

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad muchas de las tareas que una industria moderna debe llevar a cabo, son realizadas por motores de inducción. En países industrializados un 40 a 50 % de toda la energía producida está destinada para el consumo de estas máquinas [1]. El mercado de estos motores ha crecido de manera tal, que tener un control y monitoreo continuo y eficiente de su comportamiento se ha vuelto indispensable.

Como consecuencia de esta necesidad, es usual que la industria use métodos basados en mantenimientos como herramientas importantes dentro de sus programas de operación [2]; como por ejemplo:

“Mantenimiento Basado en la Condición” (*condition-based maintenance, CBM*): es un plan de mantenimiento práctico que busca optimizar la combinación de mantenimientos preventivo, predictivo, previsor y basado en fallas. Para esto se identifica un “equipo de trabajo de confiabilidad” que realice una valoración cualitativa de los procesos de planta, así como de la maquinaria, para determinar la importancia de las tareas que se deberán llevar a cabo. Se debe analizar el tipo de mantenimiento a realizarse para evitar hacer dos actividades en las que se obtenga un mismo resultado. Es importante tener una mejora ininterrumpida del equipo y el programa de mantenimiento se debería reevaluar con una periodicidad anual o semi-anual.

“Mantenimiento Basado en la Confiabilidad” (*reliability-based maintenance, RBM*): es un método muy similar a CBM, ya que RBM es una estrategia técnica de mantenimiento que busca identificar la metodología apropiada en base de los requisitos de mantenimiento adecuados para cada situación. La diferencia más importante entre RBM y CBM es que RBM usa una rigurosa evaluación cuantitativa de la criticidad del equipo basada en conductas de falla identificadas y sus efectos. Una vez que se ha identificado las conductas de falla, los requisitos de mantenimiento son especificados para cada parte del equipo; con esto se desarrolla los procedimientos para ejecutar un mantenimiento preventivo de tal manera de conseguir una alto índice de confiabilidad.

Estos métodos, junto con esquemas convencionales de mantenimiento se aplican para monitorear el funcionamiento de la maquinaria de tipo eléctrico, entre ellos, los motores de inducción y tienen como objetivo reducir el número de fallas inesperadas y el tiempo improductivo, incrementando el tiempo entre paros planificados para mantenimientos programados, dando como resultado la reducción de los costos de operación y mantenimiento en general.

En la actualidad, la evolución de estrategias de medición, control de procesos, automatización y procesamiento de señales digitales, ha logrado un gran avance en el campo de la investigación de nuevas técnicas, desarrollo de modelos y aplicaciones, para evitar la operación de máquinas eléctricas en condiciones poco seguras y para evaluar el estado de las mismas “En-Línea” evitando que estas dejen de funcionar durante algún proceso de diagnóstico.

Un motor de inducción es un sistema electromecánico, por lo que pueden presentarse fallas de naturaleza eléctrica y mecánica. De acuerdo con estadísticas de fallas en motores de inducción tipo jaula de ardilla [3], se ha reportado que el porcentaje de fallas, de acuerdo al elemento constitutivo del motor en el que ocurre la falla, es el que se muestra en el siguiente esquema:

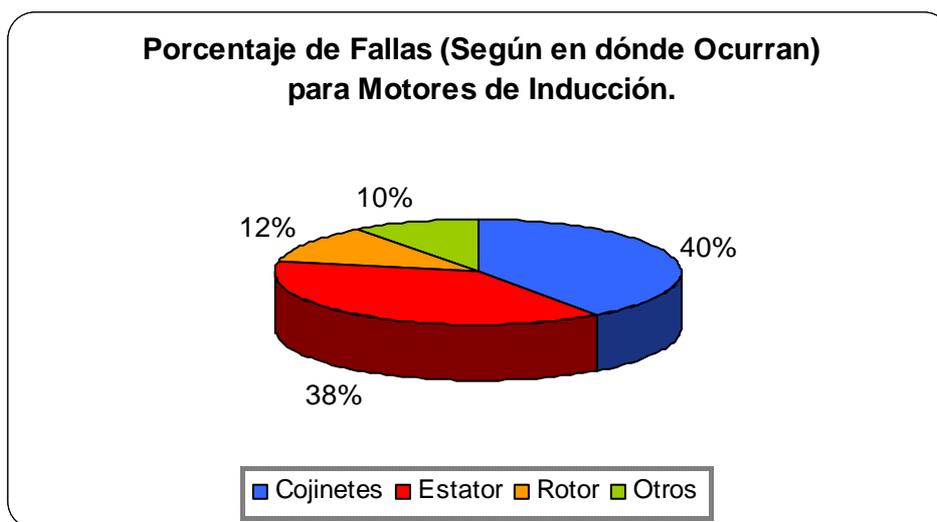


Figura 1.1 Porcentajes de Fallas en Motores de Inducción de acuerdo al componente constitutivo en el que ocurren [3].

- ✓ **Fallas en los Cojinetes o Rodamientos:** la mayoría de máquinas eléctricas usa cojinetes con elementos rotativos, tales como bolas o rodillos, que son una de las causas más comunes de falla. Una falla en el rodamiento ocasionaría componentes de frecuencia únicas en las mediciones de vibración mecánica y en las señales de otros sensores, estas frecuencias de falla, son función de la geometría del rodamiento y de la velocidad de rotación. Las fallas en los rodamientos, pueden causar también excentricidad del rotor.

- ✓ **Fallas en el Estator:** las fallas en los devanados del estator, son a menudo ocasionadas por fallas de aislamiento entre dos espiras adyacentes del

devanado; a este tipo de falla se la denomina como falla “espira a espira” o “cortocircuito entre espiras”. Las corrientes inducidas resultantes producen sobrecalentamiento y causan un desbalance en el flujo magnético. Si esta falla no se detecta, el calentamiento causará más daño al aislamiento del estator hasta desembocar en una falla irreversible. El desbalance del flujo magnético puede resultar en una vibración excesiva que a su vez puede causar fallas prematuras en los cojinetes.

