



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

*El modelo de motor agregado aplicado al análisis  
del proceso transitorio en barras de potencias  
eléctricas, constituidas por Motores de inducción*

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

*Autor: Ing. Diego Rodríguez Álvarez*

*Tutor: Ms. C. Ignacio Romero Rueda*

*Moa 2009*



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

*El modelo de motor agregado aplicado al análisis  
del proceso transitorio en barras de potencias  
eléctricas, constituidas por Motores de inducción*

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

*Autor: Ing. Diego Rodríguez Álvarez*  
*Empresa Cmdte Ernesto Che Guevara*

*Tutor: Ms. C. Ignacio Romero Rueda*  
*Profesor Auxiliar del Dpto. Ing. Eléctrica*

*Moa 2009*

*Declaración de autoridad*

**DECLARACION JURADA.**

---

Yo, Ing. Diego Rodríguez Álvarez, autor de este trabajo y el tutor Ms.C Ignacio Romero Rueda, declaramos la propiedad intelectual del mismo al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico y el Centro de Investigaciones del Níquel de Moa, para que dispongan de su uso cuando estimen menester.

-----  
Ing. Diego Rodríguez Álvarez

-----  
Ms. C. Ignacio Romero Rueda

# *Dedicatoria*

## DEDICATORIA

---

*Dedico este trabajo, primeramente a la revolución cubana y a nuestro querido comandante en jefe Fidel Castro Ruz por haberme dado la oportunidad de superarme.*

*A mis familiares, compañeros de estudio y profesores que me han brindado su apoyo de manera desinteresada.*

*A mi madre y esposa, quienes han sido los principales promotores de mi superación profesional.*

*A mis compañeros de trabajo y amigos que siempre se preocuparon por mis estudios.*

*A todas aquellas personas que me extendieron su mano y parte de su tiempo.*

*A todos "les dedico este éxito"*

*El autor*

# *Agradecimientos*

## **AGRADECIMIENTOS**

---

*Agradezco profundamente a mi tutor y amigo MSc. Ignacio Romero Rueda por su excelente contribución y el apoyo siempre brindado, el permanente interés en revisar mi trabajo y la constante preocupación desde los primeros momentos del desarrollo de esta tesis.*

*A mi Madre Luz. D. Álvarez Céspedes que me animó y se preocupó siempre por mis estudios.*

*A Tatiana Hernández Montero, mi esposa, alguien que durante todo este tiempo estuvo disponible para darme su apoyo.*

*A mi hija Thalia Rodríguez Hernández, que con su alegría (en sus 6 Años de vida) a hecho más grato los momentos.*

*Al grupo técnico de la Planta Termoeléctrica, que de acuerdo a sus posibilidades, me brindaron su ayuda siempre que lo necesité.*

*A los mencionados hoy y a quienes imperdonablemente he olvidado, valla mi agradecimiento desde lo más profundo de mi corazón.*

*A todos "Muchas Gracias"  
El autor*



*Pensamiento*

## **PENSAMIENTO**

---

Si quieres desarrollarte, no debes repetir la historia; pero hacer una historia nueva. Para construir una nueva historia, es necesario recorrer nuevos caminos.

**Gandhi**

# *Resumen*

## **RESUMEN**

---

En la primera parte de este trabajo se realiza un análisis del estado del arte referido al motor agregado, modelos físicos, matemáticos y empleo del mismo, además de los elementos necesarios de la teoría general de los motores de inducción que son aplicables directamente en la investigación, recorriendo desde el circuito equivalente para régimen estacionario hasta el modelo dinámico para el régimen transitorio.

En la segunda parte se encuentra la metodología para obtener modelos agregados a partir de motores de inducción agrupados en una misma barra de potencia. Para ello se parte de la existencia de un balance de potencia, tanto externa como interna, entre el grupo de motores en conjunto y el motor equivalente, esta metodología permite determinar los parámetros fundamentales del motor agregado para la simulación y análisis en régimen dinámico.

Por último se realiza la simulación del motor agregado y los componentes individuales, de uno de ellos, el número 29, donde se demuestra que este motor equivalente responde ante las perturbaciones en el rotor y entrada de forma semejante a como responde el conjunto de motores agrupados en la barra de potencia, corroborando el uso del agregado para el análisis del comportamiento transitorio en barras de potencias eléctricas.

# *Abstract*

## **ABSTRACT**

---

The first part of this paper describes an analysis on the condition of the added motor, as well as physical and mathematical modeling and their application. Besides the necessary elements on Induction Motors General Theory, that is applicable for this research including the equivalent circuit for stationary regime up to the dynamic modeling for the transitory regime and the second part of this paper describes the methodology to be used in order to obtain added modeling from induction motors connected to the same power bar. For this purpose it starts from the existence of a power balance both internal or external, within the motors set and the equivalent motor. This methodology also allows determining the main parameters of the added motor for simulation purposes and analysis in dynamic regime. Finally, the added motor simulation is carried out and the individual items of one of them (No. 29), evidence that this equivalent motor gives responses to the entry and rotor failures just as the motors set connected to the power bar, so that it proves the use of the added equipment for the analysis of transitory operation on electrical power bars.

# *Índice*

## ÍNDICE

---

INTRODUCCION.....	2
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO-CONCEPTUAL .....	6
I.1. Fundamentos del motor agregado .....	6
I.1.1. Métodos para obtener el modelo agregado .....	7
I.1.2. Modelo de circuito escogido para representar el motor agregado o equivalente .....	8
I.1.3. Modelo matemático empleado .....	9
I.1.4. Finalidad del modelo de motor agregado realizado .....	10
I.1.5. Criterios de agrupamientos.....	11
I.2. Método del Circuito Equivalente para el análisis del motor agregado .....	13
I.3. Estimado del grado de carga del motor agregado .....	14
I.3.1. Medición de la potencia de entrada.....	14
I.4. Modelación dinámica del motor de inducción agregado .....	15
I.4.1. Particularidades del régimen dinámico en el motor de inducción .....	15
I.4.2. Sistema de ejes .....	17
I.5. Conclusiones del Capítulo I.....	18
CAPÍTULO II. MODELO DE MOTOR AGREGADO .....	20
II.1. Modelo agregado y criterios para su integración.....	20
II.1.1. Supuestos para la derivación del método de obtención del modelo agregado.....	20
II.1.2. Derivación del modelo del motor agregado.....	21
II.2. Procesos dinámico en los nodos de carga de los sistemas eléctricos.....	30
II.3. Características estáticas y dinámicas de la carga con motores .....	30
II.3.1. Alud de tensión (estabilidad estática de la carga, detención de los motores).....	33
II.3.2. Fórmulas de cálculo fundamentales.....	34
II.4. Conclusiones capítulo II .....	37
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	39
III.1. Barras objeto de estudio 5TP4 y 5TP5 .....	39
III.2. Composición de motores agregados .....	41
III.2.1. Motores agregados en barras .....	42
III.2.2. Parámetros del circuito equivalente para los motores agregados .....	45
III.3. Características principales del motor de inducción agregado .....	46



III.4. Mediciones puntuales .....	50
III.5. Comportamiento dinámico del motor agregado real .....	52
III.6 Resultados de las simulaciones del motor agregado y los grupos de motores .....	58
III.6.1. Simulación del motor agregado y el grupo equivalente, bajo condiciones normales de operación, con cargas cuadráticas .....	59
III.6.2. Incremento de la carga en el eje del motor agregado y sus equivalentes individuales...	61
III.6.3. Falla a tierra de la fase A de 1 a 1.04 segundos.....	67
III.6.4. Falla a tierra de las fases A y B .....	71
III.7. Conclusiones Capítulo III.....	77
CONCLUSIONES.....	79
RECOMENDACIONES .....	81
BIBLIOGRAFÍA .....	83
ANEXOS .....	92

# *Introducción*

## INTRODUCCION

---

De acuerdo a estudios realizados en países tanto desarrollados como del tercer mundo, se ha podido comprobar que entre el 40% y el 60% del consumo total de energía eléctrica en el mundo corresponde a los motores de inducción trifásicos. Esta realidad, unida a la crisis energética que comenzó en los años 70 del pasado siglo, ha hecho que los fabricantes de motores más importantes del mundo hayan desarrollado nuevos tipos de máquinas con características de diseño dirigidas a la disminución de las pérdidas de potencia mediante la utilización de materiales ferromagnéticos de mejor calidad, el aumento de la longitud del estator y el rotor, la disminución del entrehierro, el empleo de conductores de mayor calibre y la utilización de mejores rodamientos.

Conocido el amplio grado de utilización que tiene el motor de inducción y aún mayor el de rotor en cortocircuito trifásico, en todas las esferas de la producción, debido a su robustez, bajo costo y confiabilidad de funcionamiento, hacen que en la industria del Níquel Cde. “Ernesto Che Guevara” constituyan más del 70% de la carga instalada, con el consiguiente peso en el consumo energético de la misma y teniendo en que es un equipamiento prácticamente obsoleto, con varias reparaciones, modificaciones y adaptaciones imprimen un bajo rendimiento.

En fábricas, empresas o industrias que cuentan con miles de motores, el procedimiento para el análisis del comportamiento transitorio de los motores de inducción se hace tan largo como engorroso y obliga a realizar muestras, dejando de considerar un gran número de máquinas. Surge así la necesidad de agrupar varios de ellos en motores equivalentes, para lo cual es imprescindible la obtención de modelos que caractericen este tipo de carga.

En el presente trabajo se propone resolver este problema agrupando los motores de características similares conectadas a una barra común en un motor equivalente denominado motor agregado y así obtener las características de comportamiento para el régimen dinámico del mismo.

Sobre la base de este problema, se establece el objeto de la investigación, los objetivos del trabajo y la hipótesis científica.

*Objeto de estudio:* Barra de potencia con carga de carácter asincrónica formada por motores de inducción trifásicos de rotor en cortocircuito de baja tensión.

*Campo de acción:* Comportamiento dinámico de la carga con motores de inducción cuando el número de estos es elevado.

*Objetivo general:* Determinar el comportamiento dinámico de la carga con motores de inducción a partir del modelo de motor agregado.

*Objetivos específicos:*

- a) Determinar el modelo de Motor Agregado.
- b) Determinar el comportamiento para régimen dinámico de la carga con motores de inducción.

A partir de este diseño metodológico se definen las siguientes *tareas de investigación*:

1. Establecimiento del estado del arte y sistematización de los conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Determinación del modelo de motor agregado partiendo de los motores agrupados por diferentes categorías.
3. Elaborar esquema de simulación con Matlab que contenga el grupo de motores y el motor agregado equivalente.
4. Simular el comportamiento dinámico de cada motor agregado por barra.
5. Establecer una comparación entre la respuesta dinámica a diferentes perturbaciones del grupo de motores en una barra y su equivalente o agregado.

Se plantea como *hipótesis* del trabajo, que el empleo del Modelo de Motor agregado empleado en barras de potencias, permitirá determinar las características de comportamiento dinámico de la carga, donde el número de motores es elevado, en menor tiempo y a menor costo.

Consecuentemente con el cumplimiento de los objetivos propuestos y la hipótesis planteada, podemos considerar como un *aporte* importante, la propuesta de un método que permite analizar grupos de motores de inducción, considerados de forma simultanea, para caracterizar el proceso dinámico que tiene lugar antes perturbaciones típicas en barras de potencias.

### *Metodología de trabajo.*

A partir del diagrama monolineal general de la empresa se determinaron los puntos en los cuales se podían agrupar motores para formar los agregados, teniendo en cuenta que tuvieran un alimentador principal común que permitiera la realización de mediciones. Realizada esta operación, aplicando el software Matlab se obtuvieron los parámetros de los motores, a partir de los datos nominales y por comparación entre valores calculados y medidos para la actualización de los mismos, con el objetivo de determinar los equivalentes a un motor real representativo de las mediciones realizadas en el punto específico.

A partir de los valores del circuito equivalente se determinaron los parámetros necesarios para la simulación y mediante la misma se determina la comparación entre las respuestas de las perturbaciones del grupo de motores y su equivalente o agregado.

*Capítulo I:*  
*Marco Teórico-Conceptual*

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

---

En este capítulo se realiza un análisis de los diferentes aspectos relacionados con los temas analizados en la bibliografía consultada, con el fin de disponer de los elementos básicos y de las tendencias actuales que resultan esenciales para el desarrollo de este trabajo, tratándose los temas relacionados con la determinación del comportamiento de la carga con motores de inducción en barras de potencias donde estos predominan.

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

Los objetivos específicos de este capítulo son los siguientes:

1. Análisis de los trabajos precedentes relacionados con el modelo de motor agregado en barras de potencias formado por motores de inducción de baja tensión como carga predominante.
2. Exposición de los fundamentos teóricos de los métodos empleados en el análisis y obtención de las características de funcionamiento del motor de inducción de baja tensión.

### **I.1. Fundamentos del motor agregado**

---

Cuando la cantidad de motores de inducción es muy elevada, es difícil determinar el rendimiento en cada uno de ellos, debido al volumen de mediciones y cálculos a realizar, teniendo en cuenta que se realiza en el sitio y las condiciones de acceso a cada motor. En este caso el rendimiento individual no es significativo para una evaluación de la eficiencia de una planta, industria o entidad a que pertenece dicho motor. Teniendo en cuenta que las cargas se alimentan desde puntos comunes, existe la posibilidad de agrupar por barras o cargas específicas a grupos de motores [Pillay 1997] que sean sustituidos por uno equivalente y a partir de este, determinar el rendimiento y características de comportamiento de una barra o grupo, que en este caso es representativo para el objeto de investigación o estudio.

Considerando que entre el 60 y 80% de la carga total se compone de motores de inducción, tomar para el análisis de una barra de potencia una carga representada por un modelo de un motor de inducción, no traería errores significativos [Venikov 1988].

El cálculo de las características de comportamiento y la simulación de un grupo de motores de inducción para el estudio de un sistema, puede resultar tedioso y consumir mucho tiempo. Para reducir el tiempo de computación se usa la representación de grupos de motores en uno o más motores agregados [Aree 2002], [Pillay 1995]. La precisión de los resultados obtenidos por el motor agregado depende en parte de las consideraciones realizadas para obtener el modelo y la variedad de métodos existentes.

### **I.1.1. Métodos para obtener el modelo agregado**

*De forma general existen dos métodos para obtener el modelo agregado a partir de un grupo de motores de inducción conectados a una barra común: el **primer método** parte del conocimiento de los parámetros del modelo de circuito equivalente escogido y en base a ello, por equivalencia de impedancias en paralelo, [Pillay 1995], [Pillay 1997], [Pedra 2005] se llega a la del motor agregado. Los puntos característicos a tomar en consideración para obtener los parámetros del circuito pueden ser: nominal, máximo, de arranque y/o combinación de estos, en dependencia de la finalidad que se persiga con el motor agregado. Este primer método presenta el inconveniente de la disponibilidad de los datos, del modelo de circuito escogido y de los motores individuales que formarían el motor equivalente. Una variante de esta vía sería disponer de los datos nominales, catálogos o de alguna metodología para determinar los parámetros de cada motor y así obtener las impedancias equivalentes. El resultado final de este método son los parámetros del circuito equivalente escogidos para representar el motor agregado.*

El **segundo método** está basado en las consideraciones del funcionamiento en paralelo y similitudes de magnitudes sumatorias de los motores individuales [Kwok-Way 2006] a las del motor equivalente o agregado, partiendo de un balance de potencia. Con esto se suele determinar la corriente del estator en forma compleja, deslizamiento, par o momento y velocidad nominal, semejantes a los datos de catálogos de un motor de inducción trifásico de rotor en jaula, para el tipo escogido. Este método es apropiado para representar el efecto de motores de inducción conectados a una barra común de un sistema eléctrico de potencia. La información esencial producida es la ofrecida por los catálogos referidos a la base de datos (Torque de arranque máximo y nominal, corriente de arranque y nominal, etc.), la cual no es obtenida por otros métodos. Este método propuesto puede reflejar exactitud en el estudio de un sistema de potencia.



Existen otras técnicas [Rogers 1984] para derivar un modelo de carga equivalente que represente los estados estacionarios y dinámicos de un sistema constituido por motores de inducción y carga de impedancia constante. Los parámetros de los motores son calculados por los datos nominales y junto con los datos de la carga se incorporan a una carga equivalente. La inercia y el deslizamiento se escogen para minimizar el error entre la respuesta transitoria del sistema y su equivalente por simulación.

### **I.1.2. Modelo de circuito escogido para representar el motor agregado o equivalente**

Durante el análisis de las literaturas, la mayoría de los investigadores se inclinan por el uso del circuito equivalente en "T", obtenido sobre la base de las ecuaciones de Park-Gorev, sin considerar las variaciones de las magnitudes con el tiempo y sin la inclusión de la resistencia ficticia de la rama de magnetización [Pillay 1995], [Kwok-Way 2006], [Pedra 2005]. Existen alternativas para seleccionar el modelo, en dependencia de la finalidad principal de la investigación, por ejemplo: cuando se trata del análisis para un régimen con deslizamiento cercano al nominal se puede utilizar el modelo de simple jaula, y cuando se quiere investigar el proceso durante el arranque se puede elegir el modelo representativo de doble jaula [Pedra 2005], que considera el efecto de desplazamiento de corriente, fundamentalmente en el circuito del rotor. Este último se complica con la obtención de los parámetros de cada motor por separado, considerándolo de doble jaula, que aunque existen procedimientos no están disponibles o al alcance de todos.

Algunos investigadores plantean que el modelo del motor de simple jaula no es el adecuado para representar al motor agregado en régimen dinámico [Pedra 2005], sino que el modelo del motor agregado debe realizarse en base al de un motor de doble jaula. Pedra, presenta cuatro vías para obtener los parámetros del modelo de motor agregado y realiza un grupo de ensayos o simulaciones vinculando a varios motores con diferentes números en el agregado. Plantea que el máximo error se encuentra en puntos cercanos al máximo par desarrollado y realiza una comparación de los diferentes métodos, basados en la diferencia del par de arranque entre motor agregado obtenido y uno real de esa potencia.

Pillay, propone un modelo de agregación de un grupo de motores para el estudio de un sistema eléctrico de potencia [Pillay 1997]. El desarrollo del método de agregación está basado en la variación realizada al circuito equivalente tipo transformador del motor de inducción de rotor en

simple jaula. Se determina el criterio de agrupamiento, clasificando motores homogéneos dentro de los diferentes grupos, la inercia y la constante de tiempo con circuito abierto se usan para clasificar estos.

La validación de este trabajo se realiza comparando los resultados obtenidos del motor agregado con la suma de los motores individuales. La potencia de salida del motor agregado es igual a la potencia total desarrollada por los motores individuales [Pillay 1995], [Kwok-Way 2006], [Pedra 2005]. Este es el criterio básico para el análisis de la carga equivalente con motores de inducción a partir del modelo de motor agregado.

De forma general, para representar el motor agregado, es utilizado ampliamente el circuito equivalente en “T” con rama de magnetización en paralelo, aunque se puede obtener su equivalencia en serie, sin considerar las variaciones de los parámetros del mismo y siempre en régimen nominal, nunca se actualizan de acuerdo a las variaciones que pueden sufrir a causa de las condiciones reales, tales como: incorrecto rebobinado o reparación deficiente [Bonnett 2005], de forma general.

Teniendo en cuenta que existen expresiones empíricas para considerar el efecto pelicular [Akbaba 1992], [Cathey 2003], [Costa Montiel 2004], [Romero 2007], se pueden aprovechar estas y representar para el régimen de arranque el máximo de las impedancias afectadas. Tampoco se ha considerado que puedan existir desbalances de tensión [Eguiluz 2007], [Gómez 2006] en las barras y realizar un análisis basado en un circuito equivalente que represente este efecto.

### **I.1.3. Modelo matemático empleado**

Se conoce de investigadores que en dependencia de los objetivos de este modelo, las ecuaciones pueden ser dinámicas o estáticas [Aree 2002]. La mayoría de los autores coinciden con el uso de las ecuaciones para régimen estacionario y cuando se analiza el comportamiento dinámico, primeramente se determinan los parámetros del modelo estacionario, se calculan a partir de ellos los datos necesarios para el modelo dinámico [Franklin 1994] y aplicando las ecuaciones del motor en régimen dinámico se simula el motor, aunque en número reducido, algunos autores intentan aplicar la modelación dinámica en coordenadas trifásicas y en los ejes “dq” para obtener el modelo del motor agregado.

En los trabajos de Pillay, se transforma la impedancia serie del estator a una impedancia ficticia en paralelo con la rama de magnetización y del rotor, para obtener una equivalente en paralelo en el motor agregado y terminar transformando al modelo original [Pillay 1995].

Estos modelos matemáticos siempre consideran que las tensiones son simétricas y no existen deformaciones de la forma de onda. Tampoco consideran las variaciones de los parámetros del circuito con las condiciones actuales del motor (reparaciones, carga, etc.)

#### **I.1.4. Finalidad del modelo de motor agregado realizado**

Existen un conjunto de importantes aspectos que pueden ser analizados e investigados empleando el modelo agregado formado por un conjunto de motores de inducción o por cargas que en su mayoría sean motores asincrónicos. Aunque en la literatura siempre se analizan cargas puramente formadas por motores, en la carga compleja pueden también incluirse los motores sincrónicos y los diferentes tipos de dispositivos estáticos (hornos, equipos para la electrólisis, etc.), lo cual hace más complejo el problema en lo referente a la exactitud.

Dentro de las aplicaciones se tienen:

1. Análisis del flujo de carga, reduciendo considerablemente el número de nodos [Aree 2006], [Dizdarevic 2008].
2. Análisis de la carga dinámica en un nodo de carga [Andel 1976], [Brereton 1991], [Concordia 1982], donde los modelos tradicionales no reflejan con la exactitud requerida el proceso que tiene lugar en una carga de carácter asincrónica y se aprovecha el acabado del modelo dinámico del motor de inducción.
3. Reducción del número de motores para un análisis dinámico más simplificado en una industria o carga.
4. Utilización de un modelo representativo de una carga variable en función de la carga, se aprovecha la variación del deslizamiento, puede utilizarse el modelo estacionario o dinámico del motor.
5. Comparación de la efectividad con otros métodos de análisis de carga dinámica en los nodos existentes, análisis de la estabilidad y los procesos transitorios en un nodo de carga.
6. Influencia de la desviación de la tensión y frecuencia en la carga.

7. Análisis del proceso de autoarranque de la carga asincrónica alimentada por fuente de tensión conmensurables [Venikov 1988], de potencia infinita y análisis del proceso de detención de motores.
8. Pronóstico de comportamiento futuro de la carga o los parámetros del nodo, sin la necesidad de realizar pruebas dinámicas que pueden afectar el sistema.

Actualmente la carga de un sistema varía y puede ser no lineal, en Aree 2006, se modifica el flujo de carga convencional para incorporar el modelo no lineal del motor de inducción como carga. Los resultados muestran que la carga con motores tienen un significativo impacto en la convergencia de la potencia activa y reactiva durante el flujo de carga. El motor de inducción es representado por el circuito equivalente del motor de inducción de simple jaula. Este flujo de carga se realiza para el ejemplo de la IEEE de 30 nodos [Aree 2002], se sitúan motores de 25 hp en 26 barras.

En el presente trabajo, el modelo de la máquina múltiple o motor equivalente de un sistema eléctrico de potencia es extendido para incluir el modelo dinámico de la carga. El efecto del uso del modelo estático y dinámico para representar la carga de un sistema a potencia constante, se investiga a través del análisis de un modelo de pequeña señal. Los resultados obtenidos para nueve nodos de un sistema de potencia revelan diferencias en la forma del comportamiento del mismo, en dependencia del uso del modelo estático y dinámico de la carga escogida [Aree 2002], [Aree 2006].

En [Lem 1994] se presentan resultados experimentales para comparar la respuesta de una carga representada por un motor de inducción, en cuanto a la potencia activa y reactiva, sujeto a cambios en la magnitud de la tensión. Estas respuestas son obtenidas por un modelo de motor en régimen dinámico y partiendo de la simulación de una red por un gran motor de inducción, se confirma la necesidad de un modelo de quinto orden cuando el tamaño del motor se incrementa.

### **I.1.5. Criterios de agrupamientos**

La determinación del número de motores a emplear para formar el equivalente es una de las tareas principales para utilizar el modelo de motor agregado en cuestiones energéticas.

Dentro de los criterios para agregar motores de inducción se han tomado los siguientes:

- Igualdad de potencias nominales.

- Relación de potencias individuales a la del motor agregado, constituyendo un coeficiente de peso a la hora del análisis.
- Uso de función de la densidad de probabilidad, para el caso de aerogeneradores donde la potencia mecánica es variable, según una ley de probabilidad [Stephan 1994].
- Relación de momento de inercia [Pillay 1992], [Pillay 1995].
- Características de los mecanismos o cargas mecánicas accionadas.

Se pudieran mencionar algunos más, teniendo presente la igualdad de la tensión de alimentación.

Se han revelado diferentes criterios para definir la cantidad de motores [Pedra 2005] a emplear en el agregado, pero no existe un número recomendado, tampoco rango de potencia a considerar para la agregación. Pedra, investiga este aspecto sin tener en cuenta, que tengan alimentador común disponibles. En estos trabajos siempre se han obtenido agregados por datos nominales.

Dentro de las mediciones a realizar por barra o alimentador principal, no está la velocidad, la cual se necesita para establecer un algoritmo de cálculo de los nuevos parámetros del circuito equivalente correspondiente al motor agregado real, que se puede estimar a través del coeficiente de carga aproximado (obtenido por la relación entre corriente real y nominal o relación de potencia real y nominal), teniendo en cuenta que la misma varía hasta un 5% a plena carga, interpolando para la carga dada, o utilizando la velocidad estimada durante la realización del motor agregado nominal.

Para la industria del Níquel Ernesto Che Guevara, la planta de Preparación de Mineral se divide en tres secciones: Sección de Grúa Gantry, Sección de Secaderos y Sección de Molienda. El suministro a los consumidores de 0.48 kV se realiza a través de dos transformadores de 10.5/0.48 kV con una potencia individual de 1000 kVA.

Tabla I.1. Característica del sistema de alimentación a Secaderos.

Sección	Subestaciones			# barras		Motores por Barras	Máximo	Total
	10 kV	6 kV	0.48 kV	T1	T2			
Secaderos	1pπ	2pπ	5pπ - 3	3	1	5/6/6/6	6	23
	5pπ	3pπ	5pπ - 4	4	2	8/5/6/6/5/3	8	33
Total para las barras de 0.48 kV				22				110

De obtener el agregado real ajustado a los motores obsoletos o de bajo rendimiento, se plantea la sustitución por un agregado nuevo, lo cual sólo justifica la reserva de energía en esa barra y luego se procede a la sustitución individual.

