

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD



**“IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO
PREDICTIVO PARA LOS MOTORES ELÉCTRICOS EN BAJA TENSIÓN
EN LA PLANTA SUPERMETANOL EMPLEANDO EL EQUIPO PARA
SUPERVISIÓN EN LÍNEA EXPLORE 3000”**

Realizado Por:

KARINA VANESSA MANCILLA ANGARITA

Trabajo de Grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito parcial
para optar al título de:

INGENIERO ELECTRICISTA

Barcelona, Abril de 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD



**“IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO
PREDICTIVO PARA LOS MOTORES ELÉCTRICOS EN BAJA TENSIÓN
EN LA PLANTA SUPERMETANOL EMPLEANDO EL EQUIPO PARA
SUPERVISIÓN EN LÍNEA EXPLORE 3000”**

Ing. Luís Parraguez

Asesor Académico

Ing. Kleiner Medina

Asesor Industrial

Ing. Santiago Escalante

Jurado Principal

Ing. Lenin Natera

Jurado Principal

Barcelona, Abril de 2010

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ELECTRICIDAD



**“IMPLEMENTACIÓN DE UN PROGRAMA DE MANTENIMIENTO
PREDICTIVO PARA LOS MOTORES ELÉCTRICOS EN BAJA TENSIÓN
EN LA PLANTA SUPERMETANOL EMPLEANDO EL EQUIPO PARA
SUPERVISIÓN EN LÍNEA EXPLORE 3000”**

JURADO CALIFICADOR

El Jurado Hace Constar que Asignó a Esta Tesis la Calificación de:

Ing. Santiago Escalante

Jurado Principal

Ing. Lenin Natera

Jurado Principal

Ing. Luís Parraguez

Asesor Académico

Ing. Kleiner Medina

Asesor Industrial

RESOLUCIÓN

De acuerdo al **Artículo 41** del reglamento de trabajos de grado de la Universidad de Oriente:

“Los trabajos de grado son de exclusiva propiedad de la Universidad y solo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”.

DEDICATORIA

A mi Dios todo poderoso y a la Virgencita del Valle por darme la sabiduría para superar todos los obstáculos que se me han presentado por el camino y darme fuerza para seguir luchando para alcanzar otras metas y poder salir adelante.

A Dios, por ser el responsable de darme el más grande de mis dichas, ser hija de una mujer y hombre tan maravillosos, como lo son *mis padres*, solo su amor y dedicación han podido formarme, solo su energía y su espíritu luchador han servido como base e inspiración de mis logros, solo su sonrisa y existencia me hacen feliz. Los amo..!!

A mis hermanos: Juvenal, Hanyorley, Jonathan, Albeiro, Alexander, Leonardo y a toda mi familia que de una u otra forma estuvieron a mi lado, que este triunfo sea motivo de orgullo para alcanzar todas sus metas.

A esa persona tan especial, como lo es Mi Vida, Mi loco, Mi ñoquito, Mi amor, Mi corazón, Mi cielo. Por su apoyo, que con su amor, comprensión y esfuerzo estuvo a mi lado, dándome apoyo y motivación en esta trayectoria. **¡Gracias por Existir Juan Diego!**

A la familia *Ramírez Llovera* por haberme brindado su amistad, apoyo y esas palabras de aliento cuando más las necesite y considerarme como una hija más.

A él *Prof. Pedro López* por apoyarme, aconsejarme y ser tan especial; gracias por estar presente y contribuir con el logro de esta meta. Mas que un profesor un amigo. ¡GRACIAS!

A mi grupo de estudio: Simón Ramírez “Mon”, Luis Manuel “Juan Corazón”, Rodrigo Marval “Sherk” y Juan Diego “Mi Vida”. Juntos compartimos alegrías, tristezas, ceros y excelentes notas. Los quiero muchachos...!!

AGRADECIMIENTOS

A La Universidad de Oriente y al Departamento de Electricidad por brindarme la oportunidad de empezar y culminar una de mis metas, ser Ingeniero Electricista.

A la Empresa Supemetanol, C.A, por darme la oportunidad de realizar mi trabajo de grado en sus instalaciones, especialmente al personal de Mantenimiento y Producción, por siempre estar dispuestos a prestar su colaboración en el desarrollo del presente trabajo.

A mi tutor Académico Ing. Luis Parraguez, por haberme ayudado y asesorado, quien con su asesoría logró orientarme en la elaboración de este trabajo.

A mi tutor Industrial Ing. Kleiner Medina, por haberme brindado su apoyo y conocimiento que contribuyeron a la realización de este trabajo.

A mi gente querida de la Sub-Estación Eléctrica: Freites, Omar, Williams, Kleiner y José, por haberme brindado todos sus conocimientos y apoyo en la realización de mi trabajo de grado más que compañeros de trabajos son amigos. ***Los quiero...!!!***

Al personal de Mantenimiento Mecánico, gracias por su amistad incondicional, ayuda y colaboración.

A los señores Immer Marín y Severiano Mujica por haberme regalado un poquito de su tiempo, consejos y amistad durante el periodo de mi pasantía.

A todos mis amigos y compañeros de estudios, en especial a: Simón “Mon”, Juan Diego “Mi Vida”, Rodrigo “Sherk”, Luis Manuel “Juan Corazón”, José Lira “papa oso”, Zoraida Castillo “Zor”, Victor “vic-vic”, Yenzo y Anny, que confiaron en mí y que de una u otra forma estuvieron a mi lado tendiéndome la mano desinteresadamente. Ruego a Dios para que se cumplan sus metas. ¡Gracias por su amistad!

A los Santos por haberme ayudado en los momentos más difíciles. ¡Gracias por toda la ayuda!

Gracias a Todos...!!!

RESUMEN

El motor de inducción, especialmente el tipo jaula de ardilla, es la máquina eléctrica más utilizada a nivel industrial debido a las ventajas que presenta sobre los demás, como son: bajo costo, alta confiabilidad, robustez, capacidad de trabajar en ambientes sucios y explosivos, por esta razón, el mantenimiento de equipos e instalaciones industriales ha cobrado una gran importancia en las últimas décadas debido a que las exigencias de calidad de la producción son cada vez mayores y al hecho de que las empresas necesitan ser más competitivas en el ámbito del comercio nacional como internacional.

El desarrollo de nuevas estrategias de monitoreo con los equipos en funcionamiento es vital en el sector industrial debido a que es posible evitar el paro de la producción o incurrir en gastos innecesarios de mantenimiento. Es por eso que la empresa Supermetanol C.A, ha decidido realizar el estudio del equipo para supervisión en línea Explore 3000 y establecer rutas de mantenimiento predictivo a través de un programa a seguir, para que este sea asociado al programa de mantenimiento preventivo actual.

ÍNDICE GENERAL

RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN	ix
ÍNDICE GENERAL	x
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	xvii
1.1 Antecedentes de la Empresa.....	xvii
1.2 Organización de la Empresa.....	20
1.2.1 Organigrama de la Empresa.....	20
1.3 Descripción Del Proceso De Obtención De Metanol.....	22
1.3.1 Desulfuración y saturación del gas natural.....	22
1.3.2 Reformación y enfriamiento del gas de síntesis.....	23
1.3.3 Síntesis del Metanol.....	23
1.3.4 Purificación del Producto.....	24
1.3.5 Diagrama del proceso de obtención de Metanol.....	24
1.4 Distribución del Sistema Eléctrico de la Empresa.....	25
1.4.1 Diagrama unifilar de la subestación eléctrica de la empresa.....	28
1.5 Planteamiento del Problema.....	29
1.6 Objetivos.....	31
1.6.1 Objetivo General.....	31
1.6.2 Objetivos Específicos.....	31
CAPÍTULO 2: TEORÍA DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS	33
2.1 Generalidades.....	33
2.2 Motor de Inducción.....	33

2.2.1 Motor de Inducción Jaula de Ardilla.....	34
2.2.2 Característica de Construcción.....	34
2.2.3 Principios de Operación.....	37
2.3 Sistema de Aislamiento.....	38
2.3.1 Aislante Eléctrico.....	38
2.3.2 Clase de Aislamiento.....	39
2.3.3 Causas de la Degradación del Aislamiento.....	40
2.3.3.1 Esfuerzo Térmico.....	41
2.3.3.2 Esfuerzo Eléctrico.....	42
2.3.3.3 Esfuerzo Mecánico.....	43
2.4 Fallas Típicas en Motores Eléctricos de Inducción.....	44
2.4.1 Degradación del Aislamiento.....	45
2.4.2 Condiciones Ambientales Adversas.....	45
2.4.3 Instalación Inadecuada.....	46
2.4.4 Fallas Eléctricas y Mecánicas.....	47
2.4.5 Desperfectos Mecánicos.....	47
2.4.6 Fallas Eléctricas.....	48
2.4.7 Desperfectos Más frecuentes en los Devanados.....	49
2.4.7.1 Desequilibrio de Voltaje.....	49
2.4.7.2 Sobrecarga.....	50
2.4.7.3 Sobretensiones.....	51
2.4.7.4 Arranques Repetidos.....	52
2.4.7.5 Bloqueo del Rotor o Frenado Contracorriente.....	52
2.4.7.6 Anomalías del Rotor.....	53
2.4.7.7 Apertura de Una Fase de un Devanado Trifásico.....	54
2.4.7.8 Devanado con Contacto a Tierra.....	54
2.4.7.9 Espiras en Cortocircuito en Una o más de una Bobina.....	55
2.5 Falla por Vibración Mecánica.....	56
2.5.1 Vibración Debida a Desbalance.....	56

2.5.2 Vibración Debida a Falta de Alineamiento	56
2.5.3 Vibración Debida a Excentricidad	57
2.5.4 Elementos Rodantes Defectuosos	58
2.5.5 Vibración debida a rodamientos de Chumacera defectuosos.....	59
2.5.6 Vibración Debida a Aflojamiento Mecánico	60
2.5.7 Vibración Debida a Fallas Eléctricas	61
CAPÍTULO 3: EQUIPO PARA SUPERVISIÓN EN LÍNEA EXPLORE 3000	63
3.1 Generalidades.....	63
3.2 Explore 3000	63
3.2.1 Funciones del Explore 3000.....	65
3.2.1.1 Colección avanzada de datos:	65
3.2.1.2 Facilidad de organización:	65
3.2.1.3 Monitoreo en línea:	65
3.3. Ámbitos de Pruebas	65
3.3.1 Calidad de Energía	65
3.3.2 Ejecución de la Máquina	66
3.3.3 Corriente.....	67
3.3.4 Espectro.....	67
3.3.5 Torsión	68
3.3.6 Conexiones.....	69
3.3.7 Monitoreo VFD (opcional)	70
3.3.8 Monitoreo Continuo	70
3.3.9 Análisis Transitorio.....	71
3.4 Ubicación de los Equipos de Medición.....	71
3.5 Evaluación de la Calidad de Energía	73
3.5.1 Niveles de tensión permitidos para la operación normal del motor.....	73
3.5.2 Eficiencia del Motor de Inducción Trifásico	81
3.6 Análisis del Espectro de Corriente.....	86
3.6.1 Evaluación del espectro en bajas frecuencias	87

3.6.1.1 Detección de daños en el rotor	87
3.6.2 Evaluación del espectro en altas frecuencias.	88
3.6.2.1 Determinación de la velocidad del motor	91
CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	93
4.1 Generalidades.....	93
4.2 Datos para el Análisis.....	93
4.2.1 Calidad de Energía	93
4.2.2 Estator	94
4.2.3 Rotor.....	94
4.3 Resultados	95
4.4 Análisis.....	100
CAPITULO 5: PROGRAMA DE MANTENIMIENTO.....	104
5.1 Generalidades.....	104
5.2 Mantenimiento	104
5.2.1 Mantenimiento Correctivo	105
5.2.2 Mantenimiento preventivo	105
5.2.3 Mantenimiento predictivo	105
5.3 Ventajas del Mantenimiento Predictivo	106
5.4 Técnicas del Mantenimiento Predictivo.....	106
5.5 Estrategia para el Programa de Mantenimiento	107
5.6 Baker Explore 3000	108
5.7 Plan de Mantenimiento Predictivo	108
5.8 Programación	110
5.9 Control y Seguimiento	110
CONCLUSIONES.....	111
RECOMENDACIONES.....	112
BIBLIOGRAFÍA.....	113
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	116
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO.....	1/5

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Clase de aislamiento para motores.....	39
Tabla 2.2. Causas de fallas eléctricas y mecánicas presentes en un motor asincrónico.	47
Tabla 2.3. Resumen de la situación.....	49
Tabla 3.1. Niveles de tensión permitidos para la operación de motores trifásicos	73
Tabla 3.2. Límites de tensión para motores de inducción de baja y media tensión ...	74
Tabla 3.3. Límites de distorsión armónica en la tensión.....	77
Tabla 3.4. Límites de distorsión armónica en la corriente.	77
Tabla 3.5. Principales armónicos asociados con sus respectivas secuencias.	79
Tabla 3.6. Relación numérica entre desbalances de tensión, desbalance de corriente e incremento de temperatura del motor.	81
Tabla 4.1. Resumen de Resultados.	96
Tabla 4.2. Resumen de Resultados.	97
Tabla 4.3. Resumen de Resultados.	98
Tabla 4.4. Resumen de Resultados.	99

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación geográfica del complejo petroquímico José Antonio Anzoátegui.	18
Figura 1.2. Ubicación de la empresa dentro del Complejo Petroquímico.	19
Figura 1.3. Organigrama de la Gerencia General de la empresa	21
Figura 1.4. Estructura de la Superintendencia de Mantenimiento	22
Figura 1.5. Diagrama general del proceso de obtención de metanol de la empresa.	24
Figura 1.6. Diagrama unifilar de la subestación eléctrica de la empresa.	29
Figura 2.1. Estator.	34
Figura 2.2. Cilindro formado por el estator.	34
Figura 2.3. Devanado estático del motor dentro del núcleo.	35
Figura 2.4. Laminas del rotor del motor de inducción.	36
Figura 2.5. Núcleo del rotor.	36
Figura 2.6. Partes del motor de inducción	37
Figura 2.7. Devanado de Fase Dañado por un Desequilibrio de Tensión.	50
Figura 2.8. Devanado dañado por una sobrecarga.	51
Figura 2.9. Falla de un Devanado por una Sobretensión.	52
Figura 2.10. Daño Causado por Bloqueo del Rotor.	53
Figura 2.11. Apertura de una fase (conexión Y).	54
Figura 2.12. Falla a Tierra en el Borde De una Ranura.	55
Figura 2.13. Falla a Tierra dentro De la Ranura.	55
Figura 2.14. Cortocircuito entre Espiras de un Devanado.	55
Figura 3.1. Explore 3000/3000R.	64
Figura 3.2. Calidad de Energía.	66
Figura 3.3. Ejecución de la Máquina.	66
Figura 3.4. Corriente.	67
Figura 3.5. Espectro.	68

Figura 3.6. Espectro.	68
Figura 3.7. Fasores.	69
Figura 3.8. Conexiones.	69
Figura 3.9. Monitoreo Continuo.	70
Figura 3.11. Diagrama de conexión para motores de media y alta tensión.	72
Figura 3.12. Variación en el desempeño del motor producto de la variación de la tensión.	74
Figura 3.13. Espectro de onda de la tensión trifásica de alimentación de un motor de inducción.	78
Figura 3.14. Factor de reducción basado en el porcentaje de desbalance de la tensión.	80
Figura 3.15. Característica de eficiencia en función del porcentaje de carga.	85
Figura 3.16. Curva del factor de potencia en función del porcentaje de la corriente.	85
Figura 3.17. Relación entre la señal en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.	87
Figura 3.18. Posición del rotor ante excentricidad estática.	89
Figura 3.19. Posición del rotor ante excentricidad dinámica.	90
Grafica 4.1. Armónicos en la MP-5105/B.	100
Grafica 4.2. Formas de Ondas Distorsionadas.	100
Figura 4.1. Sobrecorriente.	101
Figura 4.2. Corriente.	101
Figura 4.3. Factor de Servicio Efectivo.	102
Figura 4.4. Calidad de Energía.	102
Grafica 4.3. Análisis del Espectro Frecuencial de las Corrientes del MEA-4305/05.	102
Grafica 4.4. Análisis del Espectro Frecuencial de las Corrientes del MEA-4305/17.	103

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes de la Empresa

Supermetanol, C.A., es una empresa que se crea dentro del contexto de Empresas Mixtas, cuyo proyecto propuesta originalmente era la de llevar adelante la construcción de una Planta de Metanol que produjera cerca de 2.000 toneladas métricas diarias de metanol de alta pureza. Gracias a las facilidades propicias que se dieron en Venezuela: alta disponibilidad de gas natural, medios de producción confiables, y el rápido y sencillo acceso a los principales mercados nacional e internacional, se dieron las condiciones perfectas para la construcción de la planta Supermetanol C.A.

Supermetanol C.A., es una empresa dedicada a la producción de Metanol de alta pureza a partir del gas natural, el cual constituye una de las principales fuentes para el desarrollo de la industria química. El metanol es extremadamente versátil ya que se utiliza como materia prima de diversos productos químicos, tales como: Formaldehído, Metil-terbutil-éter (MTBE), ácido acético, además es utilizado como solvente, combustible en procesos de congelación y deshidratación, y en la fabricación de resinas para materiales de construcción.

El capital fundador de Supermetanol debe su origen a la unión de los socios industriales Pequiven (Petroquímica de Venezuela) por parte de Venezuela, y Ecofuel filial del Ente Nazionale Idrocarburi (ENI) como socio italiano, cada uno con igual porcentaje de acciones 34.5 %. Junto a ellos están dos socios financieros: Methanor Holding Limited (Chemical Bank) y Banca Commerciale Italiana; cada uno con 15.5 % de las acciones totales.

Concebida como uno de los megaproyectos petroquímicos, Supermetanol se construye entre los años 1991 y 1995. Diseñada con capacidad de producción de dos mil (2.000) toneladas métricas por día (TMPD) de metanol grado AA (alta pureza), utiliza la tecnología de la Imperial Chemical Industries (ICI) y la ingeniería básica desarrollada por Davy Process Technology (John Brown, London). La ingeniería de detalle, procura y supervisión de la construcción y arranque queda a cargo del consorcio Snamprogetti-Tecnoconsult.

La planta SUPERMETANOL, CA., se encuentra dentro de las instalaciones del Complejo Petroquímico "José Antonio Anzoátegui", en Jose jurisdicción del Municipio Bolívar del Estado Anzoátegui.

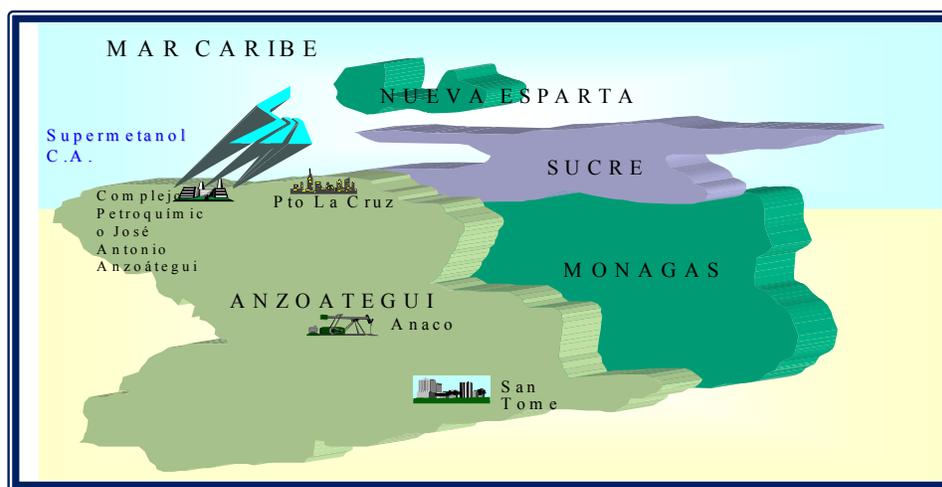


Figura 1.1. Ubicación geográfica del complejo petroquímico José Antonio Anzoátegui.

En el año 1992 se hicieron los primeros movimientos de tierra para ubicar la planta y los bienes del edificio administrativo, el inicio de la vía de penetración para los vehículos y la infraestructura de la planta de producción dentro del complejo petroquímico de Jose.

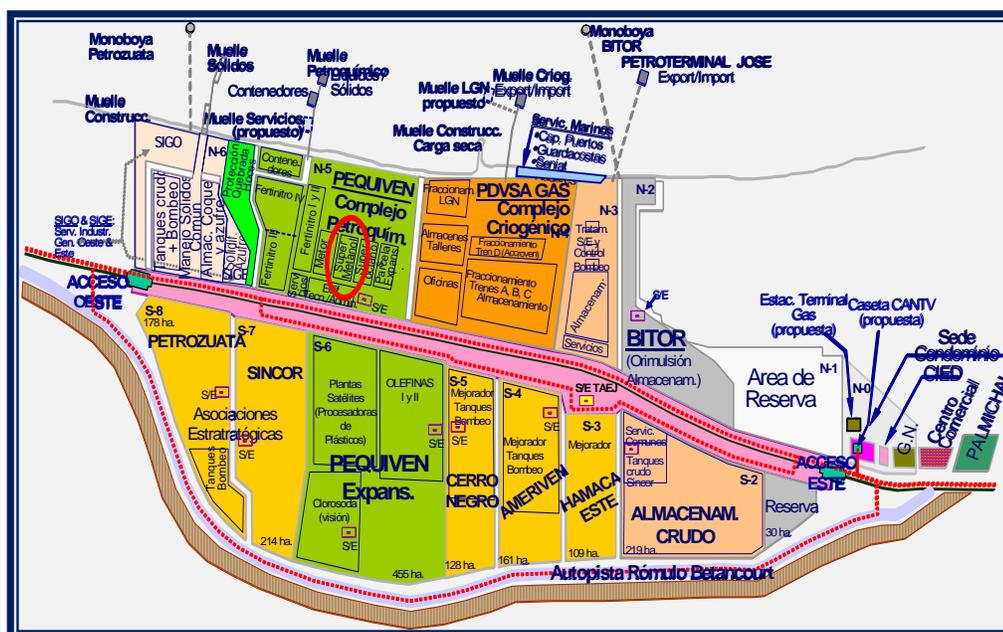


Figura 1.2. Ubicación de la empresa dentro del Complejo Petroquímico.

