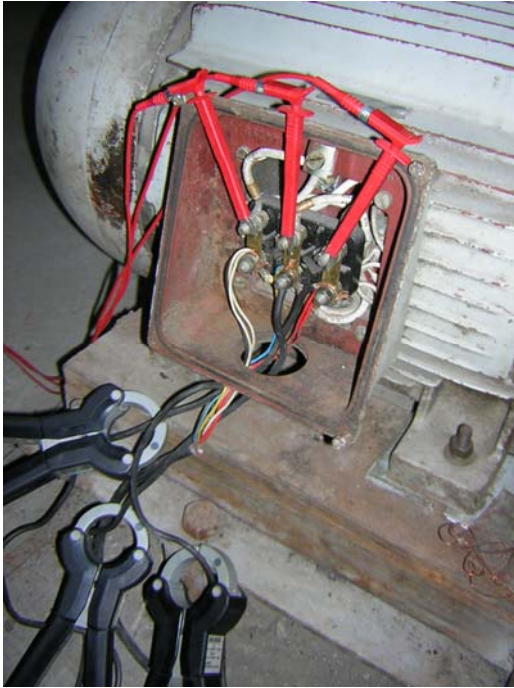
Parámetros obtenidos a partir de los ensayos de rotor libre y rotor trancado a frecuencia industrial

r_s	r_m	X_m	r_r	X_s+X_r
0,1365*	3,844	35,606	0,387	1,274

*resistencia del estator corregida a 75°C

ANEXO H

VISTAS DE LA INSTALACIÓN UTILIZADA.



(a)



(b)



(c)



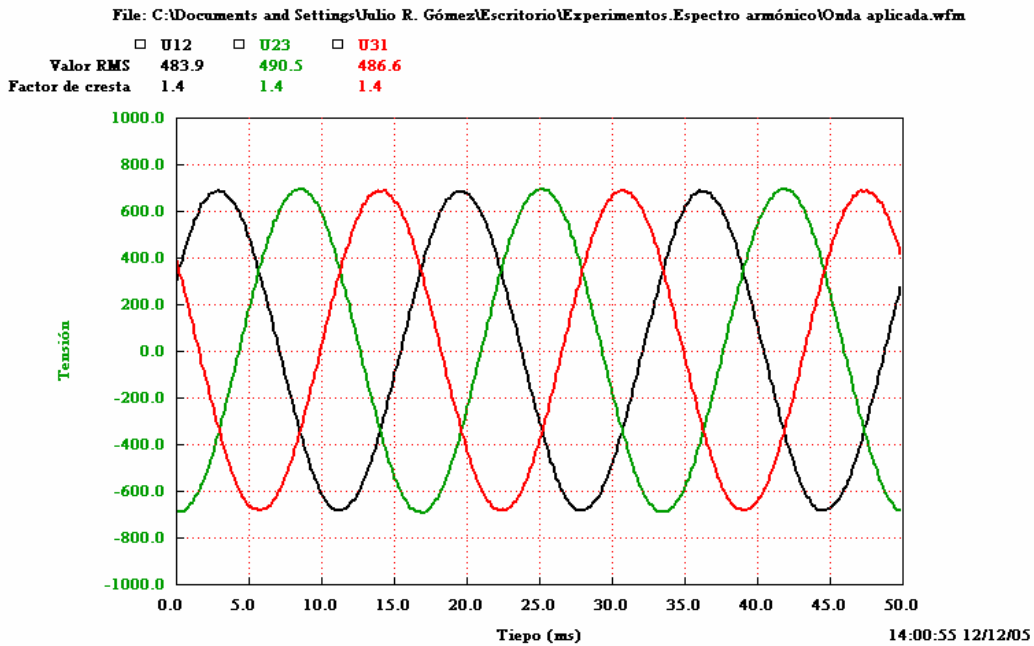
(d)

Figura H.1 Diferentes vistas de la instalación utilizada para la validación experimental del método en condiciones industriales.

ANEXO I.

MEDICIONES Y RESULTADOS.

Forma de onda y espectro armónico de las tensiones aplicadas en el experimento.



a: C:\Documents and Settings\Julio R. Gómez\Escritorio\Experimentos.Espectro armónico\Onda aplicada.

RMS Voltage = 483.9

Voltage THD = 0.81%

Fundamental = 61.0 Hz

U12	RMS Voltage	Phase
Hrm	Mag	Phase
1	483.881	0.0
3	1.597	49.4
5	2.055	151.1
7	0.966	0.0
9	0.224	0.0
11	0.280	0.0
13	0.253	0.0
15	0.026	0.0
17	0.734	0.0
19	0.626	0.0
21	0.041	0.0
23	0.083	0.0
25	0.342	0.0
27	0.144	0.0
29	0.344	0.0
31	0.103	0.0
33	0.134	0.0
35	0.442	0.0
37	0.125	0.0
39	0.247	0.0
41	0.069	0.0
43	0.307	0.0
45	0.241	0.0
47	0.126	0.0
49	0.181	0.0

U12	RMS Voltage	Phase
Hrm	Mag	Phase
2	0.574	0.0
4	0.495	0.0
6	0.211	0.0
8	1.421	58.1
10	1.493	-108.1
12	0.210	0.0
14	0.311	0.0
16	0.101	0.0
18	0.227	0.0
20	0.067	0.0
22	0.120	0.0
24	0.129	0.0
26	0.359	0.0
28	0.506	0.0
30	0.183	0.0
32	0.113	0.0
34	0.209	0.0
36	0.102	0.0
38	0.091	0.0
40	0.213	0.0
42	0.121	0.0
44	0.204	0.0
46	0.207	0.0
48	0.212	0.0
50	0.090	0.0

e: C:\Documents and Settings\Julio R. Gómez\Escritorio\Experimentos.Espectro armónico\Onda aplicada.

RMS Voltage = 490.5

Voltage THD = 0.61%

Fundamental = 61.0 Hz

U23 RMS Voltage		
Hrm	Mag	Phase
1	490.361	0.0
3	0.879	0.0
5	1.455	157.2
7	0.121	0.0
9	0.116	0.0
11	0.291	0.0
13	0.538	0.0
15	0.128	0.0
17	0.599	0.0
19	0.693	0.0
21	0.030	0.0
23	0.047	0.0
25	0.231	0.0
27	0.169	0.0
29	0.292	0.0
31	0.299	0.0
33	0.099	0.0
35	0.330	0.0
37	0.452	0.0
39	0.087	0.0
41	0.003	0.0
43	0.227	0.0
45	0.027	0.0
47	0.049	0.0
49	0.139	0.0

U23 RMS Voltage		
Hrm	Mag	Phase
2	0.242	0.0
4	0.486	0.0
6	0.268	0.0
8	1.160	68.1
10	1.164	-135.8
12	0.114	0.0
14	0.188	0.0
16	0.085	0.0
18	0.214	0.0
20	0.099	0.0
22	0.155	0.0
24	0.129	0.0
26	0.081	0.0
28	0.553	0.0
30	0.123	0.0
32	0.099	0.0
34	0.181	0.0
36	0.317	0.0
38	0.205	0.0
40	0.317	0.0
42	0.102	0.0
44	0.460	0.0
46	0.249	0.0
48	0.170	0.0
50	0.123	0.0

e: C:\Documents and Settings\Julio R. Gómez\Escritorio\Experimentos.Espectro armónico\Onda aplicada.

RMS Voltage = 486.6

Voltage THD = 0.67%

Fundamental = 61.0 Hz

U31 RMS Voltage		
Hrm	Mag	Phase
1	486.517	0.0
3	1.032	-158.9
5	1.689	139.0
7	0.902	0.0
9	0.297	0.0
11	0.339	0.0
13	0.479	0.0
15	0.103	0.0
17	0.636	0.0
19	0.512	0.0
21	0.020	0.0
23	0.129	0.0
25	0.251	0.0
27	0.159	0.0
29	0.166	0.0
31	0.206	0.0
33	0.098	0.0
35	0.410	0.0
37	0.400	0.0
39	0.280	0.0
41	0.068	0.0
43	0.155	0.0
45	0.268	0.0
47	0.140	0.0
49	0.066	0.0

U31 RMS Voltage		
Hrm	Mag	Phase
2	0.470	0.0
4	0.656	0.0
6	0.469	0.0
8	1.129	56.3
10	0.787	0.0
12	0.097	0.0
14	0.269	0.0
16	0.173	0.0
18	0.435	0.0
20	0.140	0.0
22	0.036	0.0
24	0.030	0.0
26	0.281	0.0
28	0.570	0.0
30	0.199	0.0
32	0.212	0.0
34	0.360	0.0
36	0.397	0.0
38	0.154	0.0
40	0.141	0.0
42	0.113	0.0
44	0.327	0.0
46	0.307	0.0
48	0.087	0.0
50	0.061	0.0

Tabla I.1 Mediciones experimentales Motor 1 (todas las tensiones en V, corrientes en A, velocidad en rpm, frecuencia en Hz y potencia en W).

Est.	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	rpm	frecuencia	Pt
1	461,30	443,10	453,00	40,94	29,95	28,25	1184	60,2	21640,80
2	467,40	455,20	464,70	27,60	20,12	19,70	1193	60,4	13226,40
3	464,30	449,50	458,30	33,18	24,22	23,26	1187	60,2	16942,40
4	457,40	438,00	443,80	48,82	35,60	33,60	1179	60,1	26035,20
5	468,00	459,50	471,30	24,24	17,38	17,56	1189	60,1	10542,40
6	464,00	448,40	457,70	37,35	27,31	26,18	1186	60,2	19724,00
7	463,40	444,50	449,40	45,26	33,04	31,35	1183	60,3	24347,20
8	456,90	440,90	442,10	37,34	26,80	25,64	1189	60,3	18820,00
9	478,80	464,30	473,80	34,60	24,78	23,80	1192	60,3	17322,40
10	480,50	467,90	479,40	30,96	22,26	21,54	1192	60,3	14833,60
11	482,00	470,00	479,60	28,88	20,56	20,26	1192	60,3	13238,40
12	486,00	476,60	486,00	27,07	19,19	19,14	1201	60,7	11786,40
13	486,70	478,90	492,80	24,57	17,38	17,57	1201	60,6	9490,40
14	483,70	475,50	492,40	22,58	15,91	16,28	1191	60,1	7324,00
15	421,60	404,70	407,10	44,21	31,59	29,94	1180	60,1	21504,80
16	424,30	408,70	413,50	39,05	27,90	26,70	1183	60,2	18988,80
17	425,90	413,00	415,40	35,58	25,50	24,54	1183	60,1	17191,20
18	426,70	415,70	423,10	30,78	22,06	21,47	1187	60,2	14564,80
19	429,00	418,30	425,80	28,05	20,02	19,69	1187	60,2	12973,60
20	431,90	422,80	429,20	25,49	18,08	17,99	1188	60,1	11360,00
21	444,20	420,60	422,00	44,51	31,11	26,95	1186	60,3	21267,20
22	445,20	423,40	429,70	40,10	28,04	24,52	1185	60,3	19072,00
23	448,20	429,20	433,80	37,03	25,91	22,82	1193	60,6	17551,20
24	451,20	433,90	439,00	31,88	22,26	19,90	1187	60,2	14596,80
25	451,10	435,30	447,10	29,43	20,50	18,48	1189	60,2	13125,60
26	453,20	438,60	449,00	26,71	18,50	16,92	1194	60,3	11401,60
27	456,00	443,40	454,20	23,58	16,26	15,10	1196	60,4	9164,00
28	396,30	374,50	374,00	42,82	30,10	25,41	1177	60,1	18440,80
29	398,80	379,10	379,40	39,18	27,60	23,18	1180	60,2	16888,00
30	402,90	384,60	386,90	33,38	23,83	20,06	1189	60,3	14414,40
31	404,10	388,80	392,20	29,97	21,07	18,10	1183	60,0	12624,00
32	406,10	393,20	396,20	25,50	17,78	15,60	1186	60,1	10288,00
33	407,20	395,00	398,90	23,02	15,99	14,06	1189	60,2	8858,40
34	465,60	433,10	432,00	43,96	31,28	20,34	1191	60,5	19200,80
35	471,20	442,20	445,10	35,93	25,24	17,16	1206	61,0	15107,20
36	472,40	444,90	455,10	29,03	20,11	14,23	1196	60,3	10648,00