## **I.2. Método del Circuito Equivalente para el análisis del motor agregado**

Este método se basa en el circuito equivalente de un motor de inducción en simple jaula con la rama de magnetización serie. El uso de este método para determinar las pérdidas, las características de funcionamiento y la eficiencia del motor agregado, radica en las posibilidades que ofrece el mismo de predecir su comportamiento para cualquier valor de carga cuando se conocen los valores de todas las impedancias [Boglietti 1993], [Cathey 2003], [Costa 2005], [De Almeida 2006], [IEEE Std. 112 1997], [Kueck 1996], [McPherson 1992], entre otros. Pero debemos tener en cuenta que los valores de las impedancias pueden variar mucho entre la condición de rotor estático y la condición de operación en vacío de la máquina. Esto se debe al efecto de barra profunda y a la saturación magnética. En este trabajo se partirá del análisis del comportamiento del motor agregado en el punto de funcionamiento en la zona lineal de la característica mecánica del mismo y por tanto desprecia el efecto de la saturación magnética y el efecto pelicular.

La ventaja del método del circuito equivalente consiste en la posibilidad de poder estimar la eficiencia del motor bajo condiciones de carga diferentes a las usadas durante las pruebas, lo cual es muy importante, especialmente en el caso de las industrias donde los motores pueden funcionar a diferentes regímenes de carga, esto es de gran significación para el motor agregado, el cual no existe

como elemento único físicamente, pero sí como representación de un grupo de motores de inducción.

La aplicación de este método al motor agregado tendrá semejantes resultados que para un motor individual.

El motor agregado será caracterizado por los mismos parámetros del circuito equivalente que para un motor de simple jaula y siempre se utilizará la conexión en estrella para el devanado del estator.

### **I.3. Estimado del grado de carga del motor agregado**

---

Un factor de suma importancia en el rendimiento de los motores es el factor de carga, debido a que el rendimiento de éstos varía con dicho factor. Para estimar el grado de carga del motor agregado, desde el punto de vista teórico, se pueden utilizar todos los métodos aplicables al motor de inducción ordinario [Enrique 2006], [Gómez 2006], [Hsu 1988], [Kueck 1996], [McCoy 1993], [Steele 2006], [Van 2002], desde una visión práctica sólo se dispondrá de mediciones eléctricas en los alimentadores principales y la velocidad será estimada, por tanto, se partirá como vía principal, la relación entre la potencia de entrada real y la nominal o en su lugar las relaciones de corriente real y nominal del motor agregado.

#### **I.3.1. Medición de la potencia de entrada**

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

$$P_{1ag} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{ag} \cdot \cos \phi_{ag} \quad (1.1)$$

donde:

$P_{1ag}$  = Potencia trifásica del motor agregado, medida en el alimentador principal, W.

$U$  = Valor efectivo de la tensión media aritmética medido entre línea y línea para las tres fases, en presencia de asimetría se opera a través de las tres fases por separado.

$I_{ag}$  = Valor efectivo medio de la corriente medida en las tres fases.

$f_{p_{ag}}$  = Factor de potencia del motor agregado en pu.

La potencia de entrada del motor agregado a carga nominal,  $P_{inag}$  se determina en base a los resultados obtenidos para el motor agregado nominal, a través de los parámetros nominales individuales de los motores que forman el equivalente.

$$P_{inag} = \frac{P_{2nag}}{\eta_{nag}} \quad (1.2)$$

$P_{2nag}$  = Potencia nominal de salida del motor agregado a carga nominal, W.

$\eta_{nag}$  = Eficiencia a plena carga del motor agregado.

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

$$k_c = \frac{P_{1ag}}{P_{1nag}} \cdot 100\% \quad (1.3)$$

#### **I.4. Modelación dinámica del motor de inducción agregado**

---

La dinámica de un proceso tiene lugar cuando se pasa de un régimen establecido a otro. Ellos surgen a raíz del cambio de tensiones en las redes eléctricas, de las resistencias de los devanados o de la carga y del momento exterior de rotación aplicado al árbol. Los procesos dinámicos pueden estar vinculados con las conmutaciones de explotación, así como con los cambios de emergencia de la tensión y de la resistencia, que se manifiestan durante los cortocircuitos en las redes eléctricas o en los devanados de la máquina. La teoría de los procesos dinámicos en la máquinas eléctricas es sumamente complicada, por ello aquí se consideran sólo los elementos mas importantes.

##### **I.4.1. Particularidades del régimen dinámico en el motor de inducción**

El análisis de los procesos dinámicos en las máquinas asincrónicas resulta más cómodo efectuándolo en forma de expresiones complejas resultantes con ayuda del sistema de ecuaciones de



las tensiones, escritas en los ejes (d - q), (Alfa – Beta) o en caso general, en el plano complejo que gira con una velocidad arbitraria. Este sistema, junto con las ecuaciones para las tensiones de secuencia cero, describen en forma exhaustiva (dentro de los límites de las suposiciones adoptadas) los procesos simétricos y no simétricos establecidos, así como los dinámicos en las máquinas asincrónicas y puede emplearse en lugar del sistema de ecuaciones para las tensiones de fase. Sin embargo, a diferencia del sistema de ecuaciones para las tensiones de fase, este sistema es mucho más sencillo por su estructura y resulta un conjunto de ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes constantes, lo que posibilita resolverlas mediante métodos analíticos y facilita sensiblemente su cálculo en máquinas digitales.

Es pertinente recordar que los coeficientes de las corrientes, en las ecuaciones de las tensiones en los ejes  $(\alpha, \beta, 0)$  ó  $(d, q, 0)$ , se pueden considerar constantes si se admite que se desprecien:

- 1) La saturación de las partes de acero del circuito magnético.
- 2) La existencia de ranuras y núcleos.
- 3) Las componentes armónicas espaciales superiores e inferiores del campo magnético.
- 4) Las componentes armónicas temporales superiores de las corrientes.
- 5) Las pérdidas magnéticas y auxiliares de las corrientes en torbellino en los conductores.
- 6) El cambio de la velocidad angular (o sea, con la condición  $\omega = \text{constante}$ ).

Antes de resolver el sistema de ecuaciones complejas de las tensiones, escritas en uno u otros ejes, es necesario transformar a los mismos, tanto las magnitudes de las fases, determinadas por las condiciones iniciales, como los valores que varían debido a la acción del proceso dinámico.

Según las funciones compleja de las corrientes halladas como resultado de la resolución y recurriendo a la transformación inversa, se determinan las corrientes de fases.

Al investigar el régimen dinámico donde la velocidad de variación de la frecuencia de rotación es conmensurable con la velocidad de cambio de las magnitudes eléctricas, es decir, con los procesos denominados electromecánicos, las ecuaciones complejas de las tensiones escritas en unos u otros ejes, deben examinarse conjuntamente con las ecuaciones del movimiento de rotor como se verá posteriormente.

Las ecuaciones del modelo dinámico del motor de inducción agregado se pueden observar en el Anexo 1.

#### **I.4.2. Sistema de ejes**

El devanado polifásico en general y el bifásico en particular crean una distribución de flujo en el entrehierro de la máquina, en el cual el lugar geométrico del extremo del vector que representa el flujo describe una circunferencia en el caso de que el sistema de corrientes que circula por este devanado esté equilibrado.

Si se tienen dos devanados desfasados entre sí a un ángulo igual a  $90^0$  y por ambos circulan unas corrientes sinusoidales de la misma frecuencia, pero que forman un sistema bifásico equilibrado, se puede ver fácilmente que se crea una distribución elíptica de flujo. Se han de encontrar las relaciones que ligarían a las corrientes en el caso de un devanado trifásico y en el de uno bifásico, para que ambos casos dieran la misma distribución de flujo.

## **1.5. Conclusiones del Capítulo I**

---

1. De forma general existen dos métodos para obtener el modelo agregado a partir de un grupo de motores de inducción conectado a una barra común, 1<sup>ro</sup> conociendo los parámetros de cada motor y 2<sup>do</sup> por balance de potencia.
2. El estudio de cargas de carácter asincrónica a través del modelo de motor agregado, se realiza por medio del circuito equivalente en “T” y está orientado, principalmente, a la determinación del comportamiento transitorios en nodos de potencias, pronóstico de funcionamiento, entre otros aspectos, sin considerar las variaciones que pueden sufrir a causa de las condiciones reales, tales como incorrecto rebobinado o reparación deficiente, la existencia de desbalance de tensión en las barras, etc.
3. Se han revelado diferentes criterios para definir acerca de la cantidad de motores a emplear en el agregado, no existe un número recomendado, tampoco rango de potencia a considerar para la agregación, en ocasiones se realizan sin la existencia de un alimentador común.

*Capítulo II:*  
*Modelo de Motor Agregado*

## **CAPÍTULO II. MODELO DE MOTOR AGREGADO**

---

Una industria, planta o lugar de interés puede ser representado por un número menor, pero más significativos, de motores de inducción equivalentes, lo cual permite realizar un estudio de carga no sólo en régimen estacionario, sino también dinámico, aprovechando las ecuaciones dinámicas de un motor de inducción, con la reducción de la cantidad de cargas a intervenir en el análisis.

Teniendo en cuenta que entre el 60 y 80% de la carga total se compone de motores de inducción, tomar para el análisis de una barra de potencia una carga representada por un modelo de un motor de inducción, no traería errores significativos.

El objetivo de este capítulo es ofrecer el procedimiento de obtención del modelo de motor agregado.

### **II.1. Modelo agregado y criterios para su integración**

---

Para reducir el tiempo de computación se usa la representación de grupos de motores en uno o más motores agregados. La precisión de los resultados obtenidos por el motor agregado depende en parte por las consideraciones realizadas para obtener el modelo y la variedad de métodos existentes.

En la literatura [Pillay 1997] se propone obtener el modelo del motor agregado por los datos nominales, esto representará un motor equivalente de la carga instalada, pero no de la carga real en funcionamiento.

#### **II.1.1. Supuestos para la derivación del método de obtención del modelo agregado**

Para la derivación del modelo de motor agregado se emplean supuestos [Kwok-Wai Louie. 2006] que permiten la obtención de nuevos métodos:

- 1) La potencia de entrada del motor agregado es igual a la suma de las potencias de entradas de los motores considerados.
- 2) La potencia electromagnética del motor agregado es igual a la suma de las potencias electromagnéticas de los motores considerados.
- 3) Las pérdidas en el devanado del rotor del motor agregado es igual a la suma de las pérdidas en los devanados de los rotores en los motores considerados.
- 4) La potencia de salida del motor agregado es igual a la suma de las potencias de salida de los motores considerados.

- 5) La energía cinética contenida en el motor agregado es igual al total de la energía cinética contenida en los motores considerados.
- 6) Los motores están operando bajo condiciones nominales de tensión y frecuencia.

### II.1.2. Derivación del modelo del motor agregado

Del supuesto 1, se observa que existe un balance de potencia activa y reactiva por separado para obtener la potencia aparente total.

$$\underline{S}_a = \sum_{i=1}^n \underline{S}_{ti} \quad (2.1)$$

$$\underline{S}_a = \sum_{k=0}^2 \left[ \left( I_a \angle \left( \alpha_a - k \cdot \frac{2\pi}{3} \right) \right)^* \cdot \left( V_a \angle \left( \gamma_a - k \cdot \frac{2\pi}{3} \right) \right) \right] \quad (2.2)$$

$$\underline{S}_{ti} = \sum_{k=0}^2 \left[ \left( I_{ni} \angle \left( \alpha_{ni} - k \cdot \frac{2\pi}{3} \right) \right)^* \cdot \left( V_{ni} \angle \left( \gamma_{ni} - k \cdot \frac{2\pi}{3} \right) \right) \right] \quad (2.3)$$

$\underline{S}_a$  y  $\underline{S}_{ti}$  son las potencias aparentes absorbidas por el motor agregado y la total de los motores considerados.

$V_a$  y  $V_{ni}$  son las magnitudes de tensión del motor agregado y de los motores considerados.

$I_a$  y  $I_{ni}$  son las magnitudes de corrientes del motor agregado y de los motores considerados.

$\alpha_a$ ,  $\alpha_{ni}$  y  $\gamma_a$ ,  $\gamma_{ni}$  son los ángulos de tensión y corriente del motor agregado y de los motores considerados y  $n$  es el número de motores considerados.

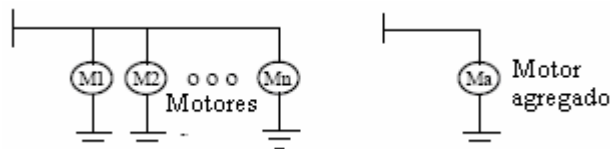


Fig. 2.1. Motores de inducción en una misma barra y su representación agregado.

Si se considera que la tensión de alimentación del motor agregado es la misma que la de la barra de tensión, la ecuación (2.4) se puede plantear a base de las corrientes como sigue:

$$\underline{I}_{ac} - j\underline{I}_{ar} = \sum_{i=1}^n \underline{I}_{nci} - j \sum_{i=1}^n \underline{I}_{nri} \quad (2.4)$$

Es decir, las componentes activas y reactivas del motor agregado son iguales a las sumas de los motores individuales, desarrollando se convierten en (2.5).

$$\begin{aligned} I_a \cdot \cos \varphi_a &= \sum_{i=1}^n I_{ni} \cos \varphi_{ni} \\ I_a \cdot \sin \varphi_a &= \sum_{i=1}^n I_{ni} \sin \varphi_{ni} \end{aligned} \quad (2.5)$$

donde:  $\varphi_a = \alpha - \gamma$  y  $\varphi_{ni} = \alpha_{ni} - \gamma_{ni}$  son los ángulos del factor de potencia del motor agregado y de los motores individuales.

A partir de las ecuaciones definidas en (2.5) la corriente de entrada del motor agregado es:

$$I_a = \sqrt{\left( \sum_{i=1}^n I_{ni} \cos \varphi_{ni} \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^n I_{ni} \sin \varphi_{ni} \right)^2} \quad (2.6)$$

El factor de potencia se calcula por la relación entre la primera ecuación definida en (2.6) y (2.7).

$$fp_a = \cos \varphi_a = \frac{\sum_{i=1}^n I_{ni} \cos \varphi_{ni}}{I_a} \quad (2.7)$$

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

$$3 \cdot \eta_a \cdot V_a \cdot I_a \cdot \cos \varphi_a = 3 \cdot \sum_{i=1}^n \eta_{ni} \cdot V_{ni} \cdot I_{ni} \cdot \cos \varphi_{ni} \quad (2.8)$$

donde  $\eta_a$  y  $\eta_{ni}$  son la eficiencia del motor agregado e individuales respectivamente.

Mientras la tensión en los terminales del motor agregado sea igual al de la barra de tensión de la ecuación (2.5) y (2.8) se obtiene que la eficiencia del motor agregado es:

$$\eta_a = \frac{\sum_{i=1}^n \eta_{ni} \cdot I_{ni} \cdot \cos \varphi_{ni}}{\sum_{i=1}^n I_{ni} \cdot \cos \varphi_{ni}} \quad (2.9)$$

El deslizamiento  $s_a$  del motor agregado y el deslizamiento de cada motor bajo operación a plena carga viene dado por:

$$s_a = \frac{\omega_0 - p\omega_{ma}}{\omega_0} \quad (2.10)$$

$$s_{ni} = \frac{\omega_0 - p_i\omega_{mi}}{\omega_0} \quad (2.11)$$

donde  $\omega_0$  es la frecuencia angular del sistema de potencia,  $\omega_{ma}$  la velocidad angular del rotor para el motor agregado,  $\omega_{mi}$  la velocidad angular del rotor para el motor,  $p$  y  $p_i$  el número de pares de polos del motor agregado y los individuales.

La potencia electromagnética del motor agregado es igual a la potencia electromagnética total de los motores considerados. También las pérdidas en el circuito del rotor de ambos tienen que ser iguales. Entonces manteniendo estas relaciones constantes:

$$\frac{\omega_o T_{ema}}{p} = \sum_{i=1}^n \frac{\omega_o T_{emi}}{p_i} \quad (2.12)$$

$$\frac{s_a \omega_o T_{ema}}{p} = \sum_{i=1}^n \frac{s_{ni} \omega_o T_{emi}}{p_i} \quad (2.13)$$

donde  $T_{ema}$  es el par electromagnético del motor agregado;  $\omega_o T_{ema}/p$  y  $s_a \omega_o T_{ema}/p$  potencia electromagnética y pérdidas en los devanados del rotor para el motor agregado respectivamente;  $T_{emi}$  es electromagnético de los motores considerados;  $\omega_o T_{emi}/p_i$  y  $s_{ni} \omega_o T_{emi}/p_i$  potencia



electromagnética y pérdidas en los devanados del rotor para los motores considerados respectivamente.

De las ecuaciones (2.12) y (2.13), el par electromagnético para el deslizamiento nominal coincide con el par nominal y puede ser establecido como:

$$T_{ema} = P \sum_{i=1}^n \frac{T_{emi}}{P_i} \quad (2.14)$$

$$s_a = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{s_{ni} T_{emi}}{P_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{T_{emi}}{P_i}} \quad (2.15)$$

Partiendo de la igualdad de la potencia mecánica del motor agregado con la suma de las potencias individuales de los motores individuales:

$$\frac{(1-s_a)P_{ema}}{\omega_a} = \sum_{i=1}^n \frac{(1-s_{ni})P_{emi}}{\omega_i} \quad (2.16)$$

$$\omega_a = \frac{(1-s_a)P_{ema}}{\sum_{i=1}^n \frac{(1-s_{ni})P_{emi}}{\omega_i}} \quad (2.17)$$

La velocidad sincrónica del motor agregado se toma partiendo de la frecuencia de la red de alimentación y la del rotor calculada:

$$\omega_{1a} = \frac{\omega_a}{1-s_a} \quad (2.18)$$

En las expresiones (2.16), (2.17) y (2.18)  $\omega_a$ ,  $\omega_i$ , representan la velocidad angular de rotación del rotor del motor agregado y de cada motor individual respectivamente y  $\omega_{1a}$  la velocidad angular de rotación sincrónica del motor agregado.

Tabla II.1. Correspondencia entre número de polos y velocidad.

$p$	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
$n_1 = \frac{60 * f}{p}$	3600	1800	1200	900	720
$\omega_1 = \frac{2 * \pi * n_1}{60}$	377.0	188.5	125.7	94.25	75.40

A partir de la velocidad sincrónica del motor agregado se toma el número de polos del mismo según la Tabla II.1.

Cuando el rotor está bloqueado, el deslizamiento es igual a la unidad, en este caso la potencia de entrada es igual a la suma de las pérdidas en los devanados. La potencia electromagnética del motor agregado y la de los motores considerados quedan como:

$$P_{bra} = \frac{\omega_o T_{bra}}{p} \quad (2.19)$$

$$P_{bri} = \frac{\omega_o T_{bri}}{P_i} \quad (2.20)$$

donde  $T_{bra}$  y  $T_{bri}$  representan el par a rotor bloqueado del motor agregado y de los motores considerados, respectivamente.

Partiendo que la potencia electromagnética del motor agregado es igual a la potencia total de los motores considerados, combinando las ecuaciones (2.16) y (2.20) se obtiene el par a rotor bloqueado del motor agregado:

$$T_{rba} = p \sum_{i=1}^n \frac{T_{rbi}}{P_i} \quad (2.21)$$

Similarmente, cuando el motor desarrolla su par máximo, la potencia electromagnética del motor agregado y de cada motor viene dada por:

$$P_{T_{ma}} = \frac{\omega_o T_{ma}}{p} \quad (2.22)$$

$$P_{T_{mi}} = \frac{\omega_o T_{mi}}{p_i} \quad (2.23)$$

donde  $T_{ma}$  es el par máximo (break-down) del motor agregado y  $T_{mi}$  es el par máximo de cada motor.

La potencia electromagnética del motor agregado es igual al total de los motores individuales cuando desarrollan el par máximo. De las ecuaciones (2.22) y (2.23) se obtiene:

$$T_{ma} = p \sum_{i=1}^n \frac{T_{mi}}{p_i} \quad (2.24)$$

$$\frac{s_{ma} \omega_o T_{ma}}{p} = \sum_{i=1}^n \frac{s_{mi} \omega_o T_{mi}}{p_i} \quad (2.25)$$

donde  $T_{ma}$  es el par electromagnético máximo del motor agregado;  $\omega_o T_{ma}/p$  y  $s_{ma} \omega_o T_{ma}/p$  potencia electromagnética y pérdidas en los devanados del rotor para el motor agregado respectivamente;  $T_{mi}$  es electromagnético de los motores considerados;  $\omega_o T_{mi}/p_i$  y  $s_{mi} \omega_o T_{mi}/p_i$  potencia electromagnética y pérdidas en los devanados del rotor para los motores considerados respectivamente.

De las ecuaciones (2.24) y (2.25) se obtiene el deslizamiento crítico correspondiente al par máximo como:

$$s_{ma} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{s_{mi} T_{mi}}{p_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{T_{mi}}{p_i}} \quad (2.26)$$

El deslizamiento crítico para cada motor individual puede ser obtenido partiendo de la fórmula del par relativa por Kloos.

$$\frac{T_{emi}}{T_{mi}} = \frac{2 + 2\alpha s_{mi}}{\frac{s_{ni}}{s_{mi}} + \frac{s_{mi}}{s_{ni}} + 2\alpha s_{mi}} \quad (2.27)$$

Haciendo  $\lambda = \frac{T_{mi}}{T_{emi}}$  (2.28)

$$s_m = \frac{\lambda s_n + s_n \sqrt{\lambda^2 - [1 - 2\alpha s_n (\lambda - 1)]}}{1 - 2\alpha s_n (\lambda - 1)} \quad (2.29)$$

donde:  $\alpha = \frac{R_1}{R_2} \approx 1$  (2.30)

La energía cinética contenida en el motor agregado y en cada uno de los motores seleccionados, operando bajo condiciones nominales vienen dado por:

$$w_k = \frac{J\omega_{ma}^2}{2} \quad (2.31)$$

$$w_{ki} = \frac{J_i\omega_{mi}^2}{2} \quad (2.32)$$

donde  $w_k$  es la energía cinética del motor agregado y  $J$  su momento de inercia,  $w_{ki}$  es la energía cinética del cada motor y  $J_i$  su momento de inercia.

La energía cinética del motor agregado tiene que ser igual al total de los motores considerados. Por las ecuaciones (2.31) y (2.32) el momento de inercia del rotor del motor agregado bajo condiciones nominales puede ser establecido como:

$$J = \frac{\sum_{i=1}^n J_i \left( \frac{1-s_{ni}}{p_i} \right)^2}{\left( \frac{1-s_a}{p} \right)^2} \quad (2.33)$$

Utilizando (2.33) se calcula la inercia de la carga agregada

$$J_c = \frac{\sum_{i=1}^n (J_i + J_{ci}) \left( \frac{1-s_{ni}}{p_i} \right)^2}{\left( \frac{1-s_a}{p} \right)^2} - J \quad (2.33.a)$$

donde  $J_{ci}$  se calcula de acuerdo a la inercia externa (de la carga) máxima normalizada para motores de categoría básica, dada por la norma IEC en el texto de Selección y aplicación de motores eléctricos, pág 67.

$$J_{ci} = 0.04 P_n^{0.9} p^{2.5} \quad (2.33.b)$$

donde  $P_n$  es la potencia nominal en kW y  $p$  pares de polos del motor que accionará la carga.

El par desarrollado por el motor agregado a deslizamiento nominal se puede calcular como:

$$T_a = \frac{3I_{ra}^2 R_r}{\omega_o s_a} \quad (2.34)$$

donde  $T_a$  es el par nominal;  $I_{ra}$  es la corriente por fase a través del devanado del rotor bajo condiciones nominales;  $R_r$  es la resistencia por fase del devanado del rotor;

$s_a$  es el deslizamiento nominal. Similarmente, cuando el rotor del motor agregado está bloqueado, el deslizamiento es la unidad y se puede expresar como:

$$T_{rba} = \frac{3I_{rba}^2 R_r}{\omega_o} \quad (2.35)$$

donde  $T_{rba}$  es el par a rotor bloqueado;  $I_{rba}$  es la corriente por los devanados del rotor cuando este está bloqueado. A través de las ecuaciones (2.34) y (2.35) se puede establecer una relación entre el par de arranque (locked-rotor) y el par nominal del motor agregado:

$$\frac{T_{rba}}{T_a} = \frac{I_{rba}^2}{I_{ra}^2} s_a \quad (2.36)$$

De la ecuación (2.36) la corriente por fase a través del devanado del rotor del motor agregado a deslizamiento nominal es:

$$I_{ra} = \sqrt{\frac{s_a T_a I_{rba}^2}{T_{rba}}} \quad (2.37)$$

El par desarrollado para el motor  $i$  a deslizamiento nominal puede ser calculado como:

$$T_{ni} = \frac{3I_{rni}^2 R_{ri}}{\omega_o s_{ni}} \quad (2.38)$$

donde  $I_{rni}$  es la corriente por fase a través del devanado del rotor bajo condiciones nominales;  $R_{ri}$  es la resistencia por fase resultante del devanado del rotor;  $s_{ni}$  es el deslizamiento nominal. De igual forma, cuando el rotor del motor  $i$ -ésimo es bloqueado, su deslizamiento es la unidad y el par viene dado por:

$$T_{rbi} = \frac{3I_{rbi}^2 R_{ri}}{\omega_o} \quad (2.39)$$

donde  $T_{rbi}$  es el par a rotor bloqueado;  $I_{rbi}$  es la corriente por fase a través del devanado del rotor bloqueado;  $R_{ri}$  es la resistencia por fase del devanado del rotor bloqueado. De las ecuaciones (2.38) y (2.39) se puede establecer una relación entre el par de arranque (locked-rotor) y el par nominal de cada motor:

$$\frac{T_{rbi}}{T_{ni}} = \frac{3I_{rbi}^2}{I_{rni}^2} s_{ni} \quad (2.40)$$

De la ecuación (2.40), la corriente por fase a través del devanado del rotor del motor i-ésimo a deslizamiento nominal es:

$$I_{rmi} = \sqrt{\frac{s_{ni} T_{ni} I_{rbi}^2}{T_{rbi}}} \quad (2.41)$$

La corriente por fase a través del devanado del rotor del motor agregado es igual a la corriente total por fase a través del devanado del rotor para los motores considerados.

$$I_{ra} = \sum_{i=1}^n I_{rmi} = \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{s_{ni} T_{ni} I_{rbi}^2}{T_{rbi}}} \quad (2.42)$$

Por las ecuaciones (2.38) y (2.41) se deriva una expresión para el motor agregado como:

$$I_{rba} = \sqrt{\frac{T_{rba}}{s_a T_a} \sum_{i=1}^n \sqrt{\frac{s_{ni} T_{ni} I_{rbi}^2}{T_{rbi}}}} \quad (2.43)$$

## II.2. Procesos dinámico en los nodos de carga de los sistemas eléctricos

---

Durante el funcionamiento normal de los sistemas de suministro eléctrico, los diferentes arranques y detenciones de los equipos tienen lugar los procesos transitorios normales.