El costo estimado de la inversión fue de unos 320 millones de dólares, el 39 % de este monto provino del capital aportado por los accionistas; parte de este aporte provino de los socios financieros y fue efectuado a través del programa de Conversión de Deuda Pública Externa Venezolana en inversión. El 61 % restante del costo total de la inversión se obtuvo de tres fuentes de financiamiento internacional, lideradas por Banca Comérciale Italiana, Chemical Investment Bank Limited y la Corporación Andina de Fomento.

Como proyecto, la planta culmina con gran éxito antes de la fecha establecida y la primera gota de metanol a especificación se produjo el 11 de octubre de 1994, durante ese mes también se efectuó el primer embarque de producto hacia Texas, Estados Unidos. Supermetanol inicia sus operaciones comerciales el 14 de enero de 1995. La Planta de Supermetanol fue inaugurada el 18 de febrero de 1995, por el Presidente de la República, Dr. Rafael Caldera.

1.2 Organización de la Empresa

Desde el punto de vista organizacional, como empresa mixta, Supermetanol posee una junta directiva conformada por un grupo de directores principales junto con sus suplentes, que pertenecen a Pequiven, Ecofuel y el resto de los socios financieros. Uno de los directores principales actúa como presidente de la junta. La dirección de la empresa está a cargo del Gerente General, quien es elegido por la Junta Directiva, y que conjuntamente con un equipo de gerentes y superintendentes, completan el organigrama columna principal de la empresa.

La empresa cuenta con trabajadores entre gerentes, supervisores, especialistas, operadores y personal de mantenimiento, con basta experiencia para operar la planta. El grado de instrucción del personal se divide de la siguiente manera: 26% trabajadores con nivel de Bachiller y Técnico medio, 41% Técnico Superior y 33% restante de Profesionales Universitarios, algunos de ellos con post-grado.

1.2.1 Organigrama de la Empresa

La estructura organizativa de la Gerencia General de Supermetanol, se compone de la siguiente manera:

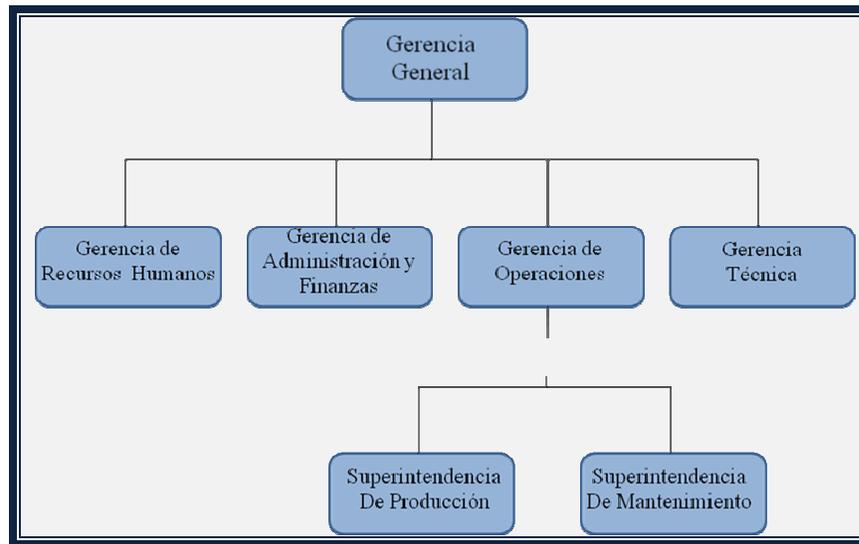


Figura 1.3. Organigrama de la Gerencia General de la empresa

La Superintendencia de Mantenimiento se divide de la siguiente manera:

- Superintendente de Mantenimiento
- Supervisor de Planificación
- Supervisor de Instrumentación
- Supervisor de Electricidad
- Supervisor de Mecánica Estáticas
- Supervisor de Mecánica Rotativa

Quedando distribuida de la siguiente manera:

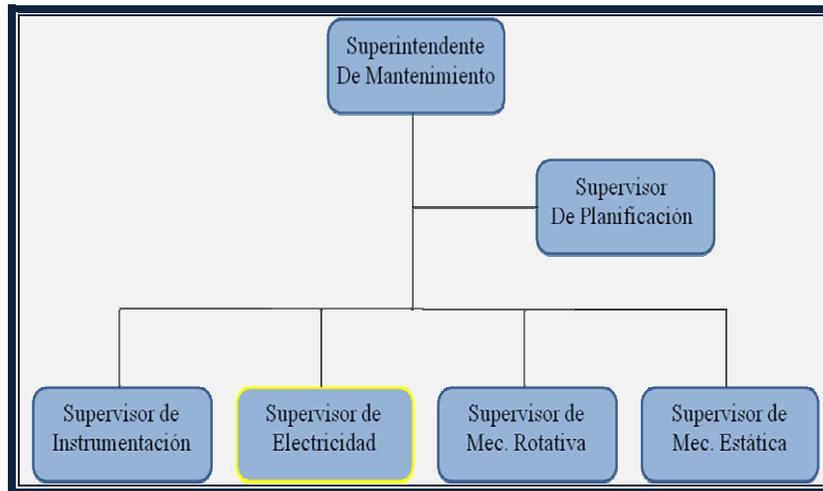


Figura 1.4. Estructura de la Superintendencia de Mantenimiento

1.3 Descripción Del Proceso De Obtención De Metanol

En el proceso para la obtención del metanol se emplea gas natural como materia prima. La planta cuenta con cuatro secciones principales:

- Desulfuración y saturación del gas natural.
- Reformación y enfriamiento del gas de síntesis.
- Síntesis de Metanol.
- Purificación del producto

A continuación se describe brevemente, cada uno de los procesos que se llevan a cabo [1].

1.3.1 Desulfuración y saturación del gas natural

El gas natural rico en Metano CH_4 y con óxidos de carbonos, contiene además pequeñas cantidades de compuestos de azufre los cuales deben ser removidos antes

de que el gas sea admitido al Reformador, para evitar envenenamiento del catalizador. El gas natural es entonces alimentado a la sección de HDS (Hidrodesulfuración) en donde en un primer reactor, los compuestos de azufre son convertidos en Sulfuro de Hidrógeno (H_2S) en presencia de un catalizador de óxido de níquel y óxido de molibdeno soportado en alúmina. Posteriormente, la corriente de salida de este reactor rica en H_2S , pasa a uno o dos recipientes con catalizador de óxido de zinc, en donde el H_2S es absorbido sobre el óxido de zinc.

1.3.2 Reformación y enfriamiento del gas de síntesis

La corriente desulfurada es saturada con agua y posteriormente mezclada con el vapor requerido para la reformación. En esta etapa (Producción de Gas de Síntesis) y en presencia de un catalizador de níquel, el vapor reacciona con los hidrocarburos gaseosos produciendo un gas reformado (gas de síntesis) constituido por CO_2 , CO , H_2 , CH_4 . Esta reacción requiere de gran cantidad de calor (reacción endotérmica) el cual es suministrado por quemadores que utilizan gas natural y gas de purga proveniente de la sección de síntesis como combustible. El gas de síntesis sale de esta sección a aprox. $880^\circ C$, lo cual se aprovecha para producir vapor (en una caldera de recuperación de calor) y proveer el calor necesario en el resto del proceso (proceso de recuperación de calor o enfriamiento del gas reformado).

1.3.3 Síntesis del Metanol

Después del proceso de recuperación de calor, el gas de síntesis es comprimido desde $16 \text{ Kg/cm}^2\text{g}$ hasta $84 \text{ Kg/cm}^2\text{g}$ en dos etapas de compresión con el propósito de acondicionar este gas para luego ser alimentado al reactor de síntesis de metanol en donde se producirá el metanol crudo. La síntesis del metanol se realiza a una presión cercana a los $82 \text{ Kg/cm}^2\text{g}$ y temperaturas de aprox. $240^\circ C$ sobre un catalizador de Cobre/Zinc. Otros de los productos de esta sección de síntesis, además de metanol,

son agua y gas de purga (rico en H_2) el cual es usado como reciclo al reactor, como combustible y como parte de la alimentación a la sección de HDS.

1.3.4 Purificación del Producto

El metanol crudo es ahora alimentado a la sección de purificación que consta de dos columnas de destilación. En la primera el metanol crudo es despojado de los compuestos livianos y el resultado de esta primera destilación es un metanol mezclado con agua. En la segunda etapa de purificación, la mezcla metanol – agua es alimentada a otra columna de destilación en donde se separa el agua del metanol resultando un metanol con un porcentaje de pureza $>99.85\%$ peso. Este metanol es el resultado final de todo el proceso y es almacenado en tanques fabricados para tal fin.

1.3.5 Diagrama del proceso de obtención de Metanol

A continuación se muestra simplificado en diagrama de bloques el proceso de obtención de metanol, según las etapas antes descritas.

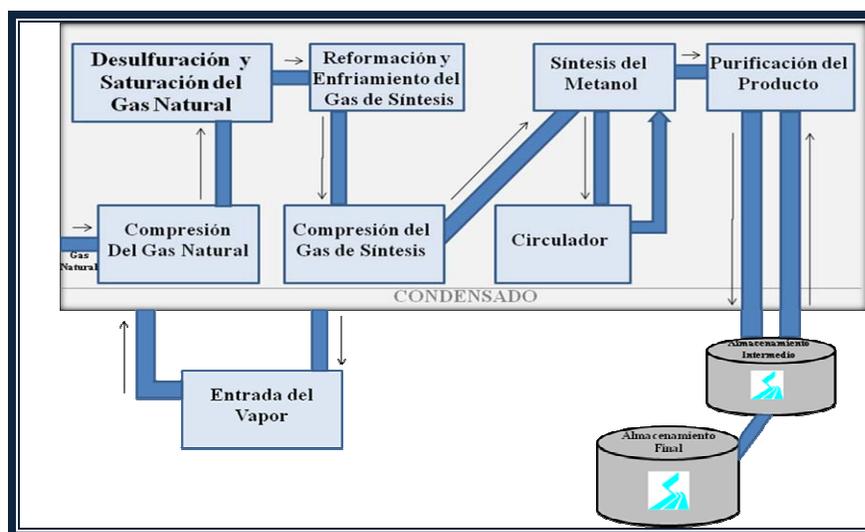


Figura 1.5. Diagrama general del proceso de obtención de metanol de la empresa.

1.4 Distribución del Sistema Eléctrico de la Empresa

La energía eléctrica suministrada a la planta Supermetanol proviene de la subestación eléctrica Pequiven del Complejo Petroquímico “José Antonio Anzoátegui”, por medio de dos acometidas trifásicas, la 605 y la 705, de calibres 3×250 MCM en 34.5 KV que vienen subterráneas hasta dos transformadores de potencia de 10 MVA de 34.5/4.16 KV (60-TMM-01 A/B) de conexiones en delta en el lado de alta y estrella en el lado de baja, para reducir los niveles de tensión a 4.160 KV. Cada uno de estos alimentadores ha sido dimensionado para soportar la carga total de diseño de la planta.

La salida de los transformadores en 4.16 KV llegan al tablero principal 60-MS-01, ubicado en la subestación eléctrica de Supermetanol, y es allí en donde tiene origen el sistema de distribución de energía eléctrica de la planta.

La configuración de las barras de este tablero es secundario selectivo, operando normalmente con el enlace abierto. El tablero principal 60-MS-01 está compuesto por una serie de unidades verticales “metalclad” tipo “switchgear”, ensambladas toda en una misma fila.

Adicionalmente a las dos barras de llegada de línea, se encuentra una tercera barra en la que está conectado única y exclusivamente el sistema de autogeneración de la planta, conformado por una unidad generadora de 1.6 MVA, accionada por un motor diesel, y que prevé su funcionamiento únicamente bajo operaciones de emergencia, tales como la ausencia total de tensión en las barras que se alimentan desde la subestación Pequiven. En caso de persistir la ausencia de tensión por más de 4 segundos, se inicia el proceso de arranque del generador de emergencia y la secuencia de re arranque de las cargas preferenciales, de acuerdo con una secuencia programada en PLC.

A las salidas asociadas al tablero principal 60-MS-01, están los cuatro transformadores de potencia de 2.5 MVA cada uno, el 60-TML 01A/B y el 60-TML-02A/B, ambos con conexión delta-estrella y neutro aterrado, los cuales reducen los niveles de tensión de 4.16 KV a 480 V para suministrar energía a los centros de potencias, 60-PC-01 A/B y 60-PC-02 A/B, respectivamente; adicionalmente está el transformador de potencia 60-TML-03 de 500 KVA, delta-estrella y neutro aterrado, que supe de energía al edificio administrativo de la empresa, a un nivel de tensión de 208/120 V; y por último se encuentran alimentados de este tablero los nueve motores eléctricos asincrónicos de media tensión, de tipo jaula de ardilla, de arranque directo cuyas potencia oscilan entre 160 KW hasta 800 KW.

La configuración de los paneles de centros de potencia es secundario selectivo con el enlace abierto, al igual que el panel principal, compuestos de interruptores de aire, extraíbles y controlados eléctricamente, tanto el de compartimiento de entrada como el de enlace. Los centros de potencias son estructuras metálicas, auto soportadas de secciones verticales ensambladas en una sola fila, de donde se distribuye la energía en 480 V a los tableros de distribución final y a las principales cargas de la planta, tales como los centros de control de motores, el panel de servicio auxiliares, el transformador 50 KVA de almacén, el transformador de 225 KVA de la sala de control, el transformador de 150 KVA de subestación, los UPS, los motores de 90 KW con variador de velocidad, los motores de 132 KW con arranque directo, los paneles de mejoramiento de factor de potencia, y el sistema de alimentación auxiliar del generador de emergencia.

El panel de servicios auxiliares (60-ASP-01) está alimentado del 60-PC-02-B; es una estructura metálica auto soportada, ensamblada en una sola fila, con configuración espalda-espalda, y dividido en una serie de compartimientos que alojan los interruptores y alimentadores que supe de energía al alumbrado vial de la planta, los rectificadores de protección catódica, las válvulas motorizadas y panel de

corriente directa a una tensión de 480 V. Se deriva de él un transformador de 112.5 KVA que reduce la tensión de 480 V a 208/120 V para conformar la sección de 208 V de este panel, (de espalda con el anterior), y que se divide en compartimientos que alojan los interruptores y alimentadores para abastecer de energía al alumbrado y tomacorrientes de planta.

Los paneles de mejoramiento de factor de potencia 60-PFIB-01-A/B/C/D Y 60-PFIB-02-A/B, conectados al PC-01-A/B y PC-02-A/B, respectivamente, son presentados como estructuras metálicas, auto soportadas, compuestas por grupos de condensadores distribuidos en cinco pisos. Estos paneles deben suministrar la energía reactiva necesaria para mantener el factor de potencia total de planta igual o superior a 0.90, según los requerimientos de la empresa que suministra la energía eléctrica.

El panel de corriente directa se divide en la sección de rectificación, en donde se encuentra alojado el grupo de rectificación y el regulador automático de tensión; en la sección de distribución se encuentra ubicado el tablero de distribución con salidas para las cargas de corriente continuas específicas. El grupo de rectificación tiene una configuración redundante, compuestos por el rectificador 1 y el rectificador 2, que comparten la carga conectada y maneja los procesos de carga y mantenimiento del banco de baterías asociados al conjunto.

Los variadores de velocidad que se alimentan del 60-PC-01, se conectan a los motores-ventiladores MU-5301 A/B/C/D de 480 V y 90 KW, para poder originar un arranque lento de estos equipos. Son estructuras metálicas auto soportadas de secciones verticales, internamente están compuestas por el variador y por un "bypass" para arranque directo en caso de falla del variador, ambas con sus respectivos circuitos de medición y protección.

Los centros de control de motores (MCC 01...10) son estructuras metálicas encerradas, auto soportadas, de secciones verticales en donde se encuentran las gavetas arrancadoras de los motores, compuestas por los circuitos de fuerza y control. Todos los motores, en general, son de corriente alterna, asincrónicos y trifásicos, tipo jaula de ardilla, con arranque directo de línea, a 480 V y de potencias que van desde 0.25 KW hasta 90 KW.

Adicionalmente, la subestación eléctrica cuenta con un sistema de monitoreo en línea, que se obtiene a través de los relés numéricos instalados en la entrada de tablero principal 60-MS-01 y en la entrada de cada uno de los centros de potencia 60-PC-01 y 60-PC-02. El monitoreo línea brinda información referente a los niveles de tensión y corriente de los respectivos tableros, así como valores de potencia activa, reactiva y aparente.

1.4.1 Diagrama unifilar de la subestación eléctrica de la empresa

El diagrama unifilar simplificado de la subestación eléctrica de Supermetanol, de acuerdo con la descripción anterior, puede apreciarse a continuación. Se destaca la ubicación de las cargas eléctricas, tableros, centros de potencias y alimentadores. Por razones de simplicidad, se han omitido los dispositivos de protección y control.

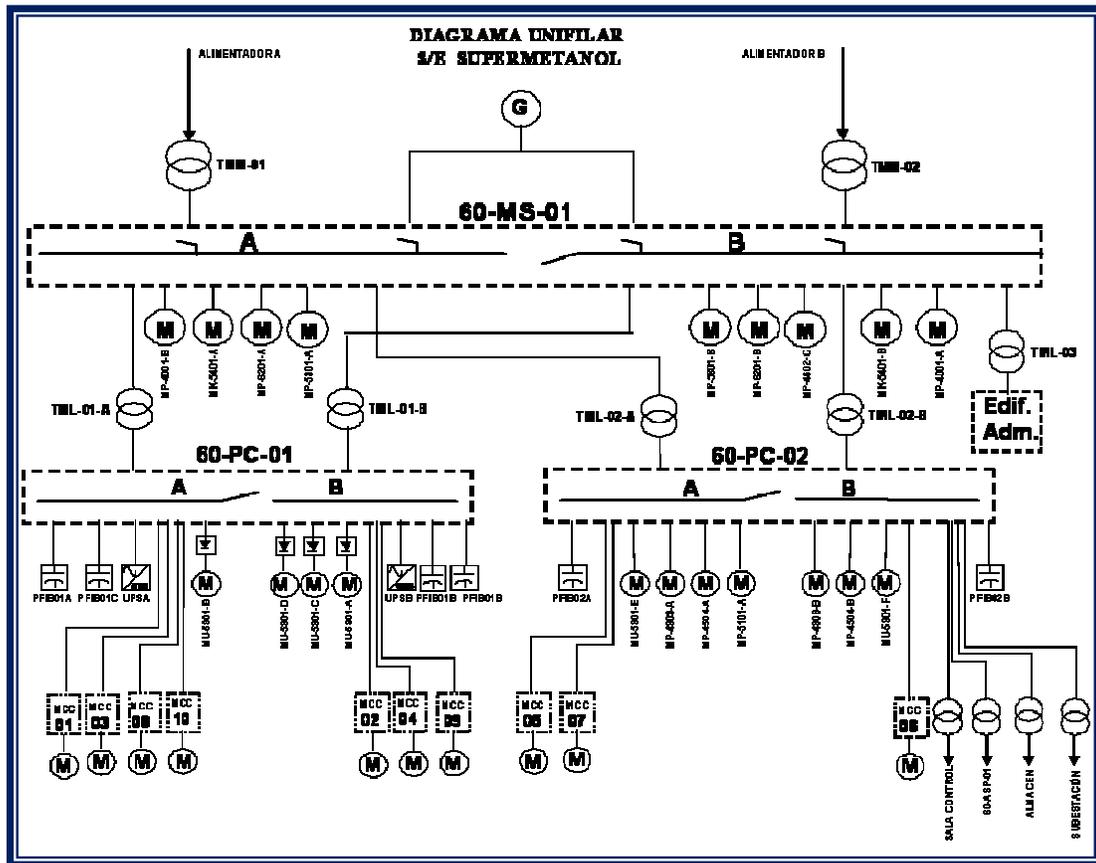


Figura 1.6. Diagrama unifilar de la subestación eléctrica de la empresa.

1.5 Planteamiento del Problema

Supermetanol es una empresa mixta conformada por **PEQUIVEN** (filial de **PDVSA**) y **ECOFUEL** (compañía italiana), cuya finalidad es la de producir Metanol de alta pureza. Su producción está destinada principalmente a la exportación y un porcentaje menor utilizado en el país en su mayoría para la elaboración MTBE en la empresa Súper Octanos C.A.

Supermetanol C.A., posee un total de 156 motores eléctricos de inducción trifásica tipo jaula de ardilla, con capacidades que van desde 0,25kw hasta 800kw, en

los niveles de tensión de 460v y 4000v. Estos motores se acoplan a bombas, compresores y ventiladores, los cuales tienen una función importante en la producción del metanol y al estar uno de esto fuera de servicio se compromete la confiabilidad del sistema y en algunos casos llega a afectar la producción.

En la actualidad, el departamento de mantenimiento eléctrico de **Supermetanol** tiene establecido un programa de mantenimiento preventivo anual en donde se atienden los motores eléctricos. El mantenimiento preventivo aplicado a estos equipos está limitado en cuanto al diagnóstico de fallas ya que, se basa en realizar pruebas con motor detenido mediante una inspección visual, medición de la resistencia de aislamiento entre fases, medición de resistencia de aislamiento respecto a masa y pruebas de funcionamiento del arrancador. Los resultados obtenidos en estas mediciones proporcionan una información muy general y no precisa las condiciones de los motores en las diferentes zonas de fallas. Aún con estas pruebas muchas anomalías pueden ser pasadas por alto.

El determinar problemas en motores debe ser confiable y seguro, por esto un análisis de motores eléctricos debe contener resultados en las siguientes zonas de falla: circuito de potencia, aislamiento, estator, rotor, entrehierro y calidad de energía. Las pruebas a realizar deben contemplar ensayos tanto con motor detenido como energizado.