37	472,30	447,50	458,50	27,17	18,61	13,39	1189	60,1	9152,00
38	492,60	456,80	460,80	47,93	34,04	21,98	1186	60,2	21844,80
39	496,30	462,30	465,10	43,23	30,56	20,03	1188	60,2	19244,80
40	498,80	467,50	473,70	40,44	28,51	19,06	1199	60,7	17783,20
41	500,50	469,20	478,30	36,34	25,48	17,26	1190	60,2	14942,40
42	499,40	470,40	479,50	33,84	23,58	16,38	1196	60,5	13394,40
43	502,20	472,50	484,60	30,88	21,29	15,09	1194	60,3	10959,20
44	503,80	475,30	487,50	29,23	19,97	14,43	1197	60,4	9499,50
45	505,20	478,50	491,20	27,45	18,61	13,62	1199	60,5	7510,40
46	409,10	374,70	368,40	47,73	34,28	21,62	1181	60,3	19096,80
47	411,50	379,40	372,70	43,29	30,91	19,86	1185	60,3	17304,80
48	415,50	386,40	382,80	36,85	26,22	17,10	1187	60,3	14603,20
49	417,80	391,30	391,90	32,64	22,94	15,94	1191	60,4	12869,60
50	419,40	395,70	401,60	27,68	19,22	13,89	1194	60,5	10460,80
51	423,20	398,80	404,00	25,05	17,17	12,58	1191	60,3	8927,20
52	392,80	387,20	435,60	38,45	21,29	51,68	1184	60,2	21701,60
53	399,20	396,30	440,30	33,81	18,86	45,53	1187	60,4	19109,60
54	408,80	409,80	443,60	26,62	15,06	35,85	1190	60,3	14593,60
55	435,10	434,90	485,20	35,41	19,68	47,63	1186	60,2	21372,00
56	400,40	395,60	440,10	36,99	21,49	49,83	1180	60,2	21295,20
57	375,30	368,80	415,20	38,92	22,50	52,25	1180	60,1	21304,80
58	421,10	417,00	460,80	36,35	21,09	48,93	1186	60,5	21684,80
59	423,50	421,70	467,50	32,39	18,98	43,70	1187	60,2	19137,60
60	460,90	462,70	505,30	32,11	18,65	43,28	1187	60,2	19261,60
61	413,60	411,50	451,50	32,93	19,38	44,43	1192	60,6	19246,40
62	415,90	413,80	455,20	29,92	17,66	40,38	1187	60,3	17243,20
63	385,20	380,60	418,70	31,22	18,42	42,15	1186	60,3	17181,60
64	452,60	453,70	489,60	29,61	17,38	39,95	1189	60,3	17471,20
65	455,70	459,70	493,40	26,30	15,68	35,54	1191	60,2	14764,80
66	432,60	434,50	469,50	25,95	15,50	35,04	1189	60,2	14616,00
67	412,10	411,70	445,30	26,18	15,65	35,34	1188	60,3	14585,60
68	454,60	460,30	485,60	24,20	14,58	32,94	1194	60,5	13208,00
69	457,20	462,10	486,40	29,98	24,80	39,42	1187	60,3	20465,60
70	459,50	465,30	487,00	27,98	23,18	36,72	1189	60,3	18740,80
71	462,80	469,00	485,00	26,13	21,69	34,34	1190	60,3	17071,20
72	462,10	469,80	491,20	23,46	19,55	30,83	1189	60,2	14497,60
73	464,40	471,90	493,40	21,94	18,34	28,77	1192	60,2	12959,20
74	425,50	429,30	447,90	30,33	25,35	39,77	1186	60,3	20147,20
75	429,50	434,00	453,20	25,97	21,61	34,01	1186	60,3	16760,00

76	392,20	395,00	417,70	31,79	26,47	41,64	1183	60,3	20031,20
77	398,60	402,30	419,30	26,98	22,50	35,28	1188	60,5	16804,80
78	469,70	479,60	483,20	31,37	30,87	32,97	1184	60,0	21408,00
79	515,30	506,70	520,00	30,62	22,41	21,86	1190	60,1	13420,80
80	520,90	513,30	523,50	28,27	20,58	20,54	1203	60,7	11244,00
81	517,10	509,20	522,80	27,10	19,76	19,62	1192	60,2	9679,20
82	518,10	511,20	528,30	25,99	18,81	19,08	1193	60,2	7740,80
83	472,80	460,40	466,00	38,46	28,44	26,62	1184	60,2	20437,60
84	477,70	466,10	473,00	33,59	24,83	23,58	1191	60,3	17386,40
85	477,50	468,90	477,80	29,93	22,03	21,25	1185	60,0	14676,80
86	478,30	470,30	481,00	27,70	20,46	19,85	1190	60,2	13097,60
87	479,30	471,80	486,40	24,88	18,35	18,03	1192	60,2	10780,00
88	480,00	475,20	484,80	23,26	17,18	17,08	1191	60,1	9288,80
89	436,00	422,80	423,90	39,95	29,42	27,70	1182	60,2	20361,60
90	438,60	425,70	428,20	36,81	27,25	25,68	1183	60,2	18730,40
91	442,70	434,40	440,00	29,74	22,01	21,20	1196	60,6	14737,60
92	444,20	435,50	443,10	27,24	20,01	19,34	1193	60,4	13020,80
93	446,70	440,00	446,80	23,80	17,45	17,13	1196	60,7	10745,60
94	447,00	440,90	449,70	21,66	15,96	15,70	1198	60,5	9128,80
95	396,90	382,60	388,30	36,17	26,66	25,01	1184	60,2	16944,80
96	400,40	390,30	395,10	28,00	20,70	19,74	1190	60,4	12837,60
97	402,30	395,00	399,90	23,55	17,38	16,77	1190	60,2	10310,40
98	402,50	396,00	402,70	21,18	15,67	15,32	1195	60,4	8962,40

Tabla I.2 Resultados obtenidos Motor 1.

Est.	Valores experimentales			Resultados del AG			Error (%)		
	Psalida(W)	Pérdidas(W)	Eficiencia(%)	Psalida(W)	Pérdidas(W)	Eficiencia(%)	Psalida	Pérdidas	Eficiencia
1	18939,04	2701,76	87,52	19123,91	2516,89	88,37	0,98	-6,84	0,98
2	11188,31	2038,09	84,59	11305,12	1921,28	85,47	1,04	-5,73	1,04
3	14614,51	2327,89	86,26	14838,13	2104,27	87,58	1,53	-9,61	1,53
4	22765,91	3269,29	87,44	23189,19	2846,02	89,07	1,86	-12,95	1,86
5	8788,57	1753,83	83,36	8757,89	1784,51	83,07	-0,35	1,75	-0,35
6	17051,40	2672,60	86,45	17396,85	2327,15	88,20	2,03	-12,93	2,02
7	21251,99	3095,21	87,29	21642,68	2704,56	88,89	1,84	-12,62	1,84
8	16407,42	2412,58	87,18	16709,45	2110,54	88,79	1,84	-12,52	1,85
9	15249,32	2073,08	88,03	15195,40	2127,00	87,72	-0,35	2,60	-0,35
10	12624,37	2209,23	85,11	12794,85	2038,75	86,26	1,35	-7,72	1,36
11	11090,13	2148,27	83,77	11308,23	1930,18	85,42	1,97	-10,15	1,97
12	9873,84	1912,56	83,77	9898,14	1888,26	83,98	0,25	-1,27	0,25
13	7649,24	1841,16	80,60	7650,26	1840,14	80,61	0,01	-0,06	0,01
14	5653,86	1670,14	77,20	5547,02	1776,98	75,74	-1,89	6,40	-1,89
15	18825,69	2679,11	87,54	19154,43	2350,38	89,07	1,75	-12,27	1,75
16	16516,70	2472,10	86,98	16821,43	2167,38	88,59	1,85	-12,33	1,85
17	14985,51	2205,69	87,17	15217,42	1973,78	88,52	1,55	-10,51	1,55
18	12615,67	1949,13	86,62	12724,94	1839,95	87,37	0,87	-5,60	0,87
19	11195,21	1778,39	86,29	11215,37	1758,04	86,45	0,18	-1,14	0,18
20	9655,27	1704,73	84,99	9728,42	1631,58	85,64	0,76	-4,29	0,76
21	18534,80	2732,40	87,15	18907,09	2360,14	88,90	2,01	-13,62	2,01
22	16520,19	2551,81	86,62	16787,86	2283,93	88,02	1,62	-10,50	1,62
23	15365,80	2185,40	87,55	15441,66	2110,88	87,97	0,49	-3,41	0,48
24	12615,67	1981,13	86,43	12698,92	1897,44	87,00	0,66	-4,22	0,66
25	11296,13	1829,47	86,06	11232,22	1893,38	85,57	-0,57	3,49	-0,57
26	9665,63	1735,97	84,77	9672,24	1729,36	84,83	0,07	-0,38	0,07
27	7562,41	1601,59	82,52	7516,19	1647,81	82,02	-0,61	2,89	-0,61
28	16247,35	2193,45	88,11	16238,88	2201,92	88,06	-0,05	0,39	-0,05
29	14734,40	2153,60	87,25	14829,73	2058,27	87,81	0,65	-4,43	0,64
30	12619,14	1795,26	87,55	12663,22	1751,23	87,85	0,35	-2,45	0,35
31	11074,59	1549,41	87,73	10976,91	1647,05	86,95	-0,88	6,30	-0,89
32	8884,34	1403,66	86,36	8780,93	1507,06	85,35	-1,16	7,37	-1,17

33	7550,39	1308,01	85,23	7421,06	1437,33	83,77	-1,71	9,89	-1,72
34	16530,74	2670,06	86,09	16825,61	2375,19	87,63	1,78	-11,04	1,78
35	12875,44	2231,76	85,23	13106,36	2001,68	86,75	1,79	-10,31	1,79
36	8901,56	1746,44	83,60	8890,90	1757,10	83,50	-0,12	0,61	-0,12
37	7458,57	1693,43	81,50	7420,71	1731,29	81,08	-0,51	2,24	-0,51
38	18965,17	2879,63	86,82	19170,65	2674,15	87,76	1,08	-7,14	1,09
39	16525,45	2719,35	85,87	16842,63	2402,72	87,52	1,92	-11,64	1,92
40	15261,69	2521,51	85,82	15467,88	2315,38	86,98	1,35	-8,17	1,35
41	12620,88	2321,52	84,46	12788,45	2153,15	85,59	1,33	-7,25	1,33
42	11308,30	2086,10	84,43	11338,07	2056,59	84,65	0,26	-1,41	0,27
43	9085,44	1873,76	82,90	9031,21	1927,87	82,41	-0,60	2,89	-0,59
44	7642,31	1857,19	80,45	7643,74	1855,78	80,46	0,02	-0,08	0,01
45	5733,53	1776,87	76,34	5725,94	1784,46	76,24	-0,13	0,43	-0,13
46	16513,21	2583,59	86,47	16654,35	2442,48	87,21	0,85	-5,46	0,85
47	14988,99	2315,81	86,62	15156,69	2148,11	87,59	1,12	-7,24	1,12
48	12615,67	1987,53	86,39	12702,29	1900,91	86,98	0,69	-4,36	0,68
49	11299,59	1570,01	87,80	11120,87	1748,72	86,41	-1,58	11,38	-1,58
50	8898,10	1562,70	85,06	8840,23	1620,57	84,51	-0,65	3,70	-0,65
51	7462,00	1465,20	83,59	7404,58	1522,59	82,94	-0,77	3,92	-0,77
52	18832,71	2868,89	86,78	18910,41	2791,19	87,14	0,41	-2,71	0,41
53	16663,98	2445,62	87,20	16488,81	2620,79	86,29	-1,05	7,16	-1,05
54	12620,88	1972,72	86,48	12520,69	2072,91	85,80	-0,79	5,08	-0,79
55	18407,90	2964,10	86,13	18470,22	2901,78	86,42	0,34	-2,10	0,34
56	18397,36	2897,64	86,39	18518,00	2777,20	86,96	0,66	-4,16	0,66
57	18375,04	2929,76	86,25	18595,80	2709,00	87,28	1,20	-7,54	1,20
58	18534,80	3114,00	85,62	18874,09	2810,85	87,04	1,83	-9,73	1,66
59	16643,50	2494,10	86,97	16646,38	2491,22	86,98	0,02	-0,12	0,01
60	16643,50	2618,10	86,41	16659,18	2602,42	86,49	0,09	-0,60	0,10
61	16914,41	2331,99	87,88	16712,45	2533,95	86,83	-1,19	8,66	-1,20
62	15106,18	2137,02	87,61	14912,71	2330,49	86,48	-1,28	9,05	-1,29
63	15104,44	2077,16	87,91	14997,58	2184,02	87,29	-0,71	5,14	-0,71
64	15109,68	2361,52	86,48	15133,09	2337,81	86,62	0,15	-1,00	0,16
65	12726,18	2038,62	86,19	12668,26	2096,54	85,80	-0,46	2,84	-0,46
66	12619,14	1996,86	86,34	12537,64	2078,36	85,78	-0,65	4,08	-0,65
67	12617,40	1968,20	86,51	12573,91	2012,31	86,20	-0,34	2,24	-0,35
68	11304,81	1903,19	85,59	11163,60	2044,22	84,52	-1,25	7,41	-1,25
69	17861,07	2604,53	87,27	17962,69	2502,91	87,77	0,57	-3,90	0,57
70	16527,21	2213,59	88,19	16443,40	2297,40	87,74	-0,51	3,79	-0,51
71	14997,73	2073,47	87,85	14909,39	2161,81	87,34	-0,59	4,26	-0,59