Los procesos que tienen lugar constantemente en cualquier carga pueden ejercer una influencia desfavorable en el funcionamiento de los demás consumidores del sistema (por ejemplo, los impulsos de la carga que contiene motores potentes de los trenes de laminación pueden causar oscilaciones de la tensión y la frecuencia en el sistema, empeorando así la calidad de la energía entregada a los consumidores).

## II.3. Características estáticas y dinámicas de la carga con motores

---

La parte básica de la carga (comúnmente desde un 50 hasta 80%) la conforman los motores asincrónicos, cuyas propiedades se reflejan sustancialmente en el carácter de los procesos transitorios de todo el nodo del sistema [Stele 2006]. Para ellos se distinguen las *características estáticas*, o sea las dependencias entre la corriente  $|I|$  o el momento de rotación  $|M|$  del motor

respecto del deslizamiento lento  $|s|$  de su rotor, y las **características dinámicas** que son las dependencias entre la variación rápida del deslizamiento, tensión y su velocidad de variación (aceleración) respecto de la corriente. Así, para un motor asincrónico tenemos  $M_{est}=f(U,s); M_{din} = f(U, dU/dt, s, ds/dt)$ .

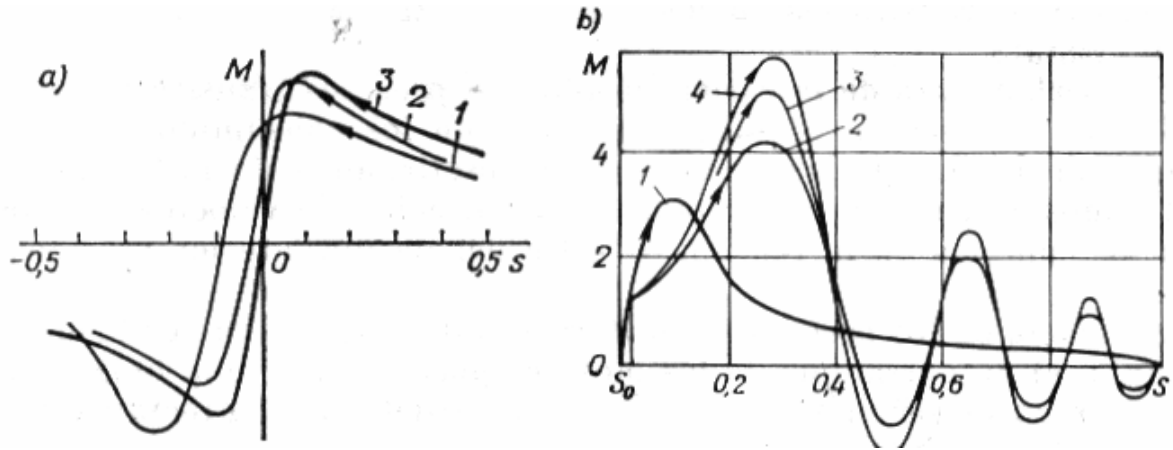


Fig. 2.2. Características estáticas y dinámicas del motor asincrónico: a), durante el arranque (embalamiento): 1, estática; 2, dinámica para una aceleración a pequeña; 3, dinámica cuando la aceleración es mayor que 2; b), durante el frenado: 1, estática; 2, 3, 4, dinámica durante la aceleración

En el estudio de una serie de procesos transitorios de los motores asincrónicos se acepta que el momento dinámico que aparece en cualquier régimen no estacionario tiene dos componentes:  $M_{din} = M_1 + M_2$ , donde  $M_1$  es la componente del momento determinada por los procesos transitorios relacionados con la circulación de corrientes transitorias por los devanados del motor;  $M_2$  es la componente del momento definida como  $M_2 = K_2 M_{est}$ .

Para los cálculos de los momentos se emplea el principio de superposición, el cual presupone el desprecio del carácter no lineal de una serie de procesos y parámetros. La práctica muestra que en la mayoría de los casos esto se justifica y el error obtenido no es muy grande.

El coeficiente que considera la diferencia entre la característica dinámica y la estática se determina por la fórmula



$$K_2 = 1 - \frac{1.8 \cdot 10^{-4}}{2T_e s_m} \left[ 1 - \sqrt{1 - \frac{4T_e s_m}{1.8 \cdot 10^{-4}} M_m} \right] \quad (2.44)$$

donde  $T_e$  es la constante de tiempo electromecánica;  $M_m$ , el momento máximo (crítico). Comúnmente  $K_2 = 0,7 \dots 1$ .

La naturaleza del momento dinámico en gran medida está predeterminada por el hecho de que durante una variación bastante rápida de la velocidad del motor su momento no tiene tiempo para alcanzar a tomar el valor correspondiente a la característica estática mecánica, o sea la característica estática se deforma.

Los procesos calculados para la representación simplificada y completa del motor asincrónico según las ecuaciones de Park—Górev se muestran comparativamente en la fig. 2.3, también muestra los procesos de arranque.

Para los cálculos según las ecuaciones completas (fig. 2.3, a) se obtienen las características dinámicas en las que las corrientes armónicas de la frecuencia básica en el estator y el rotor se representan mediante las envolventes, y las componentes aperiódicas (constantes), en forma de corrientes armónicas. En la fig. 2.3, b se muestra el transcurso del mismo proceso pero obtenido según las ecuaciones simplificadas. Los oscilogramas ilustran la influencia del paso de las ecuaciones completas a las simplificadas. De esta y otras numerosas investigaciones se puede deducir que para los cálculos aproximados el reemplazo de la característica dinámica por una cuasidinámica es permisible y conlleva a errores menores mientras mayor sea la potencia de la unidad, menor sea la relación  $r/x$  en el circuito del estator y menor sea la duración del proceso estudiado.

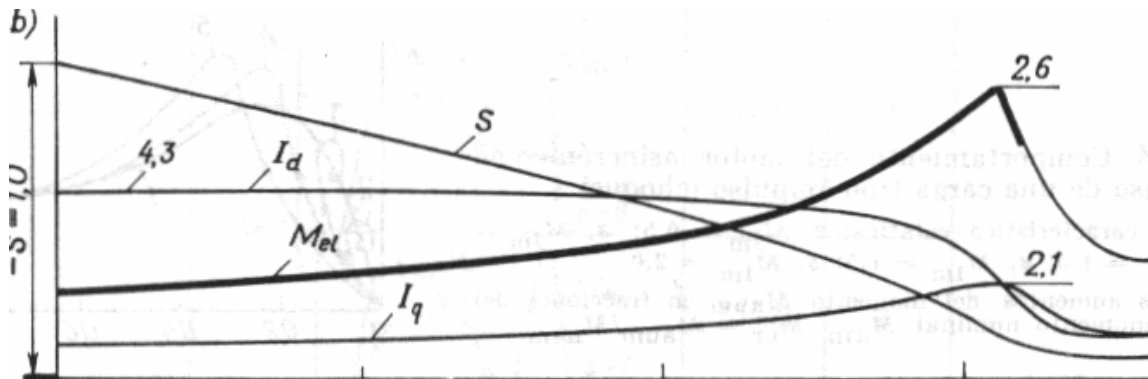
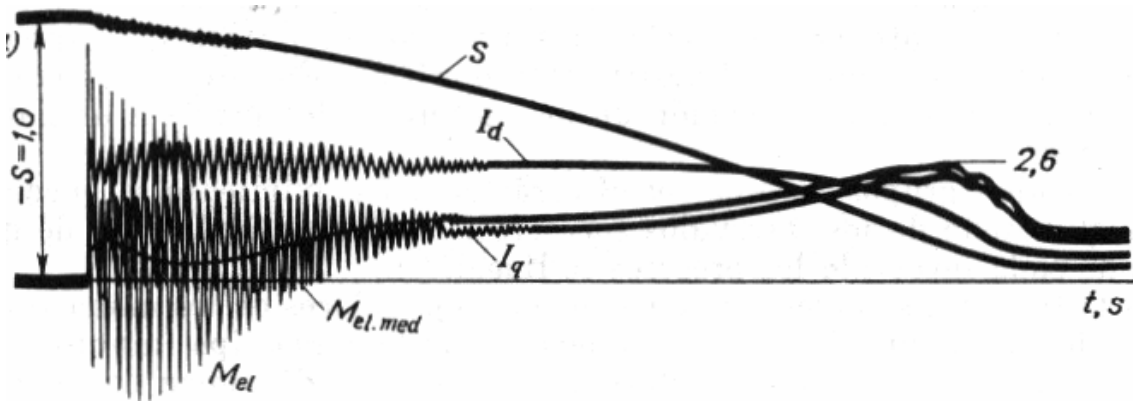


Fig. 2.3. Oscilogramas de cálculo del arranque de un motor asincrónico, obtenidos en un simulador analógico: a) cálculo según las ecuaciones completas cuando el momento se representa mediante la característica dinámica; b) cálculo según las ecuaciones simplificadas, representando el momento mediante la característica estática

### II.3.1. Alud de tensión (estabilidad estática de la carga, detención de los motores)

Los motores asincrónicos tienen reservas grandes de estabilidad y por eso garantizar la estabilidad estática de ciertos motores que forman parte de la carga no presenta dificultades. Si la reserva de estabilidad se caracteriza por la relación entre el momento de rotación máximo y el de operación, entonces el coeficiente de reserva está entre 1,5-1,7. Por consiguiente, inclusive la disminución significativa de la tensión en las barras de los motores no puede causarles la pérdida de la estabilidad.

Sin embargo, esto se refiere a un motor unitario o a un grupo de motores que se alimentan de unas barras de tensión cuyo valor no depende del régimen del motor.

Si un motor o un grupo de motores se alimentan de un generador o un grupo de generadores reemplazados por un generador equivalente de potencia conmensurable, entonces la tensión en las barras del motor depende del régimen del motor (de su deslizamiento) [Venikov V.A. 1988]. Las condiciones de la pérdida de la estabilidad (de tensión) del motor en ese caso son sustancialmente distintas. En ese caso las variaciones cualitativas de las condiciones de estabilidad están condicionadas por la variación de la cantidad de motores conectados al nodo de carga. En el planteamiento asumido del problema, todo el conjunto de motores que pertenecen a la carga deben analizarse como un todo único (*motor equivalente*).

### **II.3.2. Fórmulas de cálculo fundamentales**

Aproximadamente se representa toda la carga por un motor asincrónico equivalente. Además se emplean las características estáticas de los motores asincrónicos y, respectivamente, las ecuaciones simplificadas. Esto se justifica, primero, por el hecho de que las desviaciones iniciales que condicionan la aparición de la inestabilidad, según se propone, son pequeñas y segundo, porque cuando en el proceso de detención los motores adquieren una velocidad considerable, el carácter del proceso (más rápido, más lento) no tiene significación práctica.

Los motores que pertenecen a la carga, que en su mayor parte (90-95%) son asincrónicos, crean en los nodos de carga procesos electromecánicos complejos [Venikov V.A. 1988]. Dichos procesos están relacionados con las exigencias tecnológicas, oscilaciones mecánicas de la carga, particularidades del sistema cinemático del mecanismo y su accionamiento eléctrico, particularidades de los regímenes transitorios en ciertas unidades, variación de la tensión de la red de suministro, etc.

Cualquier variación de la velocidad del mecanismo (que frecuentemente es un sistema electromecánico de muchos elementos), va acompañada de cambios de la energía cinética. Esto es muy importante y provoca la variación del momento, potencia y velocidad angular del motor eléctrico. Además, la ecuación de movimiento del sistema, o la ecuación de los momentos (referida al rotor del motor), tiene la forma

$$M_{t,m} - M_r = J \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega^2}{2} \frac{dJ}{d\alpha} \quad (2.45)$$

donde  $M_{t,m}$  es el momento desarrollado por las fuerzas motrices;  $M_r$ , momento de las fuerzas de resistencia;  $J$ , momento de inercia del sistema, que, en general, es función del ángulo de desplazamiento de la parte que realiza el trabajo, o sea  $J = f(\alpha)$ ;  $\omega$ , velocidad angular del motor.

El segundo miembro de la ecuación (2.45) es el momento dinámico del sistema  $M_{din}$ . Cuando  $J = const$ , la ecuación (2.45) adquiere la forma

$$M_{t,m} \mp M_r = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.46)$$

Sobre el momento de los mecanismos ejercen influencia las particularidades del proceso tecnológico y el sistema electromecánico-cinemático del mecanismo, etc. Conforme a lo dicho, los mecanismos ejecutores se subdividen en clases.

A la **primera clase** pertenecen los mecanismos cuyo momento respecto de la velocidad prácticamente no varía:  $M_r = const$ . Como ejemplos pueden servir los mecanismos de los elevadores, transporte de la cabina y puente de una grúa puente, elevador para pasajeros, bandas transportadoras, transportador de rodillo, elevador con correa niveladora en las minas y otros mecanismos.

Los mecanismos de la **segunda clase** se caracterizan por el hecho de que su momento es función de la velocidad. Esta dependencia puede ser expresada por la fórmula

$$M_r = M_o + (M_{r,nom} - M_o) \left( \frac{\omega}{\omega_{nom}} \right)^n \quad (2.47)$$

donde  $M_o$  es el momento de marcha en vacío;  $M_{r,nom}$ , momento de resistencia para una carga nominal;  $\omega$  velocidad angular del motor;  $\omega_{nom}$  velocidad angular nominal;  $n$ , índice que depende de la estructura del mecanismo;  $n = - (1 \dots 2)$  y puede tener valores fraccionarios o iguales a cero. Ejemplos de dichos mecanismos son el ventilador, el compresor, la hélice.

En los mecanismos de la **tercera clase** el momento depende del ángulo de desplazamiento del eje del motor:  $M_r = f(\omega)$ . A dichos mecanismos pertenecen los elevadores, equipos de presión, tracción, equipos de excavación.

A la **cuarta clase** pertenecen los mecanismos cuyo momento depende al mismo tiempo del ángulo de desplazamiento y de la velocidad. Estos son por ejemplo, las locomotoras eléctricas, los mecanismos de dirección.

La **quinta clase** se caracteriza por el hecho de que el momento del mecanismo depende del tiempo, variando de acuerdo a cierta ley. A esta clase pertenecen por ejemplo, la sierra, el mecanismo de perforación rotatoria.

Los accionamientos eléctricos durante el funcionamiento y, por consiguiente, los procesos transitorios condicionados por ellos, están relacionados con dos regímenes fundamentales:

- duradero, que varía lentamente (aquí aparecen los problemas de la estabilidad estática);
- de poca duración y de poca duración-repetido, que varía rápidamente (éstos crean la necesidad de resolver los problemas de la estabilidad dinámica).

Las características y particularidades de los motores se van a analizar en forma compleja, considerando tanto las propiedades del motor, como las del mecanismo instalado en su eje.

#### **II.4. Conclusiones capítulo II**

---

1. Se estima la velocidad del rotor del motor agregado en función del coeficiente de carga, lo cual difiere del tratamiento a velocidad nominal constante que se realiza de forma general por varios autores, ganando en la precisión de los resultados.
2. La metodología propuesta combina la utilización de un balance de potencia y la determinación de los parámetros del modelo circuital, para obtener un motor agregado caracterizado por sus principales datos nominales y de circuito equivalente considerando las pérdidas en la rama de magnetización y adicionales por separado.
3. El par electromagnético para determinados deslizamientos no siempre coinciden con la suma de pares individuales, debido a la posibilidad de agregar motores de diferentes números de pares de polos.

*Capítulo III:*  
*Resultados y discusiones*

## **CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

---

La investigación tiene lugar en las instalaciones de la planta de Secaderos de la Empresa Cmdte. Ernesto Che Guevara de Moa, donde las variables independientes no se manipularán, porque ya han sucedido, se recolectan datos a partir de mediciones en un momento, en un tiempo único, y su propósito es describirlas y analizar su incidencia e interrelación.

La determinación de cada motor agregado de acuerdo a los datos nominales por barras es la primera etapa en este trabajo, luego empleando las mediciones de las variables a utilizar, se obtendrá el motor adaptado a las condiciones reales, utilizando algoritmo genético como herramienta alternativa. Los objetivos específicos de este capítulo son los siguientes:

1. Determinar los motores agregados nominales de cada punto escogido según el esquema monolineal de la barra objeto de estudio.
2. Simular el comportamiento transitorio del motor agregado.

La Empresa Comdte. Ernesto Che Guevara está estructurada por plantas, talleres y otras instalaciones auxiliares.

La planta de Preparación de Mineral representa una de las de mayor peso para la empresa, tanto en el número como en las potencias referidas a motores de inducción, por ello se escoge para realizar un análisis más detallado y mostrar la efectividad del método propuesto, con posibilidades de extensión a la empresa de forma general.

La alimentación a esta planta se realiza a través de subestaciones reductoras, dentro de ellas se han seleccionado, para un análisis más profundo las barras 5TP4 y 5TP5.

### **III.1. Barras objeto de estudio 5TP4 y 5TP5**

---

Las características de estas barras se reflejan en la tabla III.1. a) y b). Para 5TP4 existen 9 barras auxiliares, alimentadas por dos transformadores y un total de 48 motores. En la barra 5TP5 existen 10 barras, 5 por cada transformador y un total de 60 motores. La cantidad de motores agregados coincidirá con el total de barras con alimentación común, en este caso 19 individuales y la



posibilidad de unión a 13 grupos, uniendo los secaderos y 4 grandes grupos, uno por cada transformador final.

Tabla III.1. a) Características de la barra 5TP4

Barra 5TP4										
Barras por transformadores	T1 - 3 barras			T2 - 6 barras						Total
Denominación real barras	BOSC <sub>-4</sub>	VESC <sub>-4</sub>	TR7A8A	TR 105	BOSC <sub>-5</sub>	VESC <sub>-5</sub>	TR 106	BOSC <sub>-6</sub>	VESC <sub>-6</sub>	9
Motor agregado por barras	M4	M5	M6	M2	M7	M8	M3	M10	M11	
Cantidad de Motores	6	4	6	6	6	4	6	6	4	48

Tabla III.1. b) Características de la barra 5TP5

Barra 5TP5											
Barras por transformadores	T1 - 5 barras					T2 - 5 barras					Total
Denominación real barras	BOSC <sub>-1</sub>	VESC <sub>-1</sub>	BOSC <sub>-2</sub>	VESC <sub>-2</sub>	2WP	TR78	BOSC <sub>-3</sub>	VESC <sub>-3</sub>	3WP1	1W11	10
Motor agregado por barras	M13	M14	M16	M17	M23	M22	M19	M20	M24	M25	
Cantidad de Motores	6	4	6	4	10	6	6	4	8	6	60

Los datos correspondientes a estas barras de potencia se organizan según muestra la tabla III.2 para ser utilizados en la obtención de los motores agregados nominales.

Tabla III.2. Datos nominales para la barra TR7A-8A

Barras	$P_n$ (kW)	$U_n$ (V)	$I_n$ (A)	$n_n$ (rev/min)	$\cos\phi$ (pu)	$\eta$ (pu)	$\frac{T_a}{T_n}$	$\frac{T_m}{T_n}$	$\frac{I_a}{I_n}$	$J$ (kg.m <sup>2</sup> )
<b>M1</b> <b>(TR7A-8A)</b>	4	440	7.8	1700	0.81	0.82	2	2	6	0.0184
	4	440	7.8	1700	0.81	0.82	2	2	6	0.0184
	4	440	7.8	1700	0.81	0.82	2	2	6	0.0184
	17	440	28.0	1764	0.87	0.89	1.4	2	7	0.0753
	160	440	254.0	1764	0.90	0.92	1	2	7	0.1560
	110	440	192.0	1764	0.81	0.93	1	2	7	1.4500

Cuando se hace referencia a los datos nominales, normalmente se interpreta como los datos de chapa: potencia nominal ( $P_n$ ), tensión nominal ( $U_n$ ), corriente nominal ( $I_n$ ), velocidad nominal ( $n_n$ ), factor de potencia ( $\cos\phi$ ), rendimiento ( $\eta$ ); se adicionan otros datos como son: la inercia del motor ( $J$ ), número de pares de polos ( $p$ ), coeficiente de corriente de arranque ( $I_a/I_n$ ), coeficiente del torque de arranque ( $T_a/T_n$ ), y coeficiente de sobrecarga ( $T_m/T_n$ ). Estos datos serán utilizados para obtener los motores agregados por cada barra.

### III.2. Composición de motores agregados

Se seleccionaron los puntos donde se desarrollarán las mediciones para formar los motores agregados, los cuales se corresponden con las barras secundarias, tabla III.1. La elaboración de los modelos de los motores agregados se llevó a cabo a partir de los datos nominales y de catálogos especializados.

El algoritmo para la obtención de los modelos agregados por barras, se realizó sobre la base de metodología de Motor Agregado [Pillay 1997], que aparece en el Capítulo II, implementada a través del software Matlab, bajo el principio del algoritmo de la figura 3.1, al cual se le introducen los valores nominales de un conjunto de motores ubicados en una misma barra y como resultado se obtienen los parámetros nominales del motor agregado resultante.

Este algoritmo se repite por cada barra y luego de obtener motores agregados se toman para formar otros agregados (agregados de agregados).

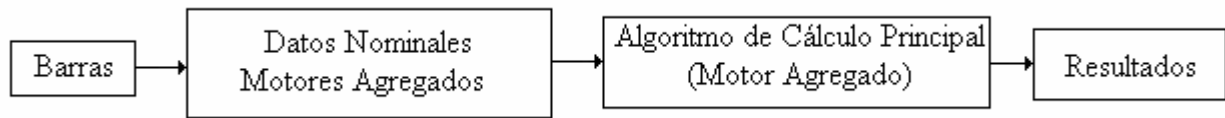


Figura 3.1. Modelo de obtención de motor agregado.

### III.2.1. Motores agregados en barras

La tabla III.3 muestra los parámetros resultantes de los motores agregados por barras, todos en conexión estrella (Y), frecuencia (60Hz) y nivel de tensión (440V), debido a que fueron obtenidos a partir de motores con alimentador común.

Tabla III.3. Principales datos nominales de los motores agregados escogidos

<i>M. Agg</i>	<i>Barras</i>	$P_n$ (kW)	$U_n$ (V)	$I_n$ (A)	$n_n$ (rev/min)	$\cos\phi$ (pu)	$\eta$ (pu)	$\frac{T_a}{T_n}$	$\frac{T_m}{T_n}$	$\frac{I_a}{I_n}$	$J$ (kg.m <sup>2</sup> )	$R_s$ (Ohm)
<b>M2</b>	<b>2WPPD22</b>	113	440	208.53	1760.22	0.841	0.843	1.377	2	7.163	0.5740	0.0261
<b>M3</b>	<b>AL105TR</b>	38	440	67.53	1770.61	0.842	0.8702	1.731	2	7.125	0.1923	0.1031
<b>M10</b>	<b>BOSEC4</b>	12.5	440	23.73	1712.41	0.848	0.8179	3.516	2	6.578	0.0747	0.4186
<b>M11</b>	<b>VESEC4</b>	193	440	322.99	1175.91	0.859	0.9104	1.200	2	6.900	5.1768	0.0164

*Nota: Las características del resto de los motores agregados obtenidos se encuentra en el anexo 5.*

En una primera etapa se obtuvieron los parámetros nominales de los 19 motores agregados correspondientes a sus respectivas barras y luego, aprovechando las ventajas que brindó el esquema monolineal, se realizó el mismo procedimiento para obtener un nuevo agregado por cada alimentador, a través de los datos nominales de los motores conectados directamente a barra y tomando los datos nominales de los motores agregados obtenidos inicialmente.

Los monolineales, figura 3.2 para la subestación 5TP4 y figura 3.3 para 5TP5, a partir de los cuales se agruparon los modelos de los motores agregados, brindan la posibilidad de una mejor orientación acerca de los cambios que experimentó todo el proceso de agrupación de los motores.

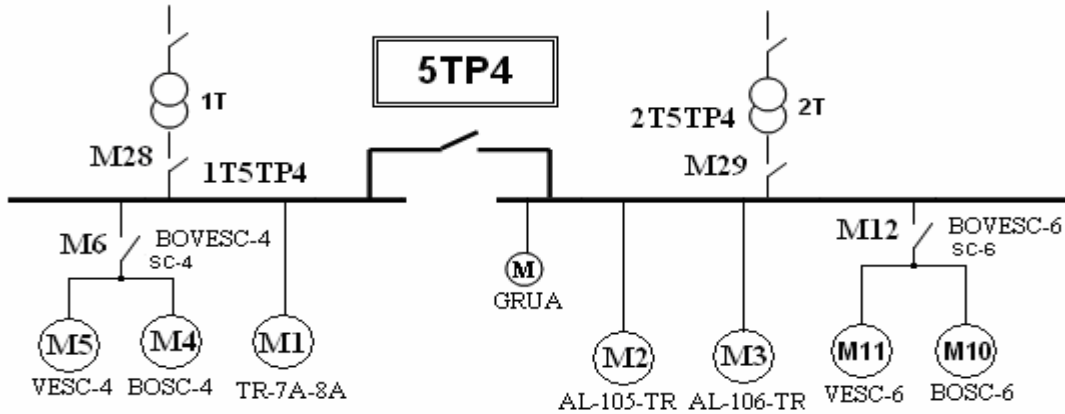


Figura 3.2. Monolineal de 5TP4 con modelos agregados por barras.

Se observa una simplificación en el número de cargas a analizar, ahora existen motores que se corresponden con la carga que existían por barras secundarias.

La posibilidad de obtener motores agregados no se limitan a las barras secundarias, se puede realizar a través de las barras principales, teniendo en cuenta que se mantiene la existencia de un alimentador común. Se puede demostrar que obtener un motor agregado tomando todos los datos de los motores individuales, resulta un proceso con gran volumen de cálculo y se obtiene el mismo resultado si se trabaja con la unión de otros agregados, simplificando el procedimiento.

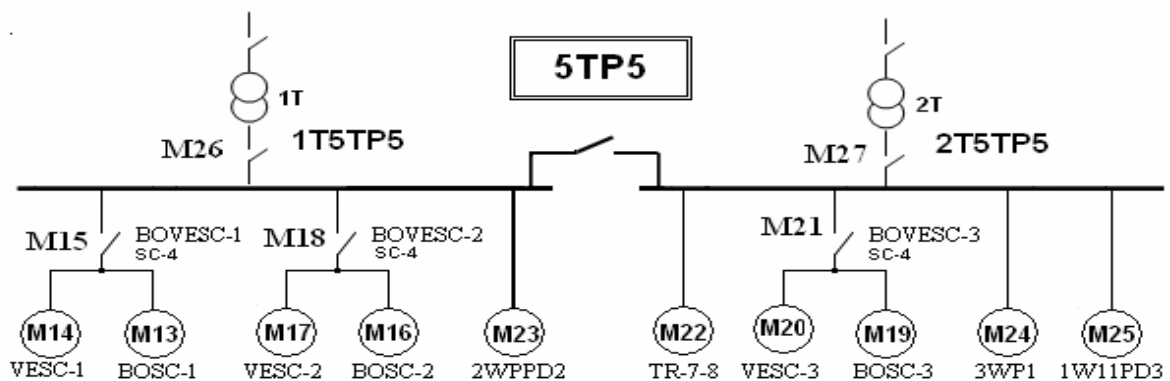


Figura 3.3. Monolineal de 5TP5 con modelos agregados por barras.