Supermetanol en búsqueda de mejoras para el programa de mantenimiento preventivo con el que cuenta la empresa y a su vez ir de la mano con los nuevos avances tecnológicos, adquirió el equipo Explore 3000 el cual no se encuentra asociado al programa de mantenimiento preventivo actual, por lo que se requiere de su estudio para poder ser implementado en el programa.

El EXP3000 es un equipo desarrollado para el monitoreo en servicio de: alimentación de la máquina, condición del motor en general, carga y ejecución, a través de las funciones que desarrolla en un programa completo de mantenimiento predictivo. Este es programado para suplir información del nivel de voltaje, balance de voltaje, armónicos y distorsión total, además de otros. Esta amplia gama de pruebas permite visualizar la verdadera condición de integridad y las condiciones relacionadas con el funcionamiento del motor, permitiendo determinar la posibilidad de falla en el tiempo de los motores y así planificar las intervenciones.

Con el desarrollo de este proyecto se pretende la implementación del equipo Explore 3000 en un programa de mantenimiento predictivo para los motores eléctricos de inducción en baja tensión de la planta Supermetanol, lo que representa un beneficio para la empresa, así como reducir costos generados por la contratación de la mano de obra especializada en mantenimiento en equipos rotativos. También mejorará la confiabilidad de los motores e incrementará su vida útil.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Implementar un programa de mantenimiento predictivo para los motores eléctricos en baja tensión en la planta Supermetanol empleando el equipo para supervisión en línea Explore 3000.

1.6.2 Objetivos Específicos

- ✓ Recopilar información sobre las características del mantenimiento predictivo, las características de los motores eléctricos de inducción trifásica tipo jaula de ardilla y los tipos de fallas que presentan.

- ✓ Estudiar el equipo para supervisión en línea Explore 3000.
- ✓ Describir las pruebas de mantenimiento predictivo aplicables a una población de los motores eléctricos en baja tensión de la planta Supermetanol.
- ✓ Realizar pruebas a los motores eléctricos en baja tensión de la planta Supermetanol empleando el EXP3000.
- ✓ Comparar los valores obtenidos en las pruebas a los motores eléctricos en baja tensión de la planta Supermetanol con los valores de operación normal según las normas.
- ✓ Elaborar un plan de mantenimiento predictivo para los motores de inducción trifásica en baja tensión de la planta Supermetanol, basada en registros de pruebas eléctricas y en sus principales fallas.

CAPÍTULO 2: TEORÍA DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS

2.1 Generalidades

En el presente capítulo se dará información general sobre lo concerniente a el mantenimiento predictivo y motores eléctricos, investigación necesaria para el entendimiento del tema tratado. Dicha información incluye la descripción de las características del mantenimiento predictivo y todo lo relacionado a la definición, fallas típicas y las pruebas a realizar para la detección de fallas en los motores de inducción tipo jaula de ardilla.

Estas pruebas tienen como objetivo principal evaluar el estado en que se encuentran las máquinas rotativas, dependiendo de los resultados de dichas pruebas se puede dar un diagnóstico del estado de la máquina; de tal manera que sus fallas sean corregidas a tiempo y no se conviertan en fallas mayores que causen la paralización del motor y afecte así la producción de la planta.

2.2 Motor de Inducción

Es una máquina asincrónica que consta de un circuito magnético que se entrelaza con dos circuitos eléctricos, girando entre si y en el que la potencia se transfiere desde un circuito al otro mediante inducción electromagnética. Un motor de inducción es una máquina de inducción que transforma la potencia eléctrica en mecánica, y en la que un miembro (por lo regular el estator) se encuentra conectado a la fuente de poder, y un devanado secundario en el otro miembro (generalmente el rotor) conduce corriente inducida.

2.2.1 Motor de Inducción Jaula de Ardilla

Están formados por barras sólidas de material conductor, alojadas en las ranuras del rotor. Las barras del rotor se ponen juntas en cortocircuito en los extremos del rotor por anillos extremos. En las máquinas grandes, las barras del rotor pueden ser de una aleación de cobre, alojadas en las ranuras y soldadas con latón a los anillos extremos.

2.2.2 Característica de Construcción

Los principales elementos del motor de inducción son el estator y el rotor. El estator es un circuito magnético formado por cientos de láminas de material ferromagnético, generalmente de acero al silicio, muy delgadas, como las que se muestran en la figura 2.1, enchapadas unas a otras, y separadas por un recubrimiento aislante especial a base de goma, para disminuir las pérdidas por calentamiento, que forman un cilindro hueco como el que se muestra en la figura 2.2.

Estas láminas están dotadas, convenientemente, de ranuras en su periferia interior para alojar dentro de sí el devanado. [2]

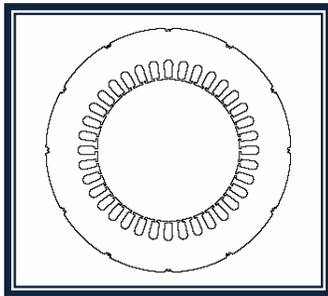


Figura 2.1. Estator.

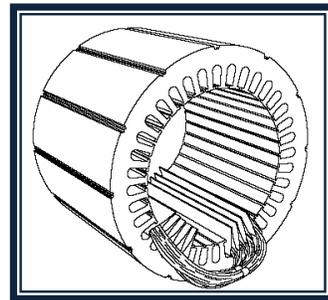


Figura 2.2. Cilindro formado por el estator.

Al devanado incrustado en el estator, se conoce como devanado estatórico, y no es otra cosa que conductores de cobre en forma de hilos esmaltados, interconectados, distribuidos e insertados sobre las ranuras ubicadas en la periferia del estator de la máquina. Por el devanado estatórico circula la corriente suministrada desde el circuito exterior que constituye el sistema eléctrico, y que se encarga de producir el campo magnético giratorio, necesario para crear el torque en el rotor. En la figura 2.3 se muestra el devanado estatórico de un motor de inducción de media potencia, ya instalado en el núcleo.

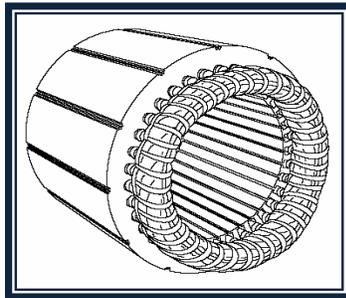


Figura 2.3. Devanado estatórico del motor dentro del núcleo.

El rotor del motor de inducción está constituido por un conjunto de chapas apiladas, formando un cilindro, que tienen unas ranuras completamente cerradas en la circunferencia exterior, en donde se coloca el devanado del rotor, tal y como puede apreciarse en la figura 2.4. El devanado del rotor está representado por un conjunto de barras conductoras sólidas alrededor del perímetro externo del rotor, insertadas en las ranuras del núcleo del rotor y fundidas dentro de ellas, generalmente de cobre o de aluminio, y conectadas eléctrica y mecánicamente por cortocircuitos, en cada extremo, por medio de anillos de cortocircuito. En la figura 2.5 puede verse al núcleo del rotor montado sobre el eje, para formar un rotor ensamblado. [2]

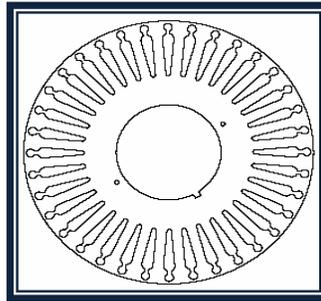


Figura 2.4. Laminas del rotor del motor de inducción.

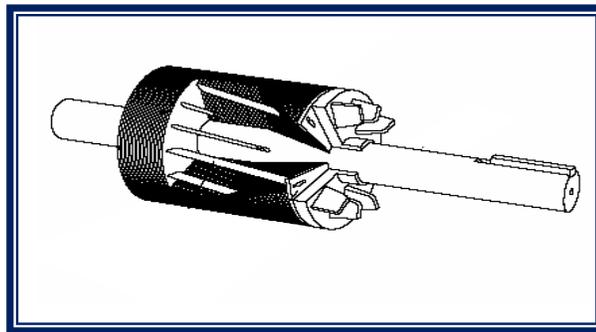


Figura 2.5. Núcleo del rotor.

El eje del rotor descansa sobre dos rodamientos, los cuales están montados sobre sendos pedestales en los escudos que se sujetan a la carcasa del estator. El espacio de aire que separa el estator del rotor, es necesario para que pueda girar la máquina, se denomina entrehierro, siendo el campo magnético existente en el mismo el que constituye el medio de acoplamiento entre el sistema eléctrico y el mecánico del motor.

Por último se tiene la carcasa que consiste en un armazón de aluminio o acero, al que se sujetan los dos escudos. El estator está montado dentro de la carcasa. La carcasa protege las partes eléctricas del motor de los perjudiciales y dañinos efectos del entorno en el cual se encuentra operando. Un ventilador, también montado sobre el eje, es utilizado para producir una ventilación forzada. La forma ondulada de la carcasa permite una mejor evacuación del calor que se produce en el interior del

motor. [3] A continuación la figura 2.6 muestra un motor de inducción indicando sus partes más importantes.

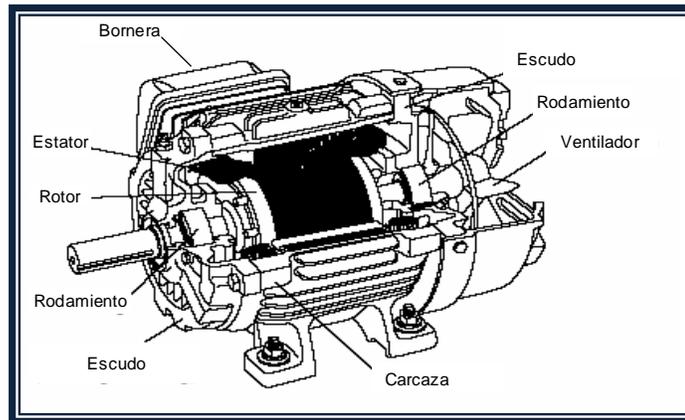


Figura 2.6. Partes del motor de inducción

Por último, un detalle importante en los motores de inducción trifásicos es la disposición de los terminales del devanado del estator en la bornera. A esta caja de conexiones se llevan los extremos de las bobinas que forman el devanado para que sean conectados con los del cable de alimentación del motor. Los comienzos de bobina se designan con las letras U1, V1 W1, y los extremos finales como U2, V2 y W2.

2.2.3 Principios de Operación

Un motor de inducción es como un transformador eléctrico cuyo circuito magnético se encuentra separado por un entrehierro en dos segmentos relativamente móviles, uno que conduce al devanado primario y otro al devanado secundario. La corriente alterna suministrada al devanado primario desde un sistema de alimentación eléctrica induce una corriente opuesta en el devanado secundario, cuando este último se pone en cortocircuito o se cierra a través de una impedancia externa. El movimiento relativo entre las estructuras primaria y secundaria se produce por las fuerzas electromagnéticas correspondientes a la potencia que es transferida a través

del entrehierro por inducción. La característica esencial que distingue la máquina de inducción de otros tipos de motores eléctricos es que las corrientes del secundario son creadas únicamente por inducción, como en un transformador, en lugar de ser suministradas mediante un excitador de **CD** u otra fuente de energía externa, como en máquinas sincrónicas y de **CD**.

2.3 Sistema de Aislamiento

El sistema de aislamiento eléctrico en un motor eléctrico es uno de los componentes más importantes. La duración y confiabilidad adecuadas del motor dependen en gran parte de la capacidad del sistema de aislamiento para desempeñar su función.

Aunque el sistema de aislamiento, a menudo, se considera como una parte que no se desgasta y, por tanto, no envejece, es quizá la parte del motor que se daña con más facilidad durante el manejo o el mantenimiento, y es la más susceptible a la degradación con funcionamiento normal y anormal y por las condiciones ambientales. Los elementos para selección de los materiales para un sistema de aislamiento incluyen sus propiedades dieléctricas, estabilidad térmica y transferencia de calor, características mecánicas, facilidad para procesarlo, resistencia a los productos químicos y compatibilidad con otros materiales en el sistema.

2.3.1 Aislante Eléctrico

El aislante eléctrico es un medio o un material que cuando es colocado entre conductores a diferentes potenciales, permite que fluya por él una mínima corriente en fase con el voltaje aplicado. El término dieléctrico es sinónimo de aislante eléctrico, el cual puede considerarse como el dieléctrico aplicado. Un dieléctrico perfecto no permite el paso de corriente de conducción sino solo corriente de carga

capacitiva entre conductores. Solo un vacío a bajos esfuerzos entre superficies metálicas no contaminadas satisface esta condición:

El intervalo de resistividad de sustancias que se pueden considerar aislantes va más de 10^{20} Mohm*cm hasta cerca de 10^6 Mohm*cm, dependiendo de la aplicación y el esfuerzo de voltaje. No hay un límite claro entre los aislantes de baja resistencia y los semiconductores. Si el esfuerzo de voltaje es bajo y no es preocupante el nivel de flujo de corriente (excepto el que pudiera calentar y destruir el aislante), se puede tolerar un aislante de relativamente baja resistencia.

2.3.2 Clase de Aislamiento

El ANSI ha definido varias clases de sistemas aislantes que se basan en temperatura máxima de operación ha estado estable, y ha establecido pruebas de voltaje para demostrar la capacidad dieléctrica del sistema de aislamiento. Otras técnicas de pruebas no destructivas, se han perfeccionado para evaluar la capacidad dieléctrica y las condiciones de los sistemas de aislamiento.

Tabla 2.1. Clase de aislamiento para motores.

CLASE	TEMPERATURA EN EL PUNTO MAS CALIENTE
A	105 °C
B	130 °C
F	155 °C
H	180 °C

- Los sistemas de aislamientos clase(A) comprenden materiales orgánicos como el algodón, seda, papel y ciertas películas sintéticas. Se usan barnices y resinas sintéticas como aglutinantes.

- Los sistemas de aislamiento clase (B) comprenden materiales inorgánicos como mica, fibras de vidrio, asbesto y películas sintéticas, con aglutinantes adecuados.
- Los sistemas de aislamiento clase (F) comprenden, por lo general materiales similares a los de la clase B, pero con aglutinantes seleccionados para un servicio adecuado a temperaturas más altas.
- Los sistemas de aislamientos clase (H) incluyen elastómeros de silicona así como mica, fibras de vidrio, asbesto, etcétera, y aglutinantes para altas temperaturas.

2.3.3 Causas de la Degradación del Aislamiento

El aislamiento usado en las máquinas eléctricas rotativas no dura por siempre. Este se ve sometido a la acción de algunos efectos y a otros factores como son: daños mecánicos, vibraciones, calor o frío excesivo, suciedad, vapores corrosivos, humedad de los procesos, etc. Que de alguna u otra forma cambian las propiedades de los mismos con el tiempo. Entre los factores que más inciden en la degradación del aislamiento tenemos:

- Esfuerzo térmico
- Esfuerzo eléctrico
- Esfuerzo mecánico

2.3.3.1 Esfuerzo Térmico

Estos esfuerzos que provocan ante todo el envejecimiento térmico del aislamiento, es el causante de los cambios químicos progresivos en la composición de sustancias que lo componen.

Los esfuerzos térmicos se deben a:

- a) Presencia de calor: acelera el proceso químico de envejecimiento a la vez que ocasiona la evaporación de componentes de las sustancias de impregnación, lo cual conduce a la resequedad y fragilidad. Aumento de la temperatura dilata las cavidades gaseosas y les disminuye su rigidez dieléctrica.
- b) Variaciones de temperatura: generan la aparición de fuerzas termo mecánicas las cuales juegan un papel importante en el deterioro del aislamiento, aparecen debido a la diferencia entre los coeficientes de dilatación de los conductores y los materiales aislantes.

Los esfuerzos térmicos provocan contracciones y expansiones diferenciales entre el devanado del estator, lo que produce poco a poco descohesión y deslizamientos relativos entre las capas aislantes, fundamentalmente en las extremidades de estator.

Los esfuerzos térmicos excesivos traen como consecuencias:

- Pérdidas de dureza en las cabezas y en las salidas de fase. El aislamiento va tornándose blando, flexible y frágil.

- Exfoliación del aislamiento del estator y de las cabezas y separación de la mica del soporte mecánico.
- Disminución de la cantidad de aglutinante y aparición de las cavidades gaseosas.

El envejecimiento térmico del aislamiento es un fenómeno eminentemente químico, es el principal factor de envejecimiento en las máquinas eléctricas de corrientes alterna de alta tensión.

2.3.3.2 Esfuerzo Eléctrico

En general los esfuerzos eléctricos a los que se puede ver sometido el aislamiento de motores y generadores pueden desarrollarse a frecuencias nominales o a alta frecuencia.

Los mecanismos de falla a la frecuencia nominal son:

- a) Presencia de descargas parciales: se producen en cavidades y fisuras, mala distribución del campo eléctrico y a la presencia de contaminantes. Provocan calentamiento y degradación electroquímica localizada.

En condiciones normales, siempre existe un nivel admisible de descargas parciales en el seno del aislamiento. Ello se debe a imperfecciones propias del aislamiento y a que la tensión de ignición de las descargas parciales, en la mayoría de los casos, se encuentra muy por debajo de la tensión nominal de la máquina.

Estos esfuerzos eléctricos pueden perforar al aislamiento entre vueltas provocando alta circulación de corriente que eventualmente puede quemar el aislamiento a tierra.

La rigidez dieléctrica del aislamiento entre vueltas puede empeorar o sufrir degradación debido a otros factores tales como:

- Uso de aislamiento en los conductores magnéticos con baja resistencia a envejecimientos eléctricos y descargas parciales.
- Debilitamiento del aislamiento entre vueltas derivado de procesos de fabricación como el inherente a la elaboración de bobinas.
- Agentes, eléctricos o mecánicos que pueden reducir la rigidez dieléctrica de aislamiento entre vueltas.

2.3.3.3 Esfuerzo Mecánico

Los esfuerzos mecánicos se manifiestan, durante la operación de la máquina, como resultados de los esfuerzos electrodinámicos, los momentos magnéticos y las vibraciones.

- a) Fuerzas electrodinámicas: tienen una frecuencia igual al doble de la frecuencia de trabajo de la máquina y aparecen como resultado de la interacción en los campos magnéticos entre barras vecinas. Durante la operación normal, estas fuerzas son muy pequeñas y alcanzan magnitudes elevadas durante los transitorios de arranques y paradas, aumentando a valores críticos durante los

cortocircuitos provocando el aflojamiento de las bobinas en las ranuras o la presencia de contaminantes.

- b) Momentos magnéticos: se hacen críticos durante los arranques prolongados o con carga en el eje. Los mismos tienden a la deformación de las bobinas en la zona de las cabezas, al aflojamiento de las amarras y de las cuñas, a la destrucción del aislamiento entre espiras y a dañar el recubrimiento semiconductor. Los momentos electromagnéticos aparecen solamente como una reacción del devanado a las variaciones de velocidad del rotor.
- c) Vibraciones mecánicas: traen como consecuencia el aflojamiento de los medios de fijación (cuñas y amarras) lo que permite el movimiento de las barras del devanado. La persistencia de este fenómeno trae como consecuencia la destrucción del recubrimiento semiconductor y de los aislamientos, además, puede provocarse la abrasión y aparición de fisuras y grietas.

2.4 Fallas Típicas en Motores Eléctricos de Inducción

Los motores eléctricos de inducción se usan en multitud de aplicaciones en la industria, y en algunas de ella es vital organizar su correcto funcionamiento. Se ha encontrado que los orígenes de los problemas en un motor suelen estar comprendidos en una de las siguientes categorías:

- ✓ Degradación del aislamiento.
- ✓ Condiciones ambientales adversas.
- ✓ Instalación inadecuada.
- ✓ Fallas eléctricas.
- ✓ Desequilibrio de voltaje.

- ✓ Una combinación de dos o más factores anteriores.

2.4.1 Degradación del Aislamiento

El aislamiento usado en las máquinas eléctricas rotativas no dura por siempre, este se ve sometido a la acción de algunos efectos y otros factores que de alguna u otra forma cambian las propiedades de los mismos con el tiempo. Algunos de estos factores pueden ser; daños mecánicos, vibraciones, calor o frío excesivo, suciedad, aceite, vapores corrosivos, humedad de los procesos o simplemente un día nublado que combinados con el esfuerzo eléctrico que existen; desarrollan picaduras o grietas donde la humedad y las materias extrañas penetran la superficie del aislamiento y proporcionan una trayectoria de baja resistencia para la corriente de fuga. Una vez que comienzan, los distintos enemigos tienden ayudarse entre si y permiten una corriente excesiva a través del aislamiento.

A veces la caída de la resistencia de aislamiento es súbita, como cuando el equipo falla. Sin embargo, el deterioro ocurre lentamente, si tales efectos permanecen dentro de ciertos límites establecidos por organismos internacionales y nacionales que rigen la materia.

2.4.2 Condiciones Ambientales Adversas

Con frecuencia, las temperaturas excesivas (ya sea la temperatura del ambiente o la que se deriva de un problema dentro del motor) son causa de avería de la máquina. Los motores deben funcionar dentro de la variación límite de su temperatura indicada en su placa de identificación, a fin de lograr su vida útil. Por cada 10°C de aumento de la temperatura de operación del motor por encima de la nominal, la duración del aislamiento se reduce a la mitad.

Además de mantener la temperatura ambiente correcta, hay que localizar y eliminar otras fuentes de aumento de temperatura, como la desalineación, sobrecarga, voltaje incorrecto y muchas otras. Las condiciones ambientales perjudiciales suelen consistir en la presencia de vapores corrosivos, sal suspendida en el aire, y suciedad, polvo y otros contaminantes en exceso.

La humedad es otra causa común de fallas de motores. Si se condensa en la superficie del aislamiento por cambios de temperatura o por contacto con agua, dicha superficie se volverá altamente conductora, se dañará y producirá la falla inmediata del motor. Además, es posible que el aislamiento absorba humedad con el paso del tiempo, hasta que la resistencia dieléctrica del aislamiento se reduce tanto que ocurre la falla.

