

Mantenimiento Predictivo para Motores Eléctricos

Ing. William Murillo



Objetivos del curso

- Falla en motores Históricos
- Principio de funcionamiento del motor.
- Tipos de pruebas desarrolladas.
- Clases de equipos.
- Tipos de reportes.
- Caso histórico.

Falla motor en planta petrolera



Descripción: Falla de motor 5500 HP 13.8 kv. Por falla a tierra y disparo por diferencial.

Impacto Confiabilidad: el motor impacto en la inyección de agua, en la confiabilidad del sistema de inyección y los costos de reparación en Aprox \$US 500.000

RCFA: Deterioro del aislamiento por acumulación de arranques, motor desbalanceado mecánicamente, alta humedad dentro del motor por falta de Shelter.

Acción Correctiva: reparación de motor, los devanados fueron contruidos en México.



Falla de motor chumaceras



- **Descripción:** Falla de motor 1500 HP 4.16 kv. Por alta temperatura en rodamientos.

- **Impacto Confiabilidad:** el motor impacto en la inyección de 10.000 bpd de agua, costo de la reparación de \$COL 89 millones.

- **RCFA:** Daño de sellos de laberinto que producen que el eje rose con el estator ocasionando daño en el aislamiento.

- **Acción Correctiva:** reparación de motor.



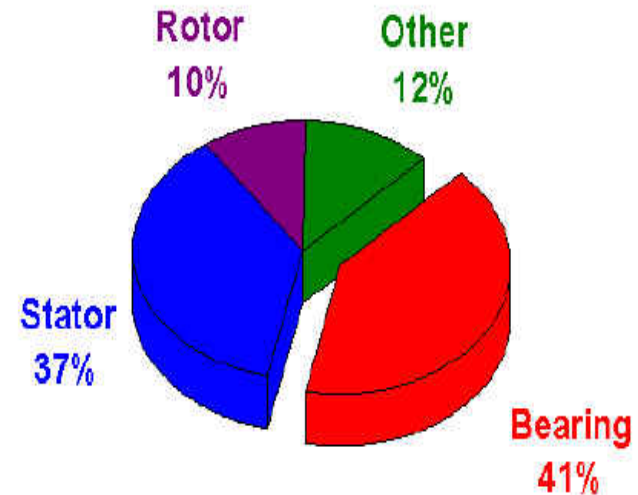
Falla motor por humedad



- **Descripción:** Falla de motor 15 HP 480 v kv. Por bajo aislamiento a tierra de 0.3 Mohn, se encontró abundante agua. Motor tipo Clase 1 Grupo D EX.
- **Impacto Confiabilidad:** el motor impacto en el enfriamiento de aire y su respectiva reparación por falla del aislamiento.
- **RCFA:** Se encontró que el ingreso de agua fue por la tapa de conexionado eléctrico, que durante un MP no se colocó el sello de esta tapa.
- **Acción Correctiva:** se reparó el motor y adicionalmente, se colocó el empaque a la tapa del conexionado y se aplicó grasa al acople entre escudo y carcasa del motor.

Estudio de fallas en motores eléctricos

Estudio realizado entre la Eléctrica Power Research Institute (EPRI) y General Electric en 1985. El propósito de este estudio fue mostrar las verdaderas fuentes de falla de los motores eléctricos



Estamos diagnosticando todas las zonas posibles fallas de un motor (Calidad potencia, aislamiento, estator, rotor, entrehierro y calidad de energía?)

Respuesta: Ni las vibraciones, Ni el ohmímetro, Ni el Megger logran revisar todas zonas de falla de un motor, entonces la tecnología predictiva que esta aplicando a su planta es suficiente para evaluar todos los componentes que pueden causar la falla de un motor?

Principios de los motores eléctricos



El Motor Eléctrico

- El motor eléctrico es un dispositivo simple, convierte energía eléctrica en energía mecánica.
- De acuerdo al estándar ANSI C50 lo define como una “maquina eléctrica rotatoria”
- La norma NEMA MG1 establece los estándares para la manufactura de los motores y generadores.