Para obtener los motores agregados de cada uno de los bloques de secaderos se unen las parejas correspondientes según las figuras 3.4 y 3.5.

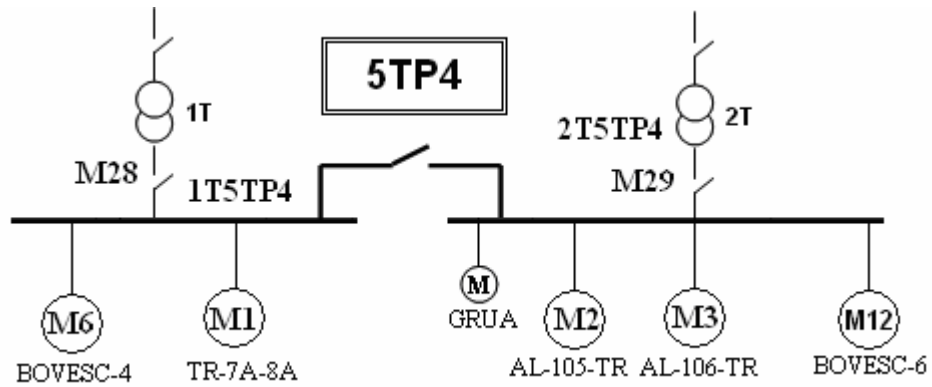


Figura 3.4. Monolineal de 5TP4 con modelos agregados por barras principales

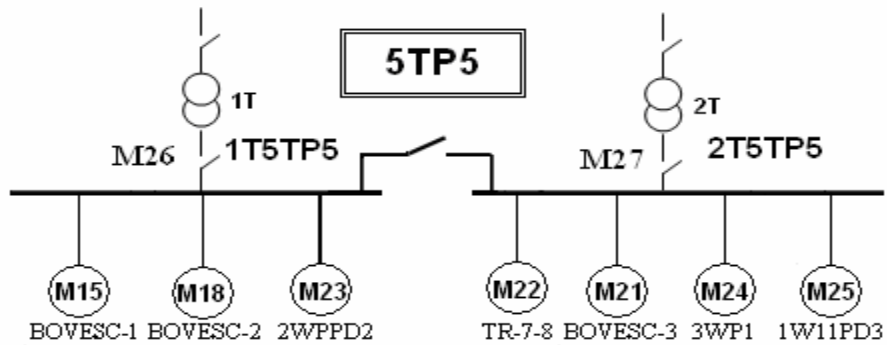


Figura 3.5. Monolineal de 5TP5 con modelos agregados por barras principales.

Para obtener los motores agregados de las barras (barra\_1 y barra\_2) en ambos monolineales se consideran los datos nominales conectados a las barras principales o los motores agregados resultantes de cada barra secundaria, resultando  $M26$ ,  $M27$ ,  $M28$  y  $M29$ . En la tabla III.4 se ubican los datos para estos motores agregados.

$$\begin{aligned}
 M26 &= [M15 \ M18 \ M23] & M27 &= [M21 \ M22 \ M24 \ M25] \\
 M28 &= [M1 \ M6] & M29 &= [M2 \ M3 \ M12]
 \end{aligned}$$

Tabla III.4. Datos nominales de los motores agregados principales.

<i>M. Agg</i>	<i>Barras</i>	$P_n$ (kW)	$U_n$ (V)	$I_n$ (A)	$n_n$ (rev/min)	$\cos\phi$ (pu)	$\eta$ (pu)	$\frac{T_a}{T_n}$	$\frac{T_m}{T_n}$	$\frac{l_a}{l_n}$	$J$ (kg.m <sup>2</sup> )	$R_s$ (Ohm)
M26	1T5TP5	550.5	440	943.9	1760.55	0.8557	0.8906	1.346	2	6.981	5.4535	0.0036
M27	2T5TP5	296.1	440	507.6	1757.11	0.8523	0.8903	1.443	2	6.769	2.7945	0.0078
M28	1T5TP4	504.5	440	842.3	1761.05	0.8607	0.9110	1.179	2	6.965	4.1172	0.0040
M29	2T5TP4	524.0	440	901.9	1760.55	0.8542	0.8903	1.352	2	6.988	5.3341	0.0038

Luego de la anterior simplificación se vuelven a reagrupar los motores agregados obtenidos, el monolineal y se modifica nuevamente para las subestaciones 5TP4 y 5TP5 según las figuras 3.6. y 3.7 respectivamente.

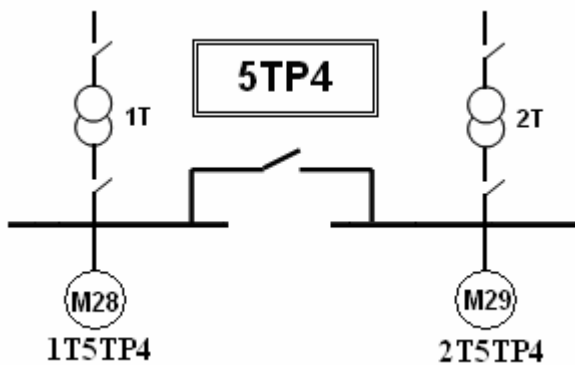


Figura 3.6. Monolineal de 5TP4 con modelos agregados por barras principales.

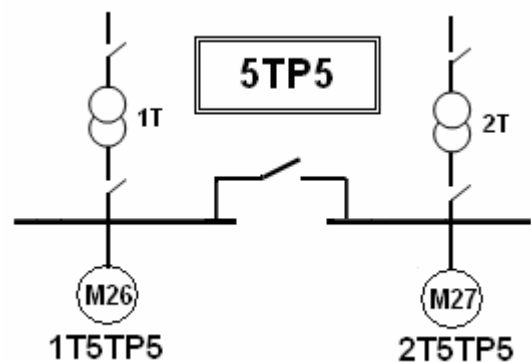


Figura 3.7. Monolineal de 5TP5 con modelos agregados por barras principales.

### III.2.2. Parámetros del circuito equivalente para los motores agregados

Una vez que se han obtenido los parámetros nominales de cada motor agregado se aplica la metodología [Pillay 1997], recogida en el Capítulo II y se obtienen los datos correspondientes al modelo de circuito equivalente en su configuración serie: resistencias del devanado del estator, rotor

y rama de magnetización ( $r_1, r_2, r_m$ ); y las reactancias del estator, rotor y rama de magnetización ( $x_1, x_2, x_m$ ).

Los parámetros nominales del circuito equivalente de los motores agregados se sitúan en la tabla III.5.

Tabla III.5. Parámetros del circuito equivalente de los motores agregados escogidos.

No	Barras	$r_1$ (Ohm)	$x_1$ (Ohm)	$r_2$ (Ohm)	$x_2$ (Ohm)	$r_m$ (Ohm)	$x_m$ (Ohm)
M2	2WPPD22	0.0261	0.1455	0.0306	0.2182	0.9012	3.0564
M3	AL105TR	0.1031	0.4251	0.0671	0.6376	1.9900	9.8846
M10	BOSEC4	0.4186	1.2019	0.5796	1.8029	7.3061	27.0234
M11	VESEC4	0.0164	0.0849	0.0163	0.1273	0.2656	2.4478
M12	VEBOSEC4	0.0152	0.0797	0.0166	0.1195	0.2837	2.2559
M29	2T5TP4	0.0038	0.0321	0.0066	0.0482	0.1620	0.8373

Nota: Las características del resto de los motores agregados obtenidos se encuentra en el anexo 6.

### III.3. Características principales del motor de inducción agregado

Teniendo en cuenta que cualquier juego de parámetros obtenidos en base a una herramienta matemática implementada, no constituyen por sí solo los datos correspondientes a un motor de inducción, se procede a la obtención de las características principales y comparar con otros pertenecientes a motores reales existentes.

La dependencia de  $P_1, n, Re, fp, I_1 = f(P_2)$  proporcionan las características de funcionamiento. Si se comparan con las recomendadas en literaturas referidas a la temática (Kostenko, Tomo II, figura 20.15, página 491) Máquinas Eléctricas, Editorial Mir, Moscú 1976, se observan similitudes en su dependencia y comportamiento, lo que sin duda es representativo de un motor de inducción, la figura 3.8 se realizó para todos los motores agregados obtenidos y muestran semejante comportamiento, en este caso se sitúa para el motor M29 el cual consta de 20 motores de inducción.

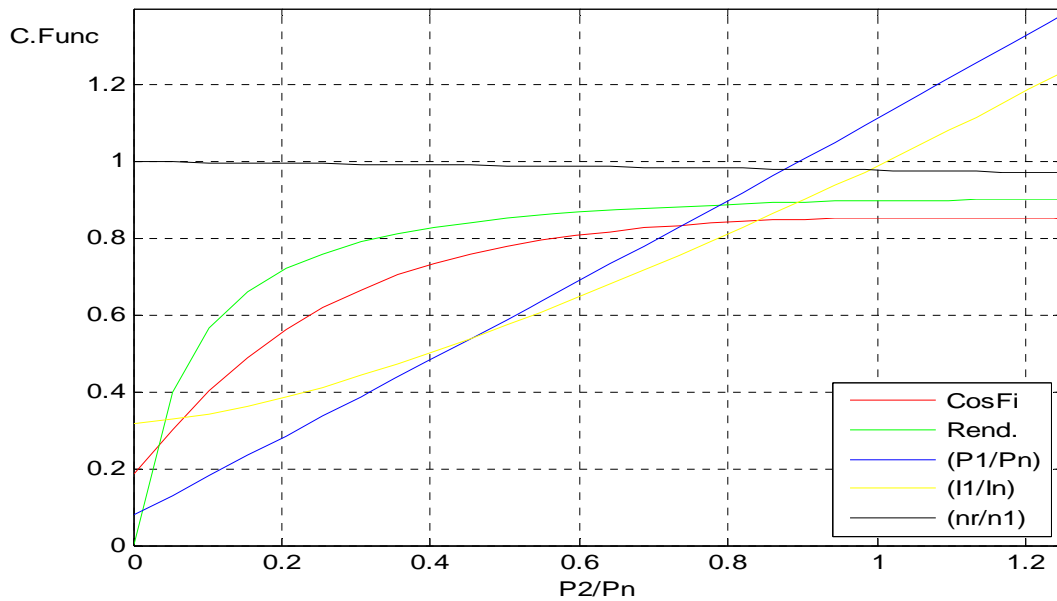


Figura 3.8. Características de funcionamiento del motor agregado.

Las características mecánicas ( $T = f(n)$ ) para los demás parámetros constantes: Para el motor nominal escogido se obtiene por dos vías (fórmula del par relativo o de Kloos), una donde solo se necesita el deslizamiento crítico y torque para régimen de máximo, figura 3.9, y otros a partir de los datos del circuito equivalente, este último procedimiento permite además extender al régimen de arranque considerando el efecto pelicular.

Como la curva par-velocidad de un motor de inducción refleja su comportamiento, es también deseable generar esta característica importante para el motor agregado. Para el  $i$ -ésimo motor la siguiente relación se mantiene aproximadamente constante (Kloos):

$$\frac{T_{emi}}{T_{mi}} = \frac{2(1 + \alpha s_m)}{\frac{s_m}{s} + \frac{s}{s_m} + 2\alpha s_m} \quad (3.1)$$

donde:  $T_{mi}$  es el momento crítico (máximo);  $s_m$ , es el deslizamiento crítico;  $\alpha$ , un coeficiente de corrección.



$$\text{Haciendo } \lambda = \frac{T_{mi}}{T_{emi}} \quad (3.2)$$

$$s_m = \frac{\lambda s_n + s_n \sqrt{\lambda^2 - [1 - 2\alpha s_n (\lambda - 1)]}}{1 - 2\alpha s_n (\lambda - 1)} \quad (3.3)$$

$$\text{donde: } \alpha = \frac{r_1}{r_2} \approx 1 \quad (3.4)$$

A través del circuito equivalente las características mecánicas se obtienen en base a los parámetros calculados partiendo de los datos nominales generados, empleando la expresión (3.5), como otra vía de comprobación de los resultados obtenidos, la cual se graficó en conjunto con la expresión (3.1).

$$T_{em} = \frac{3 U_{th}^2 \frac{r_2}{s}}{\omega_1 \left[ \left( r_{th} + \frac{r_2}{s} \right)^2 + (x_{th} + x_2)^2 \right]} \quad (3.5)$$

Cuando se quiere comprobar los parámetros en el arranque es preciso tener en cuenta el efecto pelicular, el cual puede ser complejo en su análisis o tenerlo en cuenta por expresiones aproximadas, en este trabajo aunque se enfatiza en el funcionamiento del motor agregado en un punto estacionario, cerca del nominal, se utilizó la dependencia lineal empírica dada por Jimmy Cathy en las expresiones (3.6) y (3.7).

$$r_{2p} = \left[ 0.5 + 0.5 \left( \frac{s}{s_m} \right)^{1/2} \right] r_2 \quad (3.6)$$

$$x_{2p} = \left[ 0.4 + 0.6 \left( \frac{s_m}{s} \right)^{1/2} \right] x_2 \quad (3.7)$$

Utilizando las expresiones anteriores se obtuvieron por las ecuaciones (3.1) las características mecánicas de cada motor, figura 3.9., y la del motor agregado por las ecuaciones (3.1) y (3.5) con la

resistencia y reactancia del rotor afectada por las ecuaciones (3.6) y (3.7), según se observa en la figura 3.10.

También se añadió a la figura 4.10 las características de la corriente normal y teniendo en cuenta el efecto pelicular, dada por (4.8).

$$I_2 = \frac{U_{th}}{\left( \left( r_{th} + \frac{r_2}{s} \right) + j(x_{th} + x_2) \right)} \quad (3.8)$$

En las curvas de la figura 3.10 se destacan claramente los puntos de la característica mecánica de un motor de inducción, obtenidos por tres vías, donde existe una gran similitud entre las curvas obtenidas a partir del circuito equivalente y por Kloos, guardando semejanzas con las de un motor de inducción real.

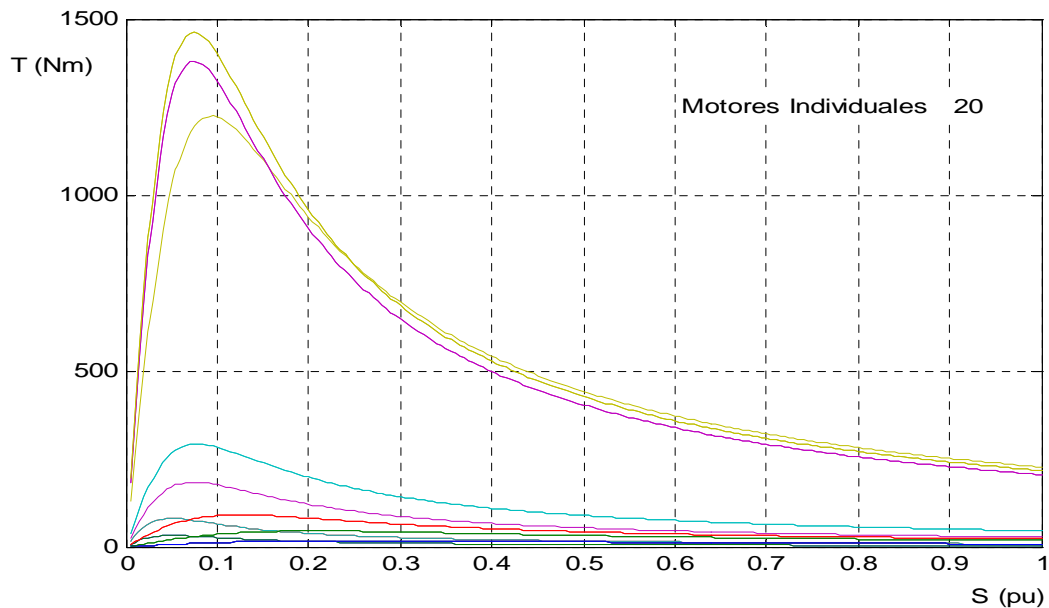


Figura 3.9. Motores individuales para formar el motor agregado M29 (20 motores).

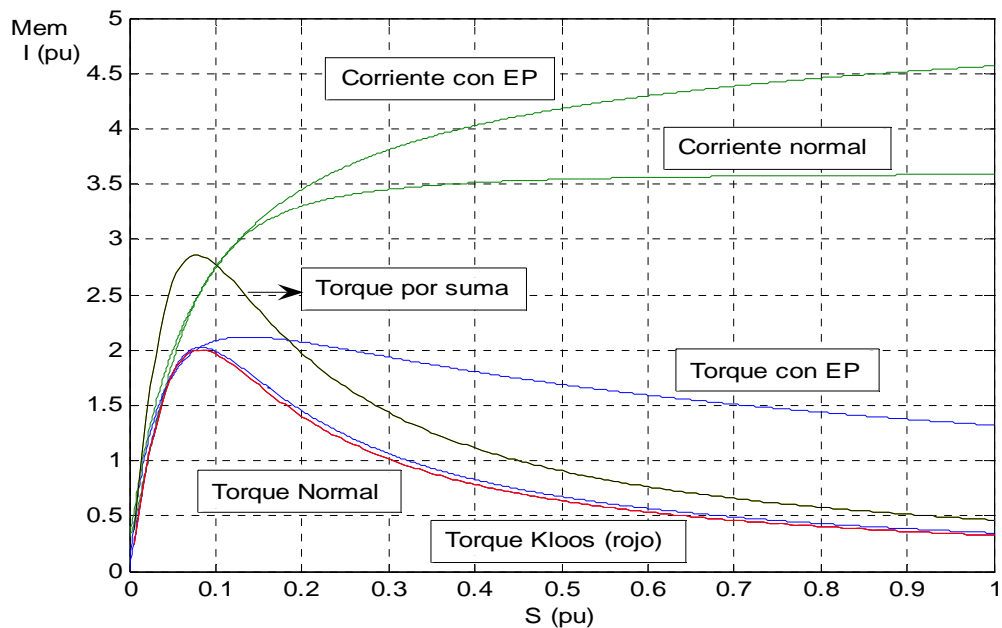


Figura 3.10. Características mecánicas por tres vías del Motor Agregado.

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

Para establecer el vínculo de estos parámetros y motores agregados nominales con los valores reales, en cada punto o alimentador común, coincidente con cada motor agregado obtenido, se hace necesario establecer las mediciones de las principales magnitudes que intervienen.

#### III.4. Mediciones puntuales

Existen diferentes criterios que se pueden tomar en cuenta a la hora de realizar mediciones para determinar el comportamiento de las cargas [Shi J. H., Renmu H. 2003] en régimen estacionario, en este caso fue necesario hacer un análisis de las cargas eléctricas de las diferentes subestaciones, el cual fue dirigido a las subestaciones 5TP-4 y 5TP-5.

Un resumen de los resultados de las mediciones efectuadas, en valores promedios por cada barra, se recogen en la tabla del Anexo 2.

Se dispone de las mediciones para las 24 h representativas del trabajo en las barras donde se encuentran los motores, se estructuran en forma de gráfico de cargas promedios y entonces se aplica la herramienta a cada nivel de carga.

Un estimado de la carga actual del motor agregado se realiza por el método de las potencias de entrada, a través de los parámetros nominales de cada motor se determina la potencia de entrada nominal y las mediciones en el alimentador común se toman como la potencia real.

El coeficiente de carga es la relación entre ambas potencias y se recoge en la tabla III.6 para cada motor agregado.

Tabla III.6. Coeficiente de carga, potencia nominal y real, velocidades por barras

Motor	Barra	$P_{In}$ (kW)	$P_{Ireal}$ (kW)	$kc$	$n_n$ (rev/min)	$n_r$ (rev/min)
M2	2WPPD22	133.58	34.28	0.26	1760.22	1795.39
M3	AL105TR	43.31	14.85	0.34	1770.61	1792.64
M12	BOVESEC6	226.79	132.63	0.58	1173.76	1185.61
M29	2T5TP4	587.15	295.32	0.50	1760.55	1782.28

En la tabla III.6,  $P_{In}$  representa la potencia de entrada nominal del motor agregado,  $P_{Ireal}$  la potencia real medida en el alimentador común de la barra,  $kc$  el coeficiente de carga,  $n_l$  la velocidad del campo,  $n_n$  la velocidad nominal y  $n_r$  la velocidad para el estado de carga actual del motor agregado.

Los datos resultantes de los parámetros reales, del circuito equivalente en T, se presentan en la tabla del Anexo 3, donde se incluye el valor de la resistencia,  $R_{sl}$ , que simula las pérdidas adicionales en el motor agregado analizado. Para obtener la resistencia que refleja estas pérdidas de acuerdo al rango de potencia, se toma de acuerdo a los valores reflejados en la tabla III.7 según la norma IEEE Std 112-1996, empleando la ecuación (3.9).

$$R_{sl} = k_{pot} \cdot r_2 \frac{(1 - s_n)}{s_n} \quad (3.9)$$

Donde  $K_{pot}$  es el coeficiente de potencia.

Tabla III.7. Valores asumidos de las pérdidas adicionales.

Rango de potencia		Pérdidas adicionales en porciento de la potencia de salida nominal
1-125 hp	1-90 kW	1.8%
126-500 hp	91-375 kW	1.5%
501-2499 hp	376-1850 kW	1.2%
2500 hp y mayores	1851 kW y mayores	0.9%

Fuente; IEEE Std 112-1996

En la tabla del Anexo 3, Parámetros del Circuito Equivalente de los Motores reales, se define que para estos valores de impedancias seleccionados se obtuvieron las características básicas de funcionamiento, ajustadas a los valores de corriente, potencia, factor de potencia y rendimiento, entre otras, a través del método del circuito equivalente con rama de magnetización serie, teniendo en cuenta que las pérdidas adicionales con las cargas están distribuidas de acuerdo a la potencia nominal, en los valores reflejados en la tabla III.7 según la norma IEEE Std 112-1996.

En la tabla del Anexo 2, se representan las características de funcionamiento promedio, para el grado de carga a la cual se estimó el funcionamiento del motor agregado correspondiente a cada barra.

### **III.5. Comportamiento dinámico del motor agregado real**

Para determinar el comportamiento dinámico real del motor agregado, se realiza la simulación [Matlab 2008] de uno de ellos y los individuales equivalentes.

Se establecieron determinados tipos de procesos dinámicos que pueden ocurrir en un nodo de carga, y luego analizar la respuesta de grupo de motores y su equivalente, comparando determinadas magnitudes, eléctricas y mecánicas.

La ventaja de analizar el proceso dinámico de la carga con el modelo de motor agregado, es que este responde a cambios individuales que pueden aparecer en los motores del nodo de carga y también ante cambios generales que afectan a todos, aumentando su generalización.

En los trabajos precedentes [Concordia, C. and Ihara, 1982], [Kwok-Way 2006], [Pedra 2005], se analiza la respuesta en el arranque, sin tener en cuenta que durante el funcionamiento posterior, pueden suceder otros procesos dinámicos que provocan variaciones significativas o no para el nodo de carga. Este trabajo soluciona con cierto nivel dicha inconveniente.

En la tabla III.8 se presentan los principales datos nominales de los motores agregados, del punto de carga escogido para el análisis a lo largo de este capítulo. Se tomó el motor M29 formado por los motores (M2, M3, M12), con el objetivo de analizar si las características de comportamiento de las diferentes magnitudes (corriente, potencia, factor de potencia, momento, etc.) del grupo guardan relación con la del agregado general.

Tabla III.8. Datos nominales de los motores escogidos,  $U_n = 440$  V.

No	Parámetros	UM	M1	M3	M12	M29
1	Potencia nominal	(kW)	113	38	205.5	524.0
2	Corriente nominal	(A)	208.53	67.53	346.72	901.9
3	Velocidad nominal	(rev/min)	1760.22	1770.61	1173.76	1760.55
4	Factor de potencia	(pu)	0.841	0.8420	0.858	0.8542
5	Rendimiento	(pu)	0.843	0.8702	0.9042	0.8903
6	Marr/Mn	(pu)	1.377	1.731	1.345	1.352
7	Mmáx/Mn	(pu)	2	2	2	2
8	Iarr/In	(pu)	7.163	7.125	6.935	6.988
9	Momento de inercia	(Kg.m <sup>2</sup> )	0.5740	0.1923	5.3548	5.3341

El esquema de simulación general consta de varias secciones, interconectadas entre si, que permiten representar el agregado general y cada motor integrante del mismo, realizado con el Simulink del Matlab.

A continuación se describen algunas de las secciones más importantes para el trabajo.

**Subsistema de carga:**

Este subsistema, figura 3.11, realiza los cambios en el momento del eje del motor agregado y los individuales. Este bloque recibe la retroalimentación de la velocidad del motor, que permite junto al exponente y el bloque **Fcn** expresar el momento de acuerdo a las leyes generales del accionamiento eléctrico, referente a tipo de carga. También permite añadir un momento adicional, controlado en tiempo, el cual genera una perturbación general en el eje del motor.

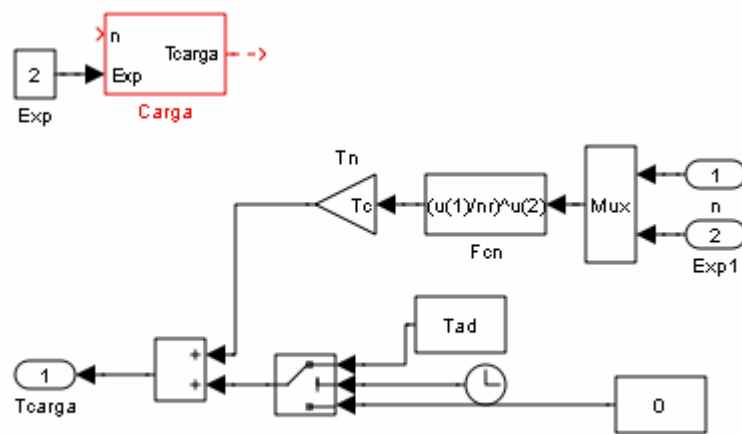


Figura 3.11. Subsistema de carga del motor y la estructura interna

Con este bloque, simulamos una perturbación en un tiempo determinado, adicionando carga al grupo de motores individuales y al motor agregado, además del cambio de carga, tanto lineal como cuadrática. De este bloque existen cuatro en el esquema general.