72	12619,14	1878,46	87,04	12417,93	2079,67	85,66	-1,59	10,71	-1,59
73	11186,57	1772,63	86,32	11049,05	1910,15	85,26	-1,23	7,76	-1,23
74	17859,31	2287,89	88,64	17782,75	2364,45	88,26	-0,43	3,35	-0,43
75	14857,52	1902,48	88,65	14621,10	2138,90	87,24	-1,59	12,43	-1,59
76	17854,03	2177,17	89,13	17596,44	2434,76	87,85	-1,44	11,83	-1,44
77	14748,32	2056,48	87,76	14698,70	2106,10	87,47	-0,34	2,41	-0,33
78	18811,12	2596,88	87,87	18976,41	2431,59	88,64	0,88	-6,36	0,88
79	11086,66	2334,14	82,61	11222,45	2198,35	83,62	1,22	-5,82	1,23
80	9101,10	2142,90	80,94	9220,09	2023,91	82,00	1,31	-5,55	1,31
81	7555,53	2123,67	78,06	7631,79	2047,41	78,85	1,01	-3,59	1,01
82	5657,27	2083,53	73,08	5721,73	2019,07	73,92	1,14	-3,09	1,14
83	17730,92	2706,68	86,76	18060,06	2377,54	88,37	1,86	-12,16	1,86
84	14999,48	2386,92	86,27	15282,26	2104,14	87,90	1,89	-11,85	1,89
85	12612,21	2064,59	85,93	12666,73	2010,07	86,30	0,43	-2,64	0,43
86	11086,66	2010,94	84,65	11118,47	1979,13	84,89	0,29	-1,58	0,29
87	8894,65	1885,35	82,51	8910,14	1869,86	82,65	0,17	-0,82	0,17
88	7631,99	1656,81	82,16	7506,49	1782,31	80,81	-1,64	7,57	-1,65
89	17727,41	2634,19	87,06	18080,01	2281,59	88,79	1,99	-13,39	1,98
90	16257,78	2472,62	86,80	16567,54	2162,86	88,45	1,91	-12,53	1,90
91	12631,37	2106,23	85,71	12873,72	1863,91	87,35	1,92	-11,50	1,92
92	11091,87	1928,93	85,19	11230,89	1789,91	86,25	1,25	-7,21	1,25
93	9002,61	1742,99	83,78	9019,39	1726,21	83,94	0,19	-0,96	0,19
94	7565,87	1562,93	82,88	7517,60	1611,20	82,35	-0,64	3,09	-0,64
95	14741,34	2203,46	87,00	14977,25	1967,55	88,39	1,60	-10,71	1,60
96	11086,66	1750,94	86,36	11175,87	1661,73	87,06	0,80	-5,10	0,81
97	8891,20	1419,20	86,24	8827,66	1482,74	85,62	-0,71	4,48	-0,71
98	7560,69	1401,71	84,36	7498,54	1463,86	83,67	-0,82	4,43	-0,82

Tabla I.3 Información adicional del AG para Motor 1.

Est.	Deslizamiento	Factor de carga Kc (%)	Parámetros obtenidos con el AG (Ω)									Coef. Desb.	
			r_s	X_s	r_m	X_m	r_{r1}	X_{r1}	r_{r2}	X_{r2}	r_{ad}	Modulo	Angulo
1	0,017	86,09	0,398	0,636	5,198	47,686	0,477	1,099	0,790	1,084	0,507	2,32	27,42
2	0,013	50,86	0,446	0,541	6,617	54,453	0,651	1,642	0,674	1,295	0,691	1,60	12,30
3	0,014	66,43	0,378	0,166	6,036	52,248	0,555	1,777	0,610	1,690	0,589	1,88	24,02
4	0,019	103,48	0,371	2,021	34,507	114,012	0,380	5,702	0,380	0,029	0,404	2,59	43,35
5	0,011	39,95	0,387	0,704	6,920	55,891	0,747	2,247	1,909	0,622	0,793	1,50	-15,88
6	0,015	77,51	0,409	0,646	5,924	51,081	0,485	1,608	0,690	0,996	0,515	1,98	23,93
7	0,019	96,60	0,371	1,530	7,597	56,420	0,462	1,530	0,462	0,990	0,491	2,52	45,78
8	0,014	74,58	0,371	2,914	12,336	69,672	0,418	3,223	0,418	0,904	0,444	2,32	56,21
9	0,012	69,32	0,386	1,074	5,854	50,912	0,459	2,643	0,531	0,538	0,488	1,80	20,06
10	0,012	57,38	0,381	0,271	5,323	49,630	0,577	1,375	1,168	1,216	0,613	1,69	4,58
11	0,012	50,41	0,371	0,513	5,893	52,052	0,652	2,106	0,652	1,381	0,692	1,53	11,01
12	0,011	44,88	0,372	0,064	13,518	79,075	0,580	26,926	0,583	1,379	0,616	1,29	0,00
13	0,009	34,77	0,374	0,631	5,792	51,791	0,787	1,076	2,425	0,659	0,836	1,65	-26,19
14	0,009	25,70	0,391	0,602	5,918	52,483	1,085	2,851	3,324	1,231	1,152	2,02	-31,27
15	0,018	85,57	0,371	2,631	34,150	109,617	0,388	39,570	0,388	0,087	0,412	2,58	52,60
16	0,017	75,08	0,371	1,303	8,266	57,580	0,469	1,303	0,469	1,040	0,498	2,23	42,77
17	0,016	68,12	0,371	2,091	12,765	70,685	0,469	2,091	0,469	1,025	0,498	1,90	50,06
18	0,014	57,34	0,371	1,389	9,995	63,634	0,519	4,524	0,519	0,036	0,551	1,53	18,90
19	0,014	50,89	0,371	1,638	9,165	61,007	0,600	3,013	0,600	0,008	0,637	1,49	17,10
20	0,012	43,89	0,371	1,443	33,444	114,012	0,486	19,925	0,486	0,231	0,516	1,26	16,93
21	0,017	84,25	0,371	2,072	18,976	85,444	0,397	4,536	0,397	0,792	0,422	3,60	57,05
22	0,017	75,09	0,371	1,983	14,736	76,245	0,479	5,297	0,480	0,248	0,509	3,01	44,02
23	0,016	69,84	0,371	0,645	25,882	102,841	0,475	10,280	0,476	1,850	0,504	2,63	46,82
24	0,014	57,34	0,371	2,233	15,348	78,558	0,542	7,746	0,542	0,571	0,576	2,34	43,58
25	0,012	51,35	0,425	0,431	7,164	56,068	0,607	2,809	1,007	1,175	0,645	2,13	14,30
26	0,010	43,93	0,382	1,234	7,546	56,845	0,562	2,040	0,804	0,539	0,597	1,94	16,43
27	0,010	34,37	0,371	1,811	7,814	57,537	0,725	1,811	0,725	0,000	0,770	1,74	7,69
28	0,021	73,85	0,371	1,661	11,088	63,795	0,473	1,661	0,473	1,278	0,502	3,89	61,09
29	0,020	66,97	0,371	2,445	16,071	75,772	0,497	2,445	0,497	0,376	0,528	3,41	59,26
30	0,014	57,36	0,371	2,323	12,089	66,610	0,437	2,445	0,437	0,281	0,464	2,96	53,52
31	0,014	50,34	0,371	2,450	13,053	69,681	0,518	3,104	0,518	0,056	0,550	2,36	47,98
32	0,013	40,38	0,371	2,046	23,746	94,003	0,601	11,590	0,601	0,981	0,638	1,96	47,34

33	0,012	34,32	0,371	3,101	13,145	69,990	0,695	3,103	0,695	0,000	0,738	1,80	41,97
34	0,016	75,14	0,371	1,861	7,352	54,739	0,470	2,070	0,470	0,975	0,499	5,04	61,59
35	0,011	58,52	0,371	2,582	12,480	70,544	0,443	7,867	0,443	0,324	0,471	4,12	54,95
36	0,008	40,46	0,372	2,481	14,681	77,235	0,443	21,285	0,451	0,240	0,470	3,52	38,93
37	0,011	33,90	0,371	1,640	6,993	54,988	0,829	2,025	0,829	1,555	0,880	3,13	34,17
38	0,015	86,21	0,371	2,026	6,129	50,704	0,436	2,026	0,436	0,315	0,463	4,88	54,35
39	0,013	75,12	0,371	2,413	12,604	72,020	0,424	8,033	0,425	0,293	0,451	4,65	55,89
40	0,012	69,37	0,371	2,120	6,208	51,410	0,474	2,124	0,474	0,352	0,504	4,02	49,52
41	0,012	57,37	0,371	2,115	8,728	61,159	0,526	9,969	0,529	0,545	0,559	3,88	44,00
42	0,012	51,40	0,374	2,796	11,700	69,662	0,550	15,329	0,552	0,027	0,584	3,57	42,54
43	0,010	41,30	0,371	0,339	29,119	113,903	0,418	37,116	0,419	2,560	0,444	3,56	36,58
44	0,009	34,74	0,371	2,272	6,019	51,206	0,750	2,272	0,750	1,384	0,797	3,39	35,22
45	0,009	26,06	0,371	2,981	32,633	114,011	0,365	52,854	0,365	0,393	0,387	3,14	32,06
46	0,021	75,06	0,371	2,588	24,918	91,473	0,430	4,096	0,430	0,257	0,457	6,70	67,88
47	0,017	68,13	0,371	3,105	20,099	82,646	0,412	3,538	0,412	0,000	0,438	6,27	68,89
48	0,016	57,34	0,371	2,370	11,114	64,001	0,490	2,370	0,490	0,885	0,521	5,32	65,54
49	0,014	51,36	0,371	2,072	26,406	97,917	0,485	10,480	0,487	1,068	0,515	4,42	58,90
50	0,013	40,45	0,371	1,479	9,119	60,017	0,661	1,479	0,661	1,448	0,702	3,54	46,50
51	0,012	33,92	0,371	3,812	12,339	67,305	0,700	4,903	0,700	0,002	0,743	3,66	48,62
52	0,017	85,60	0,372	2,238	14,504	72,592	0,348	3,288	0,855	0,420	0,370	7,70	-54,26
53	0,017	75,75	0,471	1,348	7,514	54,161	0,458	1,833	0,668	1,488	0,486	7,03	-56,79
54	0,013	57,37	0,484	0,947	7,711	56,151	0,503	2,169	0,593	2,011	0,534	5,52	-64,39
55	0,015	83,67	0,393	2,886	9,679	61,410	0,397	2,919	1,272	0,240	0,422	7,57	-59,81
56	0,020	83,62	0,391	2,279	26,713	97,556	0,421	5,471	0,479	0,379	0,447	6,97	-54,64
57	0,018	83,52	0,371	1,726	9,967	59,992	0,362	2,486	0,654	0,894	0,384	7,66	-52,97
58	0,020	84,25	0,371	1,947	16,137	79,054	0,470	5,351	0,471	0,771	0,499	6,57	-55,37
59	0,014	75,65	0,379	1,796	7,058	53,417	0,416	1,810	1,021	1,479	0,442	6,98	-58,11
60	0,014	75,65	0,431	1,738	5,458	48,372	0,495	1,770	0,538	1,474	0,526	6,20	-61,96
61	0,017	76,88	0,460	2,536	11,676	66,288	0,434	3,570	0,441	0,217	0,461	6,21	-57,45
62	0,016	68,66	0,447	1,346	7,255	54,286	0,505	2,031	0,514	1,907	0,536	6,40	-57,54
63	0,017	68,66	0,371	2,356	23,981	91,733	0,411	5,777	0,411	0,367	0,437	6,18	-53,93
64	0,014	68,68	0,371	2,609	8,660	59,488	0,500	4,564	0,500	0,354	0,531	5,30	-61,44
65	0,011	57,85	0,374	1,273	6,007	51,350	0,506	2,106	0,542	2,057	0,538	5,16	-65,34
66	0,012	57,36	0,444	2,157	7,612	55,672	0,508	2,466	0,510	1,169	0,540	5,47	-62,52
67	0,015	57,35	0,374	1,510	19,252	86,994	0,516	10,368	0,516	1,594	0,548	5,34	-59,43
68	0,013	51,39	0,371	2,494	11,747	69,639	0,622	12,310	0,623	0,448	0,660	4,12	-69,66
69	0,016	81,19	0,427	2,313	9,138	61,297	0,472	4,690	0,662	0,948	0,502	3,89	-68,77
70	0,014	75,12	0,372	1,975	6,694	53,268	0,487	2,748	0,853	1,285	0,517	3,59	-71,25
71	0,013	68,17	0,371	0,864	5,922	51,488	0,538	2,735	0,545	1,890	0,571	2,82	-75,41