2.4.3 Instalación Inadecuada

Las deficiencias en el montaje del motor pueden ocasionar su falla. Si los pernos de montaje no son de la medida correcta o no están bien apretados, puede ocurrir una desalineación y vibraciones que ocasionaría daños en los cojinetes y el eje (flecha) y, en un momento dado, la quemadura de los devanados.

2.4.4 Fallas Eléctricas y Mecánicas

Tabla 2.2. Causas de fallas eléctricas y mecánicas presentes en un motor asíncrono.

COJINETES	41%
Cojinetes de rodamientos	16%
Cojinetes de fricción	8%
Empaquetaduras	6%
Cojinetes de empuje	5%
Lubricación	3%
Otras	3%
ESTATOR	37%
Aislamiento a tierra	23%
Aislamientos entre espiras	4%
Tirantes	3%
Cuñas	1%
Carcasas	1%
Núcleo magnético	1%
Otras	4%
ROTOR	10%
Jaula	5%
Eje	2%
Núcleo magnético	1%
Otras	2%

A través de la tabla 2.2, se observa que el 41% de los daños en motores eléctricos de inducción obedecen a problemas mecánicos en los cojinetes; mientras que con el 10 y 37% se encuentran los daños en el estator y rotor por problemas de aislamiento y jaula.

2.4.5 Desperfectos Mecánicos

Una carga excesiva puede dañar con rapidez un motor; pero una variación en esta o en el mecanismo para impulsión puede producir sobrecarga del motor. Los cojinetes empezaran a fallar, o pueden presentarse otras causas de fricción o cargas extras. En este caso, el motor consumirá más corriente y se incrementará su

temperatura. Si la corriente del motor excede del amperaje nominal a plena carga, aunque sea por un tiempo breve, el rápido sobrecalentamiento reducirá la duración del motor.

Entre otras anomalías mecánicas se pueden mencionar la eventual excentricidad del rotor o del estator, la resonancia mecánica a la velocidad crítica y todas aquellas referidas a los cojinetes de soporte. Estos defectos introducen generalmente una deformación del entrehierro, que aumenta a causa del desequilibrio de las fuerzas magnéticas radiales, que produce nuevas frecuencias en el campo magnéticos del entrehierro, en las corrientes de línea y vibraciones de la estructura mecánicas.

2.4.6 Fallas Eléctricas

Si el voltaje de suministro es incorrecto o tiene variaciones notables, ocurrirá una avería prematura del motor. El bajo voltaje hace que la corriente sea mayor que la normal. Si la reducción en la tensión aplicada es considerable, el exceso de corriente producirá sobrecalentamiento del motor. Un alto voltaje de alimentación para el motor reduce las pérdidas en el cobre, pero el flujo magnético más intenso ocasiona mayores pérdidas en el hierro.

Un pequeño incremento en el voltaje de suministro podría reducir el consumo de corriente; sin embargo, un aumento del orden del 10% o más respecto al valor de la placa producirá saturación del hierro y una intensificación considerable en la corriente ocasionando sobrecalentamiento perjudicial en el motor.

2.4.7 Desperfectos Más frecuentes en los Devanados

Las condiciones desfavorables del funcionamiento eléctrico, mecánico y ambiental pueden acortar notablemente la vida de un devanado estático trifásico entre ellas tenemos las siguientes:

2.4.7.1 Desequilibrio de Voltaje

El desequilibrio de las tensiones de alimentación de un motor puede producir fuertes desequilibrios en corrientes que conducen a una sobre elevación de temperatura de los devanados con daños del aislamiento. Un desbalance en la tensión del 1% puede producir diferencias del 6 a 10% en la corriente.

Si el motor está alimentado con secuencia directa con su carga nominal absorbe la corriente nominal. Manteniendo el estado de rotación del motor se le aplica una tensión de secuencia inversa, se observará que la corriente que el motor absorbe es del orden de la corriente de arranque (en rigor el valor de corriente corresponde a resbalamiento igual a 2).

Tabla 2.3. Resumen de la situación.

MAGNITUD	SECUENCIA DIRECTA	SECUENCIA INVERSA
Tensión	V_n	$0.001 * V_n$
Corriente	I_n	$0.001 * I_{ar}$

Con los valores normales de corriente de arranque de 5 a 8 veces la nominal se comprende que la corriente de secuencia inversa que corresponde a la tensión indicada será del 6 a 10% de la corriente nominal del motor. Cuando las tensiones aplicadas a un motor no son iguales, se produce un desequilibrio de corrientes en el

estator. Un pequeño porcentaje de desequilibrio de la tensión provoca un gran desequilibrio de corrientes.

Consecuentemente, la sobre elevación de temperatura del motor funcionando con una carga dada y con un desequilibrio de tensiones, será mayor que en el caso que esté funcionando con las mismas condiciones de carga pero con tensiones equilibradas.

El efecto de tensiones desequilibradas en un motor polifásico de inducción es equivalente a introducir una tensión de secuencia negativa que tiene sentido contrario de rotación, que produce un flujo de altas corrientes en el entrehierro.



Figura 2.7. Devanado de Fase Dañado por un Desequilibrio de Tensión.

2.4.7.2 Sobrecarga

Una sobrecarga prolongada del motor puede elevar la temperatura de los devanados más allá de los límites correspondientes a su clase de aislación y provocar fallas del aislamiento.



Figura 2.8. Devanado dañado por una sobrecarga.

2.4.7.3 Sobretensiones

Las sobretensiones producidas por maniobras de los circuitos de alimentación o descargas atmosféricas pueden provocar fallas de los aislamientos de los devanados.

Las sobretensiones atmosféricas se presentan en instalaciones expuestas ya sea directamente o a través de los acoplamientos que representan la red de distribución que finalmente se enlaza con las instalaciones de alta tensión expuestas.

Las sobretensiones de maniobra son debidas en particular a interrupciones de corrientes en los circuitos, donde la energía magnética se transforma bruscamente en electrostática. Ciertos dispositivos de maniobra (interruptor, contactores) cuya forma de interrupción es brusca producen sobretensiones que superan las que corresponden al caso de interrupción ideal, y aparecen ondas de frente escarpado que penetrando en los devanados pueden ser causas de fallas.



Figura 2.9.Falla de un Devanado por una Sobretensión.

2.4.7.4 Arranques Repetidos

El arranque es una situación que puede considerarse como primera aproximación adiabática (acumulación del calor sin disipación), varios arranques consecutivos llevan a temperaturas inadmisibles.

Una situación parecida al arranque pero más severa se puede presentar cuando se interrumpe la alimentación del motor e inmediatamente se vuelve alimentar. Podría ocurrir que las tensiones de alimentación estén de contrafase con las tensiones remanentes en bornes del motor y entonces se tendría un fenómeno análogo a un arranque con dos veces la tensión nominal.

2.4.7.5 Bloqueo del Rotor o Frenado Contracorriente

Un deterioro térmico importante del aislamiento de los devanados de un motor es causado normalmente por corrientes altas en los devanados como consecuencia del bloqueo del rotor. Excesivos arranques o cambios de sentido de rotación (frenado contracorriente) también puede producir este tipo de fallas.

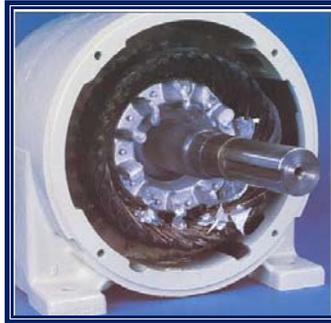


Figura 2.10. Daño Causado por Bloqueo del Rotor.

2.4.7.6 Anomalías del Rotor

El problema de rotura o fisura de anillos, es característico de motores asíncronos que tienen que arrastrar cargas con gran inercia. La temperatura para las barras y los anillos a continuación de un arranque a partir de frío varía entre 100 a 300°C para las barras y entre 60 a 300°C para los anillos.

Debido a las temperaturas alcanzadas durante el arranque en barras y anillos, si el motor no está bien diseñado o se utiliza inadecuadamente, se pueden producir distintas dilataciones relativas entre barras y anillos que provoquen incipientes daños en los puntos de soldadura. Los factores que influyen en el modo de comportamiento de los anillos son el diámetro del rotor, la velocidad de rotación, los materiales utilizados, los esfuerzos a que están sometidos los materiales a la temperatura máxima en caso de sobre velocidad. Es importante también si todas las barras del rotor han sido soldadas simultáneamente o no. Estas distintas técnicas son función del tamaño del rotor, del peso de los anillos y de los esfuerzos entre barras y anillos. Para el control de las soldaduras de barras y anillos la mayoría recurre al uso de tintas penetrantes, algunos al ultrasonido y otros a la inspección visual.

2.4.7.7 Apertura de Una Fase de un Devanado Trifásico

La apertura de una fase de alimentación de un motor como consecuencia de la fusión de un fusible, un contacto abierto, una línea interrumpida o malas conexiones, es causa de falla de los devanados.

Se produce desequilibrio de corrientes, si se sobrecarga alguna de las fases lo que puede provocar altas temperaturas y daños de los aislamientos entre espiras y la masa.



Figura 2.11. Apertura de una fase (conexión Y).

2.4.7.8 Devanado con Contacto a Tierra

Este desperfecto consiste en un contacto franco o intermitente entre uno o varios conductores y el núcleo de hierro del estator. Puede encontrarse en un motor en el que, durante el trabajo normal, un aislamiento de ranura se haya deteriorado o una cuña se haya desplazado, o bien en un estator que se reparó sin cuidado necesario.

Esta falla ocasiona que la envolvente del motor quede en contacto con un conductor “vivo” (con tensión), lo cual constituye un peligro.



Figura 2.12. Falla a Tierra en el Borde De una Ranura.

Figura 2.13. Falla a Tierra dentro De la Ranura.

2.4.7.9 Espiras en Cortocircuito en Una o más de una Bobina

Esto puede ocurrir que más de una espira haga contacto con el núcleo, con el cual, además de una falla a tierra, se tiene un cortocircuito entre espiras; esto produce calentamiento excesivo y destruye con rapidez el aislamiento.

La falla puede ocurrir también sin que haya contacto con el núcleo, cuando dos espiras contiguas pierden su aislamiento por descuido o falta de mantenimiento.



Figura 2.14. Cortocircuito entre Espiras de un Devanado.

2.5 Falla por Vibración Mecánica

La razón principal para analizar y diagnosticar el estado de una máquina es determinar las medidas necesarias para corregir la condición de vibración; reducir el nivel de las fuerzas vibratorias no deseadas y no necesarias.

2.5.1 Vibración Debida a Desbalance

El desbalance de la maquinaria es una de las causas más comunes de la vibración. En muchos casos, los datos arrojados por un estado de desbalance indican:

1. La frecuencia de vibración se manifiesta a 1x las RPM de la pieza desbalanceada.
2. La amplitud es proporcional a la cantidad de desbalance.
3. La amplitud de la vibración es normalmente mayor en el sentido de medición radial, horizontal o vertical (en las máquinas con ejes horizontales).
4. El análisis de fase indica lecturas de fase estables.
5. La fase se desplazara 90° si se desplaza el captador 90° .

El desbalance de un rotor saliente a menudo tiene como resultado una gran amplitud de la vibración en sentido axial, al mismo tiempo que en sentido radial.

2.5.2 Vibración Debida a Falta de Alineamiento

En la mayoría de los casos los datos derivados de una condición de falta de alineamiento indican lo siguiente:

1. La frecuencia de vibración es de 1x RPM; también 2x y 3x RPM en los casos de una grave falta de alineamiento.

2. La amplitud de la vibración es proporcional a la falta de alineamiento.
3. La amplitud de la vibración puede ser alta también en sentido axial, además de radial.
4. El análisis de fase muestra lecturas de fase inestables.

La falta de alineamiento, aun con acoplamientos flexibles, produce fuerzas tanto radiales como axiales que, a su vez, producen vibraciones radiales y axiales. Uno de los indicios más importante de problemas debidos a falta de alineamiento y a ejes torcidos es la presencia de una elevada vibración en ambos sentidos, radial y axial. En general, cada vez que la amplitud de la vibración axial sea mayor que la mitad de la lectura radial más alta, hay un buen motivo de sospechar la existencia de un problema de alineamiento o eje torcido.

Los tres tipos básicos de falta de alineamiento en el acoplamiento son:

- ✓ Angular
- ✓ En paralelo
- ✓ Una combinación de ambos
- ✓ Una falta de alineamiento angular: sujeta principalmente los ejes de las máquinas accionadora y accionada a vibración axial igual a la velocidad de rotación (rpm) del eje.
- ✓ La falta de alineamiento en paralelo: produce principalmente vibración radial con una frecuencia igual al doble de la velocidad de rotación del eje.

2.5.3 Vibración Debida a Excentricidad

La excentricidad es otra de las causas comunes de vibraciones en las maquinarias rotativas. Excentricidad en este caso no significa ovalización, sino que la

línea central del eje no es la misma que la línea central del rotor; el centro de rotación verdadero difiere de la línea central geométrica.

La excentricidad es en realidad una fuente común de desbalances, y se debe a un mayor peso de un lado del centro de rotación que del otro.

Una manera de diferenciar entre desbalance y excentricidad, es medir la vibración con filtro afuera mientras el motor está funcionando a baja corriente. Luego, se desconecta el motor, observando el cambio de la amplitud de vibración. Si la amplitud se reduce gradualmente mientras el motor sigue girando por inercia, es muy probable que el problema sea debido a desbalance; si, en cambio, la amplitud de vibración desaparece en el momento mismo en el que el motor es desconectado, el problema es seguramente de naturaleza eléctrica, y es muy posible que se deba a excentricidad del inducido.

La excentricidad en rodetes o rotores de ventiladores, sopladores, bombas y compresores pueden también crear fuerzas vibratorias. En esos casos las fuerzas aerodinámicas e hidráulicas desiguales que actúan contra el rotor.

2.5.4 Elementos Rodantes Defectuosos

Defectos en las pistas, en las bolas o en los rodillos de rodamientos de elementos rodantes ocasionan vibración de alta frecuencia; y lo que es más, la frecuencia no es necesariamente un múltiplo integral de la velocidad de rotación del eje. La amplitud de la vibración dependerá de la gravedad de la falla del rodamiento.

La vibración generada por el rodamiento normalmente no es transmitida a otros puntos de la máquina, por lo tanto, el rodamiento defectuoso es generalmente el que

se encuentra más cerca del punto donde ocurre el mayor nivel de vibración de este tipo.

Otras causas:

Los rodamientos no fallan prematuramente a menos que alguna otra fuerza actué sobre ellos; y tales fuerzas son generalmente las mismas que ocasionan vibración.

Causas comunes de fallas en rodamientos de elementos rodantes:

- Carga excesiva.
- Falta de alineamiento.
- Defectos de asientos de ejes y/o de las perforaciones en el alojamiento.
- Montaje defectuoso.
- Ajuste incorrecto.
- Lubricación inadecuada o incorrecta.
- Sellado deficiente.
- Falsa brinelación (deformación bajo carga).
- Corriente eléctrica.

2.5.5 Vibración debida a rodamientos de Chumacera defectuosos

Elevados niveles de vibración, ocasionados por rodamientos de chumacera defectuosos, son generalmente el resultado de una holgura excesiva (causada por desgaste debido a una acción de barrido o por erosión química), aflojamientos mecánicos (metal blanco suelto en el alojamiento), o problemas de lubricación.

a) Holgura excesiva de los rodamientos

Un rodamiento de chumacera con holgura excesiva hace que un defecto de relativamente menor importancia, tal como un leve desbalance o una pequeña falta de alineamiento, u otra fuente de fuerzas vibratorias, se transformen como resultado de aflojamientos mecánicos o en golpes repetidos (machacado).

En tales casos el rodamiento en si no es lo que crea la vibración; pero la amplitud de la misma seria mucho menor si la holgura de los rodamientos fuera correcta.

A menudo se puede detectar un rodamiento de chumacera desgastado por "barrido" efectuando una comparación de las amplitudes de vibración horizontal y vertical. Las máquinas que están montadas firmemente sobre una estructura o cimentaciones rígidas revelaran, en condiciones normales, una amplitud de vibración ligeramente más alta en sentido horizontal.

b) Torbellino de aceite

Este tipo de vibración ocurre solamente en máquinas equipadas con rodamientos de chumacera lubricados a presión, y que funcionan a velocidades relativamente altas, normalmente por encima de la segunda velocidad critica del motor.

2.5.6 Vibración Debida a Aflojamiento Mecánico

El aflojamiento mecánico y la acción de golpeo (machacado) resultante producen vibración a una frecuencia que a menudo es $2x$, y también múltiplos más

elevados, de las *rpm*. La vibración puede ser resultado de pernos de montaje sueltos, de holgura excesiva en los rodamientos, o de fisuras en la estructura o en el pedestal de soporte.

La vibración característica de un aflojamiento mecánico es generada por alguna otra fuerza de excitación, como un desbalance o una falta de alineamiento. Sin embargo, el aflojamiento mecánico empeora la situación, transformando cantidades relativamente pequeñas de desbalance o falta de alineamiento en amplitudes de vibración excesivamente altas. Corresponde por lo tanto decir que el aflojamiento mecánico permite que se den mayores vibraciones de las que ocurrirían de por sí, derivadas de otros problemas.

Un aflojamiento mecánico excesivo es muy probable que sea la causa primaria de los problemas cuando la amplitud de la vibración $2x$ las rpm es más de la mitad de la amplitud a la velocidad de rotación, $1x$ las rpm.

2.5.7 Vibración Debida a Fallas Eléctricas

Este tipo de vibración es normalmente el resultado de fuerzas magnéticas desiguales que actúan sobre el rotor o sobre el estator. Dichas fuerzas desiguales pueden ser debidas a:

- Rotor que no es redondo
- Chumaceras del inducido que son excéntricas
- Falta de alineamiento entre el rotor y el estator; entrehierro no uniforme
- Perforación elíptica del estator
- Devanados abiertos o en corto circuito
- Hierro del rotor en corto circuito

En líneas generales, la frecuencia de vibración resultante de los problemas de índole eléctrica será 1x las rpm, y por tanto se parecerá a desbalance. Una manera sencilla de hacer la prueba para verificar la presencia eventual de vibración eléctrica es observar el cambio de la amplitud de la vibración total (filtro fuera) en el instante en el cual se desconecta la corriente de esa unidad. Si la vibración desaparece en el mismo instante en que se desconecta la corriente, el problema será eléctrico. Si solo decrece gradualmente, el problema será de naturaleza mecánica.

Las vibraciones ocasionadas por los problemas eléctricos responden generalmente a la cantidad de carga colocada en el motor. A medida que se modifica la carga, la amplitud y/o las lecturas de fase pueden indicar cambios significativos. Esto explica por qué los motores eléctricos que han sido probados y balanceados en condiciones sin carga muestran cambios drásticos de los niveles de vibración cuando vuelven a ser puestos en servicio.

CAPÍTULO 3: EQUIPO PARA SUPERVISIÓN EN LÍNEA

EXPLORE 3000

3.1 Generalidades

En vista de que el motor eléctrico de inducción es un equipo de naturaleza electromecánica, es evidente que durante la operación del mismo, se da lugar a múltiples fenómenos eléctricos y mecánicos.

Existen numerosas técnicas para la detección de fallas en motores de inducción. Durante décadas se ha empleado el análisis de vibraciones y la evaluación del estado térmico del motor. Hoy en día se incluye la supervisión en línea de la condición de la máquina.

En el presente capítulo se darán a conocer las características y funciones del equipo para supervisión en línea Explore 3000 y las pruebas a realizar con este a los motores en baja tensión en la planta Supermetanol.

3.2 Explore 3000

Es un equipo desarrollado para el monitoreo de la condición de máquina en general, carga y ejecución, dando a el usuario una vista amplia de la integridad del motor. Este analizador de motor en servicio provee análisis de causa-raíz mediante la separación de asuntos mecánicos y eléctricos. El Explore 3000 fue diseñado especialmente para identificar problemas a la máquina rotativa.

Definiremos monitoreo de la condición de la máquina, como el control de su funcionamiento y el análisis de las mediciones obtenidas tendientes a detectar fallas

incipientes o el deterioro de ella; a diagnosticar estas fallas; y a predecir cuánto tiempo podría funcionar continuamente la máquina en forma segura. El explore utiliza un código basado en tres colores, verde, amarillo y rojo. El verde implica que todo se encuentra bien, el amarillo se utiliza como advertencia y el rojo se utiliza como emergencia. Este código está condicionado por una serie de umbrales que pueden ser modificados de acuerdo a los requerimientos del motor.

El Explore 3000 es un instrumento portátil e independiente, posee seis pinzas: 3 amperimétricas y 3 de voltajes. Es manejado por computadora bajo la plataforma del software: Windows EX Professional y los estándares de industria (IEEE, NEMA, Etc.): NEMA MG-1, IEEE 519, EN61000-2-2, EN61000-2-4, VDE839-2-4. Permitiendo que todo diagnóstico sea consumado directamente desde el centro de control motor (MCC) o desde la conexión de los transformadores de medición y protección.



Figura 3.1. Explore 3000/3000R.

3.2.1 Funciones del Explore 3000

3.2.1.1 Colección avanzada de datos:

Una vez realizadas las pruebas, los resultados pueden ser guardados para cada motor individualmente usando la base de base de datos MS Access. Este tipo de documentación es crítica para cualquier programa de mantenimiento predictivo, lo que permite mantener un historial para tendencias.

3.2.1.2 Facilidad de organización:

El software del exp3000 permite crear múltiples bases de datos para organizar la información colectada a sus especificaciones, facilitando canales de comunicación.

3.2.1.3 Monitoreo en línea:

Sus capacidades en línea permiten una evaluación exacta de las condiciones de carga durante operación con el paso del tiempo. Los resultados son inmediatos y muestran eficiencia de operación.

3.3. Ámbitos de Pruebas

3.3.1 Calidad de Energía

Este campo de prueba identifica problemas de calidad de energía no óptimos, los cuales causan estrés excesivo al motor. El nivel de voltaje, balance de voltaje, distorsión armónica, distorsión total, energía y pruebas de armónicos.