Partes del motor de CA

Un motor de CA tiene dos partes eléctricas básicas: un "estator" y un "rotor", como se muestra en la Figura 1.

El estator es el componente eléctrico estático. Consiste en un grupo de electroimanes individuales dispuestos de una manera tal que formen un cilindro hueco, con un polo de cada cara de los imanes hacia el centro del grupo.

El término, "estator" se deriva de la palabra estática.

El rotor es el componente eléctrico rotativo, el cual consiste en un grupo de electroimanes dispuestos alrededor de un cilindro, con los polos haciendo frente hacia los polos del estator.

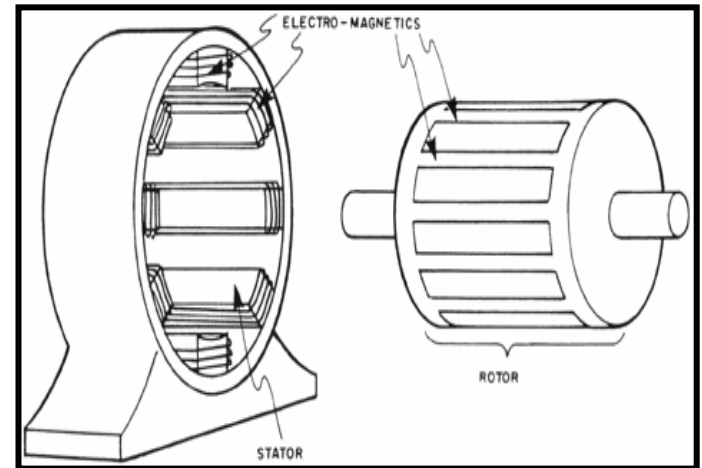


Figura 1. Componentes eléctricos básicos de un motor de CA



Partes de los motores