72	0,013	57,36	0,469	2,157	6,884	54,047	0,579	4,500	0,640	2,028	0,614	3,70	-74,43
73	0,010	50,85	0,403	1,707	6,200	52,013	0,546	3,009	0,573	2,979	0,580	3,67	-74,07
74	0,017	81,18	0,406	1,478	6,823	52,782	0,455	1,511	0,517	0,986	0,483	3,21	-68,91
75	0,017	67,53	0,392	1,058	7,235	55,280	0,580	0,650	2,403	2,052	0,616	3,34	-70,06
76	0,019	81,15	0,441	2,129	12,184	66,862	0,427	2,917	0,699	0,610	0,453	4,06	-65,58
77	0,018	67,04	0,405	0,919	7,787	55,765	0,540	2,115	0,562	1,652	0,574	3,16	-69,43
78	0,013	85,51	0,461	2,862	7,598	55,611	0,391	2,990	17,820	2,804	0,415	1,69	-104,91
79	0,010	50,39	0,480	0,357	4,299	45,565	0,660	2,223	1,595	0,686	0,700	1,51	-20,58
80	0,009	41,37	0,371	1,326	4,701	46,781	0,721	3,056	0,721	0,000	0,765	1,18	-14,31
81	0,010	34,34	0,471	1,309	4,506	45,832	0,943	2,270	1,310	0,103	1,002	1,53	-24,87
82	0,009	25,71	0,461	1,277	4,378	45,326	1,170	1,644	2,561	0,355	1,243	1,92	-36,62
83	0,017	80,60	0,371	1,765	7,591	56,945	0,517	1,986	0,517	0,000	0,549	1,54	33,41
84	0,012	68,18	0,371	0,404	5,782	51,395	0,505	1,213	0,505	1,213	0,536	1,43	23,94
85	0,013	57,33	0,377	0,502	5,521	50,368	0,618	0,581	0,694	0,493	0,657	1,23	-1,72
86	0,012	50,39	0,448	0,684	6,007	52,305	0,656	1,730	1,386	0,224	0,697	1,35	-14,17
87	0,010	40,43	0,378	0,745	6,240	53,464	0,714	2,180	3,558	0,119	0,758	1,76	-29,35
88	0,009	34,69	0,443	0,797	6,152	53,086	0,784	0,939	1,495	0,018	0,833	1,15	-30,17
89	0,018	80,58	0,371	2,992	24,595	95,763	0,453	3,216	0,453	0,000	0,481	1,99	55,76
90	0,017	73,90	0,371	1,738	10,532	65,366	0,507	1,738	0,507	1,007	0,539	1,84	49,61
91	0,013	57,42	0,371	0,802	32,043	113,632	0,464	14,658	0,464	0,458	0,492	1,11	18,73
92	0,012	50,42	0,377	1,038	7,365	56,067	0,587	1,086	0,597	0,107	0,623	1,24	6,73
93	0,015	40,92	0,371	0,000	12,993	75,702	0,868	14,192	0,868	1,360	0,922	1,01	-0,74
94	0,010	34,39	0,376	0,038	7,960	59,636	0,751	2,797	1,556	0,968	0,797	1,17	-17,56
95	0,017	67,01	0,371	1,431	8,192	55,690	0,438	1,431	0,438	0,303	0,465	2,14	36,96
96	0,015	50,39	0,371	1,126	9,403	60,653	0,562	1,126	0,562	0,782	0,596	1,48	31,85
97	0,012	40,41	0,371	0,002	33,512	113,997	0,497	19,406	0,497	1,455	0,528	1,08	18,94
98	0,011	34,37	0,481	0,709	9,024	60,191	0,640	0,873	0,691	0,406	0,680	1,10	-1,52

Tabla I.4 Mediciones experimentales Motor 2. (todas las tensiones en V, corrientes en A, velocidad en rpm, frecuencia en Hz y potencia en W).

Est.	Vab	Vbc	Vca	Ia	Ib	Ic	frecuencia	rpm	Pt
1	443,00	454,30	440,00	30,98	52,37	37,98	60,2	1785	23745,60
2	444,20	455,70	441,90	30,82	52,26	37,99	60,3	1789	23736,00
3	432,40	448,30	433,00	38,24	65,11	47,20	60,3	1785	31488,00
4	434,80	449,80	433,70	38,04	64,86	47,05	60,3	1784	31436,80
5	437,70	456,50	436,80	37,63	64,05	46,72	60,4	1784	31059,20
6	434,60	454,50	440,60	37,93	64,89	47,39	60,4	1788	31558,40
7	442,70	459,30	447,20	32,09	54,54	39,94	60,3	1789	25316,00
8	443,00	460,00	447,30	32,10	54,42	39,92	60,4	1791	25399,20
9	443,10	460,10	448,20	32,06	54,33	39,69	60,3	1789	25218,40
10	450,40	465,30	452,20	27,46	45,85	33,94	60,4	1794	19644,00
11	451,20	467,00	454,60	27,70	46,15	33,94	60,6	1800	19858,40
12	453,30	467,20	458,00	25,48	41,82	30,78	60,2	1788	16284,80
13	433,20	454,40	438,90	40,22	68,67	50,09	60,3	1785	33817,60
14	452,70	475,40	462,80	39,61	67,71	49,55	60,2	1782	34028,80
15	458,80	478,60	460,80	37,58	64,14	46,73	60,3	1784	31769,60
16	447,40	481,50	453,40	31,20	52,48	39,06	60,3	1789	23672,00
17	449,20	479,30	457,20	31,27	52,50	39,01	60,3	1789	23706,40
18	441,40	475,00	451,90	36,87	62,88	46,46	60,3	1788	30656,00
19	439,50	451,80	437,90	30,24	51,70	38,18	60,4	1792	23256,00
20	429,50	444,30	430,60	36,37	63,17	46,50	60,3	1784	29977,60
21	434,00	447,70	434,00	33,42	57,70	42,53	60,4	1790	26924,80
22	439,20	450,70	442,40	28,48	48,64	35,99	60,4	1795	21333,60
23	442,00	452,40	442,40	26,86	45,31	33,53	60,3	1793	19075,20
24	447,60	456,30	441,70	24,70	41,18	30,44	60,5	1796	15979,20
25	465,90	475,40	461,90	27,28	46,35	34,20	60,4	1795	18926,40
26	463,70	474,50	458,30	28,49	48,62	35,82	60,5	1794	20782,40
27	464,50	477,10	463,80	31,18	53,71	39,40	60,5	1795	24358,40
28	462,10	475,10	461,40	32,86	57,04	41,75	60,3	1790	26582,40
29	386,70	405,60	388,40	41,47	72,19	53,17	60,3	1782	32640,00
30	396,10	412,40	397,60	34,61	59,99	44,15	60,5	1789	26867,20
31	399,20	413,50	401,70	32,09	55,56	40,94	60,3	1788	24596,00
32	404,80	417,10	402,80	28,54	48,75	36,15	60,3	1790	21016,80
33	407,20	417,90	405,50	26,63	45,10	33,49	60,3	1790	18983,20
34	411,90	421,70	407,80	23,74	39,83	29,46	60,5	1795	15754,40
35	428,30	439,60	428,20	26,30	44,30	32,75	60,5	1796	18677,60
36	421,60	434,90	419,80	30,73	52,86	38,98	60,3	1789	23786,40
37	411,50	427,70	411,30	37,25	64,58	47,46	60,3	1784	30073,60
38	432,40	439,50	431,90	22,64	37,57	27,70	60,2	1792	13813,60
39	407,40	424,70	406,20	40,41	70,14	51,66	60,2	1779	32864,00
40	457,70	467,50	456,10	26,79	45,13	33,20	60,3	1794	18551,20
41	453,00	465,50	447,60	30,84	52,78	39,02	60,4	1791	24109,60

42	434,60	454,90	437,00	19,93	49,82	37,52	60,4	1796	17978,40
43	423,20	448,30	432,20	23,26	59,84	45,13	60,3	1789	23728,00
44	414,00	445,00	417,60	28,06	73,54	55,88	60,4	1787	30713,60
45	419,50	436,70	417,80	16,82	40,68	30,51	60,5	1798	12774,40
46	417,90	436,20	415,50	17,75	43,68	32,79	60,5	1797	14680,80
47	409,60	430,90	413,00	19,26	48,46	36,62	60,2	1786	17461,60
48	403,70	427,80	406,80	20,90	53,26	40,42	60,7	1800	20216,80
49	399,60	423,60	407,10	20,80	52,92	40,06	60,5	1796	19940,00
50	393,80	419,50	400,70	23,57	60,80	45,94	60,2	1785	23625,60
51	379,60	412,00	389,30	29,10	76,61	58,18	60,3	1781	30497,60
52	413,10	429,50	409,40	16,98	41,56	31,54	60,2	1789	13612,80
53	371,40	406,70	385,20	31,46	84,03	64,30	60,3	1779	33446,40
54	361,20	401,80	374,60	36,92	97,98	74,62	60,3	1775	38656,00
55	446,50	425,20	431,90	43,99	32,09	18,34	60,3	1793	14584,80
56	440,40	418,40	426,60	48,89	35,81	20,06	60,2	1789	17732,80
57	442,40	421,00	424,00	48,73	35,82	20,10	60,3	1793	17749,60
58	464,30	443,70	451,00	43,49	31,74	18,25	60,5	1799	13121,60
59	462,30	440,50	450,50	45,79	33,66	18,90	60,3	1793	14964,00
60	458,60	436,50	449,20	49,79	36,70	20,38	60,2	1790	17810,40
61	459,60	436,40	440,40	53,54	39,66	21,49	60,2	1789	20203,20
62	454,00	431,50	437,40	59,93	44,38	23,87	60,4	1794	24048,80
63	446,40	447,40	447,70	28,82	27,98	30,56	60,5	1797	13538,40
64	444,80	446,10	445,50	32,96	32,36	35,21	60,5	1796	18248,00
65	444,00	444,00	448,10	39,46	38,92	41,42	60,9	1805	24256,00
66	439,30	438,90	442,20	47,05	46,54	49,02	60,2	1784	30291,20
67	434,90	434,20	439,10	56,35	56,14	58,81	60,2	1779	37523,20
68	437,40	439,10	442,50	57,33	56,99	59,70	60,6	1790	38515,20

Tabla I.5 Resultados obtenidos Motor 2.

Est.	Valores experimentales			Resultados del AG			Error (%)		
	Psalida(W)	Pérdidas(W)	Eficiencia(%)	Psalida(W)	Pérdidas(W)	Eficiencia(%)	Psalida	Pérdidas	Eficiencia
1	21016,81	2728,79	88,51	21161,66	2583,94	89,12	0,69	-5,31	0,69
2	21031,09	2704,91	88,60	21176,13	2559,88	89,22	0,69	-5,36	0,70
3	28859,98	2628,02	91,65	28558,50	2929,69	90,70	-1,04	11,48	-1,04
4	28856,37	2580,43	91,79	28445,90	2990,90	90,49	-1,42	15,91	-1,42
5	27880,80	3178,40	89,77	27952,95	3106,26	90,00	0,26	-2,27	0,26
6	28384,80	3173,52	89,94	28644,40	2914,01	90,77	0,91	-8,18	0,92
7	22627,65	2688,35	89,38	22736,70	2579,31	89,81	0,48	-4,06	0,48
8	22636,60	2762,60	89,12	22786,20	2613,00	89,71	0,66	-5,42	0,66
9	22627,29	2591,11	89,73	22643,85	2574,55	89,79	0,07	-0,64	0,07
10	16929,68	2714,32	86,18	17251,75	2392,25	87,82	1,90	-11,87	1,90
11	16947,61	2910,79	85,34	17457,41	2400,99	87,90	3,01	-17,51	3,00
12	13760,89	2523,91	84,50	13990,70	2294,10	85,91	1,67	-9,11	1,67
13	30502,66	3314,97	90,20	30801,30	3016,30	91,08	0,98	-9,01	0,98
14	30491,86	3536,94	89,61	30944,19	3084,62	90,94	1,48	-12,79	1,48
15	28349,72	3419,88	89,24	28676,05	3093,65	90,26	1,15	-9,54	1,14
16	21031,45	2640,55	88,85	21059,24	2612,75	88,96	0,13	-1,05	0,12
17	21032,52	2673,88	88,72	21105,72	2600,75	89,03	0,35	-2,73	0,35
18	27653,92	3002,08	90,21	27800,20	2855,81	90,68	0,53	-4,87	0,52
19	20834,74	2421,26	89,59	20729,10	2526,90	89,13	-0,51	4,36	-0,51
20	27421,63	2555,97	91,47	27096,01	2881,59	90,39	-1,19	12,74	-1,18
21	24536,44	2388,36	91,13	24237,77	2687,26	90,02	-1,22	12,51	-1,22
22	18924,77	2408,83	88,71	18982,87	2350,80	88,98	0,31	-2,41	0,30
23	16741,58	2333,62	87,77	16789,37	2285,81	88,02	0,29	-2,05	0,28
24	13788,97	2190,23	86,29	13663,84	2315,32	85,51	-0,91	5,71	-0,90
25	16240,82	2685,58	85,81	16469,37	2457,03	87,02	1,41	-8,51	1,41
26	18184,20	2598,20	87,50	18172,77	2609,93	87,44	-0,06	0,45	-0,07
27	21641,58	2716,82	88,85	21681,64	2677,90	89,01	0,19	-1,43	0,18
28	23904,66	2677,74	89,93	23862,31	2720,09	89,77	-0,18	1,58	-0,18
29	29750,80	2889,20	91,15	29653,39	2986,61	90,85	-0,33	3,37	-0,33
30	24532,49	2334,71	91,31	24211,75	2655,45	90,12	-1,31	13,74	-1,30
31	22191,70	2404,30	90,22	22201,21	2394,79	90,26	0,04	-0,40	0,04