Phases				
	A	B	C	Ave / Sum
kW	7.4	7.1	7.9	22.5
kVAr	4.8	5.1	5.5	15.4
kVA	8.9	8.7	9.7	27.3
pf	0.84	0.81	0.82	0.82
V	468.9	471.3	468.8	469.7
I	32.7	32.2	35.6	33.5
THDv %	1.8	2.1	1.9	1.9
THDi %	3.1	3.3	3.1	3.2
c.f. v	1.44	1.43	1.43	1.43
c.f. i	1.46	1.44	1.44	1.45
NEMA Voltage Unbalance (%)				0.35
NEMA Current Unbalance (%)				6.33
Average Fundamental Frequency				60.0

Figura 3.2. Calidad de Energía.

3.3.2 Ejecución de la Máquina

Este grupo de pruebas efectivamente evalúa la operación del motor presente, identificando operaciones estresantes y su fuente. Examina Factor de Servicio, Carga, Condición de Operación, Eficiencia y Calcula Periodos de amortización. Problemas comunes encontrados en esta área incluyen: sobrecarga térmica del motor, reconoce el deterioro de la máquina entre otros asuntos que están directamente relacionados con la salud del motor y la energía gastada en ineficiencias.

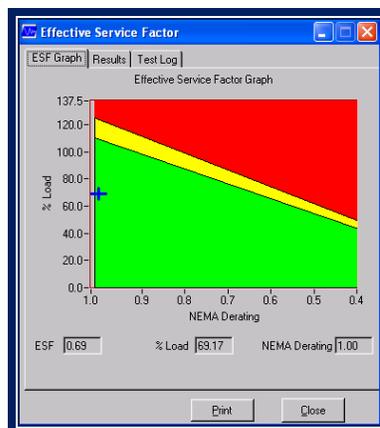


Figura 3.3. Ejecución de la Máquina.

3.3.3 Corriente

Este grupo de pruebas identifica problemas dentro de todo el sistema de máquina. Estas pruebas incluyen: Sobrecorriente, desequilibrio, desbalance y suma de corrientes. Este campo identifica problemas, no obstante la raíz de la causa puede que no sea evidente.

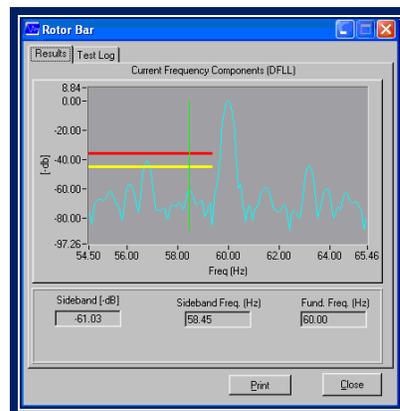


Figura 3.4. Corriente.

3.3.4 Espectro

Este dominio tiene la barra de prueba del rotor junto con V/I Spectrum, Demodulated Spectrum y armónicas. Este dominio muestra la relación de corriente y voltaje con respecto a la frecuencia. Encontrará problemas de saturación electrónicamente, barras de rotor rotas, “drives de VFD” excesivos en buses de bajo voltaje y puede verificar problemas mecánicos.

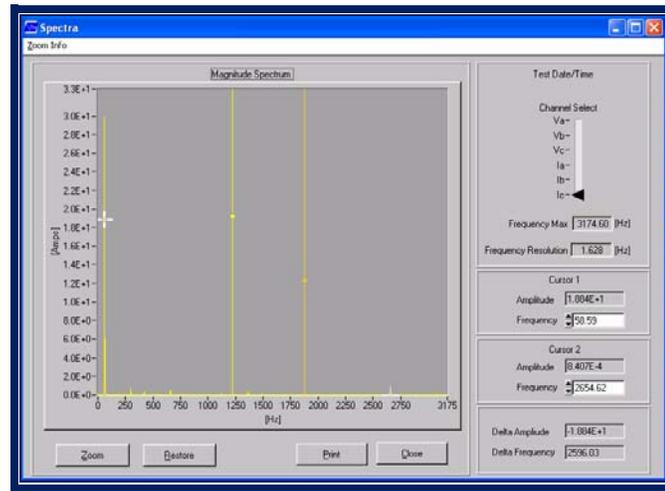


Figura 3.5. Espectro.

3.3.5 Torsión

El dominio de torsión es un adelanto altamente importante que permite al usuario encontrar numerosos problemas, rápida y precisamente. Este dominio se especializa en diagnosticar asuntos mecánicos, muestra sobrecarga transitoria, encuentra desequilibrios mecánicos, encuentra “soft-foot”, además identificar problemas, cavitación y muchas otras condiciones.

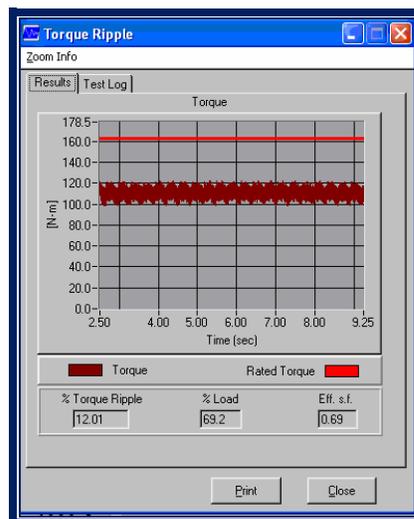


Figura 3.6. Espectro.

3.3.6 Conexiones

Esta porción del EXP3000 ofrece múltiples herramientas adicionales, incluyendo diagramas de fases, 3 corrientes, 3 voltajes y gráficos de barras armónicos, voltaje instantáneo, frecuencia, componentes simétricos y rastros de velocidad para aplicaciones dinámicas VFD. Conjuntamente estas herramientas contribuyen a encontrar desequilibrio motor, mal alineamiento y eje torcido.

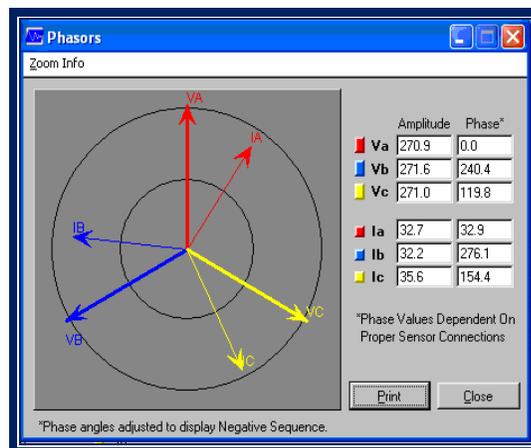


Figura 3.7. Fasores.

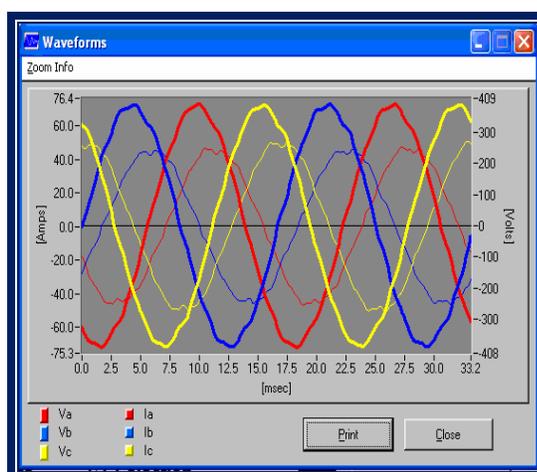


Figura 3.8. Conexiones.

3.3.7 Monitoreo VFD (opcional)

Junto con cualquier motor de inducción de tres fases, generador, también monitorea las actividades de las aplicaciones del Drive de Frecuencia Variable (VFD) y motores AC servo. Diagnostica problemas de motores que pueden ocurrir bajo las circunstancias de operación VFD más exigentes. La opción VFD 3000 enseña como la frecuencia, velocidad, torque y el nivel de voltaje varían con respecto al tiempo.

3.3.8 Monitoreo Continuo

La más novedosa modalidad del EXP3000 es el monitoreo continuo. El software CM3000 permite al usuario monitorear más de 41 puntos en tiempo real. Este tiempo real y la habilidad de colección de datos continuos darán impacto inmediato en el encuentro de problemas intermitentes con el motor tales como disparo de protecciones. Esta porción del Explore 3000 también actuará como un analizador de energía para determinar calidad de energía.

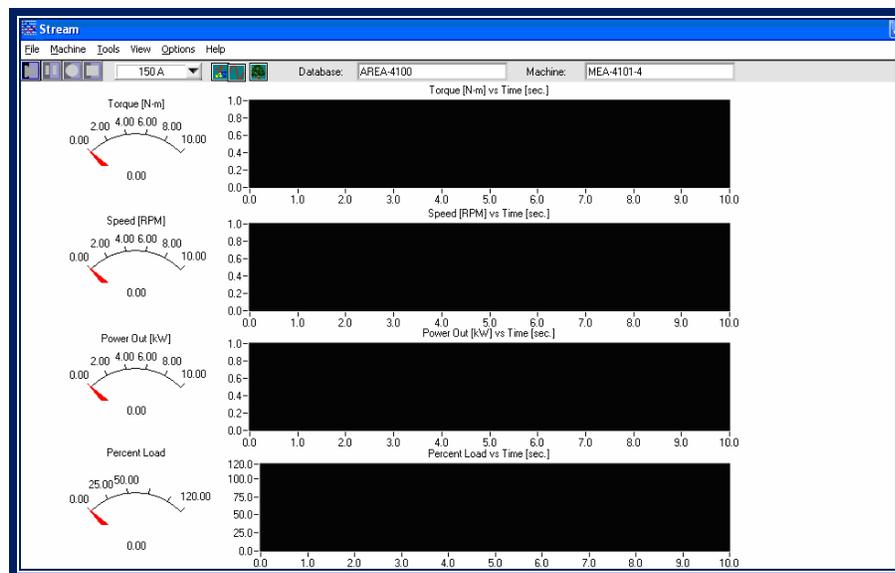


Figura 3.9. Monitoreo Continuo.

3.3.9 Análisis Transitorio

El EXP3000/3000R puede analizar arranques transitorios utilizado por el Transient Acquisition Tool. Las señales son las 3 corrientes de ciclos RMS y voltajes en las 3 fases. Estos datos pueden ser girados para una toma panorámica, tener un acercamiento (zoom) y los cursores disponibles permiten lecturas de los niveles y tiempo en las gráficas.

3.4 Ubicación de los Equipos de Medición

Para la ejecución de las pruebas electromagnéticas dinámicas es necesario medir la corriente y la tensión asociadas al motor. Para ello se hace uso de pinzas amperimétricas, que se colocan sobre los cables de alimentación del motor de baja tensión, para los de media y alta tensión se colocan a salida de los transformadores de corriente de medición. Las puntas de tensión son colocadas aguas abajo del contactor, en el arrancador para motores de baja tensión y para motores de media y alta tensión se colocan a la salida de transformador de potencial.

Todas las pruebas se realizan desde el Centro de Control de Motores (MCC) ubicado en la subestación eléctrica. A continuación se muestra el diagrama de conexión del equipo de medición para la evaluación de motores eléctricos de inducción de baja tensión (figura 3.9).

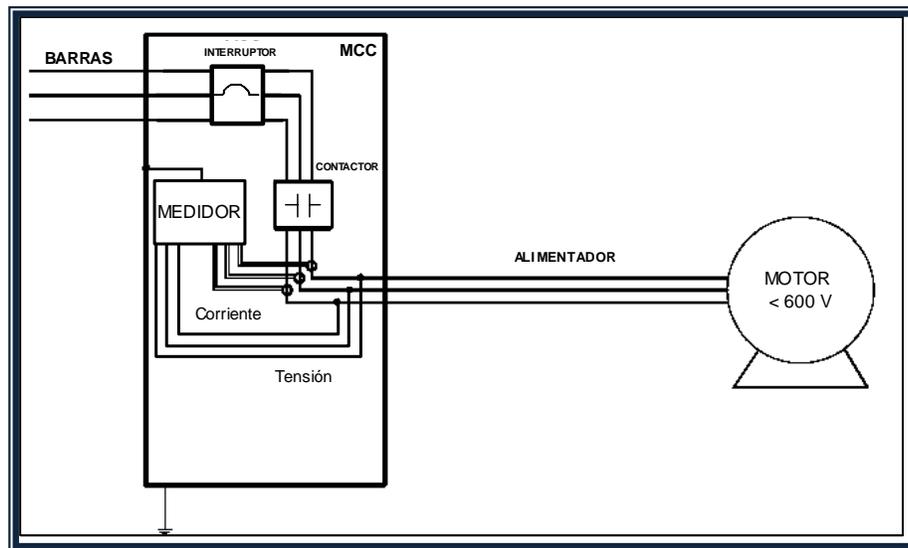


Figura 3.10. Diagrama de conexión para motores de baja tensión.

Para evaluar motores de media y alta tensión, la conexión de las pinzas de corriente y las puntas de tensión deberá hacerse directamente sobre las salidas de los transformadores de corriente y de potencial, respectivamente, tal como puede apreciarse en la figura 3.10.

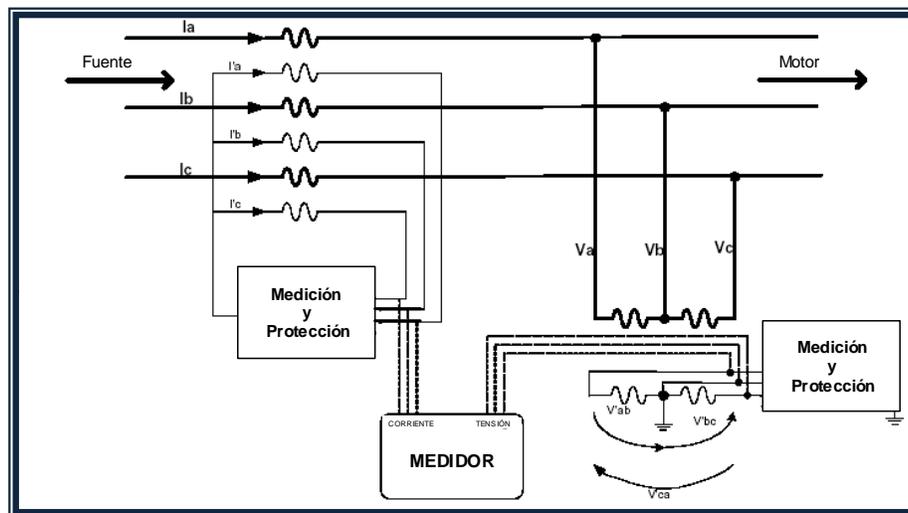


Figura 3.11. Diagrama de conexión para motores de media y alta tensión.

3.5 Evaluación de la Calidad de Energía

La calidad de energía se refiere a la condición de la señal de tensión y corriente del motor. Se visualizan las formas de ondas de tensión y corriente, de la que se extraen las magnitudes para obtener el valor RMS, el factor de cresta (CF) y el porcentaje de distorsión armónica total (THD) para cada una de las fases. Se calculan los valores promedio de tensión y corriente, y los respectivos desbalances entre fases.

3.5.1 Niveles de tensión permitidos para la operación normal del motor

Para su operación, todos los motores eléctricos trifásicos vienen diseñados para trabajar con determinados niveles de tensión, según los valores referenciales de la norma IEEE 141-1993, mostrados en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Niveles de tensión permitidos para la operación de motores trifásicos

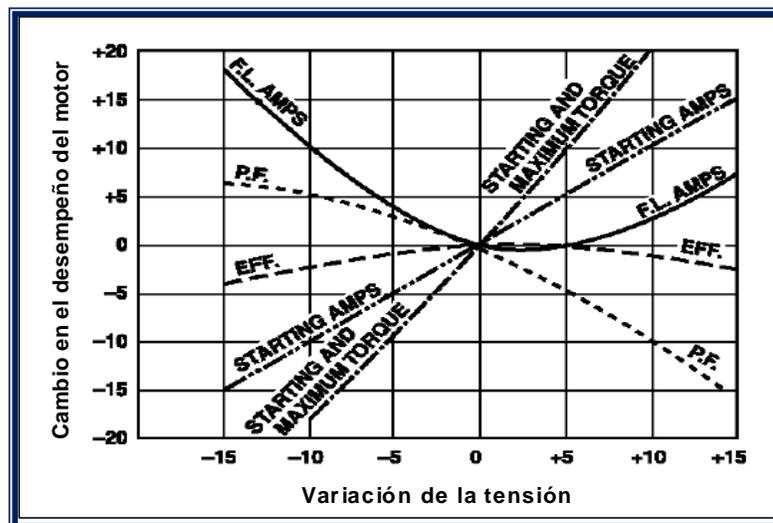
Tensión Nominal del Sistema	Tensión Nominal del motor
208 V	200 V
240 V	230 V
480 V	460 V
2400 V	2300 V
4160 V	4000 V

La norma ANSI C84.1-1989 establece que el límite tolerable de tensión para un motor de inducción estándar debe estar $\pm 5\%$ de la tensión nominal, valor que en caso de excederse incrementa la temperatura en el motor. A continuación se muestra en la tabla 3.2 los valores límites de tensión en bornes para motores de inducción de baja y media tensión.

Tabla 3.2. Límites de tensión para motores de inducción de baja y media tensión

Tensión Nominal del motor	- 5 %	+ 5 %
460 V	437 V	483 V
4000 V	3800 V	4200 V

En la siguiente gráfica (figura 3.11) se resumen los cambios porcentuales en el desempeño del motor producto de la variación porcentual del nivel de tensión.

**Figura 3.12.** Variación en el desempeño del motor producto de la variación de la tensión.

Cuando el motor trabaja con niveles de tensión por debajo de su valor nominal, se origina una reducción del torque de arranque y un incremento en la corriente, y por consiguiente un aumento de la temperatura a plena carga del motor.

Cuando trabaja por encima del valor nominal, se produce un incremento en la temperatura de operación del motor a causa del incremento en el calentamiento del hierro, aumenta el torque, se incrementa también la corriente de arranque y disminuye el factor de potencia del motor. El aumento en la corriente de arranque en el motor incrementará las fuerzas de aceleración sobre el acoplamiento y el equipo impulsado.

En general, la tensión ligeramente por encima del valor nominal, afecta menos el rendimiento del motor que la tensión ligeramente por debajo. Pero en ambos casos, la operación prolongada del motor bajo algunas de estas condiciones acelera el deterioro del sistema de aislamiento. Solo con desviaciones de hasta el $\pm 5\%$ de la tensión nominal, se puede suministrar la potencia nominal del motor.

Según la teoría de análisis de señales, el valor RMS se define como la cantidad de energía transmitida por corriente alterna que origina la misma potencia en corriente directa. Para una onda perfectamente sinusoidal, el valor RMS se obtiene por:

$$V_{RMS} = \frac{v_{MAX}}{\sqrt{2}}$$

Ecuación 3.1

Pero debido a que en un sistema eléctrico real nunca la forma de la onda de tensión es perfectamente sinusoidal, motivado a la presencia de armónicos, el valor RMS calculado es entonces un valor total. Según *Fourier*, cualquier onda periódica descomponerse en una sumatoria de ondas sinusoidales y cosinusoidales de diferentes frecuencias [17]. En el caso de una onda con contenido armónico, se descompone en varias ondas de tal manera que el valor RMS total sería:

$$V_{RMS} = \sqrt{\left(\frac{v_{MAX1}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{v_{MAX3}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \left(\frac{v_{MAX5}}{\sqrt{2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{v_{MAXn}}{\sqrt{2}}\right)^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{v_{MAXi}}{\sqrt{2}}\right)^2}$$

Ecuación 3.2

El factor de cresta es otro indicador del grado de distorsión de la forma de onda, particularmente de la señal de tensión de alimentación del motor. El factor de cresta se define como la relación entre el valor pico de la señal y su valor RMS [7]. La

relación matemática que define el valor del factor de cresta se expresa de la siguiente manera:

$$CF = \frac{V_P}{V_{RMS}}$$

Ecuación 3.3

Una forma de onda, relativamente libre de distorsión tiene un factor de cresta de 1,42, según la norma NEMA MG-1. El factor de cresta es utilizado especialmente para indicar la presencia de picos en la tensión de alimentación del motor, causados por conexiones a equipos electrónicos de estado sólido o por la presencia de transitorios de tensión en la red. Estos picos de tensión suelen causar esfuerzos inapropiados en el aislamiento del motor.

El contenido de distorsión armónica presente en la onda de tensión o en la onda de corriente incrementan las pérdidas eléctricas en el motor, produciendo un aumento en la temperatura de operación, lo cual reduce su eficiencia. El contenido armónico se expresa usualmente como un porcentaje del valor de la fundamental. La distorsión armónica total se define como la relación entre la sumatoria de los valores RMS de las armónicas individuales y el valor RMS de la fundamental. Su expresión matemática es la siguiente:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum V_n^2}}{V_f} \times 100$$

Ecuación 3.4

Los límites establecidos por la IEEE 519-1992 para la distorsión armónica individual y total en la tensión, se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 3.3. Límites de distorsión armónica en la tensión.

Nivel De Tensión En Barra	Distorsión Individual De Tensión	Distorsión Total De Tensión
< 69 KV	3,0 %	5,0 %
69,001KV y 161 KV	1,5 %	2,5 %
> 161 KV	1,0 %	1,5 %

En la tabla 3.4 se muestran los límites de distorsión armónica de corriente individual y total, en función de la relación entre la corriente de corto circuito y la corriente fundamental bajo carga en barra, de acuerdo con la norma IEEE 519-1992.

Tabla 3.4. Límites de distorsión armónica en la corriente.