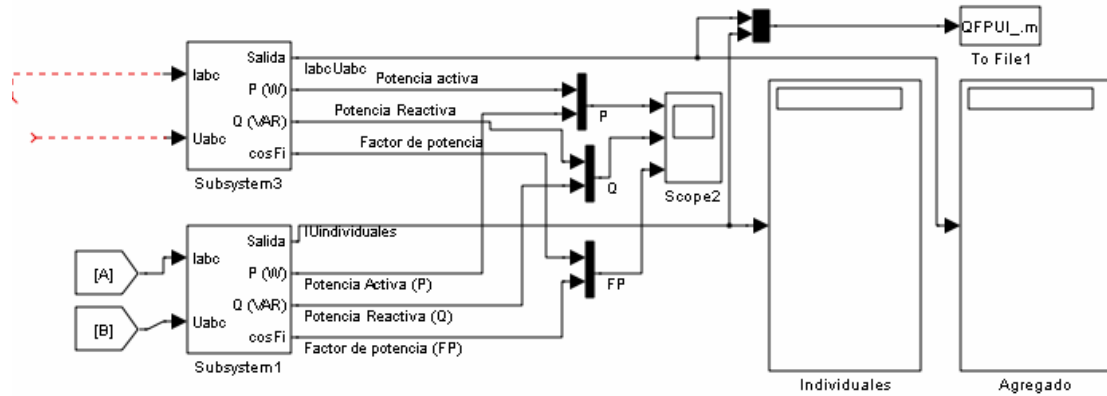


Fig.3.12. Bloque de mediciones eléctricas principales

El bloque de las mediciones eléctricas principales, figura 3.12, permite obtener los resultados de las magnitudes de potencias activas, reactivas, aparentes, corrientes por fases, tensiones por fases de la simulación para el grupo de motores (Subsystem1) y el motor agregado (Subsystem3). Estas mediciones se guardan en el bloque **To File1** (To workspace) para luego utilizando el algoritmo auxiliar *Agregado.m* realizar los gráficos y análisis de resultados.

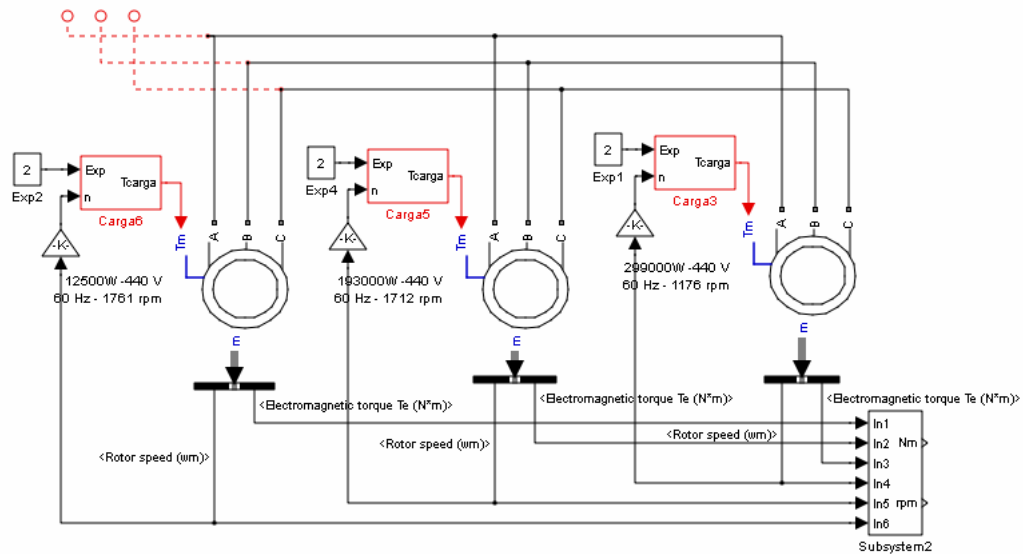


Fig.3.13. Representación de los motores individuales en paralelo



El bloque, representado en la figura 3.13, muestra la barra de potencia con tres motores (M2, M3, M12), los cuales forman el equivalente M29. Cada motor presenta el subsistema de carga incorporado, que le permite variar la misma en el eje, además del subsistema de medición.

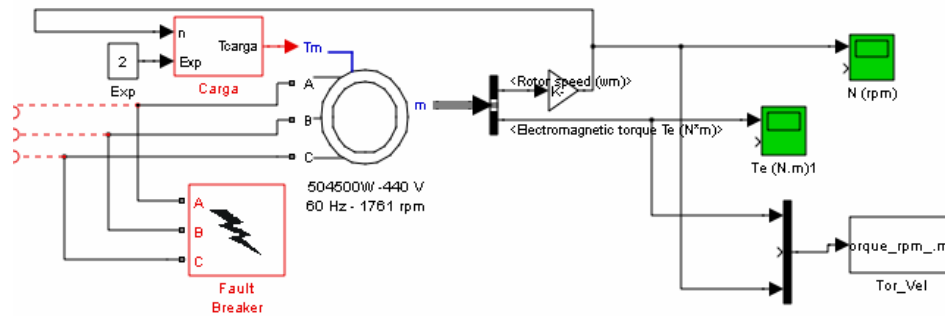


Fig.3.14 Representación del motor agregado

La figura 3.14, representa el motor agregado M29 con el sistema de carga incorporado y el bloque de medición de la velocidad y el torque electromagnético. También se observa un bloque para generar fallas (Fault Breaker) en la alimentación general del motor, un bloque semejante a este aparece en la barra del grupo de motores individuales (ver esquema general figura 3.15).

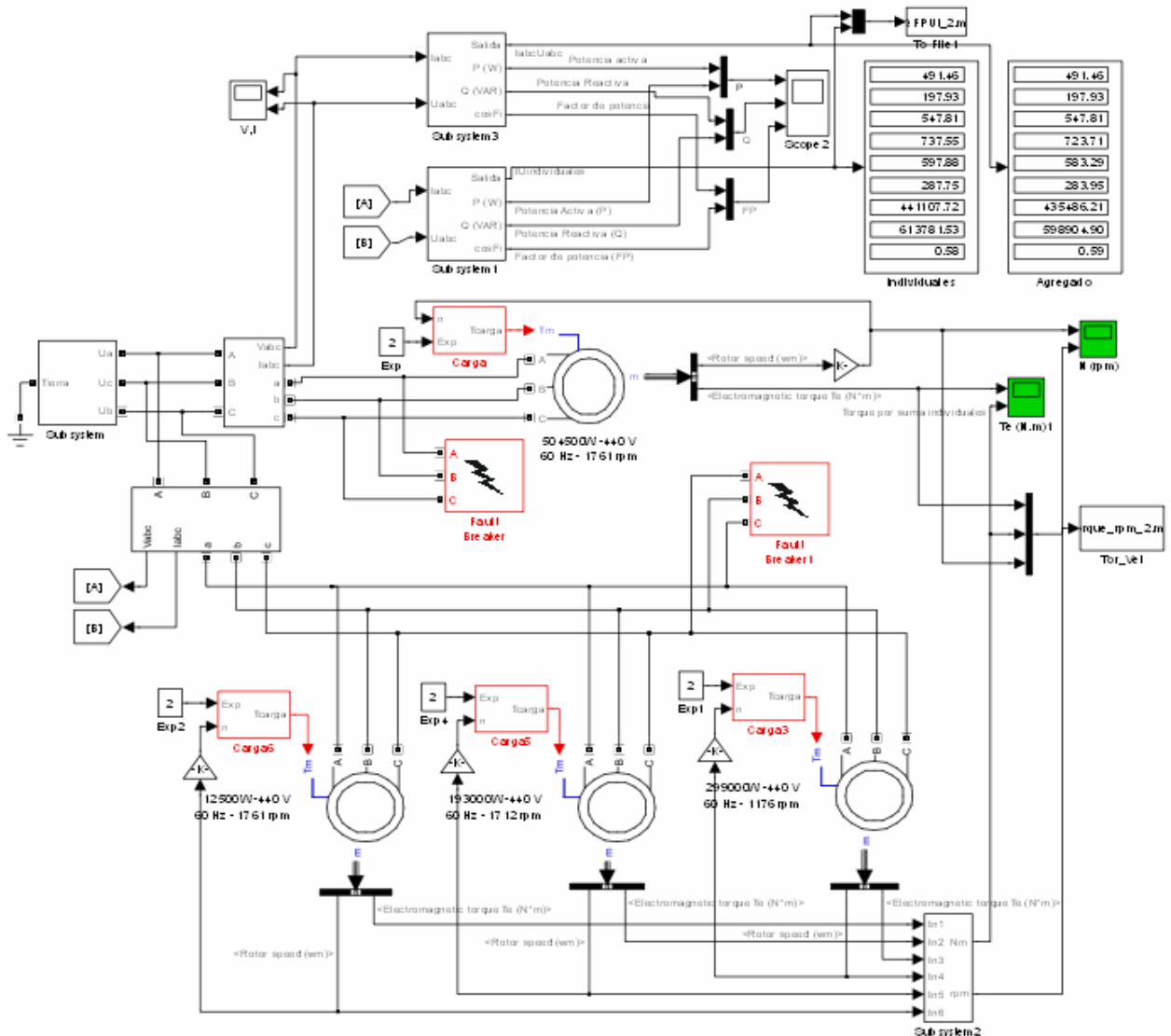


Fig.3.15. Esquema de simulación general.

La figura 3.15, muestra el esquema general de simulación, que incluye la fuente de alimentación y otros componentes no visto en los esquemas anteriores, en un mismo sistema aparece los motores individuales M2, M3 y M12 y el motor agregado M29, con los bloques de cargas, bloques de perturbaciones que introducen fallas de iguales magnitud y tiempo en la red de alimentación, además de los bloques de mediciones y de almacenamiento de datos.

El recuadro siguiente muestra el algoritmo empleado para generar las gráficas [Matlab 2008] a partir de los datos almacenados en los ficheros `****.mat`.

```

function Agregado
clear,clc
load Torque_rpm_6 % Cargar datos
load PQFPUI_6 % Datos de I, U, P, Q, fp

% PQ Nombre de la Matriz que guarda los parámetros

t = PQ(1,:); % Tiempo
Ia_ag = PQ(5,:); % Corriente fase A del agregado
Ib_ag = PQ(6,:); % Corriente fase B del agregado
Ic_ag = PQ(7,:); % Corriente fase C del agregado
Ua_ag = PQ(2,:); % Tensión fase A del agregado
Ub_ag = PQ(3,:); % Tensión fase B del agregado
Uc_ag = PQ(4,:); % Tensión fase C del agregado
P_ag = PQ(8,:); % Potencia activa del agregado
Q_ag = PQ(9,:); % Potencia Reactiva del agregado
FP_ag = PQ(10,:); % Factor de Potencia del agregado

Ia_in = PQ(14,:); % Corriente fase A del Individual
Ib_in = PQ(15,:); % Corriente fase B del Individual
Ic_in = PQ(16,:); % Corriente fase C del Individual
Ua_in = PQ(11,:); % Tensión fase A del Individual
Ub_in = PQ(12,:); % Tensión fase B del Individual
Uc_in = PQ(13,:); % Tensión fase C del Individual
P_in = PQ(17,:); % Potencia activa del Individual
Q_in = PQ(18,:); % Potencia Reactiva del Individual
FP_in = PQ(19,:); % Factor de Potencia del Individual

T_ag = TR(2,:); % Torque del agregado
T_in = TR(3,:); % Torque individual
n_ag = TR(4,:); % Velocidad del agregado

figure(2)
figure('Name','Potencia activa')
plot(t,P_ag/1000,t,P_in/1000),grid
xlabel('t(s)')
ylabel('P(kW)')
legend('P_ag','P_in')

De forma similar para el factor de potencia,
momentos, velocidad, corrientes.

```

### III.6 Resultados de las simulaciones del motor agregado y los grupos de motores

---

Con ayuda del esquema de simulación [Matlab, 2008], general y el archivo auxiliar del recuadro anterior se procedió a realizar varias perturbaciones, con el objetivo de comparar los resultados gráfica y analíticamente.

### III.6.1. Simulación del motor agregado y el grupo equivalente, bajo condiciones normales de operación, con cargas cuadráticas

Inicialmente se simuló el esquema con una carga cuadrática por ser la típica industrialmente. Los valores de momento para cada motor y el agregado son los siguientes:

$T_{M2} = 499.44 \text{ Nm}$ ;  $T_{M3} = 24.14 \text{ Nm}$ ;  $T_{I2} = 919.6 \text{ Nm}$ . Debido a que los motores M2 y M3, son de dos polos, y M12 es de 3 polos, el momento del agregado M29 se determina por la ecuación 2.14:

$$T_{M29} = 2 \left[ \frac{T_{M2} + T_{M3}}{2} + \frac{T_{M12}}{3} \right] = 1136.25 \text{ Nm};$$

El bloque de carga tiene la dependencia cuadrática de la velocidad

$$T_{carga} = \left( \frac{n}{n_n} \right)^2 Tc$$

La figura 3.16, se presenta el comportamiento del momento electromagnético del conjunto de motores individuales y el motor agregado, se puede observar que ambos se funden durante el funcionamiento. La tabla III.9 refleja los valores numéricos del valor medio y la desviación estándar de esta simulación, reflejando el mínimo de diferencia en los resultados.

Tabla III.9. Torque electromagnético del agregado y los individuales.

	Motor agregado (Nm)	Grupo de motores (Nm)
Valor medio	1109.89	1108.25
Desviación estándar	322.08	311.14

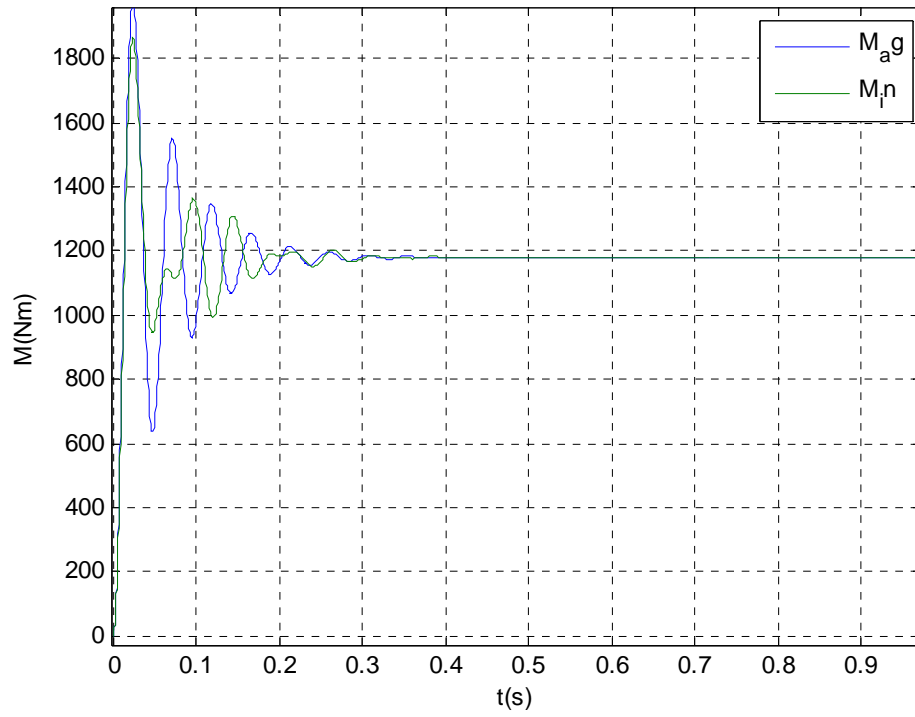


Fig. 3.16. Momento electromagnético de los motores individuales y el motor agregado

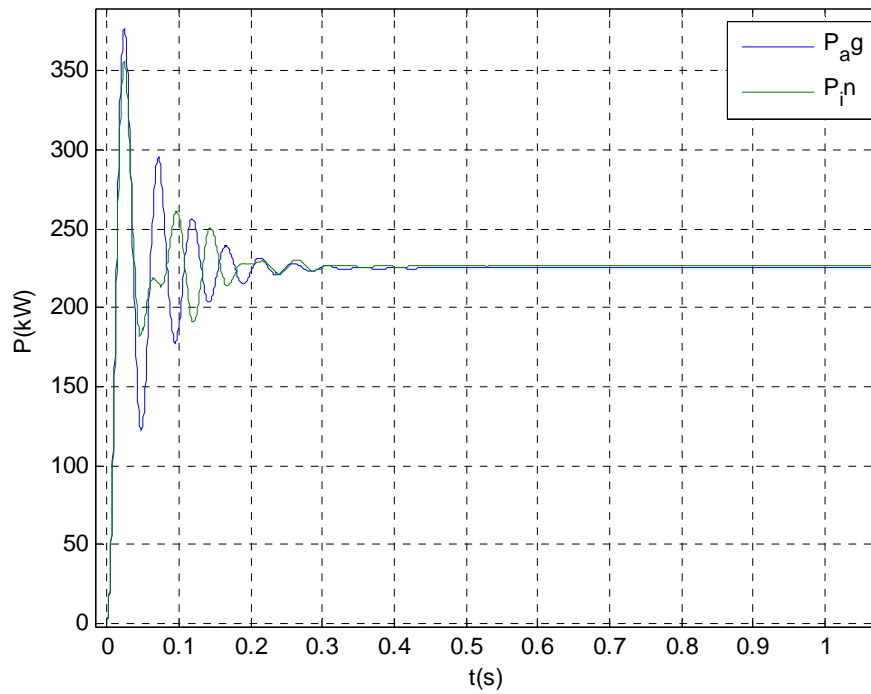


Fig. 3.17. Potencia activa del grupo de motores individuales y el motor agregado

La figura 3.17, muestra la dependencia de la potencia activa del conjunto de motores individuales y el motor agregado, mostrando un comportamiento similar al del momento. La tabla III.10 refleja el valor medio y la desviación estándar de esta simulación, reflejando poca de diferencia en los resultados.

Tabla III.10. Potencia activa del motor agregado y los individuales.

	Motor Agregado (kW)	Grupo de motores (kW)
Valor medio	211.85	212.79
Desviación estándar	60.84	58.84

De estos resultados se observa que el motor agregado, tiene un comportamiento semejante al grupo de motores, por tanto puede representar a este último.

### III.6.2. Incremento de la carga en el eje del motor agregado y sus equivalentes individuales

De forma general, se requiere cambiar el valor del momento exterior aplicado al eje en N.m., para realizar esta operación, hay que tener en cuenta que el motor agregado se ha obtenido en base a un balance de potencia y no de momento, aspecto relevante, pues pueden aparecer motores de diferentes números de pares de polos.

El momento equivalente del motor agregado viene dado por 2.14,  $T_{ag} = p \sum_{i=1}^n \frac{T_i}{p_i}$ , donde  $p$  es el número de pares de polos del motor agregado,  $p_i$  es el numero de pares de polos de cada motor individual.

La variación de la carga en el eje de un motor, no solo afecta a la potencia y momento que debe desarrollar el motor, también afecta a la corriente que demanda.

Para analizar si el motor agregado responde satisfactoriamente ante las variaciones de cargas en el eje del motor se ha simulado el comportamiento del mismo y su equivalente en barra por los individuales obteniéndose los siguientes resultados.

Se adiciona un momento igual a la mitad del valor anterior, para provocar una perturbación fuerte en el eje,  $T_{ad\_M2} = 244.72$  Nm;  $T_{ad\_M3} = 12.07$  Nm;  $T_{ad\_12} = 459.8$  Nm. El momento del agregado M29 se determina por la ecuación 2.14:

$$T_{ad\_M29} = 2 \left[ \frac{T_{ad\_M2} + T_{ad\_M3}}{2} + \frac{T_{ad\_M12}}{3} \right] = 563.32 \text{ Nm};$$

El bloque de carga tiene la dependencia cuadrática de la velocidad más el adicional

$$T_{carga} = \left( \frac{n}{n_n} \right)^2 T_c + T_{ad}$$

Esta perturbación ocurre a los 2 segundos

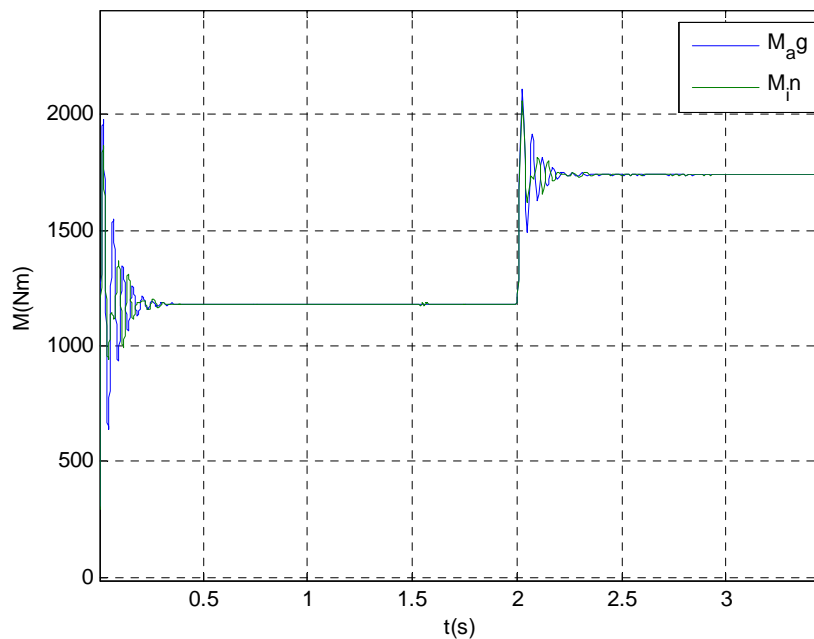


Fig. 3.18. Momento electromagnético del grupo de motores individuales y el motor agregado ante un incremento de la carga

La figura 3.18, se presenta el comportamiento del momento electromagnético del conjunto de motores individuales y el motor agregado, se puede observar que ambos responden ante la perturbación provocada a los 2 segundos después del arranque de manera simultánea estabilizándose a iguales valores, demostrándose el uso efectivo del motor agregado. La tabla III.11 refleja los

valores numéricos del valor medio y la desviación estándar de esta simulación, reflejando el mínimo de diferencia en los resultados.

Tabla III.11. Momento electromagnético del motor agregado y los individuales

	Torque electromagnético (Nm)	
	Motor agregado	Suma de motores individuales
Valor medio	1221.87	1220.10
Desviación estándar	419.60	410.84

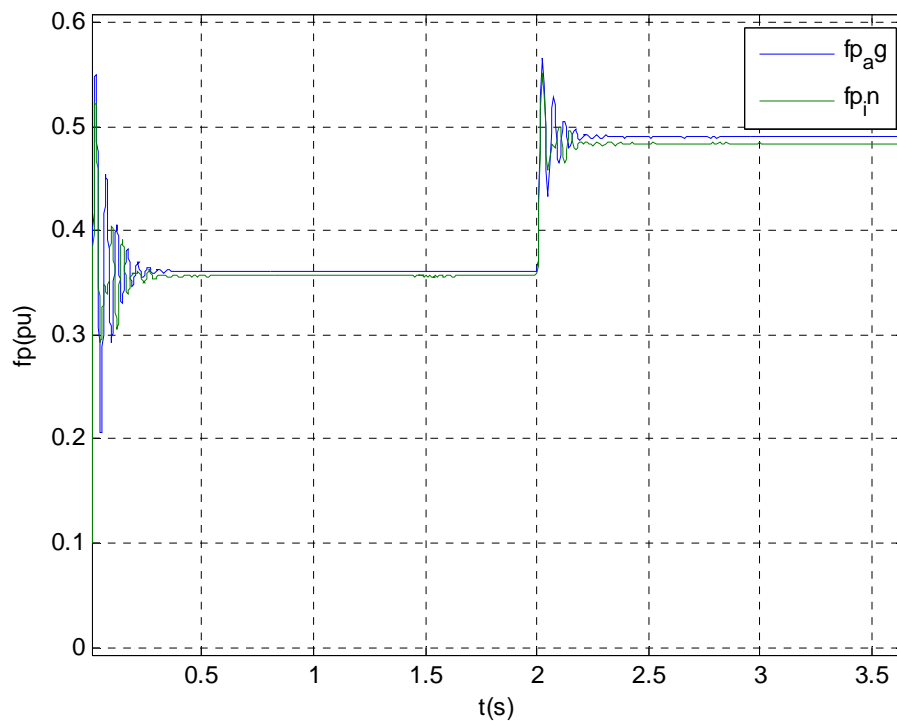


Fig. 3.19. Comportamiento del Factor de potencia del grupo de motores individuales y el motor agregado ante una variación en la carga.

La figura 3.19, presenta el comportamiento del factor de potencia del conjunto de motores individuales y el motor agregado, se puede observar que ambos responden ante la perturbación provocada a las 2 segundos después del arranque, reflejando el mínimo de diferencia en los resultados, corroborando el uso del motor agregado para este fin. La tabla III.12 refleja los valores numéricos del valor medio y la desviación estándar de esta simulación.



Tabla III.12. Factor de potencia del motor agregado y los individuales

	Factor de potencia	
	Agregado	Suma de motores individuales
Valor medio	0.37	0.36
Desviación estándar	0.12	0.11

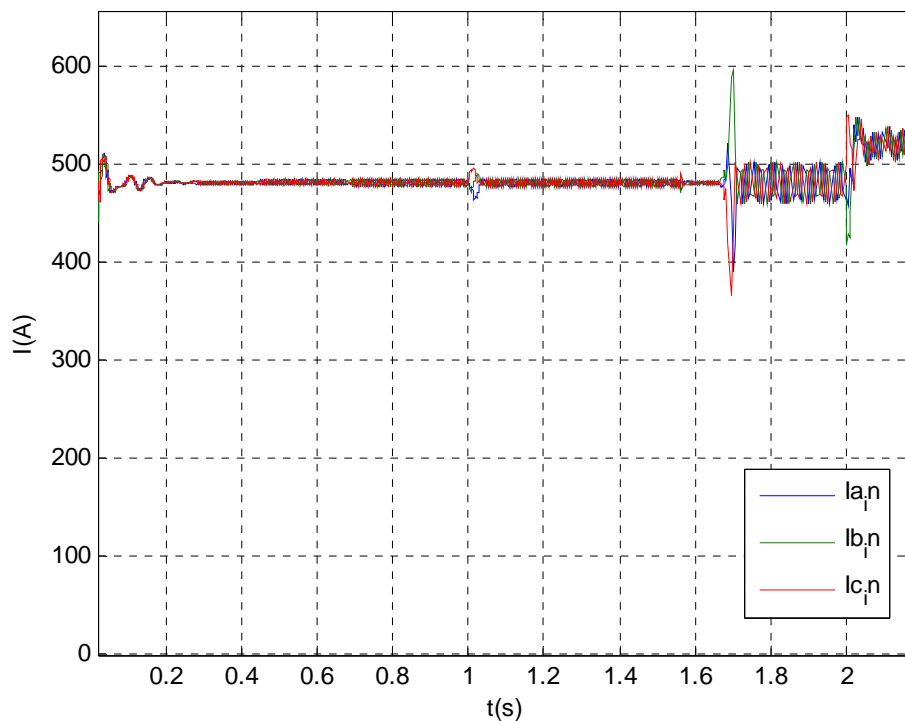


Figura: 3.20. Corriente por fase de los motores individuales

Tabla III.13. Valor medio y desviación estándar de la corriente por fases de los motores individuales

	Corriente: Suma de motores individuales		
	Fase A	Fase B	Fase C
Valor medio	458.39	453.93	456.95
Desviación estándar	112.15	122.01	115.23

La figura 3.20, presenta el comportamiento de la corriente por fases de los motores individuales, ante una perturbación a los 2 segundos del torque de carga, incrementándose la corriente en cada

fase. La tabla III.13 refleja los valores numéricos del valor medio y la desviación estándar en cada una de las fases después de la perturbación.