32	18886,70	2130,10	89,86	18728,37	2288,44	89,11	-0,84	7,43	-0,83
33	16895,00	2088,20	89,00	16777,02	2206,18	88,38	-0,70	5,65	-0,70
34	13621,90	2132,50	86,46	13605,35	2149,05	86,36	-0,12	0,78	-0,12
35	16386,47	2291,13	87,73	16403,41	2274,18	87,82	0,10	-0,74	0,10
36	21408,52	2377,88	90,00	21303,73	2482,67	89,56	-0,49	4,41	-0,49
37	27638,85	2434,75	91,90	27216,90	2856,70	90,50	-1,53	17,33	-1,52
38	11708,84	2104,76	84,76	11754,99	2058,58	85,10	0,39	-2,19	0,40
39	30224,93	2639,07	91,97	29789,14	3074,86	90,64	-1,44	16,51	-1,45
40	16235,81	2315,39	87,52	16203,01	2348,18	87,34	-0,20	1,42	-0,21
41	21627,21	2482,39	89,70	21406,82	2702,78	88,79	-1,02	8,88	-1,01
42	15394,13	2584,27	85,63	15615,80	2362,60	86,86	1,44	-8,58	1,44
43	20823,99	2904,01	87,76	21138,49	2589,51	89,09	1,51	-10,83	1,52
44	27159,07	3554,53	88,43	27471,84	3241,76	89,45	1,15	-8,80	1,15
45	10644,38	2130,02	83,33	10650,00	2124,40	83,37	0,05	-0,26	0,05
46	12448,80	2232,00	84,80	12458,40	2222,41	84,86	0,08	-0,43	0,07
47	15048,41	2413,19	86,18	15168,63	2292,97	86,87	0,80	-4,98	0,80
48	17655,46	2561,34	87,33	17779,75	2437,05	87,95	0,70	-4,85	0,71
49	17641,07	2298,93	88,47	17630,31	2309,79	88,42	-0,06	0,47	-0,06
50	20810,77	2814,83	88,09	21111,60	2514,00	89,36	1,45	-10,69	1,44
51	27141,52	3356,08	89,00	27383,05	3114,55	89,79	0,89	-7,20	0,89
52	11553,09	2059,71	84,87	11464,58	2148,22	84,22	-0,77	4,30	-0,77
53	30224,22	3222,18	90,37	30108,73	3337,67	90,02	-0,38	3,58	-0,39
54	34733,46	3922,54	89,85	34675,26	3980,83	89,70	-0,17	1,49	-0,17
55	12146,40	2438,40	83,28	12311,44	2273,36	84,41	1,36	-6,77	1,36
56	15215,64	2517,16	85,81	15270,62	2462,18	86,12	0,36	-2,18	0,36
57	15228,83	2520,77	85,80	15418,33	2331,56	86,86	1,24	-7,51	1,24
58	10646,16	2475,44	81,13	10804,96	2316,64	82,34	1,49	-6,42	1,49
59	12435,60	2528,40	83,10	12535,17	2428,83	83,77	0,80	-3,94	0,81
60	15219,56	2590,84	85,45	15160,62	2649,78	85,12	-0,39	2,27	-0,39
61	17446,85	2756,35	86,36	17650,19	2553,01	87,36	1,17	-7,38	1,16
62	21049,03	2999,77	87,53	21226,36	2822,44	88,26	0,84	-5,91	0,83
63	11173,88	2364,52	82,53	11350,47	2187,95	83,84	1,58	-7,47	1,58
64	15906,45	2341,55	87,17	15952,92	2295,11	87,42	0,29	-1,98	0,29
65	21465,50	2790,50	88,50	21661,91	2594,55	89,30	0,92	-7,02	0,90
66	27639,92	2651,28	91,25	27542,03	2749,51	90,92	-0,35	3,71	-0,36
67	34258,39	3264,81	91,30	34312,74	3211,38	91,44	0,16	-1,64	0,15
68	35064,98	3450,22	91,04	35184,84	3331,25	91,35	0,34	-3,45	0,34

Tabla I.6 Información adicional del AG para Motor 2.

Est.	Deslizamiento	Factor de carga Kc (%)	Parámetros obtenidos con el AG (Ω)									Coef. Desb.	
			r_s	X_s	r_m	X_m	r_{r1}	X_{r1}	r_{r2}	X_{r2}	r_{ad}	Modulo	Angulo
1	0,012	46,70	0,116	0,894	4,033	35,033	0,296	0,894	0,296	0,388	0,314	1,96	168,80
2	0,011	46,74	0,116	1,055	4,273	35,900	0,281	1,060	0,281	0,251	0,299	1,92	171,17
3	0,013	64,13	0,116	1,196	8,639	49,986	0,230	2,755	0,230	0,113	0,244	2,39	-178,13
4	0,014	64,13	0,116	1,035	4,733	37,451	0,249	1,035	0,249	0,154	0,264	2,38	176,56
5	0,015	61,96	0,116	1,009	4,270	35,729	0,287	1,009	0,287	0,488	0,305	2,92	177,73
6	0,013	63,08	0,116	1,089	6,134	42,714	0,242	1,107	0,242	0,838	0,257	2,67	-163,21
7	0,011	50,28	0,116	1,185	5,461	40,535	0,264	1,265	0,264	0,946	0,280	2,21	-165,03
8	0,012	50,30	0,116	1,153	5,378	40,265	0,277	1,164	0,277	1,005	0,294	2,28	-166,14
9	0,011	50,28	0,116	0,719	5,414	40,919	0,272	1,604	0,272	1,604	0,289	2,24	-163,25
10	0,010	37,62	0,116	1,355	4,674	37,544	0,320	1,356	0,320	1,066	0,340	2,07	-173,74
11	0,010	37,66	0,116	2,108	5,651	40,418	0,305	2,108	0,305	0,624	0,324	2,11	-168,38
12	0,010	30,58	0,116	1,818	4,992	38,533	0,394	1,818	0,394	1,687	0,418	1,78	-160,80
13	0,013	67,78	0,116	1,117	6,194	42,806	0,223	1,117	0,223	0,696	0,237	2,88	-165,23
14	0,013	67,76	0,116	1,609	8,313	49,810	0,239	1,609	0,239	0,803	0,254	2,84	-154,04
15	0,014	63,00	0,116	1,733	6,543	43,995	0,265	2,230	0,265	0,047	0,281	2,72	-174,84
16	0,011	46,74	0,116	1,884	4,652	36,816	0,283	2,179	0,283	2,167	0,301	4,61	-170,82
17	0,012	46,74	0,116	2,019	5,019	38,191	0,283	2,020	0,283	1,972	0,301	3,93	-165,52
18	0,012	61,45	0,116	1,605	5,768	41,147	0,224	1,605	0,224	1,570	0,238	4,38	-162,71
19	0,011	46,30	0,116	0,988	4,264	35,773	0,282	1,261	0,282	0,368	0,300	1,99	174,05
20	0,014	60,94	0,116	0,705	4,333	36,103	0,262	0,705	0,262	0,563	0,278	2,20	-176,24
21	0,012	54,53	0,116	1,099	6,714	44,367	0,252	3,053	0,253	0,186	0,268	2,09	180,00
22	0,009	42,06	0,116	1,657	6,521	43,474	0,256	2,404	0,256	0,087	0,272	1,55	-164,52
23	0,009	37,20	0,116	1,206	4,695	37,467	0,283	1,311	0,283	0,436	0,300	1,53	-178,08
24	0,010	30,64	0,116	0,925	3,944	34,682	0,420	2,036	0,420	0,627	0,446	1,89	156,57
25	0,009	36,09	0,116	0,751	3,378	32,765	0,344	0,787	0,344	0,687	0,365	1,72	163,42
26	0,012	40,41	0,116	1,342	4,096	35,284	0,360	3,243	0,360	0,064	0,382	2,05	161,14
27	0,011	48,09	0,117	1,145	6,219	43,723	0,287	5,370	0,288	0,343	0,305	1,85	177,36
28	0,011	53,12	0,116	1,313	9,586	53,598	0,233	6,605	0,233	0,000	0,248	1,92	177,44
29	0,015	66,11	0,116	1,039	10,959	53,606	0,202	2,383	0,202	0,133	0,215	3,09	-175,44
30	0,014	54,52	0,116	0,889	5,295	38,332	0,257	0,889	0,257	0,486	0,273	2,60	-175,32
31	0,011	49,31	0,116	1,046	6,029	40,889	0,226	1,046	0,226	0,374	0,240	2,19	-170,13
32	0,011	41,97	0,116	1,190	10,584	53,604	0,237	5,967	0,237	0,052	0,252	2,20	172,70

33	0,011	37,54	0,116	1,335	5,537	39,140	0,283	1,870	0,283	0,000	0,300	1,90	172,84
34	0,011	30,27	0,116	1,147	4,743	36,600	0,379	1,147	0,379	0,381	0,402	2,00	163,54
35	0,011	36,41	0,116	1,274	10,070	53,605	0,299	7,903	0,299	0,422	0,318	1,76	179,57
36	0,011	47,57	0,116	1,200	10,227	53,606	0,236	5,543	0,236	0,040	0,251	2,25	173,84
37	0,014	61,42	0,116	0,972	5,153	38,269	0,235	1,291	0,235	0,207	0,249	2,63	179,40
38	0,008	26,02	0,116	1,323	9,910	53,411	0,302	14,266	0,302	0,300	0,320	1,13	176,66
39	0,015	67,17	0,116	1,015	10,472	53,605	0,213	3,160	0,213	0,041	0,227	2,92	176,75
40	0,009	36,08	0,116	1,067	9,462	53,559	0,262	12,398	0,262	0,469	0,278	1,55	172,64
41	0,002	48,06	0,116	1,227	3,689	33,327	0,297	1,268	0,297	0,000	0,315	2,34	163,16
42	0,009	34,21	0,116	1,117	4,038	34,676	0,308	1,117	0,308	0,404	0,327	2,92	-173,92
43	0,011	46,28	0,116	0,880	4,403	36,209	0,268	0,913	0,268	0,632	0,285	3,39	-159,70
44	0,014	60,35	0,116	1,034	5,953	41,162	0,235	2,715	0,235	0,113	0,249	4,66	-174,11
45	0,009	23,65	0,116	1,072	10,116	53,606	0,350	18,236	0,350	0,616	0,371	2,86	175,43
46	0,010	27,66	0,116	1,513	10,453	53,606	0,322	13,779	0,322	0,001	0,342	3,11	174,05
47	0,011	33,44	0,116	1,571	5,071	37,548	0,334	1,659	0,334	0,000	0,354	3,19	-171,65
48	0,011	39,23	0,116	1,308	10,619	53,606	0,269	6,707	0,269	0,111	0,285	3,70	-173,39
49	0,010	39,20	0,116	1,561	10,770	53,598	0,247	5,625	0,247	0,002	0,262	3,48	-162,61
50	0,011	46,25	0,116	1,304	10,764	53,605	0,223	4,452	0,223	0,026	0,237	3,82	-165,35
51	0,015	60,31	0,116	1,201	11,095	53,606	0,218	2,744	0,218	0,023	0,232	4,92	-163,58
52	0,009	25,67	0,116	1,459	4,437	35,242	0,377	1,459	0,377	0,000	0,400	2,98	170,25
53	0,017	67,16	0,116	1,125	11,229	53,604	0,208	2,169	0,208	0,113	0,221	5,33	-157,88
54	0,019	77,19	0,116	1,050	6,303	39,957	0,198	1,195	0,198	0,096	0,211	6,37	-161,85
55	0,009	26,99	0,116	1,260	10,047	53,605	0,299	16,125	0,299	0,000	0,317	2,91	42,42
56	0,009	33,81	0,117	1,004	4,117	34,730	0,302	1,383	0,542	0,018	0,321	3,01	38,75
57	0,009	33,84	0,116	1,100	10,074	53,605	0,253	10,692	0,253	0,165	0,268	3,14	52,73
58	0,009	23,66	0,116	1,366	9,820	53,606	0,325	23,244	0,325	0,000	0,345	2,67	39,88
59	0,009	27,63	0,116	1,110	4,589	37,216	0,371	8,365	0,372	0,001	0,394	2,80	33,12
60	0,009	33,82	0,117	0,793	3,498	32,785	0,314	1,382	0,822	0,061	0,334	2,85	25,47
61	0,009	38,77	0,117	0,226	7,849	49,522	0,261	10,561	0,262	0,952	0,277	3,24	50,93
62	0,010	46,78	0,122	0,777	3,895	34,278	0,247	1,649	0,423	0,095	0,262	3,07	45,65
63	0,010	24,83	0,137	0,903	3,630	33,250	0,490	2,101			0,520	0,18	-107,25
64	0,010	35,35	0,116	0,927	3,651	33,240	0,348	1,438			0,370	0,17	-147,48
65	0,012	47,70	0,135	0,887	3,784	33,718	0,301	1,445			0,319	0,61	-60,00
66	0,012	61,42	0,119	0,871	3,848	33,927	0,227	1,470			0,241	0,47	-53,65
67	0,015	76,13	0,119	0,959	4,469	36,176	0,213	1,600			0,226	0,70	-52,45
68	0,015	77,92	0,120	0,364	3,184	31,291	0,231	1,186			0,245	0,68	-79,02

ANEXO J.