Adicionalmente, se puede presentar fallas por conexiones incorrectas de los devanados estáticos.

- ✓ **Fallas en el Rotor:** las fallas que ocurren en el rotor ocupan alrededor del 10 % del total de fallas en motores de inducción. La falla más común en el rotor es la ruptura o el agrietamiento de las barras del mismo, en la unión con el aro que forma la jaula de ardilla, esto puede ser atribuible al ciclo térmico o mecánico del rotor durante la operación. Este tipo de falla produce un efecto bastante estudiado en las componentes espectrales de corriente, en las que aparecen un par de bandas laterales alrededor de la frecuencia fundamental.

- ✓ **Otras:** (12%), como la excentricidad de eje que se surge cuando el rotor no está perfectamente centrado con respecto del estator, produciendo un entrehierro no uniforme entre ellos y esto causa vibración mecánica anormal. Además que no se puede descartar la posibilidad de que los motores tengan errores de fabricación.

De estos datos, se puede concluir que los problemas en los devanados estáticos de motores de inducción tipo jaula de ardilla, son en general, bastante frecuentes y que la posibilidad de que la falla ocurra, existe en la mayoría de los casos.

En general, la falla de un motor de inducción, que es el núcleo mismo de los procesos industriales más comunes, se traduce en significativas pérdidas, desde un atraso leve en la elaboración de algún detalle, hasta un detenimiento total del sistema de producción, con lo que se sobreentiende un daño a la economía de la empresa. De aquí que el monitoreo de los motores de inducción se vuelve esencial para cualquier tipo de mantenimiento implementado en una industria.

1.2 MÉTODOS DE MONITOREO

El objetivo final y que tiene mayor dificultad en ser alcanzado en el monitoreo “En-Línea” es el de examinar las características y los parámetros que permitan determinar si existe o no una falla, y discriminar la naturaleza de la misma. Los métodos más comunes que se han estado utilizando son entre otros[4]:

- Análisis Circuital del Motor (*Motor Circuit Analysis MCA*)
- Análisis de Vibraciones
- Análisis Infrarrojo
- Análisis Espectral de Corrientes del Motor (*Motor Current Signature Analysis MCSA*)

1.2.1 ANÁLISIS CIRCUITAL DEL MOTOR.

Este método en bajo voltaje usa lecturas individuales de resistencia, impedancia, inductancia, ángulo de fase, corriente con su respectiva respuesta en frecuencia y pruebas de aislamiento a tierra para determinar, evaluar y resolver problemas de conexión, cables, estado del rotor y estator, entrehierro y aislamiento a tierra [5]. Es así que las lecturas de una resistencia son usadas para detectar desconexiones y conductores rotos, mientras que los valores de impedancia e inductancia son comparados para evaluar condiciones de aislamiento entre bobinados. Además, las pruebas de aislamiento a tierra son utilizadas para detectar fallas a tierra, mientras que los ángulos de fase y respuesta en frecuencia, evalúan posibles cortocircuitos entre espiras de los bobinados del motor.

Un caso de estudio publicado por la corporación BJM [5] explica como un generador a bordo de un buque militar experimentaba fallas que causaban altas temperaturas. Se decidió utilizar MCA para su diagnóstico y se desmontó el generador. Más adelante, se hizo pruebas de comparación de impedancia-inductancia y con eso se detectaron cortocircuitos entre los bobinados del estator.

1.2.2 ANÁLISIS DE VIBRACIONES

El análisis de vibraciones [4] requiere que un transductor lleve la señal vibratoria a un dispositivo capaz de analizar su respuesta en frecuencia. Dependiendo del tipo de carga y del tipo de falla, este análisis provee indicadores de fallas mecánicas y su severidad, además de dar indicios para detectar fallas eléctricas. Para este proceso se requiere conocimiento del sistema a diagnosticar.

Un estudio de aplicación de IFM Efecto Inc. [6] ha desarrollado un sistema que mediante sensores inteligentes basado en análisis de vibraciones es capaz de determinar frecuencias críticas de vibración y almacenar amplitudes mínimas que logran determinar el normal funcionamiento de motores de inducción.

1.2.3 ANÁLISIS INFRARROJO

El principio del análisis infrarrojo [4] es proveer información acerca de la diferencia de temperatura entre objetos. Un análisis infrarrojo se puede aplicar para determinar de manera confiable fallas eléctricas como por ejemplo desconexiones y cortocircuitos. Además, puede prevenir daños mecánicos de una manera menos confiable. Las lecturas varían de acuerdo a la carga y se necesita conocimiento del sistema a ser evaluado.

La empresa ElectriSCAN [7], ha desarrollado, en base de termografía por infrarrojo, dispositivos específicos para hacer diagnósticos de equipo eléctrico. El aparato detecta excesos de temperatura en conductores cuyas causas pueden ser sobrecargas, circuitos desbalanceados e interruptores en mal estado. Con el criterio de que previo a una falla irreversible el elemento incrementa su temperatura, la termografía por infrarrojo detecta este exceso de calor y permite que los ingenieros de mantenimiento puedan actuar correctamente en el lugar adecuado.

1.2.4 ANÁLISIS ESPECTRAL DE CORRIENTES DEL MOTOR

El MCSA usa al motor como transductor y analiza cómo varía la corriente a través de él. Usualmente utiliza la representación en frecuencia de la señal. Este método sirve para detectar fallas eléctricas como el cortocircuitado de bobinas o

mecánicas como la ruptura de barras del rotor. Es sensitivo a variaciones de carga y requiere conocimiento de los datos de placa del motor y es usado principalmente para decidir si un motor continúa o no operando.

En la Universidad de Colombia se ha desarrollado un estudio [8] en el que en base de varios parámetros medidos y adquiridos a un PC, y teniendo comunicación con MS Access y un algoritmo basado en los principios de MCSA, se logra determinar frecuencias correspondientes a fallas en los rodamientos y barras rotas de la jaula de ardilla del rotor.

1.2.5 COMPARACIÓN DE MÉTODOS

La siguiente Tabla hace un análisis comparativo entre los métodos analizados anteriormente.