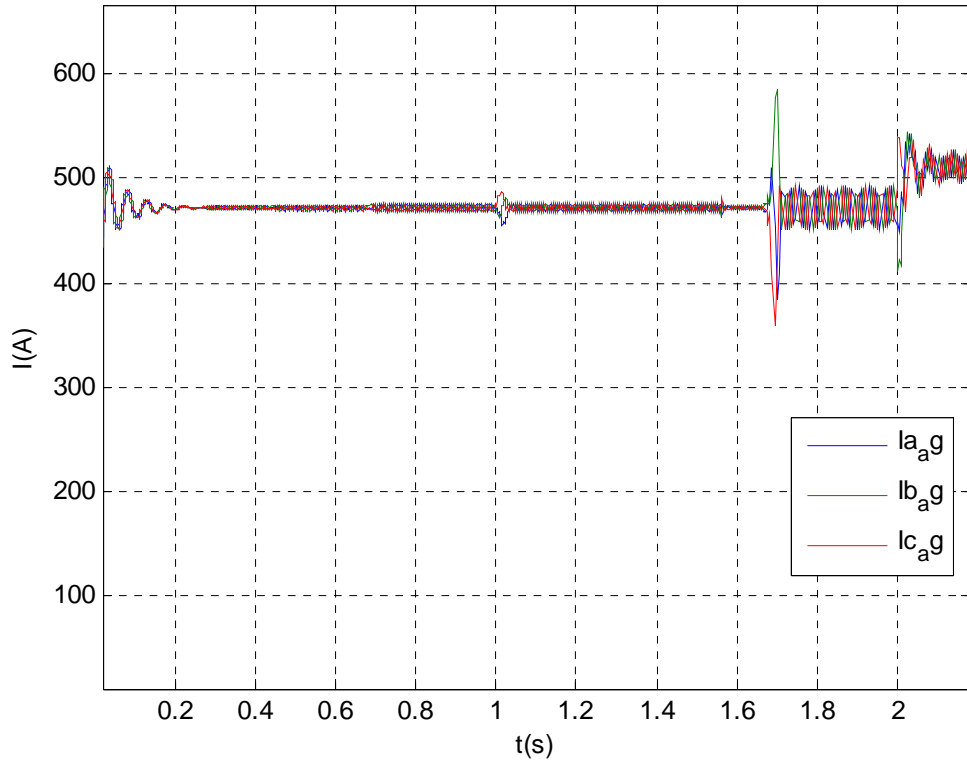


Figura: 3.21. Corriente por fase del motor agregado

Tabla III.14. Valor medio y estándar de la corriente del motor agregado

	Corriente agregado		
	Fase A	Fase B	Fase C
Valor medio	450.45	446.07	449.03
Desviación estándar	110.32	119.98	113.37

La figura 3.21, presenta el comportamiento de la respuesta de la corriente por fases del motor agregado ante una perturbación a los 2 segundos del torque de carga, incrementándose la corriente en cada fase, reflejándose en la tabla III.14, mostrándose el mínimo de diferencia si lo comparamos con los resultado de la figura 3.20 y los datos reflejados en la tabla III.13.

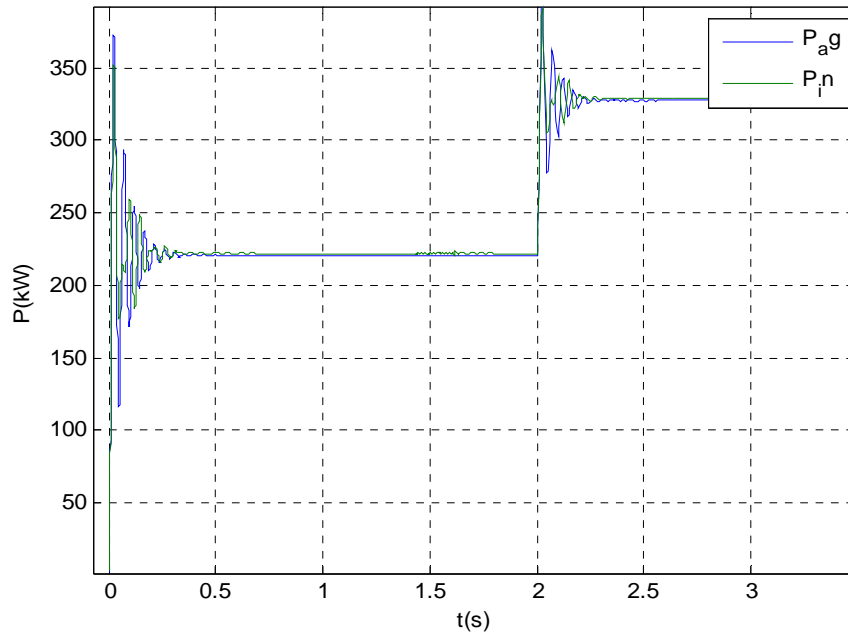


Figura: 3.22. Potencia activa del motor agregado y de los motores individuales en conjunto

Tabla III.15 Potencia activa e el conjunto de motores individuales y el motor agregado

	Potencia activa (kW)	
	Agregado	Suma de motores individuales
Valor medio	233.06	234.03
Desviación estándar	79.33	77.81

La figura 3.22, presenta el comportamiento de la potencia activa total demandada por el motor agregado y los individuales considerados en grupos, ante una perturbación del torque de carga, adicionando a los 2 segundos una sobrecarga igual al valor de la carga nominal de los motores individuales. Existe semejanza en el comportamiento del motor agregado obtenido para este punto de carga y el comportamiento en grupo de los individuales que contiene la barra de potencia. Esta similitud permite estudiar la respuesta ante variaciones de carga en el eje de los motores individuales a través del agregado, simplificando el análisis por concepto de disminución de cantidad de motores analizados. En la tabla III.15 se corrobora lo anteriormente expresado.

De forma general se observa en las figuras que el motor agregado responde satisfactoriamente a los cambios que experimenta el torque en la carga, las variaciones de las corrientes en las fases, la potencia activa demandada, guardan similitud entre los resultados individuales y agregados, corroborando la propuesta de utilizar el motor agregado en lugar de la combinación de individuales en el estudio del proceso transitorios antes cambios en la carga representadas por grupos de motores.

### III.6.3. Falla a tierra de la fase A de 1 a 1.04 segundos

El cortocircuito de fase a tierra es el de mayor frecuencia en los nodos de carga, para ello se analiza en este trabajo, como responde el motor agregado y los equivalentes individuales.

Para este caso, se añadió al esquema de simulación el bloque simulador de fallos, a la entrada en el punto de alimentación.

Aquí se representan fallos que desaparecen a las 55 milésimas de segundos, después de ocurrido, para verificar la respuesta, se tomo la corriente, factor de potencia y potencia activa.

Para analizar si el motor agregado responde satisfactoriamente ante cortocircuitos en las entradas del motor se ha simulado el comportamiento del mismo y su equivalente en barra por los individuales obteniéndose los siguientes resultados.

$T_{M2} = 499.44 \text{ Nm}$ ;  $T_{M3} = 24.14 \text{ Nm}$ ;  $T_{12} = 919.6 \text{ Nm}$ . Debido a que los motores M2 y M3, son de dos polos, y M12 es de 3 polos, el momento del agregado M29 se determina por la ecuación 2.14:

$$T_{M29} = 2 \left[ \frac{T_{M2} + T_{M3}}{2} + \frac{T_{M12}}{3} \right] = 1136.25 \text{ Nm};$$

El bloque de carga tiene la dependencia cuadrática de la velocidad

$$T_{carga} = \left( \frac{n}{n_n} \right)^2 T_c$$

La figura 3.23, presenta el comportamiento de la corriente por fases de los motores individuales, considerados de forma simultánea, además se observa que al tiempo de 1 seg. se conecta el cortocircuito en la fase A durante 0.4 seg. reaccionando al cambio paramétrico de esta fase, logrando

la estabilidad en la fase A. La tabla III.16 refleja los valores numéricos del valor medio y la desviación estándar de esta simulación. Además se observa que al tiempo de 1 seg. se conecta el cortocircuito durante 0.4 seg. reaccionando al cambio del parámetro de esta fase, logrando la estabilidad en la fase A.

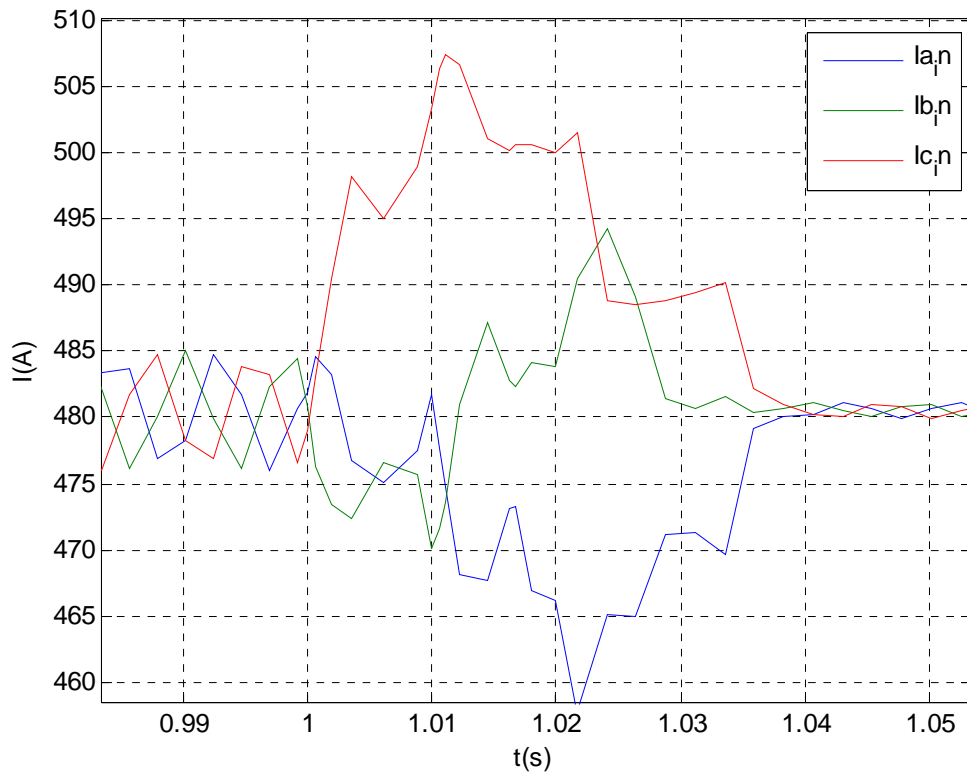


Figura: 3.23. Corriente por fase de los motores individuales

Tabla. III.16 Valores medios y estándar de la corriente por fase de los motores individuales

	Corriente individuales		
	Fase A	Fase B	Fase C
Valor medio	449.50	447.07	451.19
Desviación estándar	106.40	116.57	110.18

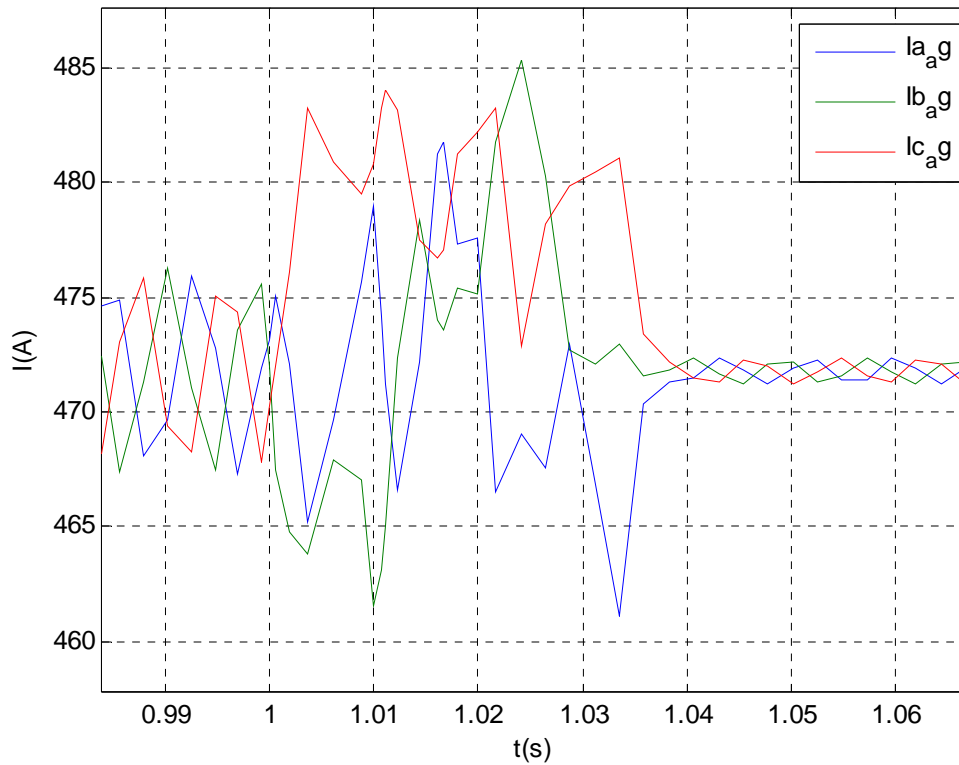


Figura: 3.24. Corriente por fase del motor agregado

Tabla III.17. Valores medios y estándar de la corriente por fase del motor agregado

	Corriente del agregado		
	Fase A	Fase B	Fase C
Valor medio	441.74	439.26	443.11
Desviación estándar	104.67	114.62	108.30

La figura 3.24, presenta el comportamiento de la respuesta de la corriente por fases del motor agregado, se observa que al tiempo de 1 seg. se conecta un cortocircuito en la fase A durante 0.4 seg. de manera simultanea al de los motores individuales, lográndose la estabilidad en la fase A, mostrándose el mínimo de diferencia si comparamos los datos reflejados en la tabla III.16 y III.17, además se observa que al tiempo de 1 seg. se conecta el cortocircuito durante 0.4 seg. reaccionando al cambio del parámetro de esta fase, logrando la estabilidad en la fase A.

La figura 3.25, presenta el comportamiento de la potencia activa total demandada por el motor agregado y los individuales considerados en grupos, ante el cortocircuito simulado en la fase A de ambas barras, de forma simultánea, logrando la estabilidad de los parámetros iniciales. Existe semejanza en el comportamiento del motor agregado obtenido para el cortocircuito en las entradas del motor y el comportamiento en grupo de los individuales que contiene la barra de potencia, reflejado en los resultados de la tabla III.18 Esta similitud permite estudiar la respuesta ante cortocircuitos en las entradas del motor agregado y su equivalente individuales, simplificando el análisis por concepto de disminución de cantidad de motores analizados.

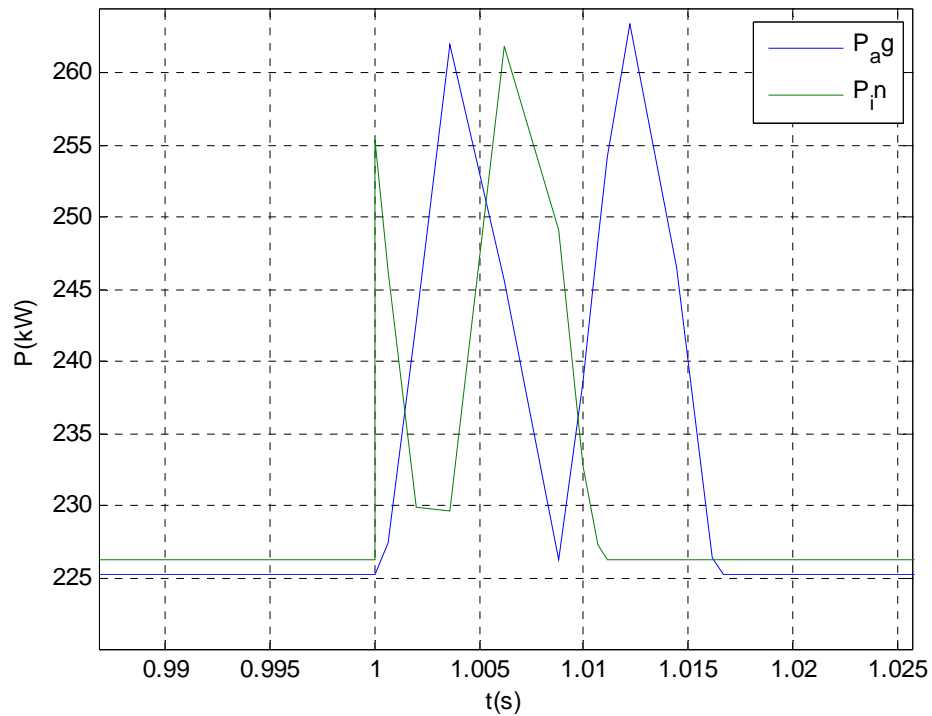


Figura 3.25 Potencia activa del motor agregado y su equivalente individuales

Tabla III.18. Valores medios y estándar del motor agregado y sus equivalentes individuales

	Potencia activa (kW)	
	Agregado	Individual
Valor medio	211.77	212.62
Desviación estándar	61.46	59.40

Existe semejanza en el comportamiento del motor agregado obtenido para el cortocircuito en las entradas del motor y el comportamiento en grupo de los individuales que contiene la barra de potencia. Esta similitud permite estudiar la respuesta ante cortocircuitos en las entradas del motor agregado y su equivalente individuales, simplificando el análisis por concepto de disminución de cantidad de motores analizados.

Las medidas para el motor agregado es derivada al grupo de motores que lo integran, solo hay que tener en cuenta la suma algebraica de la corriente los motores individuales.

De forma general se observa en las figuras que el motor agregado responde satisfactoriamente a los cambios que experimenta la potencia activa demandada, guardando similitud entre los resultados individuales y agregados, corroborando la propuesta de utilizar el motor agregado en lugar de la combinación de individuales en el estudio del proceso transitorios ante los fallos y cambios paramétricos en barra.

#### **III.6.4. Falla a tierra de las fases A y B**

Para analizar si el motor agregado responde satisfactoriamente ante cortocircuitos en las entradas del motor se ha simulado el comportamiento del mismo y su equivalente en barra por los individuales obteniéndose los siguientes resultados.

$T_{M2} = 499.44$  Nm;  $T_{M3} = 24.14$  Nm;  $T_{12} = 919.6$  Nm. Debido a que los motores M2 y M3, son de dos polos, y M12 es de 3 polos, el momento del agregado M29 se determina por la ecuación 2.14:

$$T_{M29} = 2 \left[ \frac{T_{M2} + T_{M3}}{2} + \frac{T_{M12}}{3} \right] = 1136.25 \text{ Nm};$$

El bloque de carga tiene la dependencia cuadrática de la velocidad

$$T_{carga} = T_c$$

La figura 3.26, presenta el comportamiento de la respuesta de la corriente por fases de los motores individuales, se simula un cortocircuito en la fase A y B al término de 1 segundo, lográndose la estabilidad en las fases A y B a los 0.4 segundos, reflejándose los datos en la tabla III.19.



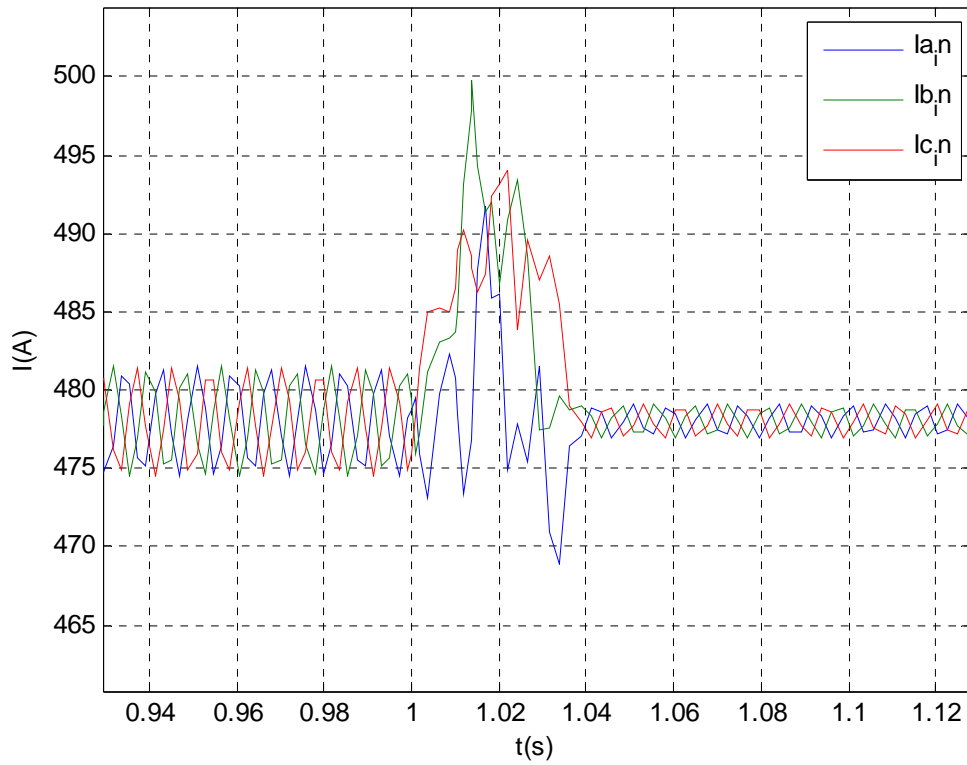


Fig. 3.26 Corriente por fase de los motores individuales.

Tabla III.19. Valores medios y estándar del motor agregado y sus equivalentes individuales

	lin_fasea	lin_faseb	lin_fasec
Valor medio	447.80	442.72	442.72
Desviación estándar	110.12	119.61	119.61

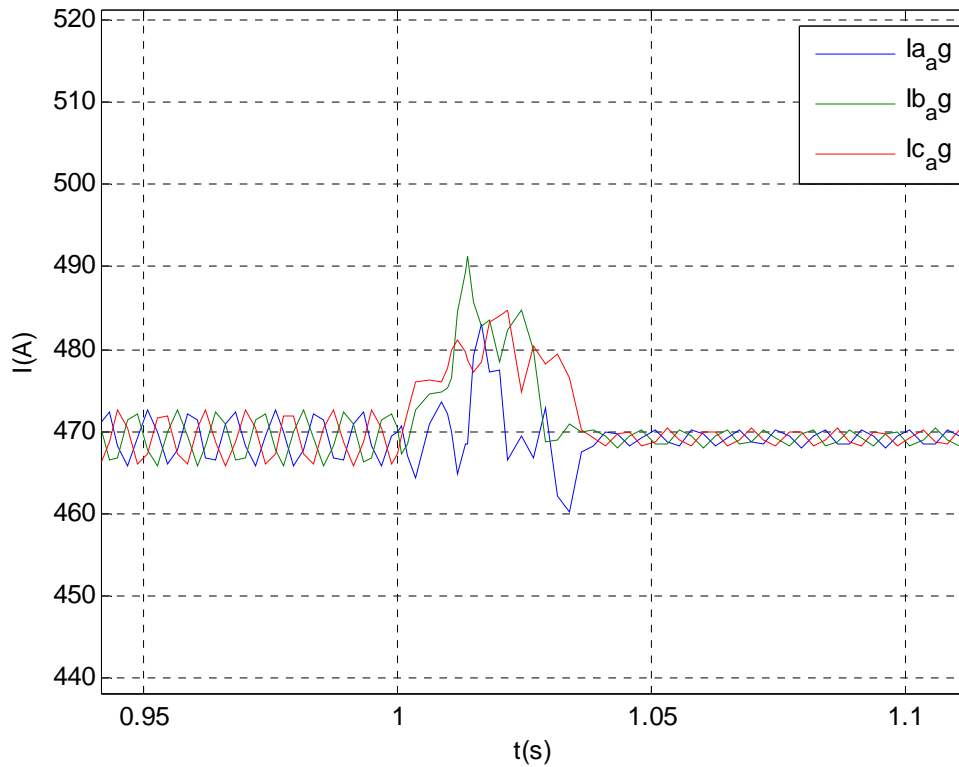


Fig. 3.27 Corriente por fase del motor agregado.

Tabla III.20. Valores medios y estándar del motor agregado y sus equivalentes individuales

	lag_fasea	lag_faseb	lag_fasec
Valor medio	439.86	434.88	436.72
Desviación estándar	108.27	117.56	112.70

La figura 3.27, presenta el comportamiento de la respuesta de la corriente por fases del motor agregado, se observa que se simula un cortocircuito en la fase A y B al termino de 1 segundo, de manera simultanea al de los motores individuales (Fig. 3.26), lográndose la estabilidad en la fases A y B, reflejándose el mínimo de diferencia, si comparamos los datos reflejados en la tabla III.19 y III.20.