ESTIMADO DE LA INCERTIDUMBRE DE LAS MEDICIONES EXPERIMENTALES.

Para las mediciones realizadas en los experimentos, se utilizó la siguiente instrumentación:

- Tacómetro óptico Shock Pulse Tester T 2000, fabricado en Suecia por la marca SPM Instrument. Error en la medición: ± 1 rpm.
- Analizador de redes modelo PS 3000, fabricado por Summit Technology, Inc. USA. Clase de precisión en potencia: 1.
- Amperímetro dc, Checoslovaquia, rango 0 – 5, Clase de precisión: 0,2.
- Voltímetro dc, ML22, Checoslovaquia, rango 0 – 150, Conmutador para 30 mV, 0,075, 0,15, 0,30, 0,75, 1,5, 3, 7,5, 15, 30, 75, 150, 300, 750V. Clase de precisión: 0,2.

El análisis de incertidumbre combinada se prepara en base al modelo empleado para la medición y teniendo en cuenta la ley de propagación de las incertidumbres:

$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \cdot \Delta x_i^2 \right)} \quad (\text{J.1})$$

La medición de la potencia de salida del motor estará dada por:

$$P_2 = P_3 + p_{cuINT} + p_{cuARM} + p_{cuESC} + p_{Rot} \quad (\text{J.2})$$

Donde:

P_2 es la potencia de salida del motor, igual a la potencia de entrada del generador dc, en W.

P_3 es la potencia de carga del generador dc, en W.

p_{cuINT} son las pérdidas por efecto Joule en los interpolos, en W.

p_{cuARM} son las pérdidas por efecto Joule en la armadura, en W.

p_{cuESC} son las pérdidas por efecto Joule en las escobillas, en W.

p_{Rot} son las pérdidas rotacionales(según expresión G.2 del Anexo G), en W.

Las cantidades anteriores están dadas por:

$$P_3 = V_{ARM} \cdot I_{ARM} \quad (J.3)$$

$$P_{cuINT} = I_{ARM}^2 \cdot R_{INT} \quad (J.4)$$

$$P_{cuARM} = I_{ARM}^2 \cdot R_{ARM} \quad (J.5)$$

$P_{cuESC} = V_{ESC} \cdot I_{ARM}$, como la caída de tensión en las escobillas se considera $V_{ESC} = 2V$ [115],

entonces la expresión anterior será:

$$P_{cuESC} = 2 \cdot I_{ARM} \quad (J.6)$$

$$P_{Rot} = w_r \cdot (0,1957 + 0,0425 \cdot I_{exc} + 3,36 \cdot 10^{-7} \cdot w_r^2) \quad (J.7)$$

Donde:

V_{ARM} es la tensión a la salida del generador dc, en V.

I_{ARM} es la corriente de armadura, en A.

R_{INT} y R_{ARM} son las resistencias de los interpolos y de armadura respectivamente, en Ω .

I_{exc} es la corriente en el devanado de campo, en A.

w_r es la velocidad angular del rotor, en rpm.

Se conoce que todos los instrumentos de corriente directa empleados en la medición de las corrientes y tensiones dc son de clase 0,2 y que el error en la medición de velocidad es

$\Delta w_r = \pm 1$ rpm. Los errores que se cometen en la medición de las resistencias de los interpolos y

la armadura por el método del voltímetro y el amperímetro son $\Delta R_{INT} = 0,000015\Omega$ y

$\Delta R_{ARM} = 0,000033\Omega$, respectivamente. Expresando los errores de las mediciones en función de

los errores relativos y aplicando (J.1) a las expresiones de la (J.3) a la (J.7) se tiene:

$$\Delta P_3 = \sqrt{8 \cdot 10^{-6} \cdot P_3^2} \quad (J.8)$$

$$\Delta p_{cuINT} = \sqrt{6,74 \cdot 10^{-10} \cdot I_{ARM}^4} \quad (J.9)$$

$$\Delta p_{cuARM} = \sqrt{3 \cdot 10^{-9} \cdot I_{ARM}^4} \quad (J.10)$$

$$\Delta p_{cuESC} = \sqrt{1,6 \cdot 10^{-5} \cdot I_{ARM}^2} \quad (J.11)$$

$$\Delta p_{Rot} = \sqrt{7 \cdot 10^{-9} \cdot w_r^2 \cdot I_{exc}^2 + (10,08 \cdot 10^{-7} \cdot w_r^2 + 0,0425 \cdot I_{exc} + 0,1957)^2} \quad (J.12)$$

Teniendo en cuenta el cálculo del error probable para la expresión (J.2) según (J.1), y debido a que las derivadas parciales de los términos que no contienen la variable de la función son iguales a cero, entonces:

$$\Delta P_2 = \sqrt{(\Delta P_3)^2 + (\Delta p_{cuINT})^2 + (\Delta p_{cuARM})^2 + (\Delta p_{cuESC})^2 + (\Delta p_{Rot})^2} \quad (J.13)$$

Sustituyendo las expresiones de la (J.9) a la (J.13) en (J.14) y agrupando tenemos la incertidumbre en la medición de la potencia de salida del motor:

$$\Delta P_2 = \sqrt{8 \cdot 10^{-6} P_3^2 + 3 \cdot 10^{-9} I_{ARM}^4 + 1,6 \cdot 10^{-5} I_{ARM}^2 + 7 \cdot 10^{-9} I_{exc}^2 w_r^2 + (10,08 \cdot 10^{-7} \cdot w_r^2 + 0,0425 \cdot I_{exc} + 0,1957)^2} \quad (J.14)$$

La incertidumbre en la medición de la potencia eléctrica medida estará dada por la clase de precisión del analizador de redes para la medición de potencia como:

$$\Delta P_1 = 0,01 \cdot P_1 \quad (J.15)$$

La eficiencia expresada en % se calcula como:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 \quad (J.16)$$

Por lo que la incertidumbre en la determinación de la eficiencia será:

$$\Delta \eta = \sqrt{\left(\frac{100 \cdot P_2}{P_1^2}\right)^2 \cdot \Delta P_1^2 + \left(\frac{100}{P_1}\right)^2 \cdot \Delta P_2^2} \quad (J.17)$$

ANEXO K.

DETERMINACIÓN DEL TAMAÑO DE MUESTRA.

Motor 1. Est. 5					
Ef. (%)	Perdidas (W)	Psalida (W)			
83,11	1780,31	8762,09			
83,05	1786,43	8755,97			
82,86	1807,30	8735,10	Media	83,017	1790,399
82,96	1796,36	8746,04	Error típico	0,021	2,185
82,85	1808,14	8734,26	Mediana	83,065	1785,590
82,91	1802,18	8740,22	Moda	83,120	#N/A
83,12	1780,04	8762,36	Desviación estándar	0,113	11,969
82,97	1795,37	8747,03	Varianza de la muestra	0,013	143,262
83,10	1781,53	8760,87	Curtosis	-0,322	-0,296
83,09	1782,34	8760,06	Coefficiente de asimetría	-0,923	0,937
83,07	1784,80	8757,60	Rango	0,390	40,850
82,81	1812,02	8730,38	Mínimo	82,740	1779,030
83,11	1780,40	8761,96	Máximo	83,130	1819,880
83,11	1781,00	8761,40	Suma	2490,510	53711,980
83,04	1787,83	8754,57	Cuenta	30,000	30,000
83,07	1785,10	8757,30			
83,13	1779,03	8763,37			
82,74	1819,88	8722,52			
83,12	1779,41	8762,99			
82,97	1795,18	8747,22			
83,06	1786,08	8756,32			
83,10	1781,46	8760,94			
83,12	1779,66	8762,74			
83,01	1790,82	8751,58			
83,11	1780,41	8761,99			
82,88	1804,73	8737,67			
82,84	1808,64	8733,76			
82,96	1796,39	8746,01			
83,12	1780,08	8762,32			
83,12	1779,06	8763,34			

Calculos experimentales		Error abs.	Error relat.
Eficiencia	83,36	0,85	1,02
Pérdidas	1753,83	107,28	6,17
Psalida	8788,57	19,86	0,22

Resultados del STATGRAPHICS

Sample-Size Determination

 Parameter to be estimated: normal mean
 Desired tolerance: +- 2.0% when mean = 83.36
 Confidence level: 95.0%
 Assumed sigma: 0.113

The required sample size is n=2 observations.

Motor 1. Est. 1

Ef. (%)	Perdidas (W)	Psalida (W)
88,25	2542,81	19097,99
88,44	2500,93	19139,87
88,12	2570,92	19069,88
88,05	2587,15	19053,65
88,17	2559,25	19081,55
88,44	2500,70	19140,10
87,96	2605,54	19035,26
88,01	2594,62	19046,18
88,45	2499,28	19141,52
88,44	2501,29	19139,51
88,00	2596,13	19044,67
88,41	2508,98	19131,82
88,08	2580,66	19060,14
88,08	2579,29	19061,51
88,34	2523,68	19117,12
88,45	2498,88	19141,92
88,06	2583,75	19057,05
88,21	2550,90	19089,90
88,00	2597,07	19043,73
88,42	2505,01	19135,79
88,49	2491,81	19148,99
88,48	2493,72	19147,08
88,27	2539,17	19101,63
88,36	2518,14	19122,66
88,34	2522,96	19117,84
88,49	2491,56	19149,24
88,07	2582,50	19058,30
88,14	2566,33	19074,47
88,33	2524,71	19116,09
88,41	2507,91	19132,89

	<i>Efic.</i>	<i>Pérdidas</i>	<i>Psalida</i>
Media	88,259	2540,855	19099,945
Error típico	0,033	7,125	7,125
Mediana	88,300	2531,940	19108,860
Moda	88,440	#N/A	#N/A
Desviación estándar	0,180	39,025	39,025
Varianza de la muestra	0,032	1522,956	1522,956
Curtosis	-1,553	-1,565	-1,565
Coefficiente de asimetría	-0,226	0,233	-0,233
Rango	0,530	113,980	113,980
Mínimo	87,960	2491,560	19035,260
Máximo	88,490	2605,540	19149,240
Suma	2647,760	76225,650	572998,350
Cuenta	30,000	30,000	30,000

Calculos experimentales		Error abs.	Error relat.
Eficiencia	87,52	0,90	1,03
Pérdidas	2701,76	221,20	8,19
Psalida	18939,04	45,79	0,24

Resultados del STATGRAPHICS

Sample-Size Determination

Parameter to be estimated: normal mean
 Desired tolerance: +/- 2.0% when mean = 87.52
 Confidence level: 95.0%
 Assumed sigma: 0.18

The required sample size is n=2 observations.

Motor 1. Est. 3

Ef. (%)	Perdidas (W)	Psalida (W)
87,51	2116,33	14826,07
87,56	2107,13	14835,27
87,57	2105,10	14837,30
87,60	2100,71	14841,69
87,52	2114,15	14828,25
87,53	2113,40	14829,00
87,59	2101,86	14840,54
87,56	2108,23	14834,17
87,55	2108,71	14833,69
87,60	2101,58	14840,82
87,60	2101,68	14840,72
87,60	2101,56	14840,84
87,53	2112,11	14830,29
87,51	2115,41	14826,49
87,57	2105,99	14836,41
87,60	2100,94	14841,46
87,52	2114,41	14827,99
87,49	2120,00	14822,40
87,53	2113,13	14829,27
87,55	2109,98	14832,42
87,48	2121,09	14821,31
87,52	2114,34	14828,06
87,54	2111,56	14830,84
87,51	2116,74	14825,66
87,47	2123,01	14819,39
87,58	2103,97	14838,43
87,55	2110,02	14832,38
87,60	2101,15	14841,25
87,49	2118,70	14823,70
87,48	2121,65	14820,75

	<i>Efic.</i>	<i>Pérdidas</i>	<i>Psalida</i>
Media	87,544	2110,488	14831,895
Error típico	0,008	1,273	1,275
Mediana	87,545	2110,790	14831,610
Moda	87,600	#N/A	#N/A
Desviación estándar	0,041	6,970	6,983
Varianza de la muestra	0,002	48,581	48,759
Curtosis	-1,129	-1,144	-1,156
Coefficiente de asimetría	-0,063	0,087	-0,083
Rango	0,130	22,300	22,300
Mínimo	87,470	2100,710	14819,390
Máximo	87,600	2123,010	14841,690
Suma	2626,310	63314,640	444956,860
Cuenta	30,000	30,000	30,000

Calculos experimentales		Error abs.	Error relat.
Eficiencia	86,26	0,89	1,03
Pérdidas	2327,89	172,94	7,43
Psalida	14614,51	34,69	0,24

Resultados del STATGRAPHICS

Sample-Size Determination

Parameter to be estimated: normal mean
 Desired tolerance: +- 2.0% when mean = 86.26
 Confidence level: 95.0%
 Assumed sigma: 0.041

The required sample size is n=2 observations.