Relación Icc/In	Distorsión individual de armónicas < 11 va	Distorsión total de tensión
< 20	4,0 %	5,0 %
20 < 50	7,0 %	8,0 %
50 < 100	10,0 %	12,0 %
100 < 1000	12,0 %	15,0 %
> 1000	15,0 %	20,0 %

Tal y como se dijo en párrafos anteriores, de acuerdo con *Fourier*, cualquier onda periódica está formada por la suma de un grupo de ondas sinusoidales y cosinusoidales, de la siguiente forma:

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots + b_0 + b_1 \sin \omega t + b_2 \sin 2\omega t + \dots \quad \text{Ecuación 3.5}$$

En donde los coeficientes a_n y b_n para cualquier onda, se determinan mediante las siguientes ecuaciones:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt$$

Ecuación 3.6

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \text{seno}\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt$$

Ecuación 3.7

El diagrama en donde se muestran las amplitudes de cada uno de los armónicos que componen una onda se denominada espectro de onda. La amplitud de cualquier armónico se obtiene a partir de la siguiente expresión [17]:

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (n \geq 1)$$

Ecuación 3.8

En la figura 3.12 se muestra el espectro de onda de los armónicos presentes en las señales de tensión trifásica de alimentación de un motor eléctrico de inducción.

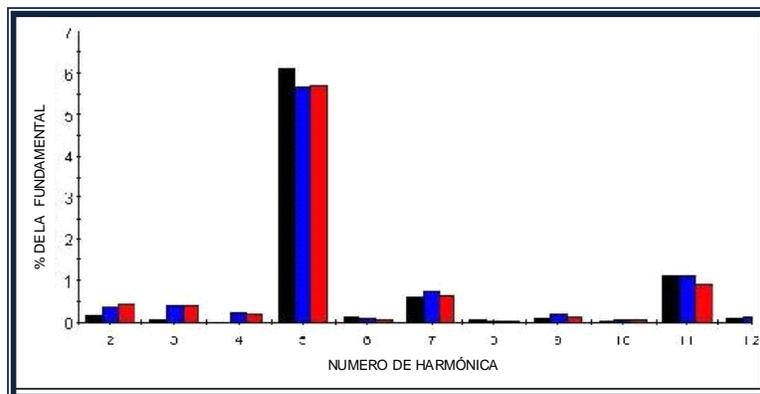


Figura 3.13. Espectro de onda de la tensión trifásica de alimentación de un motor de inducción.

Los variadores de velocidad modernos utilizan compuertas IGBT, haciendo posible que excedan la tensión nominal del motor, por grandes cantidades, en menos de un microsegundo. Los viejos motores con sistemas de aislamiento clase B tienen muy poca tolerancia a los rápidos incrementos de tensión, por lo que pueden fallar rápidamente. Las longitudes excesivas entre el variador y el motor pueden crear

desequilibrio de impedancias que contribuyan a picos de tensión en los terminales del motor. Valores altos en los 5 y 7 armónicos de tensión indican la presencia de influencia de un variador de 6 pulsos en el sistema eléctrico de distribución [8].

En un circuito trifásico balanceado, en donde las corrientes están desplazadas entre sí 120° , los armónicos pueden ser asociados a componentes de secuencia, de manera tal que el segundo armónico tienen 240° (en base a 60 Hz) entre las fases, el tercero tendrá 360° , y así sucesivamente. La tabla 3.5 enlista los principales armónicos asociados con sus respectivas secuencias [12].

Tabla 3.5. Principales armónicos asociados con sus respectivas secuencias.

POSITIVA	SECUENCIA NEGATIVA	CERO
1	2	3
4	5	6
7	8	9
10	11	12
13	14	15
	Etc.	

Al conectar el motor a la red de alimentación, las tensiones de secuencia positiva darán lugar a la circulación de corrientes de secuencia positiva, y de un modo análogo, las tensiones de secuencia negativa y cero, producirán corrientes de secuencia negativa y cero, respectivamente.

Las tres corrientes de secuencia cero son por definición iguales en módulo y ángulo, por lo que su suma no puede ser cero y en el caso de que existiese un cable neutro retornaría esta suma por él. Sin embargo, siendo la conexión del motor de tres hilos, bien sea en estrella o en triángulo, no existirá camino de retorno, por lo que las corrientes de secuencia cero serán siempre nulas. De este modo, solo circularán por el motor corriente de secuencia positiva y de secuencia negativa.

Para medir la cantidad de desbalance presente en la señal trifásica de tensión o de corriente, basta con conocer el valor RMS de cada fase y calcular el valor promedio de las tres. El desbalance se calcula de la siguiente manera,

$$\%Desbalance = \frac{\text{Mayor_desviación_del_promedio}}{\text{promedio}} \times 100 \quad \text{Ecuación 3.9}$$

El desbalance presente en la tensión de alimentación del motor incrementa las pérdidas, principalmente debido a la presencia de tensión de secuencia negativa. La norma NEMA MG-1-1998, proporciona un factor de reducción de la potencia del motor, en función del porcentaje de desbalance presente en la tensión, tal y como puede apreciarse en la curva de la figura 3.4.

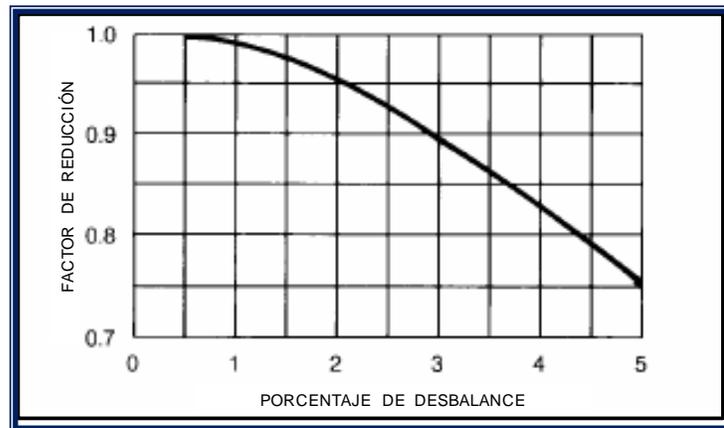


Figura 3.14. Factor de reducción basado en el porcentaje de desbalance de la tensión.

Según NEMA MG-1-1998, no deberá operarse ningún motor cuando el desbalance de tensión exceda el 5%, y se recomienda que éste valor esté por debajo del 2%.

Cuando la tensión de alimentación de un motor presenta cierto grado de desbalance, se produce un incremento en la corriente absorbida por el motor.

No obstante, la naturaleza del desbalance de corriente es bastante compleja, ya que ésta depende del desbalance de la carga trifásica alimentada y del desbalance presente en la tensión de alimentación. De aquí puede deducirse que las condiciones de desbalance en la corriente absorbida por un motor, no obedecen exclusivamente a condiciones anormales de los niveles de tensión, sino que también se debe al desbalance en la impedancia interna del motor de inducción.

En motores eléctricos de inducción trifásicos, deterioros tales como: embobinado defectuoso, disminución de la resistencia del aislamiento, etc., suelen ser los principales causantes de desbalance en las corrientes, bajo tensiones balanceadas, produciendo aumento en la temperatura del motor. En la tabla 3.6 se muestra la relación numérica empírica entre el desbalance de tensión, el desbalance de corriente producido y el incremento asociado en la temperatura del motor, para un motor trifásico balanceado [9].

Tabla 3.6. Relación numérica entre desbalances de tensión, desbalance de corriente e incremento de temperatura del motor.

Desbalance de Tensión	Desbalance de corriente	Incremento de temperatura
0,3 %	0,4 %	0 °C
2,3 %	17,7 %	30 °C
5,4 %	40 %	40 °C

3.5.2 Eficiencia del Motor de Inducción Trifásico

Dado que existe la facilidad de medir directamente la potencia eléctrica demandada por el motor, puede utilizarse ésta para estimar el porcentaje de carga del mismo y la eficiencia del motor. Para calcular la potencia eléctrica trifásica de alimentación, se calcula la potencia activa por fase del motor de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$P_F = V_{LN} \cdot I_L \cdot f_p$$

Ecuación 3.10

La potencia trifásica que entra al motor es la sumatoria de las tres potencias por fase del motor, de manera que:

$$P_{ent} = \sum P_F$$

Ecuación 3.11

La potencia de salida del motor de inducción se define como el producto del torque mecánico en el eje y la velocidad de giro del rotor, según las siguientes expresiones:

$$P_{sal} = T_{mec} \cdot \omega_{mec}$$

Ecuación 3.12

Para

$$\omega_{mec} = RPM \left(\frac{2\pi}{60} \right)$$

Ecuación 3.13

Cuando el motor ha alcanzado su régimen estable de operación, el torque mecánico del motor puede expresarse por la siguiente ecuación:

$$T_{mec} = T_{elec} - F\omega_r$$

Ecuación 3.14

En donde F representa el coeficiente de fricción y viscosidad combinada del rotor y la carga mecánica impulsada. Sin embargo, éste valor puede despreciarse con frecuencia para motores eléctricos de inducción de baja y media potencia.

De acuerdo con la teoría general de máquinas eléctricas, el torque electromagnético desarrollado por un motor de inducción viene dado por la siguiente expresión [5]:

$$T_{elec} = \frac{P}{3} (\Phi_d \cdot i_q - \Phi_q \cdot i_d) \quad \text{Ecuación 3.15}$$

En donde P es el número de polos del motor, Φ_d y Φ_q son los componentes directo y de cuadratura del vector del flujo magnético, y i_d y i_q son las componentes análogas en la corriente del estator.

Los valores de las corrientes i_d y i_q se obtienen transformando los fasores espaciales de las corrientes trifásicas del motor, i_a , i_b y i_c , mediante la transformada de *PARK*. La relación de las corrientes y tensiones trifásicas fijas a, b, c situados en el estator, se transforman a un sistema bifásico móvil d, q, 0 de acuerdo con la siguiente relación matricial [5]:

$$\begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta-240^\circ) \\ \text{sen}\theta & \text{sen}(\theta-120^\circ) & \text{sen}(\theta-240^\circ) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 3.16}$$

En ángulo $\theta = \omega t + \theta_0$, define la posición del fasor espacial con respecto al sistema de referencia del estator.

Para estimar la posición instantánea de la amplitud del campo magnético en el entrehierro se integra numéricamente las siguientes expresiones, las cuales definen el comportamiento eléctrico del motor de inducción [4]:

$$\Phi_d = \int v_d - r_s \cdot i_d \cdot dt \quad \text{Ecuación 3.17}$$

$$\Phi_q = \int v_q - r_s \cdot i_q \cdot dt \quad \text{Ecuación 3.18}$$

En donde r_s es la resistencia promedio del embobinado del motor. Y las tensiones directa y de cuadratura se obtienen al resolver la siguiente expresión matricial [5]:

$$\begin{bmatrix} v_q \\ v_d \\ v_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta-240^\circ) \\ \text{sen}\theta & \text{sen}(\theta-120^\circ) & \text{sen}(\theta-240^\circ) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 3.19}$$

Finalmente, la eficiencia del motor puede calcularse utilizando el criterio de NEMA MG-1-1998, la cual la define como la relación entre la potencia total de salida y la potencia total de entrada al motor, resumida en la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{P_{sal}}{P_{ent}} \times 100 = \left(1 - \frac{P_{érd}}{P_{ent}} \right) \times 100 \quad \text{Ecuación 3.20}$$

La gran mayoría de los motores eléctricos de inducción están diseñados para operar entre el 50% y el 100% de su carga nominal. La eficiencia máxima de estos equipos se alcanza cerca del 75% de la carga nominal del motor. La eficiencia tiende a decaer dramáticamente por debajo del 50% de su carga nominal (figura 3.14). De manera que puede considerarse que un motor está subcargado cuando su eficiencia cae significativamente en la medida en que decrece su carga. De igual manera un motor sobrecargado puede calentarse y perder eficiencia también.

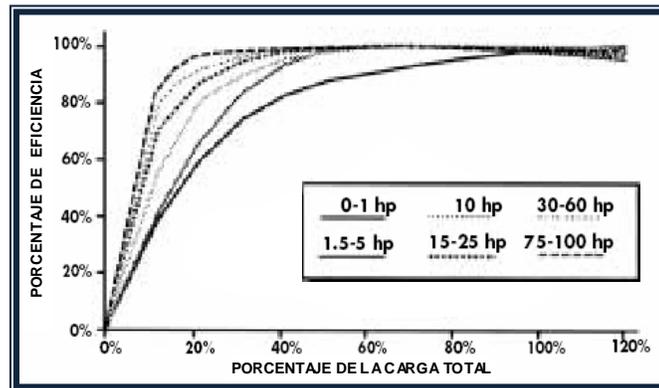


Figura 3.15. Característica de eficiencia en función del porcentaje de carga.

El factor de potencia también es un elemento indicador de la eficiencia de un motor de inducción. El factor de potencia es la fracción de la potencia activa entregada al motor desde la red de alimentación, en relación con la potencia que es entregada al motor por la misma tensión y corriente, pero sin desfase entre ellos. El factor de potencia se calcula a partir del ángulo de desfase entre la tensión y la corriente. La curva típica del factor de potencia, en función del porcentaje de la corriente nominal del motor, se muestra en la figura 3.15.

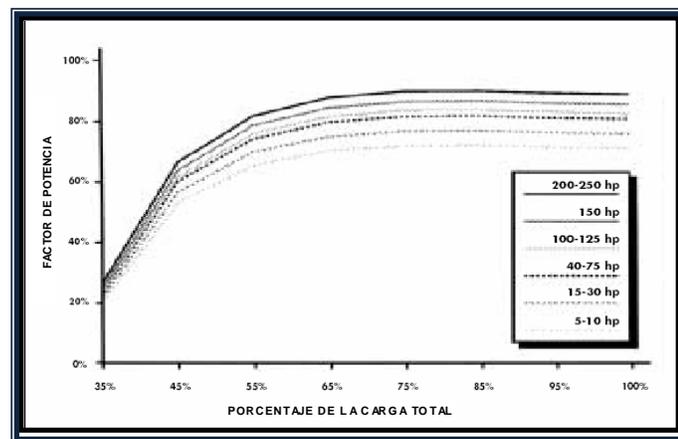


Figura 3.16. Curva del factor de potencia en función del porcentaje de la corriente.

3.6 Análisis del Espectro de Corriente

Esta técnica ha estado creciendo desde los últimos años, como herramienta fundamental para planes de mantenimiento predictivo de motores eléctricos de inducción. El análisis de espectro de corriente (CSA, por sus siglas en inglés) se basa en la observación de las variaciones en el entrehierro entre el estator y el rotor del motor de inducción, las cuales se reflejan en la forma de la onda del espectro de la corriente del motor debido a que el flujo resultante existente en el entrehierro afecta la fuerza contraelectromotriz del motor [18]. Estos cambios en la fuerza contraelectromotriz son las que modulan la corriente del motor, utilizándose al propio motor de inducción como un transductor de energía.

Luego se aplica la transformada rápida de *FOURIER* sobre la forma de onda de la corriente del motor. La transformada rápida de *FOURIER* (FFT, por sus siglas en inglés) es una operación matemática que extrae la información de una señal en el dominio del tiempo, para transformarla en una señal en el dominio de la frecuencia.

En el dominio de la frecuencia, la altura del pico representa la amplitud de la señal a esa frecuencia. La figura 3.16 muestra la transformación de una señal desde el dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

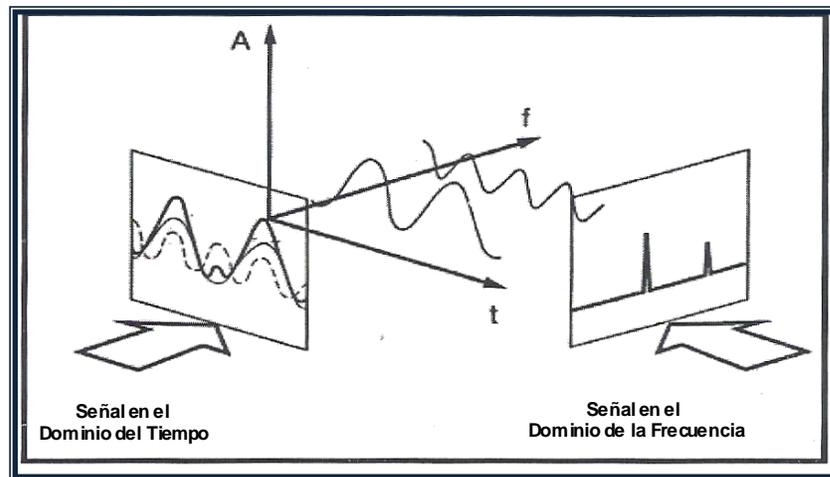


Figura 3.17. Relación entre la señal en el dominio del tiempo y en el dominio de la frecuencia.

3.6.1 Evaluación del espectro en bajas frecuencias

3.6.1.1 Detección de daños en el rotor

Un devanado estatórico trifásico simétrico, alimentado por una fuente trifásica, produce un campo magnético giratorio a velocidad sincrónica, y si existe una simetría perfecta, no habrá un campo magnético reverso. Cualquier asimetría en la alimentación o en el devanado estatórico causará un campo magnético resultante inverso. Ahora aplicando los mismos fundamentos del campo magnético giratorio al rotor, se aprecia que las corrientes del rotor también producen un campo magnético, con el mismo número de polos que el del campo estatórico pero que gira a una frecuencia de deslizamiento con respecto al rotor.

Cuando el devanado de jaula del rotor es simétrico, solo existe un campo magnético giratorio en dirección positiva a la frecuencia de deslizamiento con respecto al rotor. Si existiera alguna asimetría en el rotor, entonces se crearía un campo magnético inverso resultante a la frecuencia de deslizamiento con respecto al

campo magnético positivo del rotor. El resultado de esto es que, con respecto al devanado estacionario del estator, este campo magnético inverso, a la frecuencia de deslizamiento con respecto al rotor, inducirá una tensión y una corriente en el devanado estatórico a una frecuencia conocida como frecuencia de paso polar, y que es igual a [18]:

$$\boxed{f_{sb} = f_1(1 - 2s)} \quad \text{Ecuación 3.21}$$

En donde:

f_{sb} : frecuencia de falla en barras del rotor.

f_1 : frecuencia de la red de alimentación.

s : deslizamiento real del motor.

La diferencia en amplitud entre el pico de la frecuencia de línea y el de la frecuencia de paso polar es un indicativo de la condición de las barras del rotor. Estudios empíricos han determinado que una diferencia de más de 60 dB indica condiciones excelentes de las barras del rotor. En la medida en que las barras del rotor comienzan a degradarse (alta resistencia en las juntas o comienzo de roturas), la impedancia del rotor comienza a aumentar. Debido a esto, la corriente que fluye a la frecuencia de paso polar se incrementa, dando origen a un incremento de la amplitud del pico a ésta frecuencia en el espectro de corriente. Una diferencia de picos cerca de 48 dB podría indicar la presencia de juntas de alta resistencia, en cambio una diferencia de 35 dB indicarían múltiples barras rotas en el rotor [20].

3.6.2 Evaluación del espectro en altas frecuencias.

Detección de excentricidad en el entrehierro. La excentricidad debida a variaciones en el entrehierro puede darse de dos formas: estática y dinámica. Las

excentricidades en el entrehierro pueden ser detectadas al identificar su frecuencia asociada en el espectro de corriente, la cual puede calcularse a partir de la siguiente expresión [18]:

$$f_{ec} = f_1 \left\{ (R \pm n_d) \left(\frac{1-s}{P} \right) \pm n_{ws} \right\} \quad \text{Ecuación 3.22}$$

En donde:

f_{ec} : frecuencia asociada a excentricidad del entrehierro

f_1 : Frecuencia de alimentación

R : número de barras en las ranuras del rotor

n_d : 0 ó 1

P : Pares de polos

N_{ws} : 1 y 3

En la ecuación anterior, cuando $n_d = 0$ se determinan las frecuencias asociadas con la excentricidad estática, en donde la distancia más corta del entrehierro es fija en el espacio, típicamente causada por la forma ovalada del núcleo del estator o una posición incorrecta del rotor o del estator. Tal y como se muestran en la figura 3.17.

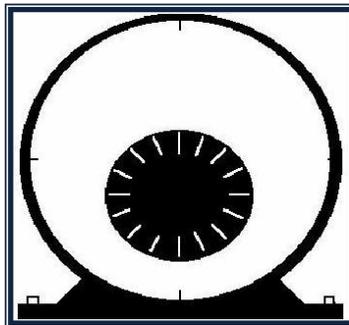


Figura 3.18. Posición del rotor ante excentricidad estática.

La excentricidad estática causa un empuje magnético desbalanceado sobre el rotor en una dirección que intenta empujar aún más el rotor fuera del centro del núcleo del estator en dirección a la distancia más corta del entrehierro. La resistencia a una reducción mayor del entrehierro es controlada primeramente por la propia rigidez mecánica del rotor. La excentricidad estática se presenta como altos picos a las frecuencias descritas, con amplitudes menores a 55 dB [18].

Cuando $n_d = 1$ se determinan las frecuencias asociadas con la excentricidad dinámica del rotor. El mismo es un fenómeno en el que la distancia más corta del entrehierro gira con el rotor, siendo función del espacio y del tiempo. La excentricidad dinámica causa una fuerza que actúa sobre el rotor, pero que gira a la velocidad del rotor también. La excentricidad dinámica puede ser causada por un rotor con diámetro externo no concéntrico, pandeo térmico del rotor o avanzado desgaste de rodamiento. Estos espectros se muestran como altos picos a las mismas frecuencias de excentricidad estáticas, pero acompañado de bandas laterales a la velocidad de operación del motor, alrededor de ellas, con amplitudes menores a 55 dB [18]. La disposición del rotor ante excentricidad dinámica se muestra en la figura 3.18.



Figura 3.19. Posición del rotor ante excentricidad dinámica.

Aunque teóricamente, la excentricidad dinámica difiere de la estática solo por las bandas laterales a la velocidad de operación del motor, estudios posteriores de elementos finitos y pruebas de laboratorio, así como numerosos casos industriales, han probado que estas componentes son en efecto función de la combinación de excentricidades dinámicas y estáticas en el entrehierro, por lo que muchas veces se prefiere hablar de excentricidad total del entrehierro, en lugar de una u otra.