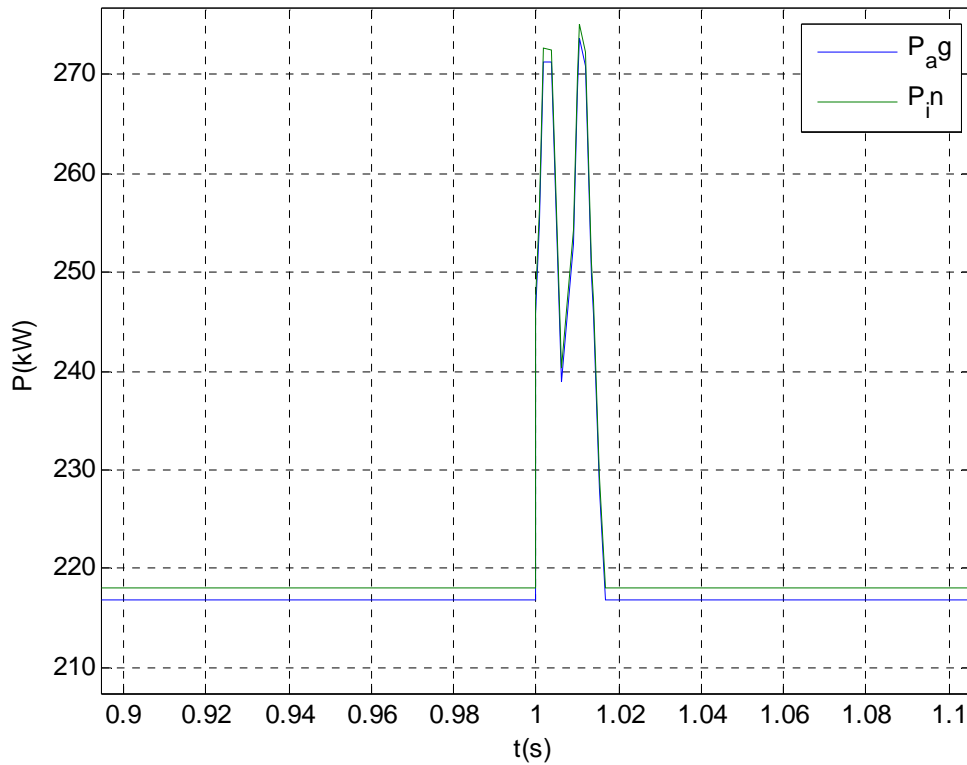


Fig. 3.28 Potencia activa del motor agregado y su equivalente individuales

Tabla III.21. Valores medios y estándar del motor agregado y sus equivalentes individuales

	$P_{ag}$	$P_{in}$
Valor medio	203.48	204.68
Desviación estándar	61.24	59.06

La figura 3.28, presenta el comportamiento de la potencia activa total demandada por el motor agregado y los individuales considerados en grupos, ante el cortocircuito simulado en la fase A y B de ambas barras, de forma simultánea, logrando la estabilidad inicial de los parámetros iniciales. Existe semejanza en el comportamiento del motor agregado obtenido para el cortocircuito en las entradas del motor y el comportamiento en grupo de los individuales que contiene la barra de potencia, reflejado en los resultados de la tabla III.21

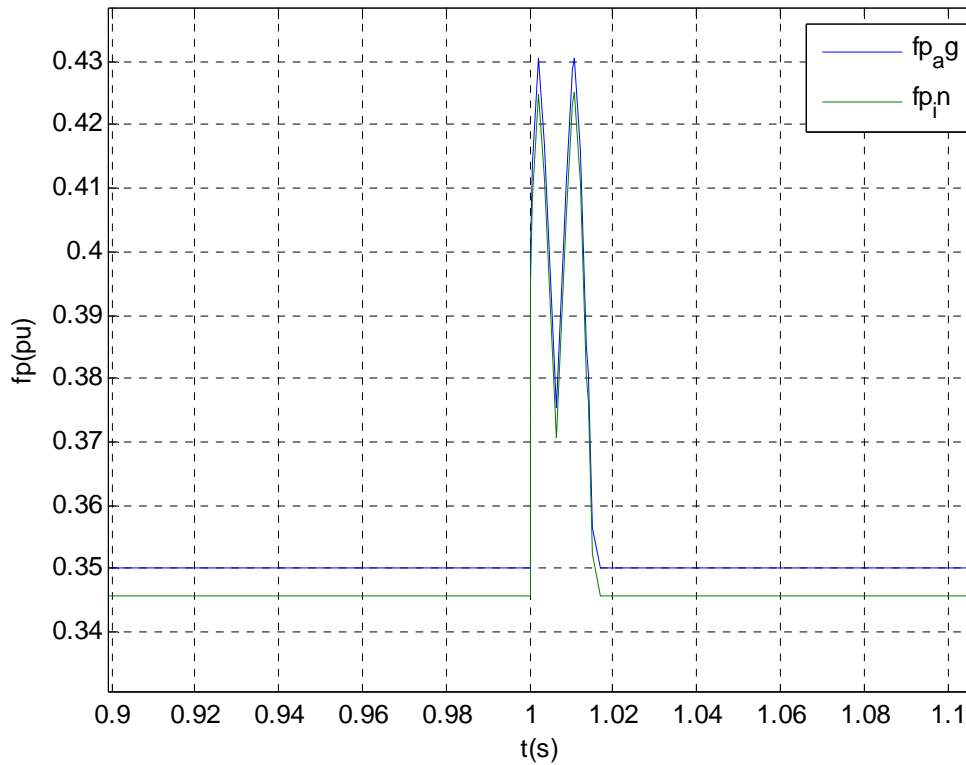


Fig. 3.29 Factor de potencia del motor agregado y su equivalente individuales

Tabla III.22. Valores medios y estándar del motor agregado y sus equivalentes individuales

	fpag	fpin
Valor medio	0.328	0.324
Desviación estándar	0.096	0.092

La figura 3.29, presenta el comportamiento del factor de potencia del conjunto de motores individuales y el motor agregado, se puede observar que ambos responden a la perturbación provocada ante el cortocircuito simulado en la fase A y B de ambas barras, de forma simultánea, logrando la estabilidad inicial de los parámetros iniciales, reflejando el mínimo de diferencia en los resultados, corroborando el uso del motor agregado para este fin. La tabla III.22 refleja los valores medios y la desviación estándar de esta simulación.

Como podemos observar, existe semejanza en el comportamiento del motor agregado obtenido ante variaciones en las entradas del motor y el comportamiento en grupo de los individuales que contiene la barra de potencia. Esta similitud permite estudiar la respuesta ante cortocircuitos en las entradas del motor agregado y su equivalente individuales, simplificando el análisis por concepto de disminución de cantidad de motores analizados.

### **III.7. Conclusiones Capítulo III**

---

1. El uso de motores agregados en barras de potencia eléctrica, reduce el número de carga a analizar.
2. La correspondencia del juego de parámetros nominales y del circuito equivalente a un motor de inducción se verifica por la gran semejanza entre las características mecánicas y de funcionamiento de un motor de inducción real con semejantes datos nominales.
3. Expresando la velocidad del motor agregado en función del grado de carga, permite obtener las características de comportamiento a deslizamiento diferente del nominal.
4. Se elaboró un esquema de simulación en MATLAB que permite la simulación y comparación del comportamiento transitorio del conjunto o grupo de motores de inducción y el agregado equivalente.
5. De forma general se observa en las figuras que el motor agregado responde satisfactoriamente a los cambios que experimenta la potencia activa demandada, guardando similitud entre los resultados individuales y agregados, corroborando la propuesta de utilizar el motor agregado en lugar de la combinación de individuales en el estudio del proceso transitorios ante los fallos y cambios paramétricos en barra.

# *Conclusiones*

## CONCLUSIONES

---

1. La metodología propuesta combina la utilización de un balance de potencia y la determinación de los parámetros del modelo circuital, para obtener un motor agregado caracterizado por sus principales datos nominales y de circuito equivalente.
2. Se analizan los procesos transitorios durante el arranque, no los que pueden ocurrir durante el régimen de trabajo.
3. Se elaboró un esquema en MATLAB que permite la simulación del motor agregado y sus equivalentes al mismo tiempo, los cuales se pueden generalizar para el análisis de cada motor agregado por separado.
4. Las simulaciones muestran resultados de gran similitud entre los motores agregados y los individuales en el comportamiento transitorio frente a cambios en la carga y perturbaciones en la línea de alimentación.
5. En las pruebas realizadas se obtuvo como resultado, que el motor agregado responde satisfactoriamente a los cambios que experimenta la potencia activa demandada, con gran porcentaje de similitud entre los resultados individuales y agregados.



# *Recomendaciones*

## **RECOMENDACIONES**

---

- Utilizando la teoría de motor agregado, procederlo para toda la empresa, por plantas y barras, siempre que sea posible.
- Analizar la propuesta con cambio de tensión, incluyendo diferente tensión de alimentación.

# *Bibliografía*

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Abdel, M. M. and Berg, G. J. Dynamic single-unit representation of induction motor groups. IEEE Transactions Power Apparatus Systems, PAS-95, 1: 155-165. (Jan./ Feb. 1976).
- [2] Akbaba M. and S.Q. Fakhro, "New model for single-unit representation of induction motor loads, including skin effect, for power system transient stability studies", IEEE Proceedings-5, vol. 139, No. 6, November 1992.
- [3] Alamir M. Sensitivity analysis in simultaneous state/parameter estimation for induction motors. Int. J. Control, Vol. 75, No.10, 2002, pp. 753- 758.
- [4] Aree P. Effects of Static and Dvnmatic Load Models on Power Svstem Load Representation. Thammasat Int. J. Sc. Tech., Vol.7, No.3, September-December 2002.
- [5] Aree, P. Load flow solution with induction motor. Songklanakarin J. Sci. Technol., 2006, Vol. 28 No. 1, Jan/Feb. 2006 pag. 157-168
- [6] Atkinson D. J., Finch. J.W and Acarnley P. P. Estimation of rotor resistance in induction motors IEEE Proc.-Electr. Power Appl, Vol 143, No. 1. January 1996
- [7] Atkinson J David, Acarnley P Paul, and Finch W John. Observers for Induction Motor State and Parameter Estimation. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 21, No, 6 , November / December 1991
- [8] Bastiaensen C., Deprez W., Symens W., Driesen J. Parameter Sensitivity and Measurement Error Propagation in Torque Estimation Algorithms for Induction Machines. IMTC 2006 - Instrumentation and Measurement Technology Conference Sorrento, Italy 24-27 April 2006
- [9] C., Deprez W., Driesen J., Belmans R. Influence of parameter distributions on electromechanical torque of induction motors. 3rd IEEE Benelux Young Researchers Symposium In Electrical Power Engineering 27-28 April 2006, Ghent, Belgium.
- [10] Boglietti, A.; Ferraris, P.; Lazzari, M.; Profumo, F. Induction motor equivalent circuit parameters determination from standard tests made with inverter supply. Electrical Machines and Drives, 1993. Sixth International Conference on (Conf. Publ. No. 376) Volume , Issue , 8-10 Sep 1993 Page(s): 271 – 276
- [11] Bonnett. A. Gibbon B. The results are in: motor repair's impact on efficiency. Electrical Apparatus Service Association, inc. 2002. Disponible: [www.easa.com/indus/rwstdy1203.pdf](http://www.easa.com/indus/rwstdy1203.pdf) Visitado: 2005.

- [12] Bose, B.K.; Patel, N.R. Quasi-fuzzy estimation of stator resistance of induction motor Power Electronics, IEEE Transactions on Volume 13, Issue 3, May 1998 pp. 401 - 409
- [13] Brandão J. C., Edgar C. J. and Nogueira L. M. A, Estimating the Parameters of Induction Machines at Standstill. IEEE Transaction on energy conversion, Vol. 17, No. 1, March 2002, pp. 85-89.
- [14] Brereton, D. S., Lewis, D. G. and Young, C. C., Representation of Induction-Motor Loads During Power-System Stability Studies, AIEE Transactions, Vol. 76, pp. 451-461,1951.
- [15] Brito H., Madiedo R., Bermello E., Arafet P. Software para la determinación del comportamiento de un motor asincrónico trifásico energética Vol. XXVI, No. 1/2005
- [16] Cathey Jimmie J., Electric Machines: Analysis and Design Applying MATLAB, Publisher: McGraw-Hill, New York USA, 2003.
- [17] 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.
- [18] Concordia, C. and Ihara, S. 1982. Load Representation in power system stability studies. IEEE Transactions Power Apparatus Systems, PAS-101, 4: 969-977.
- [19] Costa Montiel A y otros. Determinación Experimental de los Parámetros del Motor de Inducción Trifásico Considerando la Variación de los Parámetros del Rotor. Memoria del Evento SIE 2005
- [20] Costa Montiel. A. A; Lopez Fernandez, X. M.; Ciumbulea, G.; Galan, N.. Cálculo de los Parámetros del Motor de Inducción a partir de Datos de Catálogo. Energía y Computación, 01 jul. 2004.
- [21] 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.
- [22] De Almeida A. Characterization of Motor Systems in the EU. Improving the Penetration of Energy Efficient. Motors and Drives. SAVE II Study. [www.iea.org/textbase/work/2006/motor/De%20ALMEIDA%20IEA-Motor-Part-I-15-May-06-Final.pdf](http://www.iea.org/textbase/work/2006/motor/De%20ALMEIDA%20IEA-Motor-Part-I-15-May-06-Final.pdf) –

- [23] De Souza Ribeiro Luis Antonio, Brandão Jacobina Cursino and Nogueira Lima Antonio Marcus Linear Parameter Estimation for Induction Machines Considering the Operating Conditions. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 14, No. 1, January 1999
- [24] Determining electric motor load and efficiency. Motor Challenger a Program of the U.S. Department of Energy. Disponible: <http://smservice.com/litlist.htm> . Visitado: Junio 2005
- [25] Dizdarević N., Tešnjak S., Andersson G. Induction motor behaviour during voltage instability solved by unified power flow controller. Disponible: [www.actapress.com/PDFViewer.aspx?paperId=24977](http://www.actapress.com/PDFViewer.aspx?paperId=24977). Visitado: Junio 2008.
- [26] Eguiluz, L.I.; Lavandero, P.; Mañana, M.; Lara, P. Performance Analysis of a Three-phase Induction Motor under Non-sinusoidal and Unbalanced Conditions. Disponible. [www.diee.unican.es/pdf/gijon99\\_2.pdf](http://www.diee.unican.es/pdf/gijon99_2.pdf). Visitado: Junio 2007.
- [27] Enrique Quispe y otros. Medición en sitio de la eficiencia de su motor. Una comparación de metodologías prácticas. Papel y tisú. Mari. Enero – Febrero 2006. [www.latinpressinc.com](http://www.latinpressinc.com).
- [28] Fitzgerald, A, E., Kingsley Charles, Jr., and Umans Stephen D., Electric Machinery, Sixth Edition, Publisher: McGraw-Hill, New York USA, 2003.
- [29] Franklin, D. C. and Morelato, A. 1994. Improving dynamic aggregation of induction motor models. IEEE Transactions on Power Systems, 9, 4: 1934-1941.
- [30] Gómez Sarduy J. R. Determinación de la Eficiencia de los Motores Asíncronos con Tensiones Desbalanceadas en Condiciones de Campo. Resumen de la Tesis para optar por el grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Santa Clara 2006
- [31] Henry Y. H. Chuang. Fail-Safe Asynchronous Machines with Multiple-Input Changes. IEEE Transactions On Computers, June 1976
- [32] Heureux G. L. Steele B. Minhaz R Field Estimation of. Induction Motor Efficiency. Marzo 2006. Disponible : [http://www.ee.umanitoba.ca/programs/undergraduate/courses/coursehome/c24400/24\\_400/2006-07/FinalReports/G19%20Final%20Report%202006.pdf.pdf](http://www.ee.umanitoba.ca/programs/undergraduate/courses/coursehome/c24400/24_400/2006-07/FinalReports/G19%20Final%20Report%202006.pdf.pdf). Visitado Febrero 2007.
- [33] Hsu, John S., y col., “Comparison of induction Motor Field Efficiency Evaluation Methods”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol 34, no. 1, january/february 1998

- [34] 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
- [35] IEEE Power Engineering Society, IEEE Standard Test Procedure for Polyphsse Induction Motors and Generators, IEEE Std 112-1996 (Revision of IEEE Std 112-1991), February 27, 1997.
- [36] Jordan, H. E., Zowarka, R. C., Hotz, T. J. and Uglum, J. R. Induction Motor Performance Testing With an Inverter Power Supply: Part 1. Magnetics, IEEE Transactions on Volume 43, Issue 1, Jan. 2007, pp. 242 – 245.
- [37] Karagiannis Dimitrios, Astol Alessandro. Rotor Resistance Estimation for Current-Fed Induction Motors
- [38] Kataoka, T. H. Uchida, S. Nishikata, T. Kai, and T. Funabashi, “A method for aggregation of a group of induction motor loads,” in Proc. POWERCON Perth, Australia, 2000, pp. 1683–1688.
- [39] Khemliche M, Latreche S., Khellaf A. Modelling and identification of the asynchronous machine. IEEE 2004
- [40] Ki Sul Seung. A Novel Technique of Rotor Resistance Estimation Considering Variation of Mutual Inductance. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 25, No. 4, July/August 1989.
- [41] Kostenko M. P.; Piotrovski L. M. Máquinas Eléctricas. Tomo II. Editorial Mir, Moscu URSS, 1976.
- [42] Kueck J. D., Gray J. R., Driver R. C., Hsu J. S. Assessment of Available Methods for Evaluating In-Service Motor Efficiency. Prepared for the U.S. Department of Energy Bonneville Power Administration under DOE Interagency Agreement and the Pacific Gas & Electric Company under Contract No. 94AI33601. April 1996.
- [43] Kwok-Wai Louie. A New Way to Represent the Aggregate Effects of Induction Motors at a Same Bus in a Power System. International Journal of Applied Science and Engineering 2006. Vol.4, No.1: pp. 91-102.
- [44] Lehtla, T. Joller, J. Lehtla, M. Laugis, J. Parameter identification and comparison of an induction motor model, Power Electronics and Variable Speed Drives, Eighth International Conference on (IEE Conf. Publ. No. 475), 2000, pp. 201-205.

- [45] Lehtla, T., Joller, J., Lehtla, M., Laugis J. Parameter identification and comparison of an induction motor models. Disponible: [http://www.ene.ttu.ee/elektrijamid/teadus/artiklid/Comp\\_OF\\_models/](http://www.ene.ttu.ee/elektrijamid/teadus/artiklid/Comp_OF_models/). Visitado: Enero 2004
- [46] Lem T. Y. J. and R. T. H. Alden, "Comparison of experimental and aggregate induction motor responses," IEEE Trans. Power Syst., vol. 9, no. 4, pp. 1895–1900, Nov. 1994.
- [47] Lin Dingsheng, Zhou Ping, Stanton Scott and Cendes J. Zoltan. A Fully Integrated Simulation Package for Electric Machine Design.
- [48] Lobosco S. Orlando – Luis PC Día José. Selección y aplicación de motores eléctricos. Tomo I. Colección SIEMENS. Editorial Marcombo. 1989. 372 pp.
- [49] Martinez, J A., Johnson B., and Grande-Moran C. Parameter Determination for Modeling System Transients—Part IV: Rotating Machines. IEEE Transaction on Energy Conversion , Vol. 20, No. 3, July 2005 pp. 2063 - 2072
- [50] McCoy G. A., Litman T., Douglass J. G. Energy-Efficient Electric Motor Selection Handbook. Washington State Energy Office Olympia, Washington. United States. Department of Energy. Revision 3, January 1993.
- [51] McPherson George and Laramore D. Robert. An Introduction to Electrical Machines and Transformers. 1992.
- [52] Medarametla J. B, Cox M. D. Calculations and measurements of the unity plus three-phase induction motor. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 7, No. 4, December 1992.
- [53] Nomikos B. M., Vournas C. D. Investigation of Induction Machine Contribution to Power System Oscillations. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 2, May 2005, pp. 916-925.
- [54] Nozari, F., Kankam, M. D., W. W. P Aggregation of Induction Machines for Transient Stability Load Modeling, IEEE Transactions on Power System, Vol. 2, No. 4, pp. 1096-1103, 1987.
- [55] Parasiliti F. And others. Three-Phase Induction Motor Efficiency Improvements with Die-Cast Copper Rotor Cage and Premium Steel. SPEEDAM 2004 June 16th - 18th, CAPRI (Italy)
- [56] Pedra J., Sainz L., and Córcoles F. Study of Aggregate Models for Squirrel-Cage Induction Motors. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 20, No. 3, August 2005, pp. 1519-1527.



- [57] 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.
- [58] Pillay P. and Sabur S. M.A. Use of reduced order models to calculate reclosing transients in a refinery. Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS apos; 95., Conference Record of the 1995 IEEE, Vol. 3, Issue , 8-12 Oct 1995, pp. 2180 - 2188
- [59] Pillay P., Refoufi L. Calculation of slip energy recovery induction motor drive behavior using the equivalent circuit. Industry Applications Society Annual Meeting, 1992., Conference Record of the 1992 IEEE Vol. 1, Issue, 4-9 Oct 1992 pp.10 – 17.
- [60] Pillay P., Sabur S. and Haq. M. A model for induction motor aggregation for power system studies. Electric Power System Research No. 42, 1997, pp. 225-228.
- [61] Proca Amuliu Bogdan, , and Keyhani Ali. Identification of Variable Frequency Induction Motor Models from Operating Data. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, No. 1, March 2002
- [62] Rahim, A. H. M. A. and Laldin, A. R. 1987. Aggregation of induction motor loads for transient stability studies. IEEE Transactions Energy Conversion, EC-2, 1: 55-61. March 1987.
- [63] Richards, G. G. “Reduced order models for an induction motor group during bus transfer,” IEEE Trans. Power Syst., vol. 4, no. 2, pp. 494–498, May 1989.
- [64] Rogers, G. J., Manno, J. D. and Alden, R. T. H., An Aggregate Induction Motor Model for Industrial Plants. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 103, No. 4, pp. 683-690, 1984.
- [65] Romero R. I, Pérez M. B, Guerrero R. Y. “Nuevo Enfoque para la Determinación de los Parámetros del Motor de Inducción por Datos Nominales” CIE’2007
- [66] Rubin Nicholas P, Harley Ronald G.and Diana Gregory.. Evaluation of Various Slip Estimation Techniques for an Induction Machine Operating Under Field-Oriented Control Conditions. IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 6, November / December 1992
- [67] Santisteban J. A and . Stepha - R M. Comparative study of vector control methods for induction machines.. The European Power Electronics Association 1993.

- [68] Sedighzadeh M. and Rezazadeh A. Load Modeling for Power Flow and Transient Stability Computer Studies at BAKHTAR Network. Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology Vol. 26 December 2007, pp. 749-756, ISSN 1307-6884
- [69] Sedighzadeh M., and Rezazadeh A. Dynamic Load Modeling for KHUZESTAN Power System Voltage Stability Studies. Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology, Vol. 26, December 2007, ISSN 1307-6884, pp. 767-771.
- [70] Shi J. H., Renmu H. Measurement-based Load Modeling – Model Structure, Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna Volume 2, Issue , 23-26 June 2003, 5 pp.
- [71] Steele B., Minhaz R. and L’Heureux G. Field Estimation of Induction Motor Efficiency. Project proposal submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Bachelor of Science in Electrical and Computer Engineering in the Faculty of Engineering of the University of Manitoba. October 2005. Visitado. Junio de 2006 Disponible, [www.ee.umanitoba.ca/.../coursehome/c24400/24\\_400/2006-07/FinalReports/G19%20Final%20Report%202006.pdf.pdf](http://www.ee.umanitoba.ca/.../coursehome/c24400/24_400/2006-07/FinalReports/G19%20Final%20Report%202006.pdf.pdf).
- [72] Stephan J., Bodson M. and Chiasson J. Real-Time Estimation of the Parameters and Fluxes of Induction Motors. IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. 30. No 3. pp. 746-759. May/June 1994
- [73] Stevenson. D. W. Análisis de sistemas Eléctricos de Potencia. Edición Revolucionaria. 1ra reimpresión, 1990, 394 pp.
- [74] Stocks M. Modeling, Analysis, State and Parameter Estimation of Faulty Induction Machines. Doctoral Thesis. Division of Systems and Interaction Department of Computer Science and Electrical Engineering Lulea University of Technology 971 87 Lulea Sweden October 2006.
- [75] Sujitjorn S and Areerak K-L. Loss Minimization in an Induction Motor Driven by a Voltage-Source-Inverter. Asian J. Energy Environ., Vol. 3 Issues 1-2, August. 2002, pp. 53-78
- [76] T. Phumiphak y C. Chat-uthai. Effective Estimation of induction Motor Field Efficiency Based on On-site Measurements, 2002 IEEE.
- [77] Taleb, M. M. Akbaba and E.A. Ahdullah, Aggregation of induction machines for power system dynamic studies, IEEE/ PES 1994 Winter Meet., New York, New York, Jan. 30–Feb, 3, 1994

- [78] Toliyat H. A., Levi E., and Raina M., A Review of RFO Induction Motor Parameter Estimation Techniques. IEEE Transaction on Energy Conversion , Vol. 18, No. 2, June 2003., pp. 271- 283.
- [79] Veles Reyes Miguel, Liam Pung Wee and Ramos Torres José E. Developing Robust Algorithms for speed and Parameter Estimation in Induction Machines. Proceeding of the 40<sup>th</sup> IEEE Conference on Decision and Control. Orlando, Florida. USA. December 2001.
- [80] Venikov V.A. Procesos transitorios electromecánicos en los sistemas eléctricos de potencia, Editorial Mir Moscú. 1988. 502 pp.
- [81] Voldek, A. I., Máquinas eléctricas, Tomo I., Editorial Pueblo y Educación, Cuba, 1985,
- [82] Wang Kaiyu, Chiasson John, Bodson Marc, and Tolbert M. Leon. A Nonlinear Least-Squares Approach for Identification of the Induction Motor Parameters. IEEE Transactions on automatic Control, Vol.50, No.10, October 2005.
- [83] Matlab, 2008.