Motor 1. Est. 21

Ef. (%)	Perdidas (W)	Psalida (W)
88,90	2360,24	18906,96
88,90	2360,26	18906,94
88,90	2360,26	18906,94
88,90	2360,28	18906,92
88,90	2360,26	18906,95
88,90	2360,25	18906,95
88,90	2360,24	18906,96
88,90	2360,30	18906,90
88,90	2359,70	18907,50
88,90	2360,26	18906,89
88,90	2360,26	18906,95
88,90	2359,92	18907,28
88,90	2360,16	18907,04
88,90	2359,80	18907,45
88,90	2359,70	18907,50
88,90	2360,23	18906,99
88,90	2360,23	18906,95
88,91	2359,28	18907,92
88,90	2359,73	18907,54
88,90	2360,27	18907,00
88,90	2360,26	18906,94
88,90	2360,26	18906,94
88,90	2360,02	18907,22
88,91	2358,74	18908,52
88,90	2360,26	18906,94
88,90	2360,29	18906,99
88,90	2360,21	18906,99
88,90	2360,30	18906,92
88,90	2360,15	18907,05
88,90	2359,99	18907,22

	<i>Efic.</i>	<i>Pérdidas</i>	<i>Psalida</i>
Media	88,901	2360,070	18907,142
Error típico	0,000	0,064	0,066
Mediana	88,900	2360,240	18906,975
Moda	88,900	2360,260	18906,940
Desviación estándar	0,003	0,352	0,362
Varianza de la muestra	0,000	0,124	0,131
Curtosis	12,207	6,647	6,762
Coefficiente de asimetría	3,660	-2,442	2,443
Rango	0,010	1,560	1,630
Mínimo	88,900	2358,740	18906,890
Máximo	88,910	2360,300	18908,520
Suma	2667,020	70802,110	567214,260
Cuenta	30,000	30,000	30,000

Calculos experimentales		Error abs.	Error relat.
Eficiencia	87,15	0,90	1,03
Pérdidas	2732,40	217,32	7,95
Psalida	18534,80	44,72	0,24

Resultados del STATGRAPHICS

Sample-Size Determination

Parameter to be estimated: normal mean

Desired tolerance: +- 2.0% when mean = 87.15

Confidence level: 95.0%

Assumed sigma: 0.003

The required sample size is n=2 observations.

ANEXO L.

ESTRUCTURA DE LA INFORMACIÓN DE LA APLICACIÓN EN MATLAB.

```
*****
Entrada de los Datos de Chapa
*****
Potencia nominal en kW, Pn= 22
Voltaje nominal en V, Vn= 460
Corriente nominal en A, In= 34.9
Factor de Potencia nominal, fpn= 0.88
Eficiencia nominal en pu, Efn= 0.9
Velocidad sincronica en rpm, ns= 1200
Velocidad nominal en rpm, nn= 1180
Diseño NEMA (A, B, C o D), Diseño= 'c'
Norma por la que se estampa la chapa (Eur, Jap o Ame), Fcte= 'eur'
Conexion del devanado (Delta o Estre), Conexion= 'delta'
Clase de aislamiento (A, B, F o H), Aislamiento= 'f'
*****
Medicion de resistencia del estator
Resistencia de fase del estator medida a temperatura ambiente en Ohmios, rs= 0.3705
Temperatura a la que se mide la resistencia del estator en °C, ta= 28
*****
Estado de carga para determinar eficiencia, Est= 2
Z = 0.4897 0.8547 5.2541 47.5416 0.4720 0.9933 1.5928 0.8578 0.5013
  Resultados del modelo
    Modulo  angulo
VAB= 461.30   0.00
VBC= 443.10 -119.92
VCA= 453.00  122.03
ILa= 40.94  -60.01
ILb= 29.95  163.61
ILc= 28.25   72.98
  Factor de desbalance complejo
    Modulo  angulo
FDVC= 2.32  27.42
Deslizamiento:  s = 0.016611
PERDIDAS DESAGREGADAS (W)
Perdidas de cobre del estator  = 550.33
Perdidas de cobre del rotor    = 434.44
Perdidas fricción batimiento y nucleo = 1311.46
Perdidas adicionales           = 341.89
PERDIDAS TOTALES (W)          = 2638.13
EFICIENCIA = 87.81
POTENCIAS CONSUMIDAS DE LA RED (W)
Potencia activa fase a  = 9325.25
Potencia activa fase b  = 5453.39
Potencia activa fase c  = 6862.16
Potencia activa total   = 21640.80
Potencia reactiva       = 13565.27
Potencia aparente       = 25540.96
Factor de potencia      = 0.85

POTENCIA DE SALIDA      = 19002.67
```

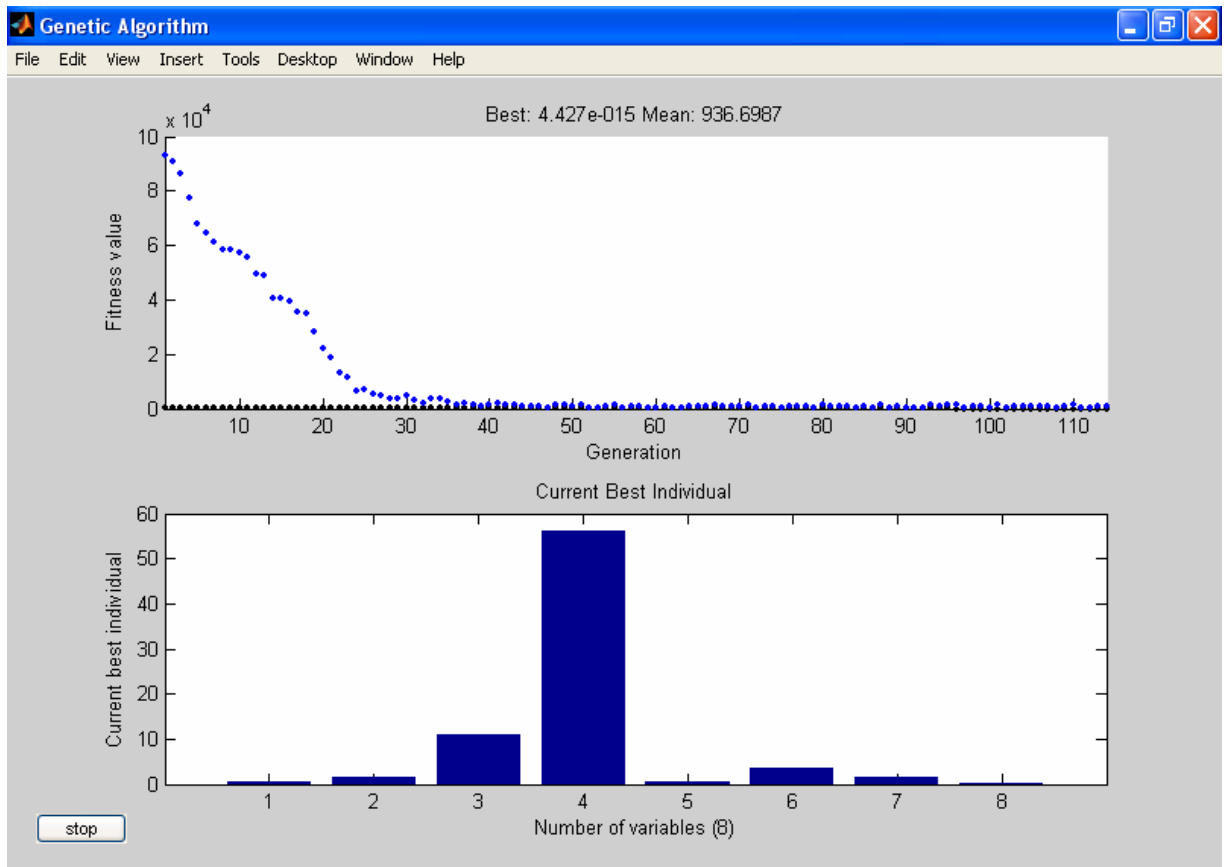


Figura L.1 Ventana que muestra la evolución hacia la solución promisoría, el mejor individuo y el número de generaciones actuales.

ANEXO M.

CASOS DE ESTUDIO

GYDEMA.

Motor de la Bomba de vacío: Marca ASEA; 42,5 kW; 440 V; 74 A; $\cos\phi=0,84$; $\eta=89\%$; 1160 rpm; aislamiento clase F; conexión Δ ; resistencia del devanado del estator: 0,1248 Ω /fase a 30°C.

Tabla M.1 Mediciones motor Bomba de vacío en planta de refinación y evaporación de glucosa.

Est	Vab (V)	Vbc (V)	Vca (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	rpm (rpm)	frecuencia (Hz)	Pt (W)	FDVL (%)	Desv tensión (%)
1	462,5	462,5	468,5	66,3	64,3	64,9	1175	60,3	41312	0,86	5,57
2	461,0	461,3	467,6	66,5	64,4	65,0	1174	60,3	41402	0,93	5,30
3	460,6	461,2	465,7	66,5	64,3	65,1	1178	60,3	41402	0,69	5,11
5	462,8	463,6	463,6	66,4	64,5	65,2	1178	60,5	41536	0,12	5,30
7	460,1	459,7	465,7	66,6	64,4	65,0	1175	60,3	41389	0,84	4,96
14	458,7	460,6	465,1	67,0	65,2	65,9	1178	60,1	41862	0,79	4,88
15	458,9	460,8	464,3	66,8	65,0	65,8	1170	60,1	41747	0,64	4,85
20	470,2	470,9	476,2	65,2	63,1	63,9	1173	60,2	40301	0,80	7,37
24	460,9	461,1	465,4	65,6	63,8	64,2	1177	60,3	40736	0,63	5,11
36	447,2	448,5	454,8	64,9	62,9	63,6	1173	60,2	39789	1,03	2,31

PIENSOS BALANCEADOS.

Molinos 1, 2 y 3: Marca SIEMENS; 110 kW; 440 V; 172 A; $\cos\phi=0,89$; $\eta=93.6\%$; 3570 rpm; aislamiento clase F; conexión Δ .

Resistencia del devanado del estator molino 1: 0,0253 Ω /fase a 35°C.

Resistencia del devanado del estator molino 2: 0,02577 Ω /fase a 27°C.

Resistencia del devanado del estator molino 3: 0,02969 Ω /fase a 35°C.

Molino 4: Fabricante URSS; 90 kW; 440 V; 142 A; $\cos\phi=0,9$; $\eta=92\%$; 3530 rpm; aislamiento clase F; conexión Y; resistencia del devanado del estator: 0,01667 Ω /fase a 27°C.

Tabla M.2 Mediciones molino 1.

Est	Vab (V)	Vbc (V)	Vca (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	rpm (rpm)	frecuencia (Hz)	Pt (W)	FDVL (%)	Desv tensión (%)
1	431,8	431,2	431,5	119,2	120,3	113,9	3547	60,4	77292,8	0,07	-1,93
2	429,6	429,2	430,4	129,5	130,6	124,2	3563	60,4	84640,0	0,16	-2,33
10	428,6	427,6	428,4	133,8	134,0	127,4	3553	60,4	87027,2	0,14	-2,68
13	435,9	435,1	436,1	133,4	132,5	127,6	3533	60,3	87795,2	0,14	-0,98
15	431,4	431,8	432,6	134,0	134,0	129,0	3562	60,1	88032,0	0,15	-1,83
24	431,5	431,9	431,8	124,8	124,7	119,5	3568	60,1	81190,4	0,05	-1,88
25	432,7	432,1	432,8	121,7	121,8	116,5	3579	60,2	79084,8	0,10	-1,70
28	433,7	432,9	433,5	124,0	124,0	118,2	3578	60,4	80838,4	0,11	-1,51
30	432,4	432,2	432,4	123,7	124,3	118,1	3591	60,5	80748,8	0,03	-1,74
32	430,0	430,4	431,1	130,9	131,2	125,6	3567	60,1	85548,8	0,14	-2,16

Tabla M.3 Mediciones molino 2.

Est	Vab (V)	Vbc (V)	Vca (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	rpm (rpm)	frecuencia (Hz)	Pt (W)	FDVL (%)	Desv tensión (%)
1	429,2	429,4	430,6	99,8	110,3	104,8	3585	60,3	63878,4	0,20	-2,33
2	428,9	429,3	429,3	99,1	109,6	104,4	3590	60,4	63424	0,06	-2,46
3	428,8	428,9	429,4	99,3	109,5	104,6	3586	60,3	63436,8	0,09	-2,49
4	429,8	430,5	430,1	99,6	110,3	104,8	3592	60,5	63955,2	0,09	-2,24
5	432,4	433,0	432,4	99,3	110,1	104,9	3588	60,4	63955,2	0,09	-1,68
6	431,6	431,8	431,6	99,6	110,2	104,3	3583	60,3	63833,6	0,03	-1,89
8	431,5	432,1	431,9	99,5	109,4	104,5	3590	60,5	63705,6	0,08	-1,86
10	434,0	433,4	434,9	99,7	108,3	104,4	3586	60,3	63468,8	0,18	-1,34
12	435,2	435,2	435,5	99,4	108,2	104,0	3587	60,4	63347,2	0,05	-1,07
18	432,4	432,2	434,5	98,8	108,3	104,1	3590	60,3	63052,8	0,34	-1,58

Tabla M.4 Mediciones molino 3.