3.6.2.1 Determinación de la velocidad del motor

La determinación de la velocidad de giro del motor de inducción se realiza utilizando la misma ecuación para determinar excentricidad en el entrehierro, valiéndose del hecho de que todo motor presenta cierto grado de excentricidad por condiciones propias de fabricación. De hecho, el procedimiento incluye los mismos pasos, con la diferencia que se hace de manera inversa. A continuación se detalla el método para calcular la velocidad [19]:

Se obtienen las frecuencias de excentricidad estática ($n_d = 0$), utilizando como valor para el deslizamiento s , el valor nominal, y se sustituyen en n_{ws} los números impares 1 y 3. Luego que se determinen los componentes, se identifican y se ubican en el espectro real muestreado, los cuales serán de valores muy cercanos a los determinados en el paso anterior.

Es necesario ahora un análisis más preciso del espectro para determinar los componentes asociados con la excentricidad dinámica. En la ecuación de excentricidad se sustituye $n_d = \pm 1$ y se obtienen componentes de frecuencia ligeramente por encima y por debajo de la frecuencia de excentricidad estática. La diferencia entre estos son las bandas laterales asociadas a la frecuencia de velocidad rotacional de motor.

Se examina en el espectro real el valor exacto de estas bandas laterales, es decir, su espaciamiento de la frecuencia de excentricidad estática. Este valor corresponde a la velocidad rotacional del rotor, la cual puede determinarse a partir de:

$$RPM = 60 |f_{exsta} - f_{excdin}|$$

Ecuación 3.23

En donde la f_{exsta} es cualquiera de los picos de la excentricidad estática, mientras que f_{excdin} es cualquiera de las bandas laterales alrededor de los picos de excentricidad estática.

CAPÍTULO 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Generalidades

En este capítulo se analizan los resultados de las pruebas realizadas a los motores eléctricos en baja tensión que permitirán determinar la condición en la que se encuentran funcionando los equipos, con el objetivo de observar el comportamiento de la máquina en el tiempo.

4.2 Datos para el Análisis

4.2.1 Calidad de Energía

El estándar IEEE 519-1992 señala que la operación de un motor con una variación de su voltaje nominal mayor al 5% produce calor en el mismo y con el tiempo estrés térmico (daño del aislamiento). Por cada 10°C que suba por encima de la capacidad térmica del aislamiento, este reduce su vida útil a la mitad.

La publicación de Normas NEMA MG-1 para motores y generadores en su sección 12.45 establece que “los motores de C.A deberán de operar satisfactoriamente bajo condiciones de operación a carga nominal cuando el desbalance de tensión en los terminales del motor no exceda del 1%”. La sección I-14.5 de la misma norma menciona una reducción de la capacidad nominal por desbalance observado y no recomienda la operación de motores para desbalances de tensión de más de 5%.para este caso, el desbalance observado ya señala un derrateo de la capacidad nominal.

La norma MG-1 menciona que el máximo desbalance permitido en corriente es de 10%.

El estándar IEEE 519-1992 comenta que para sistemas hasta 69 KV el máximo permitido de distorsión individual de voltaje es de 3% y el de distorsión total es de 5%. En cuanto a la corriente, es necesario, tener un aproximado de la corriente de corto circuito, asumimos que nos situará en la relación I_{sc}/I_L a $50 < 100$. En esta condición el máximo permitido de armónicos totales de corriente no debe exceder el 12 %.

4.2.2 Estator

Partiendo de la teoría de que los motores son unidades trifásicas balanceadas, los valores de impedancia y resistencia deberían estar muy similares o con minúscula variación. Al respecto de estas variaciones la IEEE en sus estándares 388-1992, 389-1996, 43-2000 y 120-1989 comenta sobre los efectos y menciona que el máximo desbalance permitido de impedancias entre fases es de 12%. Ante esto, el valor colectado está muy por debajo de la alarma. Esto da pie para señalar que no observan anomalías en el estator.

4.2.3 Rotor

También pudo evaluarse la condición del rotor. En el espectro frecuencial de las corrientes, los polos del motor pasan a una frecuencia ($PPF = \text{slip} \times \text{Nro. de polos}$) mostrada como bandas laterales a la línea de la frecuencia. La diferencia de amplitud entre el pico de la línea de frecuencia fundamental y la frecuencia de las bandas laterales causadas por el paso polar es una indicación de la salud de las barras del rotor. (Una escala de dB es usada por el eje Y en función de resolver los picos PPF claramente, esto es muy difícil en una escala lineal). Cuando las barras del rotor

empiezan a degradarse (por ejemplo, cuando están presentes altas resistencias de conexión (juntura) o cuando se está iniciando una fractura), la impedancia del rotor aumenta. Debido a esto, la corriente trazada por la PPF es elevada, conduciendo a un decrecimiento en la amplitud de los picos PPF en el espectro de corriente. Una diferencia de cerca de 48dB podría estar indicando la presencia de alta resistencia de juntura, mientras que una diferencia de cerca de 35 dB podría estar indicando la fractura de múltiples barras.

4.3 Resultados

Se presenta una serie de tablas enumeradas de la siguiente manera (desde la 4.1 hasta la 4.4) y gráficos obtenidos de la toma de parámetros.

Tabla 4.1. Resumen de resultados.

Motor (Tag)	Voltaje			Corriente			Fp	% EFF	Velocidad (R.P.M)	Torque (N.M)	Carga (Kw)	Eff.S.F	Marca		
	Avg	%Unbal	CF	THD	Avg	%FLA								%Unbal	THD
MEA 4305/01	472.1	0.40	1.44	2.0	52.1	106.5	5.3	3.5	0.80	95.7	1777.8	175.8	32.7	1.09	Marelli
MEA 4305/02	474.7	0.88	1.48	3.1	48.3	97.6	3.1	5.3	0.80	92.5	1774.4	157.6	29.3	0.98	Marelli
MEA 4305/03	472.2	0.79	1.45	2.0	50.6	104.4	5.3	2.9	0.82	92.6	1773.8	169.7	31.5	1.05	Marelli
MEA 4305/04	470.3	0.72	1.47	3.3	49.5	101.9	5.0	5.8	0.80	92.7	1779.4	160.7	29.9	1.00	Marelli
MEA 4305/05	473.8	0.33	1.46	2.0	48.1	99.5	5.4	2.0	0.81	92.4	1770.5	159.0	29.5	0.98	Marelli
MEA 4305/06	472.4	0.89	1.48	3.1	46.2	86.8	3.3	4.8	0.80	92.8	1773.6	151.5	28.1	0.82	Siemens
MEA 4305/07	469.7	0.83	1.44	1.7	45.6	95.5	6.7	3.3	0.78	94.2	1800.0	145.6	27.4	0.91	Marelli
MEA 4305/08	471.8	0.75	1.47	3.5	48.9	91.3	2.8	5.3	0.81	92.5	1769	162.5	30.1	0.87	Siemens
MEA 4305/09	468.5	0.96	1.45	1.6	46.2	87.2	3.9	2.8	0.83	93.1	1776.3	155.0	28.8	0.84	Siemens
MEA 4305/10	466.6	0.74	1.47	3.2	47.0	93.5	1.4	5.7	0.79	92.0	1764.6	150.3	27.8	0.93	Marelli
MEA 4305/11	473.2	0.81	1.44	1.9	48.7	100.8	5.5	3.4	0.78	93.9	1800.0	155.3	29.3	0.98	Marelli
MEA 4305/12	464.7	0.78	1.48	3.6	48.6	97.2	3.2	6.3	0.81	95.5	1774.1	161.9	30.1	1.00	Marelli
MEA 4305/13	469.5	0.48	1.45	1.7	48.3	98.2	4.8	3.0	0.79	92.5	1776.9	153.8	28.6	0.95	Marelli
MEA 4305/14	468.8	0.67	1.47	3.2	48.3	96.4	1.8	5.4	0.83	92.8	1774.3	163.2	30.3	1.01	Marelli
MEA 4305/15	464.9	0.78	1.44	1.6	45.3	85.1	3.4	2.9	0.81	92.9	1775.0	147.1	27.3	0.79	Siemens

Tabla 4.2. Resumen de resultados.

Motor (Tag)	Voltaje			THD			Corriente			Fp	% EFF	Velocidad (R.P.M)	Torque (N.M)	Carga (Kw)	EFF.SF	Marca
	Avg	%Unbal	CF	THD	Avg	%FLA	%Unbal	THD								
MEA 4305/16	472.2	0.73	1.47	3.4	47.3	93.7	1.2	5.8	0.80	92.8	1777.2	155.1	28.9	0.96	Marelli	
MEA 4305/17	470.0	0.49	1.45	1.6	51.6	97.3	3.9	2.6	0.83	92.3	1767.0	174.4	32.3	0.94	Siemens	
MEA 4305/18	466.7	0.71	1.47	3.0	47.4	88.2	2.4	4.6	0.81	92.5	1769.2	154.0	28.5	0.83	Siemens	
MEA 4305/19	465.8	0.76	1.44	1.6	48.8	97.6	2.0	2.6	0.79	92.7	1779.7	155.2	28.9	0.96	Marelli	
MEA 4305/20																
MEA 4305/21	469.8	0.45	1.45	1.6	40.2	83.3	5.9	3.3	0.79	93.4	1781.2	128.6	24.0	0.80	Marelli	
MEA 4305/22	471.6	0.89	1.48	3.0	48.9	100.8	5.2	5.0	0.82	92.6	1774.8	162.4	30.2	1.01	Marelli	
MEA 4305/23	473.4	0.81	1.44	1.9	45.7	92.9	3.7	3.3	0.81	94.4	1800.0	152.4	28.7	0.96	Marelli	
MEA 4305/24	464.1	0.75	1.48	3.5	41.7	85.5	4.4	6.7	0.78	95.7	1779.1	135.1	25.2	0.84	Marelli	
MEA 4305/25	467.5	0.36	1.45	1.7	44.7	90.1	4.1	3.2	0.80	93.2	1779.7	145.4	27.1	0.90	Marelli	
MEA 4305/26	472.7	0.88	1.48	3.1	47.2	96.0	4.8	5.2	0.80	92.7	1778.3	154.2	28.7	0.96	Marelli	
MEA 4305/27	469.1	0.80	1.44	1.7	45.8	87.1	4.6	2.8	0.82	94.6	1800.0	152.8	28.8	0.83	Siemens	
MEA 4305/28	467.6	0.78	1.47	3.3	47.0	94.4	2.5	5.0	0.83	92.8	1774.2	158.1	29.4	0.98	Marelli	
MEA 4305/29	470.0	0.46	1.45	1.7	36.0	74.2	8.0	3.8	0.67	92.9	1787.1	97.1	18.2	0.61	Marelli	
MEA 4305/30	473.7	0.89	1.48	3.1	36.8	73.8	3.3	6.8	0.70	93.1	1786.1	104.6	19.6	0.65	Marelli	

Tabla 4.3. Resumen de Resultados.

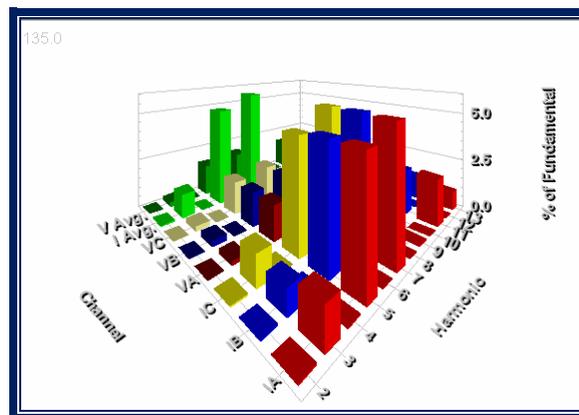
Motor (Tag)	Voltaje			Corriente				Fp	% EFF	Velocidad (R.P.M)	Torque (N.M)	Carga (Kw)	Eff.S.F	Marca
	Avg	%Unbal	CF	THD	Avg	%FLA	%Unbal							
MEA 4305/31	466.3	0.82	1.45	1.9	51.2	102.1	1.7	2.6	0.83	1770.7	172.2	31.9	1.06	Marelli
MEA 4305/32	472.8	0.84	1.44	1.9	36.4	69.0	4.4	3.7	0.69	1800.0	103.4	19.5	0.56	Siemens
MEA 4305/33	479.3	0.90	1.43	1.8	37.3	78.0	6.5	4.0	0.64	1787.9	97.9	18.3	0.61	Marelli
MEA 4305/34	479.5	0.30	1.44	2.4	36.0	75.2	6.7	4.7	0.67	1786.5	102.7	19.2	0.64	Marelli
MEA 4303/01	468.5	0.36	1.43	1.8	40.4	84.1	6.2	3.3	0.74	1782.8	120.1	22.4	0.75	Marelli
MEA 4303/02	469.3	0.36	1.43	1.9	40.4	83.3	5.0	3.4	0.72	1783.3	117.4	21.9	0.73	Marelli
MEA 4303/03	475.3	0.42	1.43	1.7	44.2	90.7	4.7	3.1	0.76	1768.6	138.1	25.6	0.85	Marelli
MEA 4303/04	475.8	0.42	1.43	1.7	47.1	95.9	3.9	3.0	0.79	1777.5	152.1	28.3	0.94	Marelli
MEA 4201/01	469.8	0.46	1.45	1.6	41.8	86.2	5.3	3.3	0.79	1779.9	133.7	24.9	0.83	Marelli
MEA 4201/02	471.9	0.90	1.48	3.0	39.6	80.9	4.1	6.0	0.78	1781.8	126.1	23.5	0.78	Marelli
MEA 4201/03	473.3	0.81	1.44	1.9	40.5	81.1	2.2	4.0	0.76	1782.7	126.2	23.6	0.79	Marelli
MEA 4201/04	463.5	0.76	1.48	3.5	42.8	86.3	2.9	6.3	0.78	1800.0	137.4	25.9	0.86	Marelli
MEA 4201/05	469.4	0.47	1.44	1.6	38.2	80.5	7.4	3.6	0.72	1783.5	112.3	21.0	0.70	Marelli
MEA 4201/06	472.8	0.89	1.48	3.1	37.0	76.1	4.8	6.6	0.69	1786.0	103.4	19.3	0.64	Marelli
MEA 4201/07	468.6	0.36	1.43	1.7	41.8	88.6	8.1	3.0	0.74	1781.9	124.9	23.3	0.78	Marelli

Tabla 4.4. Resumen de Resultados.

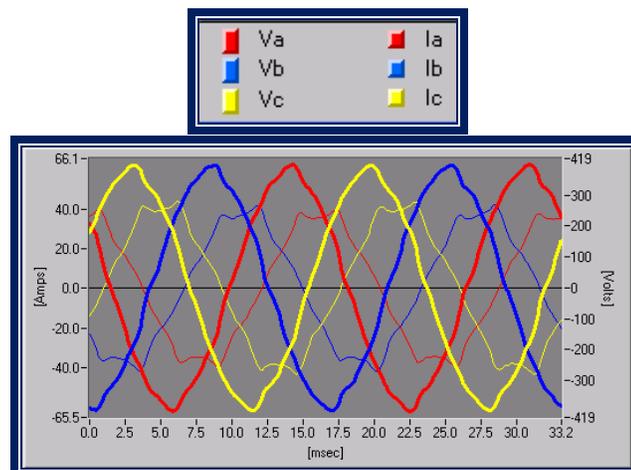
Motor (Tag)	Voltaje			Corriente				Fp	% EF	Velocidad (R.P.M)	Torque (N.M)	Carga (Kw)	EFF.S.F	Marca
	Avg	%Unbal	CF	THD	Avg	%FLA	%Unbal							
MEA 4201/08	468.0	0.76	1.47	3.3	42.0	83.4	2.0	6.4	0.74	92.7	1782.3	23.2	0.77	Marelli
MEA 4201/09	468.7	0.35	1.43	1.9	43.9	90.1	4.6	3.0	0.77	92.9	1780.3	25.4	0.85	Marelli
MEA 4201/10	472.1	0.80	1.44	1.8	40.4	84.1	6.1	4.0	0.70	93.7	1800.0	21.8	0.73	Marelli
MP 5105/B	471.2	0.27	1.48	3.3	28.9	77.6	4.7	8.4	0.67	91.5	3568.7	14.4	0.65	Marelli
MP 5105/A	466.8	0.29	1.44	1.8	20.8	69.3	6.6	3.1	0.87	93.2	3566.0	13.6	0.64	Siemens
MP 5105/C	468.5	0.29	1.45	1.8	27.5	74.3	5.5	5.7	0.66	91.7	3569.5	13.6	0.62	Marelli
MP 4109A	467.7	0.29	1.43	1.8	35.9	73.3	6.2	3.6	0.74	93.6	1784.6	20.2	0.67	Cemp
MEA 4101/01	468.5	0.33	1.43	1.8	33.2	94.7	7.8	2.9	0.80	92.8	1779.1	20.0	0.91	Marelli
MEA 4101/02	470.2	0.35	1.43	2.0	33.5	93.3	5.3	2.7	0.81	92.6	1773.9	20.4	0.93	Marelli
MEA 4101/03	469.0	0.34	1.43	1.8	31.8	88.9	5.8	3.1	0.81	93.1	1778.9	19.4	0.88	Marelli
MEA 4101/04	469.7	0.35	1.43	1.9	33.5	94.3	6.3	3.2	0.82	92.3	1777.8	20.8	0.69	Marelli

4.4 Análisis

La calidad de energía está bastante estable, no se observan desbalances de voltajes y corrientes que indiquen una falla. Algunas alarmas de precaución por contenido armónico se presentaron en los siguientes equipos: **MEA-4305/02, MEA-4305/04, MEA-4305/06, MEA-4305/08, MEA-4305/10, MEA-4305/12, MEA-4305/14, MEA-4305/16, MEA-4305/18, MEA-4305/22, MEA-4305/24, MEA-4305/26, MEA-4305/28, MEA-4305/30, MEA-4201/06, MEA-4201/04, MEA-4201/08, MEA-4201/02, MP-5105B.**



Grafica 4.1. Armónicos en la MP-5105/B.



Grafica 4.2. Formas de Ondas Distorsionadas.

Normalmente esta condición produce calor, sobre todo en las condiciones en que están generando los armónicos. El quinto y el séptimo armónico de voltaje producen calor en los motores. El contenido armónico observado no representa una alarma crítica de operación, pero debe realizarse monitoreo continuo para ver si ha habido aumento de niveles. Por los momentos no requiere ninguna acción, solo mantenerse bajo supervisión.

En los siguientes equipos: **MEA-4305/01, MEA-4305/03, MEA-4305/31, MEA-4305/22, MEA-4305/14**. Se observó una sobrecarga del 2% sobre la nominal, aun cuando el equipo de medición no refleja la precaución por estar dentro del máximo límite permitido. Esta sobrecarga genera un consumo adicional al nominal de: corriente, potencia y esfuerzo del torque mecánico que con el tiempo se ve reflejado en pérdidas por calentamiento, degradación del aislamiento o puntos calientes, trayendo como consecuencia la disminución de la vida del equipo. Aunque la sobrecarga no señala anomalía, debe mantenerse bajo vigilancia.

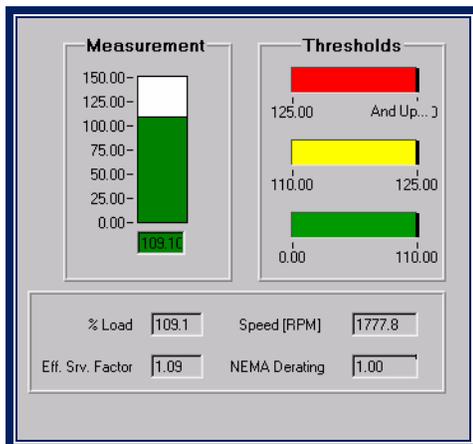


Figura 4.1. Sobrecorriente.

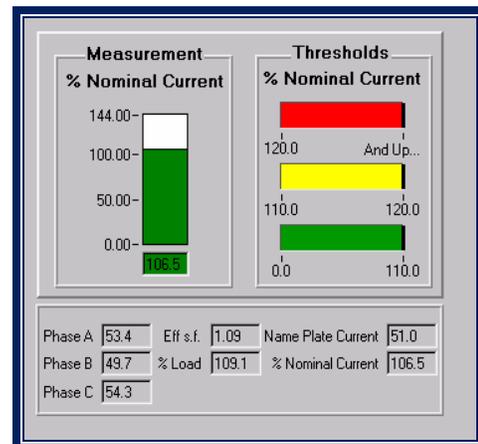


Figura 4.2. Corriente.

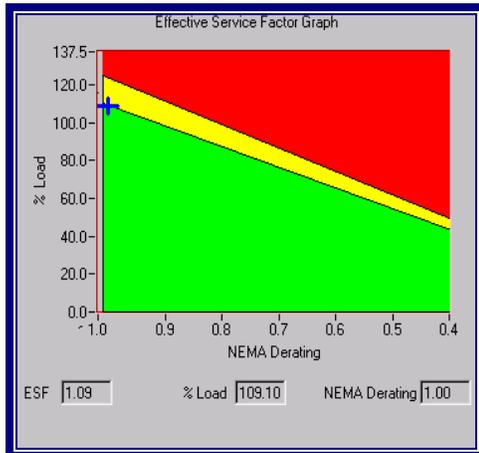


Figura 4.3. Factor de Servicio Efectivo.