*Anexos*

## ANEXOS

---

### Anexo 1. Modelación dinámica del motor de inducción agregado

#### Tensiones de alimentación del sistema ABC

$U_{an} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_n \cdot \cos(w_1 t)$ $U_{bn} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_n \cdot \cos\left(w_1 t - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)$ $U_{cn} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot U_n \cdot \cos\left(w_1 t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right)$	<p>Donde:</p> <p><math>U_n \Rightarrow</math> Tensión nominal, [V];</p> <p><math>U_{an}, U_{bn}, U_{cn} \Rightarrow</math> Valor máximo de la tensión por fase;</p> <p><math>w_1 \Rightarrow</math> Frecuencia angular eléctrica [rad/s]</p>
---	--

#### Tensiones para el sistema fijo con respecto al estator ( $\alpha, \beta$ )

$U_{s\alpha} = \frac{1}{3} \cdot (2 \cdot U_{an} - U_{bn} - U_{cn})$ $U_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot (U_{bn} - U_{cn})$	<p>Donde:</p> <p><math>U_{s\alpha}, U_{s\beta} \Rightarrow</math> Tensión por los ejes <math>\alpha</math> y <math>\beta</math> respectivamente</p>
--	---

#### Tensiones en el sistema fijo con respecto al rotor (d,q)

$U_{sd} = -U_{s\alpha} \cdot \text{sen}(w_1 t) + U_{s\beta} \cdot \cos(w_1 t)$ $U_{sq} = U_{s\alpha} \cdot \cos(w_1 t) + U_{s\beta} \cdot \text{sen}(w_1 t)$	<p>Donde:</p> <p><math>U_{sd}, U_{sq} \Rightarrow</math> Tensión por los ejes d y q respectivamente</p>
--	---

Transformación directa ABC dq

$$U_{sq} = \frac{2}{3} \cdot \left( U_{an} \cdot \cos(\omega_o \cdot t) + U_{bn} \cdot \cos\left(\omega_o \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) + U_{cn} \cdot \cos\left(\omega_o \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \right)$$

$$U_{sd} = \frac{2}{3} \cdot \left( -U_{an} \cdot \sin(\omega_o \cdot t) - U_{bn} \cdot \sin\left(\omega_o \cdot t - \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) - U_{cn} \cdot \sin\left(\omega_o \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{3}\right) \right)$$

$$U_{so} = \frac{1}{3} \cdot (U_{an} + U_{bn} + U_{cn})$$

**Transformaciones inversas:**

Corrientes del estator por los ejes fijo, ( $\alpha, \beta$ )

$$I_{s\alpha} = I_{sd} \cdot \cos(\omega_1 t) - I_{sq} \cdot \sin(\omega_1 t)$$

$$I_{s\beta} = I_{sd} \cdot \sin(\omega_1 t) + I_{sq} \cdot \cos(\omega_1 t)$$

Corrientes para el sistema A B C

$$I_a = I_{s\alpha}$$

$$I_b = -\frac{1}{2} \cdot I_{s\alpha} + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{s\beta}$$

$$I_c = -\frac{1}{2} \cdot I_{s\alpha} - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{s\beta}$$

Transformación directa dq al sistema A B C

$$I_{sa} = I_{sd} \cdot \cos(\omega_o \cdot t) - I_{sq} \cdot \sin(\omega_o \cdot t)$$

$$I_{sb} = I_{sd} \cdot \cos(\omega_o \cdot t - 2 \cdot \pi/3) - I_{sq} \cdot \sin(\omega_o \cdot t - 2 \cdot \pi/3)$$

$$I_{sc} = I_{sd} \cdot \cos(\omega_o \cdot t + 2 \cdot \pi/3) - I_{sq} \cdot \sin(\omega_o \cdot t + 2 \cdot \pi/3)$$

## Ecuaciones en derivada para el flujo magnético y la velocidad

$\frac{d\psi_{sd}}{dt} = U_{sd} - \frac{R_s \cdot L_r}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \cdot \left( \psi_{sd} - \frac{L_m}{L_r} \cdot \psi_{rd} \right) + \omega_1 \psi_{sq}$ $\frac{d\psi_{sq}}{dt} = U_{sq} - \frac{R_s \cdot L_r}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \cdot \left( \psi_{sq} - \frac{L_m}{L_r} \cdot \psi_{rq} \right) - \omega_1 \psi_{sd}$ $\frac{d\psi_{rd}}{dt} = -\frac{R_r \cdot L_s}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \cdot \left( \psi_{rd} - \frac{L_m}{L_s} \cdot \psi_{sd} \right) + (\omega_1 - p \cdot \omega) \psi_{rq}$ $\frac{d\psi_{rq}}{dt} = -\frac{R_r \cdot L_s}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \cdot \left( \psi_{rq} - \frac{L_m}{L_s} \cdot \psi_{sq} \right) - (\omega_1 - p \cdot \omega) \psi_{rd}$ $\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \cdot \left( \frac{3}{2} \cdot \frac{p \cdot L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \cdot (\psi_{sq} \cdot \psi_{rd} - \psi_{sd} \cdot \psi_{rq}) - T_c \right)$	<p>Donde:</p> <p><math>\psi_{sd}, \psi_{sq}, \psi_{rd},</math> y <math>\psi_{rq} \Rightarrow</math> Flujo magnético para el estator y rotor por los ejes d y q.</p> <p><math>R_s, R_r \Rightarrow</math> Resistencia del estator y rotor.</p> <p><math>L_s, L_r \Rightarrow</math> Inductancia propia del estator y el rotor respectivamente.</p> <p><math>L_m \Rightarrow</math> Inductancia mutua</p> <p><math>p \Rightarrow</math> Pares de polos del motor</p> <p><math>J \Rightarrow</math> Momento de inercia (kg.m<sup>2</sup>)</p> <p><math>\omega \Rightarrow</math> Velocidad del rotor (rad/s)</p>
---	---

Torque electromagnético desarrollado por el motor

$$T_{em} = \frac{3}{2} \cdot \frac{p \cdot L_m}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \cdot (\psi_{sq} \cdot \psi_{rd} - \psi_{sd} \cdot \psi_{rq})$$

Corrientes para el estator y rotor por los ejes directos y transversales (d,q)

$$I_{sd} = \frac{L_r}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \cdot \left( \psi_{sd} - \frac{L_m}{L_r} \cdot \psi_{rd} \right)$$

$$I_{rd} = \frac{L_s}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \cdot \left( \psi_{rd} - \frac{L_m}{L_s} \cdot \psi_{sd} \right)$$

$$I_{sq} = \frac{L_r}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \cdot \left( \psi_{sq} - \frac{L_m}{L_r} \cdot \psi_{rq} \right)$$

$$I_{rq} = \frac{L_s}{L_s \cdot L_r - L_m^2} \cdot \left( \psi_{rq} - \frac{L_m}{L_s} \cdot \psi_{sq} \right)$$

Estas características, obtenidas en base al circuito equivalente, se utilizan para pronosticar el comportamiento futuro de esta carga cuando varíe en amplio rango. La dependencia gráfica de varios puntos de carga da lugar a una curva de comportamiento puntual.

Considerando que los parámetros del circuito equivalente no cambian, una vez identificado para un punto de carga, se obtienen las características de rendimiento, factor de potencia, etc.



## Anexo 2. Valores promedios de las mediciones por barra

M. Agg		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
Barras		<b>TR 7A y 8A</b>	<b>2WPPD22</b>	<b>AL105TR</b>	<b>BOSEC4</b>	<b>VESEC4</b>	<b>VEBOSEC4</b>	<b>BOSEC5</b>	<b>VESEC5</b>
Ia	(A)	199.15	63.42	23.02	10.729	230.04	240.77	11.688	235.27
Ib	(A)	197.40	62.71	23.31	5.125	230.48	235.60	10.667	239.58
Ic	(A)	200.63	60.69	24.33	9.458	227.63	237.08	10.281	232.18
Iprom	A	199.06	62.27	23.56	8.44	229.38	237.82	10.88	235.68
Uab	(V)	446.79	453.44	456.31	439.06	439.06	439.06	453.50	453.50
Ubc	(V)	445.02	451.79	455.69	436.00	436.00	436.00	454.54	454.54
Uca	(V)	446.52	452.50	455.54	437.77	437.77	437.77	452.38	452.38
Uprom	V linea	446.11	452.58	455.85	437.61	437.61	437.61	452.60	453.47
Desb.	%	0.153	0.613	0.102	0.379	0.379	0.332	0.283	0.283
P	(kW)	108.539	34.276	14.847	5.317	129.963	135.279	5.657	122.758
Q	(kvar)	109.389	35.773	12.321	3.559	116.153	119.711	6.381	138.911
S	(KVA)	154.165	49.569	19.293	6.472	174.315	180.644	8.528	185.381
CosFi	()	0.704	0.693	0.770	0.812	0.746	0.750	0.663	0.662

### Anexo 3. Parámetros del circuito equivalente de los motores reales

No	Barra	r1 ( $\Omega$ )	x1 ( $\Omega$ )	r2 ( $\Omega$ )	x2 ( $\Omega$ )	rm ( $\Omega$ )	xm ( $\Omega$ )	Rs1 ( $\Omega$ )
M1	TR7Ay8A	0.0092	0.2444	0.0113	0.3648	0.6530	2.2567	0.0077
M2	2WPPD22	0.0311	0.1099	0.0306	0.1640	2.0653	4.9427	0.0244
M3	AL105TR	0.1230	1.3151	0.0692	1.9628	5.3087	19.0320	0.0751
M4	BOSEC4	0.4993	1.1856	0.5796	1.7695	19.1060	44.8867	0.2040
M5	VESEC4	0.0196	0.2091	0.0163	0.3121	0.6307	2.5490	0.0119
M6	VEBOSEC4	0.0181	0.1790	0.0166	0.2672	0.3793	2.4223	0.0111
M7	BOSEC5	0.4993	1.9339	0.5843	2.8864	7.9213	30.2170	0.2057
M8	VESEC5	0.0196	0.2393	0.0163	0.3572	0.4183	1.9540	0.0119
M9	VEBOSEC5	0.0181	0.2193	0.0166	0.3273	0.3440	1.8520	0.0111
M10	BOSEC6	0.4993	2.0287	0.5795	3.0280	7.0233	27.4773	0.2040
M11	VESEC6	0.0196	0.5300	0.0165	0.7910	6.0910	3.2313	0.0121
M12	BOVESEC6	0.0181	0.2238	0.0166	0.3341	0.5693	2.0277	0.0111
M13	BOSEC1	0.4993	3.0513	0.5798	4.5542	41.1737	43.5700	0.2041
M14	VESEC1	0.0196	0.2249	0.0163	0.3357	0.4667	2.0307	0.0119
M15	BOVESEC1	0.0181	0.2104	0.0166	0.3140	0.4423	1.9530	0.0111
M16	BOSEC2	0.4993	1.6027	0.5797	2.3921	8.2413	28.0277	0.2040
M17	VESEC2	0.0196	0.2432	0.0163	0.3630	0.6180	2.1290	0.0119
M18	BOVESEC2	0.0181	0.2469	0.0166	0.3684	0.6670	2.0010	0.0111
M19	BOSEC3	0.4993	1.1283	0.5797	1.6840	6.0273	23.3003	0.2040
M20	VESEC3	0.0196	0.2090	0.0163	0.3120	0.5227	2.4570	0.0119
M21	BOVESEC3	0.0181	0.2043	0.0166	0.3048	0.5193	2.1743	0.0111
M22	TR7Y8	0.1729	1.3098	0.1844	1.9549	2.5217	19.5187	0.0914
M23	2WPPD21	0.0239	0.6075	0.0248	0.9068	3.5253	4.3333	0.0165
M24	3WP1	0.0772	0.8931	0.0498	1.3329	2.0517	9.5253	0.0504
M25	1W11PD3	1.3784	3.0143	2.7396	4.4989	0.6387	7.4640	0.5425
M26	1T5TP5	0.0043	0.0890	0.0063	0.1328	0.2227	0.8337	0.0034
M27	2T5TP5	0.0093	0.1811	0.0127	0.2703	0.4690	1.3733	0.0078
M28	1T5TP4	0.0048	0.1120	0.0068	0.1672	0.3843	1.1450	0.0037
M29	2T5TP4	0.0045	0.0948	0.0066	0.1415	0.2260	0.8140	0.0035

#### Anexo 4. Características de funcionamiento de los motores agregados reales

No	Barra	$I_s$ (A)	$Tem$ (Nm)	$P_1$ (kW)	$P_2$ (kW)	$P_{sl}$ (kW)	$cos\varphi$	$\eta$ .(%)
M1	TR7Ay8A	209.36	499.44	112.95	92.81	0.491	0.698	0.822
M2	2WPPD22	67.13	129.27	38.88	24.19	0.102	0.739	0.622
M3	AL105TR	26.08	70.06	15.86	13.07	0.078	0.770	0.824
M4	BOSEC4	9.57	24.14	6.09	4.41	0.026	0.827	0.705
M5	VESEC4	234.30	919.60	132.30	112.54	1.191	0.745	0.851
M6	VEBOSEC4	242.04	996.64	138.04	121.81	1.241	0.752	0.882
M7	BOSEC5	11.80	25.83	6.48	4.72	0.028	0.699	0.725
M8	VESEC5	256.54	905.03	132.62	110.62	1.229	0.658	0.834
M9	VEBOSEC5	251.60	899.75	130.85	110.14	1.058	0.663	0.842
M10	BOSEC6	12.59	26.42	6.66	4.81	0.032	0.680	0.717
M11	VESEC6	165.15	538.53	84.40	65.96	0.678	0.662	0.781
M12	BOVESEC6	250.95	899.47	134.81	110.00	1.096	0.696	0.816
M13	BOSEC1	6.60	11.83	4.26	2.20	0.006	0.853	0.517
M14	VESEC1	247.61	896.11	131.92	109.69	1.153	0.686	0.831
M15	BOVESEC1	251.53	907.53	133.28	110.98	1.107	0.691	0.833
M16	BOSEC2	10.41	15.70	4.90	2.91	0.010	0.595	0.594
M17	VESEC2	236.26	836.08	126.37	102.47	1.023	0.691	0.811
M18	BOVESEC2	245.96	849.58	131.38	104.03	0.988	0.683	0.792
M19	BOSEC3	11.61	14.02	4.71	2.60	0.008	0.525	0.552
M20	VESEC3	244.37	965.03	137.20	117.96	1.308	0.732	0.860
M21	BOVESEC3	256.57	980.02	142.01	119.67	1.260	0.719	0.843
M22	TR7Y8	15.13	25.59	6.14	4.78	0.012	0.510	0.777
M23	2WPPD21	68.43	117.21	40.87	21.95	0.051	0.768	0.535
M24	3WP1	46.19	107.98	24.32	20.04	0.171	0.667	0.806
M25	1W11PD3	25.28	19.71	6.62	2.17	0.032	0.329	0.328
M26	1T5TP5	562.42	1355.32	303.99	250.10	1.551	0.697	0.823
M27	2T5TP5	337.70	757.21	177.42	139.04	1.224	0.671	0.784
M28	1T5TP4	455.85	1126.33	253.80	208.20	1.203	0.727	0.820
M29	2T5TP4	562.23	1318.19	299.39	243.07	1.601	0.682	0.812

### Anexo 5. Principales datos nominales de los motores agregados obtenidos

<i>M. Agg</i>	<i>Barras</i>	$P_n$ (kW)	$U_n$ (V)	$I_n$ (A)	$n_n$ (rev/min)	$\cos\phi$ (pu)	$\eta$ (pu)	$\frac{T_a}{T_n}$	$\frac{T_m}{T_n}$	$\frac{l_a}{l_n}$	$J$ (kg.m <sup>2</sup> )	$R_s$ (Ohm)
M1	TR 7A y 8A	299	440	495.60	1761.33	0.863	0.9157	1.064	2	6.936	1.7378	0.0077
M4	M7 M13 M16 M19	BOSEC5 BOSEC6 BOSEC1 BOSEC2 BOSEC3										
	BOSEC4	12.5	440	23.73	1712.41	0.848	0.8179	3.516	2	6.578	0.0747	0.4186
M5	M8 M14 M17 M20	VESEC5 VESEC6 VESEC1 VESEC2 VESEC3										
	VESEC4	193	440	322.99	1175.91	0.859	0.9104	1.200	2	6.900	5.1768	0.0164
M22	TR 7y 8	29	440	50.12	1736.92	0.845	0.8603	1.654	2	6.253	0.1305	0.1450
M23	2WPPD21	139.5	440	250.47	1760.30	0.848	0.8525	1.350	2	7.104	0.6935	0.0200
M24	3WP1	55	440	95.50	1768.57	0.850	0.8762	1.628	2	7.093	0.2676	0.0647
M25	1W11PD3	6.6	440	15.60	1100.00	0.740	0.74	2.000	2.2	6.000	0.0162	1.1557

**Anexo 6. Parámetros del circuito equivalente de los motores agregados escogidos**

No	Barras	$R_l$ (Ohm)	$x_2$ (Ohm)	$r_2$ (Ohm)	$x_2$ (Ohm)	$r_m$ (Ohm)	$x_m$ (Ohm)
M1	TR 7A y 8A	0.0077	0.0559	0.0113	0.0838	0.1799	1.6675
<b>M4 M7 M13 M16 M19</b>		<b>BOSEC5 BOSEC6 BOSEC1 BOSEC2 BOSEC3</b>					
<b>BOSEC4</b>		0.4186	1.2019	0.5796	1.8029	7.3061	27.0234
<b>M5 M8 M14 M17 M20</b>		<b>VESEC5 VESEC6 VESEC1 VESEC2 VESEC3</b>					
<b>VESEC4</b>		0.0164	0.0849	0.0163	0.1273	0.2656	2.4478
<b>M6 M15 M18 M21</b>		<b>VEBOSEC5 BOVESEC6 BOVESEC1 BOVESEC2 BOVESEC3</b>					
<b>VEBOSEC4</b>		0.0152	0.0797	0.0166	0.1195	0.2837	2.2559
M22	TR 7y 8	0.1450	0.5413	0.1844	0.8120	1.7465	14.9200
M23	2WPPD21	0.0200	0.1183	0.0248	0.1774	0.7219	2.7349
M24	3WP1	0.0647	0.2959	0.0497	0.4439	1.3430	7.5068
M25	1W11PD3	1.1557	1.7887	1.7856	2.6830	4.5641	25.5293
M26	1T5TP5	0.0036	0.0306	0.0063	0.0459	0.1534	0.8104
M27	2T5TP5	0.0078	0.0563	0.0127	0.0844	0.2406	1.4826
M28	1T5TP4	0.0040	0.0333	0.0068	0.0500	0.1255	0.9662

## Anexo 7. Simbologías

$P_{lag}$	Potencia trifásica del motor agregado, medida en el alimentador principal, W.
$U$	Valor efectivo de la tensión media aritmética medido entre línea y línea para las tres fases, en presencia de asimetría se opera a través de las tres fases por separado.
$I_{ag}$	Valor efectivo medio de la corriente medida en las tres fases.
$fp_{ag}$	Factor de potencia del motor agregado en pu.
$P_{inag}$	Potencia de entrada del motor agregado a carga nominal.
$P_{2nag}$	Potencia nominal de salida del motor agregado a carga nominal, W.
$\eta_{nag}$	Eficiencia a plena carga del motor agregado.
$k_c$	Coefficiente de carga.
$\underline{S}_a$ y $\underline{S}_{ti}$	Potencias aparentes absorbidas por el motor agregado y la total de los motores considerados.
$V_a$ y $V_{ni}$	Magnitudes de tensión del motor agregado y de los motores considerados.
$I_a$ y $I_{ni}$	Magnitudes de corrientes del motor agregado y de los motores considerados.
$\alpha_a, \alpha_{ni}$ y $\gamma_a, \gamma_{ni}$	Ángulos de tensión y corriente del motor agregado y de los motores considerados y $n$ es el número de motores considerados.
$\varphi_a = \alpha - \gamma$ y $\varphi_{ni} = \alpha_{ni} - \gamma_{ni}$	Ángulos del factor de potencia del motor agregado y de los motores individuales.
$\eta_a$ y $\eta_{ni}$	Eficiencia del motor agregado e individuales respectivamente.
$s_a$	Deslizamiento del motor agregado.
$\omega_o$	Frecuencia angular del sistema de potencia.
$\omega_{ma}$	Velocidad angular del rotor para el motor agregado.
$\omega_{mi}$	Velocidad angular del rotor para el motor.
$p$ y $p_i$	Número de pares de polos del motor agregado y los individuales.
$T_{ema}$	Par electromagnético del motor agregado.
$\omega_o T_{ema}/p$ y $s_o \omega_o T_{ema}/p$	Potencia electromagnética y pérdidas en los devanados del rotor para el motor agregado respectivamente.

$T_{emi}$	Par electromagnético de los motores considerados
$\omega_o T_{emi}/p_i$ y $s_o \omega_o T_{emi}/p_i$	Potencia electromagnética y pérdidas en los devanados del rotor para los motores considerados respectivamente.
$T_{bra}$ y $T_{bri}$	Par a rotor bloqueado del motor agregado y de los motores considerados, respectivamente.
$T_{ma}$	Par máximo (break-down) del motor agregado.
$T_{mi}$	Par máximo de cada motor.
$T_{ma}$	Par electromagnético máximo del motor agregado.
$\omega_o T_{ma}/p$ y $s_{ma} \omega_o T_{ma}/p$	Potencia electromagnética y pérdidas en los devanados del rotor para el motor agregado respectivamente.
$\omega_o T_{mi}/p_i$ y $s_{mi} \omega_o T_{mi}/p_i$	Potencia electromagnética y pérdidas en los devanados del rotor para los motores considerados respectivamente.
$w_k$	Energía cinética del motor agregado.
$J$	Momento de inercia.
$w_{ki}$	Energía cinética del cada motor.
$J_i$	Momento de inercia.
$J_{ci}$	Se calcula de acuerdo a la inercia externa (de la carga) máxima normalizada para motores de categoría básica.
$P_n$	Potencia nominal en kW.
$p$	Pares de polos del motor.
$T_a$	Par nominal.
$I_{ra}$	Corriente por fase a través del devanado del rotor bajo condiciones nominales.
$R_r$	Resistencia por fase del devanado del rotor.
$s_a$	Deslizamiento nominal.
$T_{rba}$	Par a rotor bloqueado.
$I_{rba}$	Corriente por los devanados del rotor cuando este está bloqueado.
$I_{rni}$	Corriente por fase a través del devanado del rotor bajo condiciones nominales.
$R_{ri}$	Resistencia por fase resultante del devanado del rotor.

$s_{ni}$	Deslizamiento nominal.
$T_{rbi}$	Par a rotor bloqueado.
$I_{rbi}$	Corriente por fase a través del devanado del rotor bloqueado.
$R_{ri}$	Resistencia por fase del devanado del rotor bloqueado.
$t$	Subíndice que indica los valores de par, corriente.
$I$	Subíndice de los modelos estudiados (k).



## Anexo 8. Respuesta ante carga lineal

### *Perturbación torque de carga adicional*

$$T2 = 244.72 \text{ Nm} ; T3 = 12.07 \text{ Nm}; T12 = 459.8 \text{ Nm}$$

$$Tag = [(T2+T3)/2+T12/3] \times 2 = 563.32 \text{ Nm};$$

$$Tcarga = (nr/nn)^1 \times Tc + Tad, \text{ tiempo de 2s.}$$

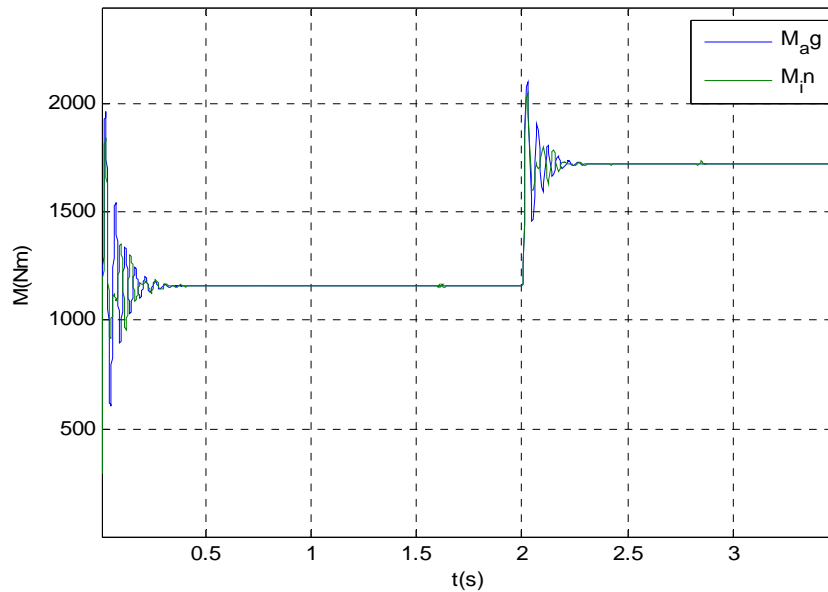


Fig. A8.1. Momento electromagnético del grupo de motores individuales y el motor agregado

Tabla A8.1. Momento electromagnético del motor agregado y los individuales

	Agregado	Individual
Valor medio	1235.58	1234.86
Desviación estándar	422.18	413.97

La figura A 8.1, se presenta el comportamiento del momento electromagnético del conjunto de motores individuales y el motor agregado, se puede observar que ambos responden ante la perturbación provocada a los 2 segundos después del arranque de manera simultánea estabilizándose a iguales valores, demostrándose el uso efectivo del motor agregado. La tabla A 8.1 refleja los valores numéricos del valor medio y la desviación estándar de esta simulación, reflejando el mínimo de diferencia en los resultados.

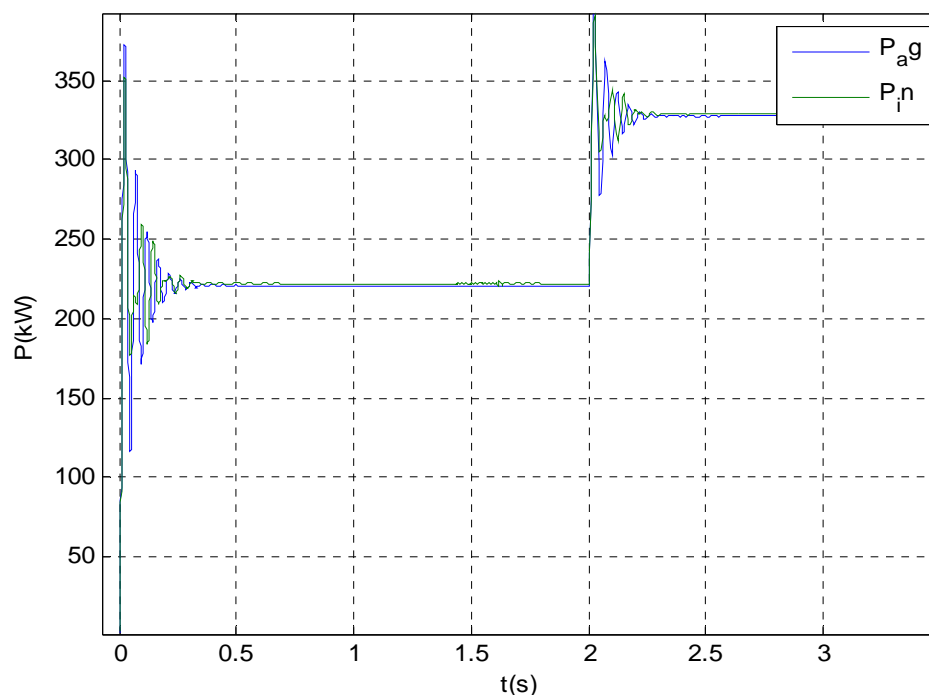


Figura: A8.2. Potencia activa del motor agregado y de los motores individuales en conjunto

Tabla A8.2. Potencia activa e el conjunto de motores individuales y el motor agregado

	Potencia activa	
	Agregado	Individual
Valor medio	235.65	236.83
Desviación estándar	79.82	78.41

En la figura A8.2 presenta el comportamiento de la potencia activa total demandada por el motor agregado y los individuales considerados en grupos, ante una perturbación del torque de carga, adicionando a los 2 segundos una sobrecarga igual al valor de la carga nominal de los motores individuales, reaccionando al cambio. Existe semejanza en el comportamiento del motor agregado obtenido para este punto de carga y el comportamiento en grupo de los individuales que contiene la barra de potencia. Esta similitud permite estudiar la respuesta ante variaciones de carga en el eje de los motores individuales a través del agregado, simplificando el análisis por concepto de disminución de cantidad de motores analizados en cargas lineales.