Est	Vab (V)	Vbc (V)	Vca (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	rpm (rpm)	frecuencia (Hz)	Pt (W)	FDVL (%)	Desv tensión (%)
1	429,9	428,5	429,3	117,8	118,9	114,1	3581	60,3	75987,2	0,17	-2,45
3	429,2	429,2	428,2	113,4	114,6	110,4	3566	60,1	72915,2	0,16	-2,53
5	428,5	428,8	428,7	120,6	121,4	117,2	3562	60,1	78009,6	0,04	-2,58
7	426,6	426,3	427,8	122,8	124,1	119,1	3594	60,5	79462,4	0,21	-2,98
9	423,3	422,4	424,4	126,9	128,7	123,2	3582	60,3	81920	0,24	-3,78
10	424,0	423,1	424,5	131,4	132,3	127,0	3585	60,3	84729,6	0,18	-3,67
11	421,1	420,7	421,5	134,3	136,9	131,3	3583	60,3	87008	0,09	-4,30
13	420,7	420,0	422,5	133,2	136,1	130,0	3576	60,2	86297,6	0,34	-4,30
15	419,1	419,2	418,9	130,2	132,9	126,7	3574	60,2	83763,2	0,04	-4,76
17	418,3	418,0	418,0	131,1	133,8	127,7	3587	60,4	84281,6	0,05	-4,98

Tabla M.5 Mediciones molino 4.

Est	Vab (V)	Vbc (V)	Vca (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	rpm	frecuencia (Hz)	Pt (W)	FDVL (%)	Desv tensión (%)
1	436,5	434,1	437,5	118,5	117,1	110,6	3568	60,3	77638,4	0,44	-0,90
3	435,8	433,8	435,6	117,8	118,0	110,3	3564	60,2	77459,2	0,29	-1,12
4	434,1	432,3	433,1	118,1	117,8	110,6	3575	60,4	77318,4	0,22	-1,55
8	432,0	430,3	433,0	118,5	118,0	111,9	3573	60,4	77555,2	0,34	-1,87
10	422,0	423,2	422,1	115,6	118,0	110,5	3551	60,1	75097,6	0,18	-3,99
13	418,1	419,7	418,5	115,0	118,2	110,3	3586	60,7	74508,8	0,22	-4,83
16	415,6	416,9	416,2	115,0	117,8	110,7	3552	60,1	74048	0,16	-5,40
20	426,0	425,3	426,6	116,7	118,5	111,2	3569	60,3	76204,8	0,16	-3,19
21	428,5	428,4	428,8	117,1	118,1	111,9	3579	60,5	76806,4	0,05	-2,60
29	425,6	425,1	426,8	115,6	118,2	110,6	3563	60,3	75686,4	0,23	-3,22

EA "CIUDAD CARACAS".

VTI 60T: Marca SZDO198C; 260 kW; 440 V; 430 A; $\cos\phi=0,84$; $\eta=94,5\%$; 890 rpm; aislamiento clase F; conexión Y; resistencia del devanado del estator: 0,011 Ω /fase a 29°C.

VTF 60T: Marca WEG; 185 kW; 440 V; 319 A; $\cos\phi=0,81$; $\eta=94\%$; 1190 rpm; aislamiento clase F; conexión Δ ; resistencia del devanado del estator: 0,0279 Ω /fase a 29°C.

VAS 60T: Marca WEG; 75 kW; 460 V; 108 A; $\cos\phi=0,92$; $\eta=93,6\%$; 3560 rpm; aislamiento clase F; conexión Δ ; resistencia del devanado del estator: 0,083 Ω /fase a 28°C.

VTI Retal: Marca WEG; 150 kW; 440 V; 275 A; $\cos\phi=0,76$; $\eta=91\%$; 890 rpm; aislamiento clase F; conexión Δ ; resistencia del devanado del estator: 0,0171 Ω /fase a 30°C.

VTF Retal: Marca VEB; 90 kW; 440 V; 143 A; $\cos\phi=0,88$; $\eta=93\%$; 1185 rpm; aislamiento clase F; conexión Δ ; resistencia del devanado del estator: 0,0815 Ω /fase a 27°C.

VAS Retal: Marca VEB; 132 kW; 440 V; 203 A; $\cos\phi=0,9$; $\eta=95\%$; 3570 rpm; aislamiento clase F; conexión Δ ; resistencia del devanado del estator: 0,04 Ω /fase a 21°C.

Tabla M.6. Mediciones VTI 60T.

Est	Vab (V)	Vbc (V)	Vca (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	rpm (rpm)	frecuencia (Hz)	Pt (W)	FDVL (%)	Desv tensión (%)
1	431,6	432,2	434,2	327,8	336,7	328,5	894	60,3	195788	0,35	-1,67
5	438,5	440,8	440,1	324,1	333,3	326,5	895	60,6	196147	0,30	-0,05
7	428,2	429,6	429,9	327,4	337,2	329,0	899	60,5	194969	0,24	-2,45
8	428,2	428,9	429,8	327,2	336,7	327,9	896	60,3	194304	0,19	-2,51
9	428,9	429,6	430,3	325,9	335,4	326,5	895	60,3	193638	0,16	-2,36
15	434,4	437,1	438,1	337,5	347,9	340,0	892	60,1	204595	0,49	-0,79
17	437,6	440,5	439,3	339,8	350,1	342,8	901	60,7	207769	0,35	-0,20
19	436,8	437,7	440,0	338,0	347,9	339,0	894	60,3	205209	0,42	-0,42
21	436,2	438	438,2	340,0	350,0	341,8	897	60,5	206745	0,29	-0,58
23	441,0	442,2	444,7	333,9	343,5	335,2	895	60,3	203827	0,47	0,60

Tabla M.7. Mediciones VTF 60T.

Est	Vab (V)	Vbc (V)	Vca (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	rpm (rpm)	frecuencia (Hz)	Pt (W)	FDVL (%)	Desv tensión (%)
1	439,7	439,5	440,9	186,9	186,1	185,5	1198	60,5	107801	0,20	0,01
3	436,6	437,3	439,2	184,2	183,4	183,2	1189	60,1	105203	0,34	-0,52
5	435,4	435,5	438,0	189,1	188,3	187,7	1195	60,5	109011	0,39	-0,84
7	436,5	437,3	441,0	186,0	185,2	184,9	1190	60,1	106617	0,62	-0,39
9	441,3	442,0	445,6	185,6	185,0	184,7	1190	60,1	106873	0,59	0,67
11	427,0	426,2	429,5	187,8	187,1	186,6	1196	60,3	106886	0,45	-2,83
13	428,8	427,6	432,8	186,8	186,0	185,8	1195	60,3	106476	0,71	-2,33
15	435,5	436,2	439,2	185,3	184,6	185,3	1195	60,1	106316	0,51	-0,69
17	430,7	431,3	434,6	187,1	186,2	186,5	1190	60,1	106803	0,56	-1,77
19	439,1	437,9	442,1	186,0	185,2	185,1	1192	60,2	107014	0,55	-0,07

Tabla M.7. Mediciones VAS 60T.

Est	Vab (V)	Vbc (V)	Vca (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	rpm (rpm)	frecuencia (Hz)	Pt (W)	FDVL (%)	Desv tensión (%)
1	437,0	436,5	437,5	86,7	85,9	84,4	3579	60,5	58150,4	0,11	-5,00
3	425,8	426,1	427,1	87,4	86,6	85,1	3565	60,1	57459,2	0,18	-7,32
5	434,3	434,0	435,4	86,5	85,5	84,0	3561	60,2	57593,6	0,19	-5,53
7	435,1	433,3	435,0	86,8	85,9	84,2	3569	60,2	57804,8	0,27	-5,55
9	432,5	431,1	434,2	87,1	85,8	84,2	3570	60,2	57696	0,37	-5,96
11	441,8	441,7	442,5	86,3	85,7	84,1	3586	60,5	58496	0,11	-3,91
13	444,1	443,6	444,6	86,5	85,7	84,4	3587	60,5	58848	0,11	-3,46
15	447,8	446,1	449,0	84,9	84,0	82,6	3568	60,3	57817,6	0,34	-2,69
17	443,8	442,5	445,4	85,8	85,1	83,3	3573	60,3	58156,8	0,34	-3,50
19	442,4	441,3	444,6	85,9	85,1	83,3	3575	60,3	58067,2	0,41	-3,75

Tabla M.8. Mediciones VTI Retal.

Est	Vab (V)	Vbc (V)	Vca (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	rpm (rpm)	frecuencia (Hz)	Pt (W)	FDVL (%)	Desv tensión (%)
10	444,5	444,6	452,2	211,5	208,2	214,5	895,9	60,3	119904	1,14	1,61
12	442,5	443,0	451,8	211,1	207,8	214,2	894	60,2	119411	1,35	1,31
14	446,0	446,3	449,2	209,5	206,1	212,1	895,2	60,4	118188	0,45	1,63
15	443,9	443,7	451,7	209,7	206,4	212,3	894	60,2	118092	1,18	1,46
17	443,6	443,5	450,3	209,7	206,2	212,3	894,8	60,3	118073	1,01	1,32
24	443,7	445,6	451,9	208,0	205,1	211,6	890,9	60,1	116921	1,08	1,61
26	440,0	440,5	448,2	210,4	207,2	213,2	901,2	60,2	118278	1,20	0,66
28	442,5	443,8	450,8	213,2	210,2	216,6	893,1	60,2	120832	1,14	1,30
29	442,6	443,8	451,1	212,8	210,0	216,3	893,5	60,2	120652	1,18	1,33
30	446,0	446,3	455,3	209,2	206,7	212,1	894,3	60,2	118169	1,36	2,09

Tabla M.9. Mediciones VTF Retal.

Est	Vab (V)	Vbc (V)	Vca (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	rpm (rpm)	frecuencia (Hz)	Pt (W)	FDVL (%)	Desv tensión (%)
1	438,5	436,2	441,0	84,0	81,5	81,8	1193	60,3	49811,2	0,55	-0,33
3	420,8	419,9	421,2	84,0	81,5	82,4	1189	60,1	48857,6	0,17	-4,40
5	439,1	437,1	441,1	83,6	81,2	82,1	1195	60,4	49798,4	0,46	-0,20
7	449,6	447,0	451,3	84,0	81,2	81,3	1194	60,4	49952	0,51	2,11
11	445,8	443,0	447,6	83,5	80,8	81,1	1192	60,3	49536	0,55	1,24
13	447,5	444,8	448,4	83,5	80,9	81,2	1194	60,3	49619,2	0,47	1,57
15	428,1	425,6	429,9	84,4	81,6	81,9	1193	60,3	49369,6	0,53	-2,76
17	441,8	439,5	444,1	83,8	81,0	81,3	1193	60,3	49574,4	0,52	0,41
19	440,0	438,3	441,4	83,7	81,0	81,4	1195	60,5	49612,8	0,36	-0,02
21	440,2	437,4	442,2	83,4	80,6	80,8	1192	60,3	49126,4	0,58	-0,02

Tabla M.10. Mediciones VAS Retal.

Est	Vab (V)	Vbc (V)	Vca (V)	Ia (A)	Ib (A)	Ic (A)	rpm (rpm)	frecuencia (Hz)	Pt (W)	FDVL (%)	Desv tensión (%)
1	447,4	445,0	448,5	92,0	90,9	88,7	3591	60,3	58220,8	0,44	1,58
3	435,9	434,3	436,8	92,7	92,0	89,5	3590	60,3	57958,4	0,31	-0,98
5	435,3	434,3	435,3	92,9	91,8	89,9	3591	60,5	57945,6	0,15	-1,14
7	432,9	431,4	432,3	93,1	92,2	90,4	3591	60,4	58009,6	0,19	-1,77
9	435,6	435,0	436,9	91,3	92,0	90,0	3592	60,4	57689,6	0,24	-0,95
11	434,6	434,5	435,3	90,9	91,2	89,6	3577	60,2	57177,6	0,11	-1,18
13	441,9	441,9	444,8	89,9	91,8	89,4	3594	60,4	57785,6	0,44	0,65
15	443,6	444,5	444,9	88,8	91,8	89,3	3597	60,5	57593,6	0,17	0,98
17	430,0	430,3	431,8	90,0	93,2	90,8	3592	60,4	57440	0,26	-2,11
19	431,1	431,0	431,4	90,4	92,6	90,2	3590	60,4	57331,2	0,05	-2,01