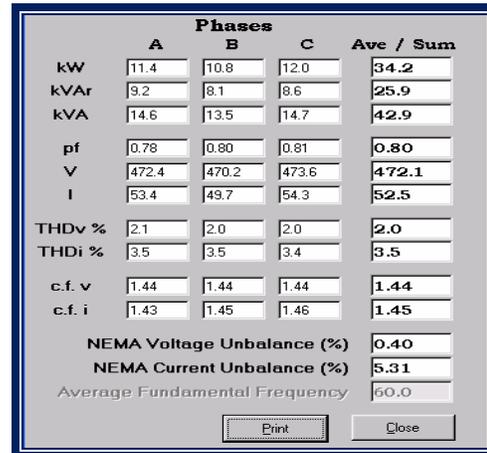
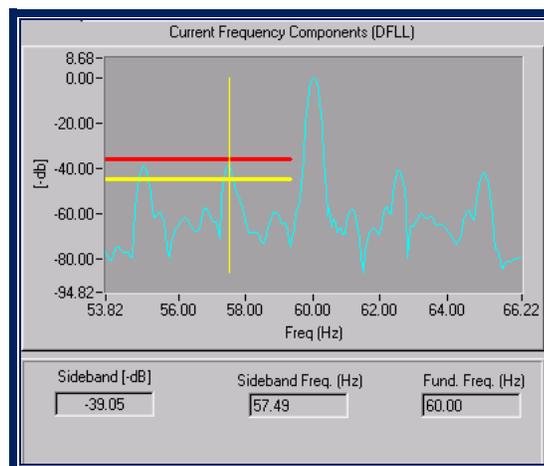
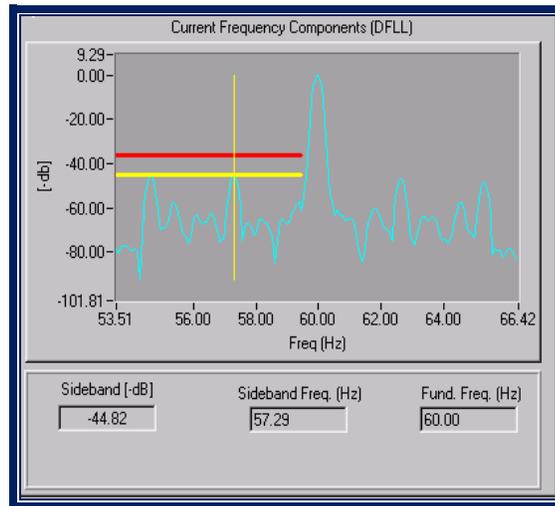


Figura 4.4. Calidad de Energía.

También, los equipos **MEA-4305/17** y **MEA-4305/05**, presentaron alarmas de precaución mediante el Análisis del Espectro Frecuencial de las Corrientes que evalúa la condición del rotor. Estos equipos mostraron una diferencia en la amplitud de picos entre la frecuencia fundamental y la frecuencia de paso polar de 44.82dB y 39.05dB respectivamente, lo que puede estar indicando la presencia de una alta resistencia de unión y fracturas múltiples de barras. La presencia de barras rotas en el rotor, no es motivo de parada inminente, pero provoca una degradación del funcionamiento del motor, y la posible aparición de serios efectos secundarios.



Grafica 4.3. Análisis del Espectro Frecuencial de las Corrientes del MEA-4305/05.



Grafica 4.4. Análisis del Espectro Frecuencial de las Corrientes del MEA-4305/17.

CAPITULO 5: PROGRAMA DE MANTENIMIENTO

5.1 Generalidades

Este capítulo enfoca algunos conceptos básicos que deben tenerse presente al realizar las acciones o plan de mantenimiento basado en la programación de los motores eléctricos en baja tensión y que contribuyen al entendimiento de las mismas.

Estas acciones, están basadas en el mantenimiento predictivo o monitoreo según condición a través de equipos que permiten evaluar el estado de máquina y realizar intervenciones únicamente cuando las mediciones o pruebas indican que es necesario.

5.2 Mantenimiento

Es uno de los factores indispensables para el buen funcionamiento y desarrollo de las plantas industriales. Se puede definir como el conjunto de técnicas y sistemas que actuando sobre los medios de producción que permiten:

- ✓ Garantizar la disponibilidad y confiabilidad planeadas de la función deseada.
- ✓ Satisfacer todos los requisitos del sistema de calidad de empresa.
- ✓ Cumplir con todas las normas de seguridad y medio ambiente.
- ✓ Maximizar el beneficio global.

5.2.1 Mantenimiento Correctivo

Consiste en el reacondicionamiento o sustitución de partes en un equipo una vez que han fallado, es la reparación de la falla (falla funcional), ocurre de emergencia.

5.2.2 Mantenimiento preventivo

Consiste en reacondicionar o sustituir a intervalos regulares un equipo o sus componentes, independientemente de su estado en ese momento.

5.2.3 Mantenimiento predictivo

Consiste en el análisis de parámetros de funcionamiento cuya evolución permite detectar una falla antes de que este tenga consecuencias más graves.

En general, el mantenimiento predictivo, consiste en estudiar la evolución temporal de ciertos parámetros y asociarlos a la evolución de fallas, para así determinar en qué periodo de tiempo, esa falla va a tomar una relevancia importante, para así poder planificar todas las intervenciones con tiempo suficiente, para que no tenga consecuencias graves.

Una de las características más importante de este tipo de mantenimiento es que no debe alterar el funcionamiento normal de la planta mientras se está aplicando.

La inspección de los parámetros se puede realizar de forma periódica o de forma continua, dependiendo de diversos factores como son: el tipo de planta, los tipos de fallas a diagnosticar y la inversión que se quiera realizar.

La respuesta aparente a estos problemas es realizar un mantenimiento basado en la condición o estado de la máquina. En este tipo de mantenimiento, las revisiones a intervalos fijos de tiempo se sustituyen por mediciones de ciertos síntomas o parámetros a intervalos fijos.

Esto se denomina control y seguimiento de la condición, o monitoreo de la condición. El principio de mantenimiento predictivo es que la intervención de la máquina se realiza únicamente cuando las mediciones indican que es necesario.

5.3 Ventajas del Mantenimiento Predictivo

- ✓ Reduce el tiempo de parada al conocerse exactamente que órgano es el que falla.
- ✓ Permite seguir la evolución de un defecto en el tiempo.
- ✓ Optimizar la gestión del personal de mantenimiento.
- ✓ Toma de decisiones sobre la parada de una línea de maquinas en momentos críticos.
- ✓ Conocer con exactitud el tiempo límite de actuación que no implique el desarrollo de un fallo imprevisto.
- ✓ Permitir el conocimiento del historial de actuaciones, para ser utilizada por el mantenimiento correctivo.
- ✓ Facilita el análisis de las averías.
- ✓ Permite el análisis estadístico del sistema.

5.4 Técnicas del Mantenimiento Predictivo

El principio del monitoreo de la condición de una máquina es un concepto muy antiguo. El operario a cargo de una máquina lo ha usado desde siempre con sus propios sentidos.

Estos métodos naturales de monitoreo han sido:

- ✓ La vista para detectar fugas, humo o cambios de color de superficie por recalentamiento.
- ✓ El olfato, para detectar fugas y recalentamiento.
- ✓ El oído, para detectar ruidos anormales indicativos de algún problema.
- ✓ El tacto, para detectar vibraciones o temperaturas anormales.

El uso de los instrumentos de medidas elimina lo subjetivo del problema y permite comparar las mediciones actuales con las mediciones obtenidas cuando la maquina está en buenas condiciones.

5.5 Estrategia para el Programa de Mantenimiento

El nivel de confiabilidad de los motores eléctricos en la empresa Supermetanol poseen un nivel de confiabilidad moderado, respecto a su mantenimiento, lo cual hizo posible la adquisición de un equipo que permite evaluar la condición o comportamiento de los motores, llevando a tomar nuevas estrategias como es cambiar el plan de mantenimiento preventivo a predictivo.

Ya que mediante el mantenimiento predictivo se puede aumentar la confiabilidad del mantenimiento, reducir costos y, lo más importante, permite conocer cuando se debe intervenir los motores, a través de estudios y diagnósticos de una serie de parámetros que se encuentran dentro de estos, por tal motivo conocer con exactitud que elemento es el que falla.

En este trabajo se estudió un equipo on-line (con el motor funcionando), que ofrece especificaciones técnicas de gran ayuda para el mantenimiento a los motores eléctricos de baja tensión. El equipo estudiado es el Baker Explore 3000.

5.6 Baker Explore 3000

Este equipo es capaz de monitorear las condiciones de alimentación, el perfil de la carga y el funcionamiento del motor, incluyendo los rodamientos. Con la prueba de condición del motor se puede conocer lo siguiente: velocidad, torque, eficiencia y carga a la cual está sometido el motor.

Por otra parte, se registra el valor de la corriente de carga por fase y el factor de servicio efectivo. En el caso de que el rotor del motor sea del tipo jaula de ardilla, el equipo es capaz de verificar las condiciones del mismo, efectuando un análisis espectral de la corriente de carga del motor.

Con respecto al análisis de la carga, el equipo deberá monitorear el “ripple” del torque y compararlo respecto al torque de operación del motor. El equipo de monitoreo deberá registrar y almacenar los valores adquiridos en una base de datos.

Para los datos correspondientes a desbalance de voltaje, nivel de voltaje, distorsión armónica de voltaje, factor de servicio efectivo, corrientes del motor, condición del rotor de la jaula de ardilla, punto de operación, ripple del torque, e historia de la carga, el equipo es capaz de crear un histórico de resultados que permita verificar las tendencias de estos parámetros.

5.7 Plan de Mantenimiento Predictivo

Premisas:

- Se realizó un plan de mantenimiento predictivo con inspecciones de acuerdo a la criticidad de los motores. Estas actividades de mantenimiento predictivo

son necesarias para conservar el funcionamiento normal de los motores de baja tensión.

- En el momento de ejecutar la actividad de inspección estarán los motores en funcionamiento, pues existen pasos específicos para realizar el trabajo.
- Se ejecutará en coordinación con el grupo de mantenimiento predictivo (confiabilidad) de equipos rotativos, de manera que las mediciones eléctricas y de vibraciones sean simultaneas y consistentes para realizar diagnóstico.
- La estrategia preliminar que se sugiere es la siguiente: un electricista que realice pruebas en motores que están funcionando con el Explorer 3000. Adicionalmente se elaboraron rutas de trabajo.
- Solo incluye actividades ejecutadas por mantenimiento eléctrico.

5.8 Programación

En base a la PLANIFICACIÓN PRESCRITA, las tareas a realizar serán:

Mantenimiento de Motores		Mantenimiento Semanal (motores de alta criticidad) o Quincenal (motores de criticidad normal)
		MOTOR EN SERVICIO
	30 min	Solicitar el permiso de trabajo para equipos específicos según rutas de trabajos establecidas. Realizar el análisis riesgo.
	30 min	Realizar preparativos de equipos de pruebas, herramientas, procedimientos e implementos de seguridad. Trasladarse al sitio.
	15 min	Coordinar con el personal de confiabilidad para equipos rotativos.
	5 min	Realizar inspección visual y verificar lo siguiente: <ul style="list-style-type: none"> - Ausencia de ruido u olores anormales. - Luz roja encendida (en marcha). Las demás apagadas. - Relés Térmico y Diferencial sin condición de alarma.
	15 min	Conexión del equipo de medición y toma de parámetros.
	5 min	Guardar la información en la base de datos del equipo.
	20 min	Desconexión y notificación de trabajo realizado.

5.9 Control y Seguimiento

Este control será llevado por el departamento de Electricidad bajo la supervisión de la unidad de operaciones y mantenimiento, el cual podrá estadísticamente comprobar lo satisfactorio del programa en base a las reducciones de las interrupciones de los equipos comparándola con años pasados.

CONCLUSIONES

1. La implantación de este equipo en el programa de mantenimiento actual, permite evaluar la condición o comportamiento de los motores, llevando a tomar nuevas estrategias como es cambiar el plan de mantenimiento preventivo a predictivo y así evitar paradas no programadas y la reducción de costos generados por la contratación de la mano de obra especializada en mantenimiento en equipos rotativos.
2. Se logró colocar en funcionamiento el Explore 3000, quedando en operatividad para la supervisión en línea de los motores de baja tensión. La empresa continúa realizando estudios de confiabilidad del equipo para su implementación en el programa de mantenimiento actual.
3. De los 55 motores a los cuales se les realizaron toma de parámetros, 19 mostraron un alto índice de %THD, lo que indica que estos motores presentan distorsión armónica.
4. En general los motores se encuentran en buen estado, algunas alarmas de precaución pero, ningún valor que indique una falla. Por los momentos no requieren una acción sino mantenerse bajo supervisión.
5. Con la implementación del Explore 3000 en el programa de mantenimiento predictivo, se obtiene una visión más completa del funcionamiento y estado de la máquina, permitiendo detectar fallas incipientes y su evolución; a diagnosticar estas fallas; y a predecir cuánto tiempo podría funcionar continuamente la máquina en forma segura.

RECOMENDACIONES

1. Con la implantación del Equipo para realización del mantenimiento predictivo, se podría determinar un diagnóstico general que involucre tanto parámetros mecánicos como eléctricos, con la finalidad de poder predecir con exactitud las fallas que presentan los motores y programar su intervención de manera más adecuada.
2. El mantenimiento predictivo de los motores eléctricos de baja tensión, se debe ejecutar en coordinación con el grupo de mantenimiento predictivo (confiabilidad) de equipos rotativos, de manera que las mediciones eléctricas y de vibraciones sean simultáneas y consistentes para realizar diagnóstico.
3. El mantenimiento predictivo se debe realizar mediante una ruta de inspección para los motores, la cual se clasificó de acuerdo al alto grado de criticidad, es decir, para los motores más críticos la inspección es semanal y para los demás la inspección es quincenal o mensual.
4. Crear una base de datos histórica por máquina de todas las mediciones realizadas a cada una de estas. Esto permitirá hacer estudios del comportamiento del motor a través del tiempo y así predecir con exactitud las fallas y programar su intervención.
5. De aplicarse el programa de mantenimiento predictivo, se tendrán que ir ajustando los valores referenciales de cada uno de los parámetros a medir. Esto con la finalidad de ir ajustando el programa hacia su punto más óptimo de operación.

BIBLIOGRAFÍA

1. MATSCH, Leander. **“Máquinas Electromecánicas y Electromagnéticas”**. International Textbook Company. 1972.
2. FITZGERALD, A. & KINGSLEY, Jr. **“Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas”**. McGraw-Hill Book Company. 1982.
3. WEEDY, B.M. **“Análisis de Sistemas Eléctricos de Gran Potencia”**. Editorial Reverté. Inglaterra 1982.
4. COVA, J. JOHNSTON, H. **“Análisis Dinámico del Efecto del Arranque de Grandes Motores en el Sistema Eléctrico de la Refinería de Corpoven S.A.”** Trabajo de Grado. Universidad de Oriente. 1.987.
5. NASAR, Syed. **“Máquinas Eléctricas y Electromecánicas”**. Editorial Mac-Graw Hill. Madrid. 1987.
6. IEEE. **“Recommended practice for Industrial and Commercial Power System Analysis”**. Brown Book. IEEE. New York 1990.
7. NEMA, National Electrical Manufactures Asociation. **“Motor and Generator”**. MG-1. 1993.
8. STEVENSON, William. **“Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia”**. Editorial Mc-Graw Hill. México. 1995.

9. IEEE. **“Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants”**. Standard 141. 1996.
10. ALLER CASTRO, José. **“Introducción a la Teoría General de las Máquinas Rotativas”**. Universidad Simón Bolívar. 1997.
11. HARPER, Enrique. **“Protección de Instalaciones Eléctricas Industriales y Comerciales”**. Editorial Limusa. Año 1999.
12. NFPA. **“Recommended Practice for Electrical Equipment Maintenance”**. NFPA. Minneapolis. 2002.
13. HIDALGO, J. **“Análisis de las zonas de falla de Motores Eléctricos”**. San José de Costa Rica. Año 2002.
14. FRILE MORA, Jesús. **“Máquinas Eléctricas”**. Editorial Mac Graw-Hill/Interamericana. Madrid 2003.
15. ROCHA, J. **“Elaborar Planes de Mantenimiento Basados en la Condición de Funcionamiento de los Equipos Eléctricos del Área de Hidroproceso de la refinería Puerto la Cruz PDVSA”**. Tesis de Grado, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Departamento de Electricidad, Universidad de Oriente. 2005.
16. PÉREZ, A. **“Desarrollo de un Programa de Mantenimiento Centrado en la confiabilidad para Subestaciones del Patio de Distribución de Gurí”**. Tesis de Grado, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Departamento de Electricidad, Universidad de Oriente. 2005.

17. **“USERS MANUAL EXP3000/EXP3000R”**. Baker Instrument Corporation.
2008.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

1. **Switchgear Metalclad:** Es un tablero de distribución de fácil intervención de mantenimiento, mayor seguridad y mayor vida operativa estructural de celdas tipo metal-clad que constituyen un innovador diseño modular atornillado. Su flexible ingeniería, derivada del diseño modular, permite la adaptación de las celdas a los requerimientos del cliente en varias configuraciones y opciones.
2. **PLC:** Controlador de lógica programable, controla la lógica de funcionamiento de máquinas, plantas y procesos industriales y también realizan operaciones aritméticas para manejar señales analógicas para realizar estrategias de control.
3. **Bypass:** Es un contacto para arranque directo en caso de falla del variador (una camino alternativo), con su respectivo circuito de medición y protección.
4. **CD:** Corriente directa.
5. **ANSI:** Instituto Nacional Americano de Estándares, es una organización privada sin fines de lucro, que permite la estandarización de productos, servicios, procesos, sistemas y personal en Estados Unidos.
6. **R.P.M:** Revoluciones por minuto es una unidad de frecuencia, usada frecuentemente para medir la velocidad angular. En este contexto, una revolución es una vuelta de una rueda, un eje, un disco o cualquier cosa que gire sobre su propio eje.

- 7. Drives de VFD:** Es un sistema para controlar la velocidad de rotación de una corriente alterna (motores AC) mediante el control de la frecuencia de la energía eléctrica suministrada al motor.
- 8. Soft-foot:** Pata coja es una condición en la que uno de los pies no se sientan apoyados en la base. El pie o la base pueden haber sido deformado.
- 9. VFD:** Es un dispositivo o conjunto de dispositivos mecánicos, hidráulicos, eléctricos o electrónicos empleados para controlar la velocidad giratoria de maquinaria, especialmente de motores.
- 10. NEMA:** Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos, este organismo es el responsable de numerosos estándares industriales comunes usados en el campo de la electricidad.
- 11. IEEE:** Instituto de Ingenieros Electricistas y Electrónicos, una asociación técnico-profesional mundial dedicada a la estandarización, entre otras cosas. Es la mayor asociación internacional sin fines de lucro formada por profesionales de las nuevas tecnologías, como ingenieros electricistas, ingenieros en electrónica, científicos de la computación, ingenieros en informática, ingenieros en biomédica, ingenieros en telecomunicación e Ingenieros en Mecatrónica.
- 12. RMS:** Valor cuadrático medio de una corriente variable se le denomina valor eficaz y se define como el valor de una corriente rigurosamente constante (corriente continua) que al circular por una determinada resistencia óhmica pura produce los mismos efectos caloríficos (igual potencia disipada) que dicha corriente variable (corriente alterna).

13. Compuertas IGBT: Transistores bipolares de compuerta aislada o IGBT, capaces de soportar altos niveles de corrientes y voltajes. Este amplio rango de potencia de operación, permite cubrir un rango bastante amplio de aplicaciones dentro de la electrónica de potencia, como manejadores de medio voltaje, control de motores, aplicaciones de alto voltaje y fuentes de poder.

14. Riple: Es una oscilación de los niveles de tensión de la misma.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

TÍTULO	“Implementación de un Programa de Mantenimiento Predictivo Para los Motores Eléctricos en Baja Tensión en la Planta Supermetanol Empleando el Equipo para Supervisión en Línea Explore 3000”
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Mancilla A, Karina V.	CVLAC: 18.407.110 E MAIL: k-mancilla@hotmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALABRAS O FRASES CLAVES:

Programa de Mantenimiento Predictivo

Supervisión en Línea

Motores Eléctricos

Supermetanol

Explore 3000

Baja Tensión

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

ÁREA	SUB ÁREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Eléctrica

RESUMEN (ABSTRACT):

El motor de inducción, especialmente el tipo jaula de ardilla, es la máquina eléctrica más utilizada a nivel industrial debido a las ventajas que presenta sobre los demás, como son: bajo costo, alta confiabilidad, robustez, capacidad de trabajar en ambientes sucios y explosivos, por esta razón, el mantenimiento de equipos e instalaciones industriales ha cobrado una gran importancia en las últimas décadas debido a que las exigencias de calidad de la producción son cada vez mayores y al hecho de que las empresas necesitan ser más competitivas en el ámbito del comercio nacional como internacional. El desarrollo de nuevas estrategias de monitoreo con los equipos en funcionamiento es vital en el sector industrial debido a que es posible evitar el paro de la producción o incurrir en gastos innecesarios de mantenimiento. Es por eso que la empresa Supermetanol C.A, ha decidido realizar el estudio del equipo para supervisión en línea Explore 3000 y establecer rutas de mantenimiento predictivo a través de un programa a seguir, para que este sea asociado al programa de mantenimiento preventivo actual.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Parraguez, Luís	ROL	CA	AS	TU X	JU
	CVLAC:	23.734.609			
	E_MAIL	lparraguez@gmail.com			
	E_MAIL				
Natera, Lenin	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	15.036.331			
	E_MAIL				
	E_MAIL				
Escalante, Santiago	ROL	CA	AS	TU	JU X
	CVLAC:	3.198.012			
	E_MAIL	santiago.escalante@gmail.com			
	E_MAIL				
Medina, Kleiner	ROL	CA	AS X	TU	JU
	CVLAC:	13.611.223			
	E_MAIL	Kmedina@yahoo.com			
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

AÑO	MES	DÍA
2010	04	13

LENGUAJE: SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
TESIS.ProgramaDeMantenimientoPredictivo.doc	Aplicación/msword

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I
J K L M N O P Q R S T U V W X Y Z. a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y
z. 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9.

ALCANCE

ESPACIAL: Supermetanol C.A/Dpto de Mantenimiento Eléctrico (OPCIONAL)

TEMPORAL: Diez (10) meses (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Electricista

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Electricidad

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente/Núcleo de Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

DERECHOS

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de trabajo de grado:

“Los trabajos de grado son de exclusiva propiedad de la Universidad y solo podrán ser utilizados para otros fines con el consentimiento del Consejo de Núcleo respectivo, el cual lo participará al Consejo Universitario”.

Mancilla A, Karina V.

AUTOR

Parraguez Luís

TUTOR

Natera, Lenin

JURADO

Escalante, Santiago

JURADO

Mercado, Verena

POR LA SUBCOMISIÓN DE TESIS