Tabla 1.1 Comparación de los métodos de diagnóstico. [4]

	Calidad de potencia	Estator	Rotor	Entre-hierro	Roda-mientos	Aisla-miento	Vibra-ción	Aline-amiento	Carga
MCA	-	X	X	X	-	X	-	-	-
Vibración	-	P	P	P	X	-	X	X	X
Infrarrojo	X	P	-	-	P	-	-	P	P
MCSA	X	X	X	X	P	-	X	X	X

Donde:

- x significa que el objetivo a diagnosticar es perfectamente compatible con el método.

- P significa que el objetivo a diagnosticar es poco compatible con el método.

Tabla 1.2 Consideraciones administrativas de la implementación de los métodos. [4]

	Precio estimado (USD)	Invasivo	Experiencia de operador	Personal dedicado	Incluye software
MCA	1000-9000	Si	Algo	No	No siempre
Vibración	10000	No	Alta	Recomendado	Si
Infrarrojo	10000	No	Alta	Recomendado	Si
MCSA	1000-16000	No	Algo	Recomendado	Si

Debido a que MCSA es un método muy amplio que tiene facilidad de ser implementado en hardware y software, que no es extremadamente caro, además de ser un método no invasivo, no necesitar experiencia del operador y por último, que existe una gran cantidad de personas envueltas en la investigación de este método por sus excelentes resultados, se ha decidido implementar un sistema basado en MCSA.

1.3 ANÁLISIS ESPECTRAL DE CORRIENTE DEL MOTOR

1.3.1 ANTECEDENTES.

El análisis de corriente en motores de inducción tiene su origen en Gran Bretaña entre los años de 1970 y 1980. Como resultado de esta investigación se precisó que observando el contenido en frecuencia de la corriente de alimentación de un motor trifásico de inducción, es posible determinar el estado de ciertos componentes del motor, como por ejemplo: cortocircuitos entre los devanados del estator, las barras de la jaula de ardilla o los anillos de la misma y además de poder determinar el nivel de excentricidad del entrehierro [9]. El software asociado

al MCSA, fue entonces desarrollado en base de estos estudios, como una combinación de leyes fundamentales de la física y el conocimiento empírico recogido del estudio de muchos centenares de motores industriales diferentes.

Posteriormente, en el año de 1989, *Oak Ridge National Laboratory* (O.R.N.L) [10, 11], desarrolló una tecnología para monitoreo de máquinas eléctricas basada en MCSA; con el fin de supervisar a los dispositivos controladores de motores eléctricos en la Estación de Generación *Philadelphia Electric Company Eddystone* para determinar la degradación por envejecimiento del equipo de la planta. En una valoración del envejecimiento de válvulas operadas por un motor, MCSA mostró ser capaz de detectar, diferenciar y monitorear el progreso de las anomalías de éstas.

En la actualidad MCSA, se presenta como una excelente alternativa de monitoreo en línea y no invasivo, usada para diagnosticar ciertos problemas que se pueden presentar en motores de inducción, tales como cortocircuitos en los devanados estatóricos en bajo voltaje, barras rotas en el rotor, niveles anormales de excentricidad del entrehierro y ciertos problemas mecánicos.

En el sistema a ser diseñado, se enfocará únicamente la detección de fallas por cortocircuito de los bobinados del estator en motores de inducción jaula de ardilla.

1.3.2 CARACTERÍSTICAS DEL MCSA.

Un sinnúmero de pruebas han confirmado que MCSA tiene fortalezas inherentes al método como tal, las más notables se describen a continuación [10,11]:

- Tiene la capacidad de hacer monitoreo no invasivo y en una posición remota respecto del equipo al que se está evaluando.
- Proporciona información acerca del daño y el diagnóstico del equipo, comparable con la instrumentación convencional.
- Tiene la capacidad de diferenciar entre un tipo de falla y otra.
- El diagnóstico mediante MCSA, puede ser realizado rápidamente y tan frecuentemente como se desee y por personal relativamente inexperto, usando equipo portátil y económico.
- Es aplicable tanto para máquinas de alta potencia, como para máquinas de potencia fraccionaria, de corriente continua o corriente alterna que pueden ser trifásicas o monofásicas.
- Para máquinas trifásicas, se requiere analizar únicamente la corriente de una de las tres fases.
- Usando MCSA se puede detectar y diferenciar fallas relacionadas con la carga y la alimentación al motor, analizando en forma conjunta las señales de voltaje y corriente de alimentación al motor.

En general, MCSA es un método de monitoreo de maquinaria eléctrica de tipo industrial que se aplica principalmente en motores de inducción; tiene la ventaja de poder hacer el diagnóstico en forma no invasiva, es decir, mientras el motor esta trabajando en condiciones normales de operación y proporcionando un alto grado de sensibilidad, selectividad y rentabilidad.

1.3.3 FUNDAMENTOS DE MCSA.

MCSA se fundamenta en que a un motor eléctrico convencional, se lo puede ver también como un transductor eficiente y permanentemente conectado, ya que a través de él se puede detectar variaciones en la carga o variaciones de naturaleza mecánica en su funcionamiento. Estas variaciones generadas dentro del sistema mecánico, son convertidas como señales distintivas o “marcas” en la corriente eléctrica de alimentación al motor, por lo que para obtener estas señales, es necesario tomar una muestra de dicha corriente, lo que se puede hacer de forma confiable y segura con métodos no invasivos. La muestra tomada debe ser procesada con el fin de suministrar indicativos de la condición del motor y para este análisis se puede usar el dominio del tiempo o el dominio de la frecuencia, siendo este último el método más usado actualmente.

MCSA [12], usa como criterio que a través de una combinación de las componentes de frecuencia de señales de voltaje y corriente de alimentación al motor se puede detectar y diferenciar fallas relacionadas con la carga y la alimentación al motor. Se puede, entonces, clasificar a las fallas como de naturaleza eléctrica o mecánica con el siguiente principio:

- Si las componentes que se muestran en la señal de corriente, se reflejan también en la señal de voltaje, se concluye que la falla es de naturaleza eléctrica.
- Si las componentes se muestran en la señal de corriente, pero no en la señal de voltaje, se concluye que el problema es de naturaleza mecánica.

De acuerdo al fundamento de MCSA, se requiere de ciertos elementos para que éste método pueda ser implementado de forma exitosa, tal como se muestra en la Figura 1.2, y esto incluye [13]:

- Tener un conocimiento elemental respecto del diseño y operación de motores de inducción, que pueden ser trifásicos o monofásicos.
- Adquirir de manera adecuada las señales de corriente y voltaje de alimentación del motor para que puedan ser analizadas.
- Analizar las señales adquiridas en un “Instrumento de MCSA” que permita mostrar el rasgo distintivo en la corriente para poder hacer el diagnóstico del motor en análisis.
- Tener una base de conocimientos experta obtenida a través de la experiencia y la pericia de los operadores dentro de la organización y/o consultores externos, para definir los criterios de gravedad de la falla.
- Una vez hecho el diagnóstico, es el operador encargado del control de la maquinaria quien debe tomar la decisión definitiva, esto es, escoger entre retirar el motor inmediatamente para que sea reparado o dejarlo en funcionamiento y planear un paro programado para rectificar el problema.

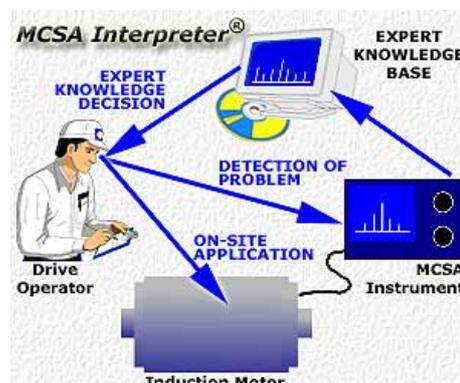


Figura 1.2. Esquema global para el uso de MCSA [13].

1.4 MCSA PARA DETECCIÓN DE CORTOCIRCUITOS.

1.4.1 CAUSAS Y CONSECUENCIAS DE LOS CORTOCIRCUITOS.

La mayor parte de fallas relacionadas con el estator o armadura son los cortocircuitos. Las fallas que pueden presentarse en este ámbito son[14] :

- Cortocircuito entre fases. El motor falla y la protección del equipo desconecta la alimentación.
- Cortocircuito fase-tierra. El motor falla y la protección del equipo desconecta la alimentación.
- Cortocircuito espira-espira en una bobina. El motor continúa trabajando durante un tiempo indeterminado.
- Cortocircuito entre bobinas de la misma fase. El motor continúa trabajando durante un tiempo indeterminado.

Las dos primeras categorías son bastante graves, para lo cual una detección preventiva es casi imposible de hacer, mientras que las otras tienen un tiempo preliminar indeterminado antes de que lleguen a una falla grave. Las principales razones para que estas falla ocurran son: [13, 15]

- Altas temperaturas del núcleo o de los bobinados.
- Laminación del núcleo y juntas flojas.
- Pérdida del aseguramiento del final de las bobinas.
- Contaminación por aceite, humedad y suciedad.
- Pérdidas en los sistemas de enfriamiento.
- Desbalanceo de una de las fases.

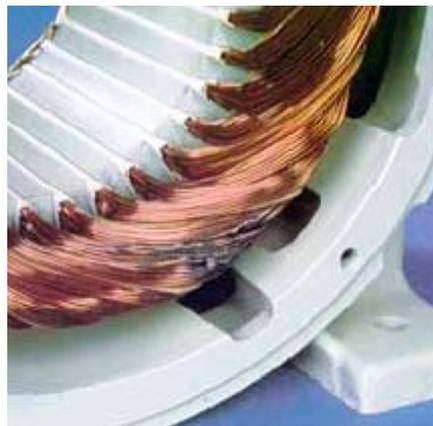
Las Figuras que se muestran a continuación, son un ejemplo de motores con presencia de cortocircuitos. En el caso de la Figura 1.3a [16] se expone un motor trifásico conectado en delta, en donde se puede identificar cortocircuitos en una sola fase. La Figura 1.3b [16] corresponde a un motor con cortocircuito fase-fase, mientras que en la Figura 1.3c [16], se muestra un cortocircuito entre espiras de la misma fase.



a)



b)



c)

Figura 1.3. Motores con daño: a) en una sola fase, b) entre fases, c) entre espiras de una misma fase.

Como se mencionó anteriormente, los casos de cortocircuito son solo detectable antes de una falla total si estos ocurren entre espiras seguidas (una o dos) o no-seguidas pero de una sola fase.

De igual manera, queda aún la incógnita de cuánto tiempo puede operar un motor con esta falla antes de que se queme totalmente. Esta pregunta aún no tiene respuesta, ya que depende de cada motor únicamente. Idealmente, para detectar esta falla se necesitaría un monitoreo “en línea”, sobretodo para motores de bajo voltaje.

Una de las mayores dificultades para detectar esta falla es que en muchas ocasiones, las bobinas no están al alcance del ser humano y cuando lo están, muchas veces ni siquiera se puede observar las espiras cortocircuitadas, lo que lleva a la necesidad de que un método de detección aplicado en estos casos debe ser no-invasivo.

Es necesario tener una idea del estado de cualquier motor de una industria para poder, si es necesario, programar un paro en la producción para mantenimiento, precautelando así, la integridad de la producción y la seguridad del personal de una industria.

De todo lo expuesto anteriormente se puede concluir que realizar un monitoreo periódico en los motores de inducción dentro de una industria, con el fin de prevenir y evitar riesgos tanto en la maquinaria como en el personal, es fundamental, y MCSA es un método eficiente para lograrlo.

1.4.2 DESARROLLO CONCEPTUAL Y MATEMÁTICO.

En esta sección se presenta el desarrollo conceptual y matemático que permite fundamentar la aplicación de MCSA para la detección de cortocircuitos entre espiras en motores de inducción.

Fuga de flujo magnético radial

Muchas personas han propuesto el uso del flujo axial como variable de referencia para monitoreo del estado del motor de inducción [17]. A través de esta técnica se puede detectar fallas como barras del rotor quebradas, cortocircuitos en los bobinados del estator y excentricidades del eje.

Para la máquina de inducción ideal, la fuga de flujo axial es nulo. Esto es porque, en condiciones libres de falla, las corrientes del rotor y del estator están perfectamente balanceadas. En la práctica, las asimetrías existen por las imperfecciones inherentes a la fabricación de los elementos, como al enrollado de los bobinados, así como también, deformaciones e imperfecciones en los materiales de construcción.

La consideración importante que hay que tomar en cuenta es que una falla representa una asimetría grande, sobretodo en los bobinados del estator. De esta manera, es posible deducir matemáticamente las componentes armónicas generadas por una falla en particular.

En el caso de las espiras cortocircuitadas, la asimetría se produce porque este conjunto de espiras, forman una bobina diferente a la original acopladas magnéticamente. En la Figura 1.4a se ve una bobina que induce un campo magnético. Al cortocircuitar algunas espiras, Figura 1.4b, se tiene un circuito equivalente a dos bobinas mutuamente inducidas Figura 1.4c. Cabe recalcar que ya que la resistencia de la bobina que hace el cortocircuito es pequeña, la

corriente tiende a ser muy alta y a producir calor. Este acoplamiento magnético es el que da una asimetría representativa en el flujo axial de la bobina del motor.

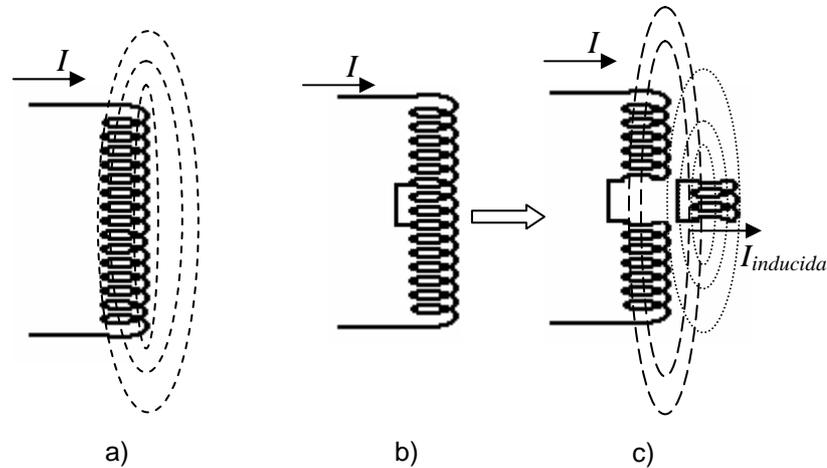


Figura 1.4. Representación de la asimetría por cortocircuitado en espiras.

La asimetría de flujo, induce a su vez una corriente y sus armónicas con una frecuencia específica que es deducida a continuación.

Análisis de armónicas en la corriente inducida por la fuga de inducción magnética radial.

La existencia de esta falla resulta en un cambio en la distribución de armónicas en el flujo magnético [17]. Determinar estas armónicas resulta bastante difícil si se las mide sensando directamente este flujo. De aquí que es necesario determinar una relación entre estas armónicas y una variable que sea modificada por éstas directamente, y además, sea fácil de sensar. Debido a que el flujo magnético induce un voltaje y que éste, a su vez, genera una corriente sobre una impedancia cuando está conectado en circuito cerrado, la forma de onda de corriente contendrá la misma distribución de componentes armónicas del flujo magnético.

Partiendo de un caso particular para un motor de inducción de cuatro polos, bobinado de paso fraccionario y distribuido, sin cortocircuito, la distribución del campo magnético es de la siguiente manera:

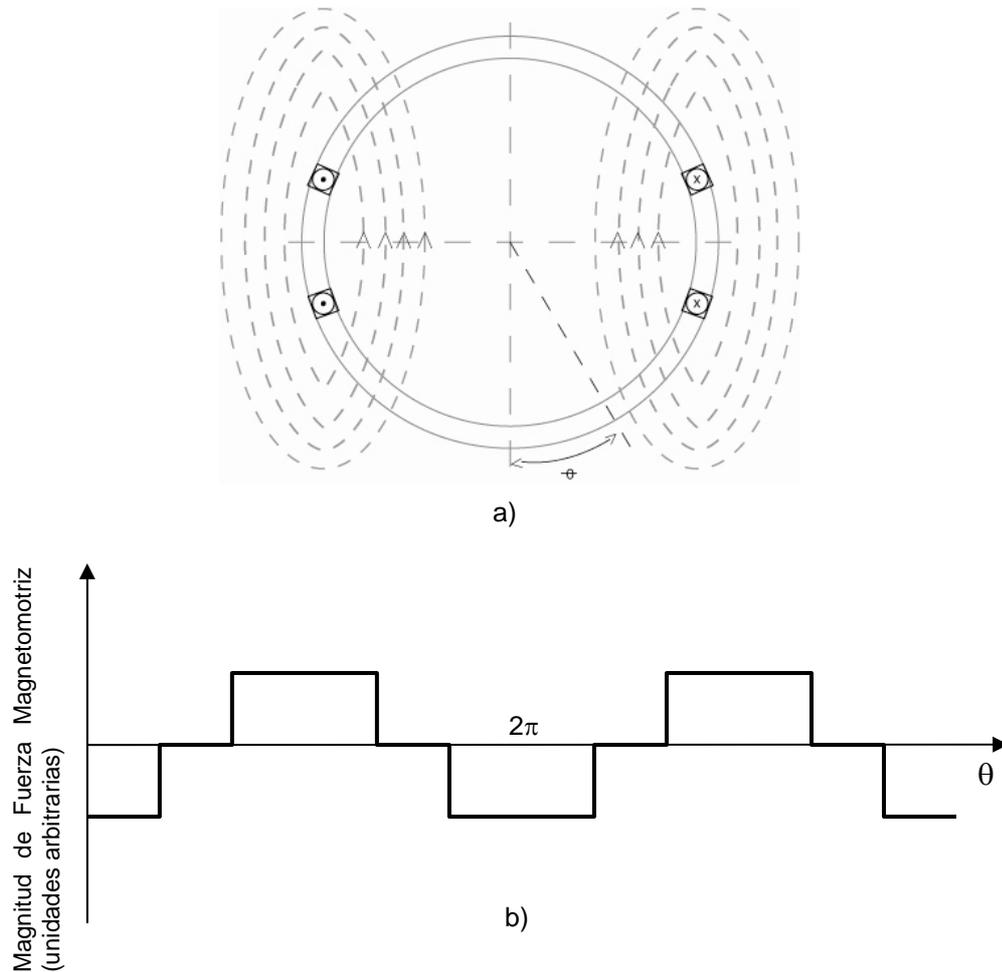


Figura 1.5. Distribución espacial del campo magnético en un motor de inducción. a) Distribución espacial, b) disposición angular.

De esta distribución se puede deducir que la expansión en series de Fourier se expresa de la siguiente manera:

$$B_{(t,\theta)} = \sum_n \sum_k B_{nk} \cos(k\omega t \pm np\theta) \quad (1.1)$$

donde:

- $B_{(t,\theta)}$ es la inducción magnética en un tiempo y ángulo espacial dado.

- B_{nk} es la nk ésima armónica de la inducción magnética.
- ω es la frecuencia angular de la red.
- θ es un ángulo arbitrario sobre un punto del estator desde un eje arbitrario común para estator y rotor visto por un observado estacionario
- $k = 1,3,5\dots$ debido a las armónicas de la red.
- $n = 1,5,7,11\dots$ debido a las armónicas espaciales.

Tomando en cuenta que un cortocircuito representa un desbalanceo significativo en la distribución de la inducción magnética, se puede representar esta distribución, para un motor de cuatro polos, de la siguiente manera:

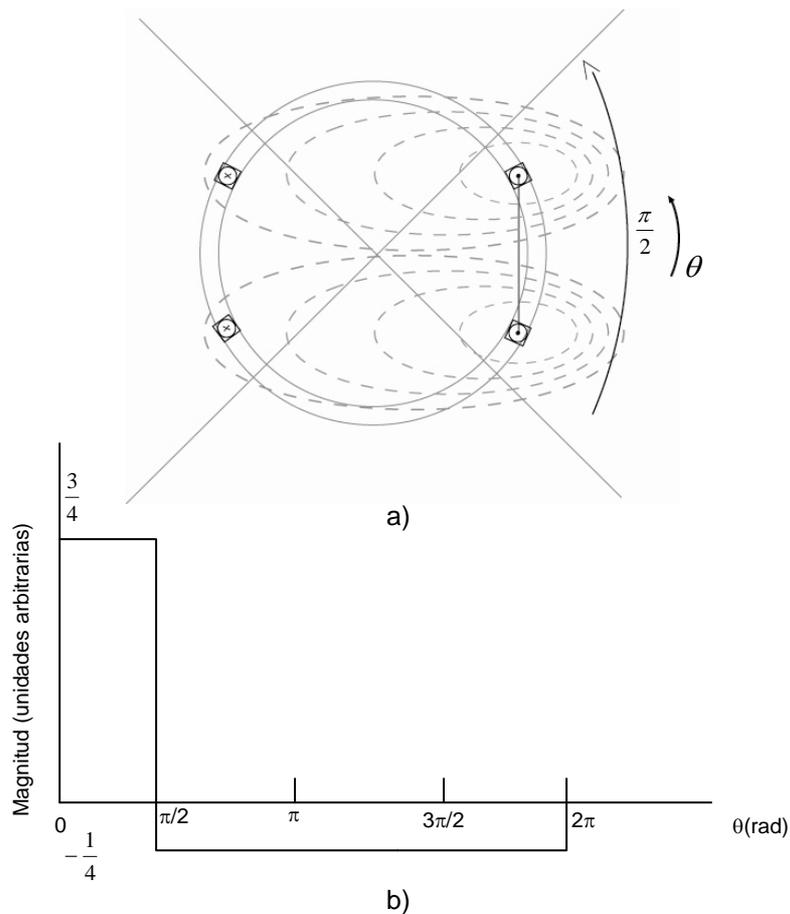


Figura 1.6. Distribución de un campo magnético debido a espiras Cortocircuitadas
a) Distribución espacial, b) Distribución angular

La expansión en series de Fourier de esta forma de onda espacial contiene todas las armónicas, pares e impares, de aquí que:

$$B_{(t,\theta)} = \frac{1}{2} \sum_n \sum_k B_{nk} \cos(k\omega t \pm n\theta) \quad (1.2)$$

Debido a que existe simetría entre el ciclo positivo y negativo de 1:3, las armónicas múltiplos de cuatro desaparecen. En general, si se tiene una simetría de 1:(2p-1) siempre desaparecerán las armónicas 2p.

La ecuación (1.2) toma como marco de referencia al estator. Si se cambia el marco de referencia al rotor, haciendo que el ángulo θ arbitrario se mueva junto a un punto arbitrario en el rotor, cuyo eje de referencia es el mismo tomado para un observador estacionario del caso anterior, se tiene:

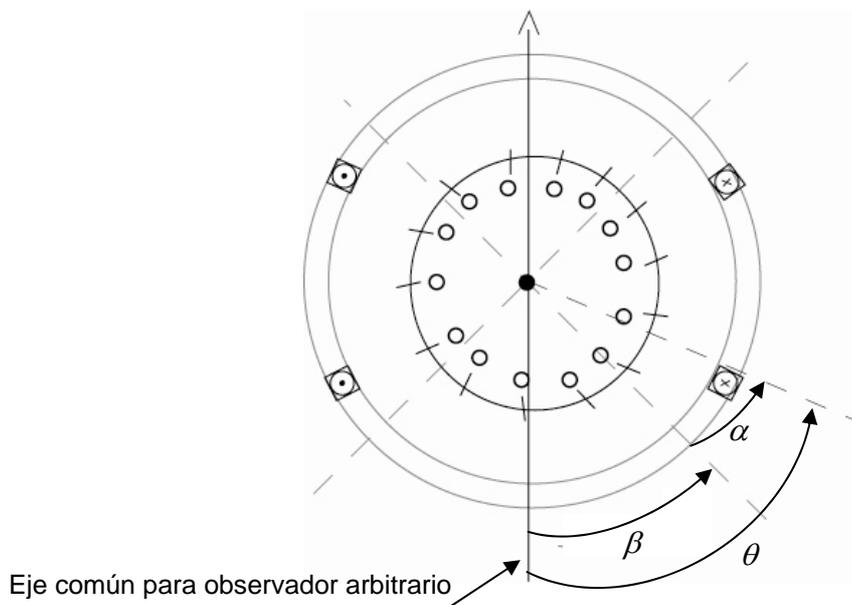


Figura 1.7. Transformación de marco de referencia.

Del gráfico: $\theta = \alpha + \beta$, donde α es el ángulo entre un punto arbitrario del rotor y el eje del rotor y β es el ángulo entre el eje del rotor y el eje común para un observador estacionario. β gira a la velocidad angular del rotor ω_r , por lo que $\beta = \omega_r t$.

De esto se tiene que:

$$\theta = \alpha + \omega_r t \quad (1.3)$$

y usando la definición general para el deslizamiento:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (1.4)$$

donde ω_s es la velocidad sincrónica definida por la relación ω/p . Despejando:

$$\omega_r = \frac{\omega(1-s)}{p} \quad (1.5)$$

Reemplazando (1.5) en (1.3) y esta a su vez en (1.2), reordenando y sacando factor común se obtiene que

$$B_s = \frac{1}{2} \sum \sum B_n \cos \left[\left(k + \frac{n}{p}(1-s) \right) \omega t + n\alpha \right], n \neq 4m \text{ para todo } m \quad (1.6)$$

El factor $\left(k + \frac{n}{p}(1-s) \right) \omega$ representa un pico por cortocircuito en el espectro

de frecuencia de la inducción magnética, que corresponde al mismo escalado para la corriente.

De aquí que:

$$\omega_{cc} = \omega \left(k + \frac{n}{p}(1-s) \right) \quad (1.7)$$

donde ω_{cc} es la frecuencia angular de cortocircuito, y ω es la frecuencia angular de red. Si a esta expresión la dividimos para 2π , se tiene

$$f_{cc} = f_{red} \left(k + \frac{n}{p}(1-s) \right) \quad (1.8)$$

Para $k=1,3,\dots$ y $n=1,2,3,\dots$

Las frecuencias en las que caen las armónicas del flujo magnético son exactamente las frecuencias en las que se encontrarán picos en el espectro de corriente. Por esta razón, analizando la forma de onda de la corriente, se puede verificar fácilmente la existencia o no de armónicas en las frecuencias calculadas con (1.8)

En la Figura 1.8a, se puede observar un espectro de corriente ideal y uno con espiras cortocircuitadas en el estator.

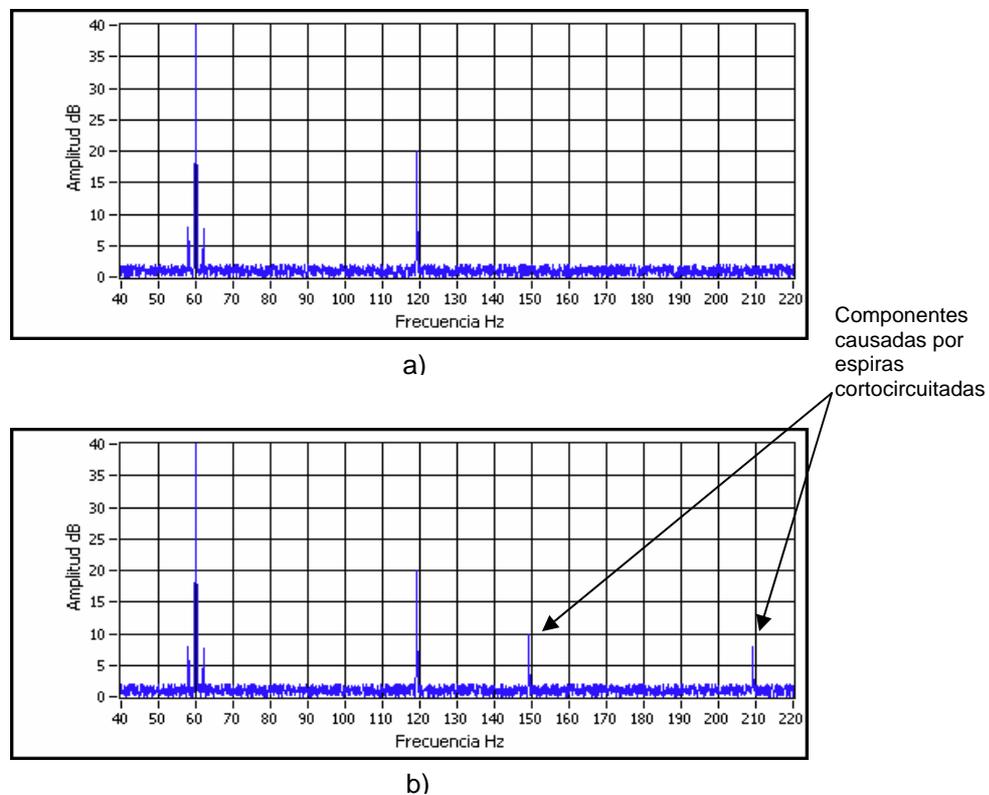


Figura 1.8. Espectros de corriente de dos motores ideales: a) sin falla, b) con falla

En síntesis el algoritmo de MCSA para la detección de fallas en motores de inducción por cortocircuito en los bobinados estáticos obedece el siguiente diagrama de flujo:

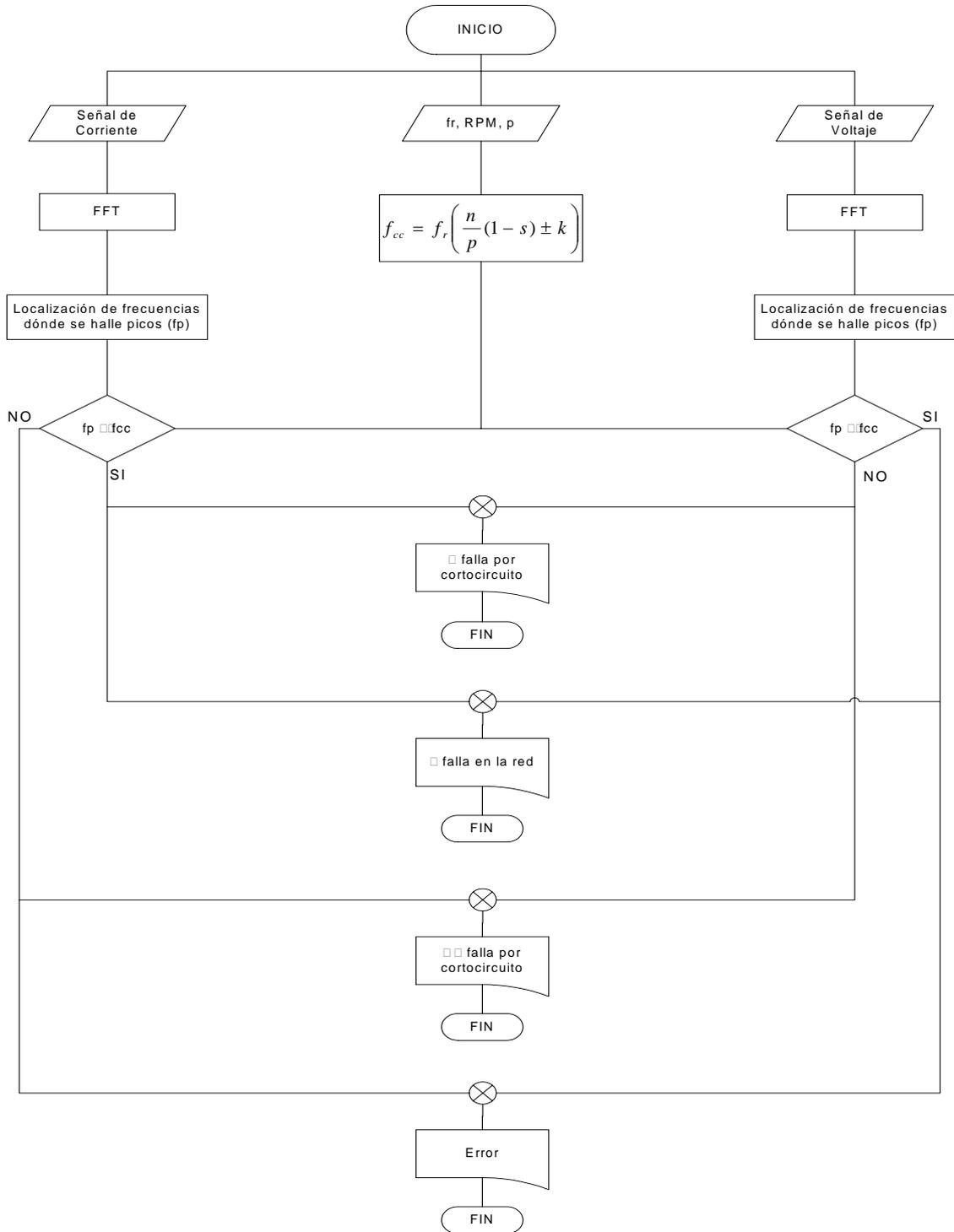


Figura 1.9. Diagrama de flujo del algoritmo de MCSA

1.4.3 CONSIDERACIONES DEL MÉTODO DE DIAGNÓSTICO.

De acuerdo a las variables que afectan a la frecuencia y magnitud de las frecuencias armónicas, se debe considerar aspectos que pueden influir significativamente en el diagnóstico y de acuerdo a estos, llevar a cabo implementaciones diferentes, o incluso, llegar a cambiar de estrategia.

Debido a que las frecuencias armónicas son caracterizadas por la ecuación 1.8, las consideraciones que deben tomarse son las siguientes [13]:

- Diferencias en los diseños de cada motor.
- Potencia del motor.
- Efectos debidos a la carga.
- Efectos de la presencia de un reductor mecánico de velocidad.

El *diseño de cada motor* tiene influencia sobre la velocidad sincrónica ya que esta es función del número de polos específico para cada motor. Además, cabe señalar que los motores de inducción pueden tener dos tipos de rotores: devanados o jaula de ardilla. La estrategia en estudio es aplicable a ambos.

El sistema debe ser acorde a la *potencia del motor* sujeto de estudio, tomando en cuenta que en el mercado existe una variedad de motores cuyas potencias oscilan desde fracciones de HP hasta miles de HP.

El *efecto de carga* se produce si el torque de la carga varía con la posición del rotor. En este caso la corriente contiene componentes espectrales que pueden coincidir con los causados con la condición de falla [18]. Una situación en la que se evidencia este problema es cuando el motor es usado en compresores o trituradores en cuyo caso la carga no es constante en el tiempo. En general, de

acuerdo a estudios previamente realizados en [14] el efecto de la carga existe y es representativo en la ubicación de las armónicas en el espectro.

Cuando el motor está conectado a un *reductor mecánico de velocidad* puede producir componentes en el espectro de frecuencias de corriente que pueden estar cerca o en el mismo lugar que las frecuencias armónicas [19].

El presente proyecto presenta la implementación de un sistema basado en MCSA para la detección de fallas por cortocircuitos en las espiras de los bobinados del estator de motores de inducción.