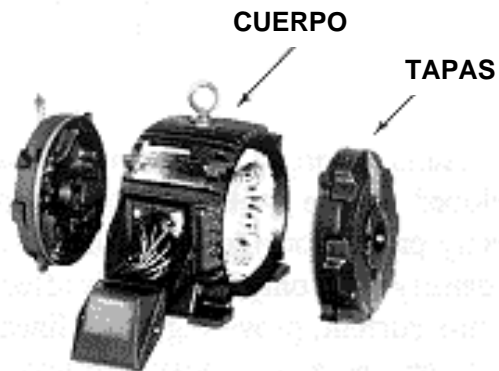


FIGURA 2.1. Componentes del Motor de CA

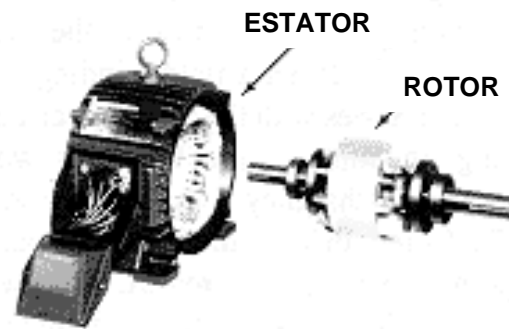


FIGURA 2.2. Componentes del Motor de CA

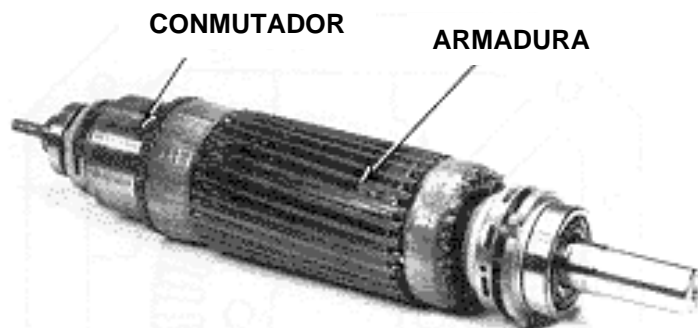


FIGURA 2.3. Componentes del Motor de CD

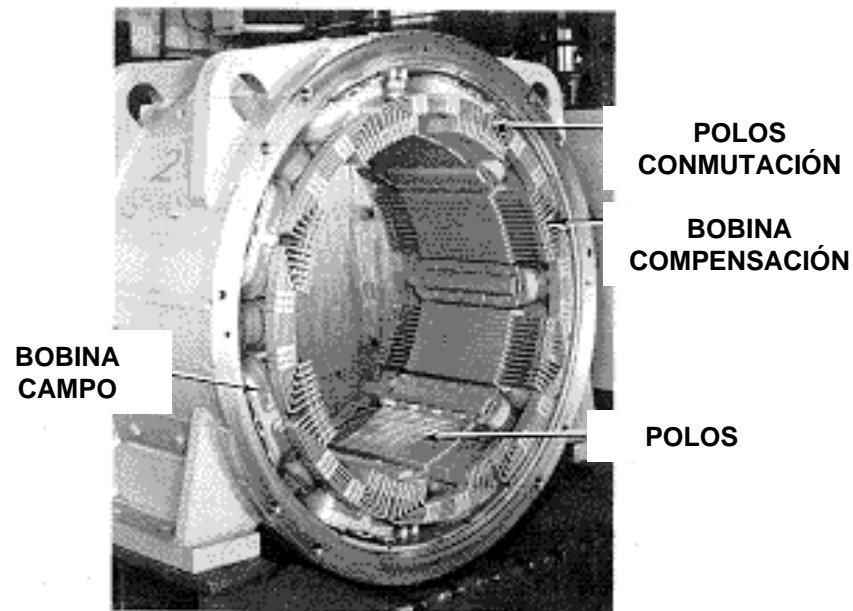


FIGURA 2.4. Componentes del Motor de CD

Operación básica del motor de CA

Para producir un campo magnético que rota en el estator de un motor de CA trifásico, se necesita que las bobinas del estator estén correctamente conectadas a la fuente de alimentación de corriente AC.

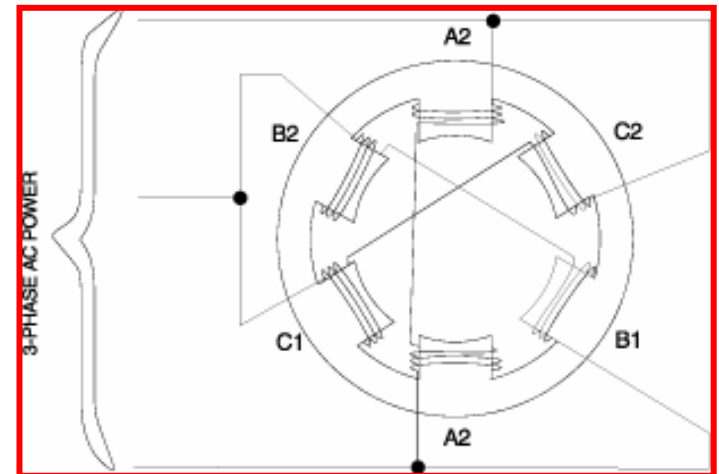
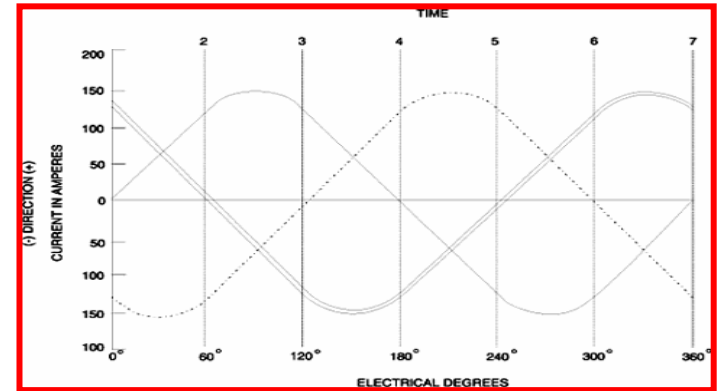


Figura 3. Método para conectar energía trifásica con un estator de seis polos.

Operación básica del motor de CA

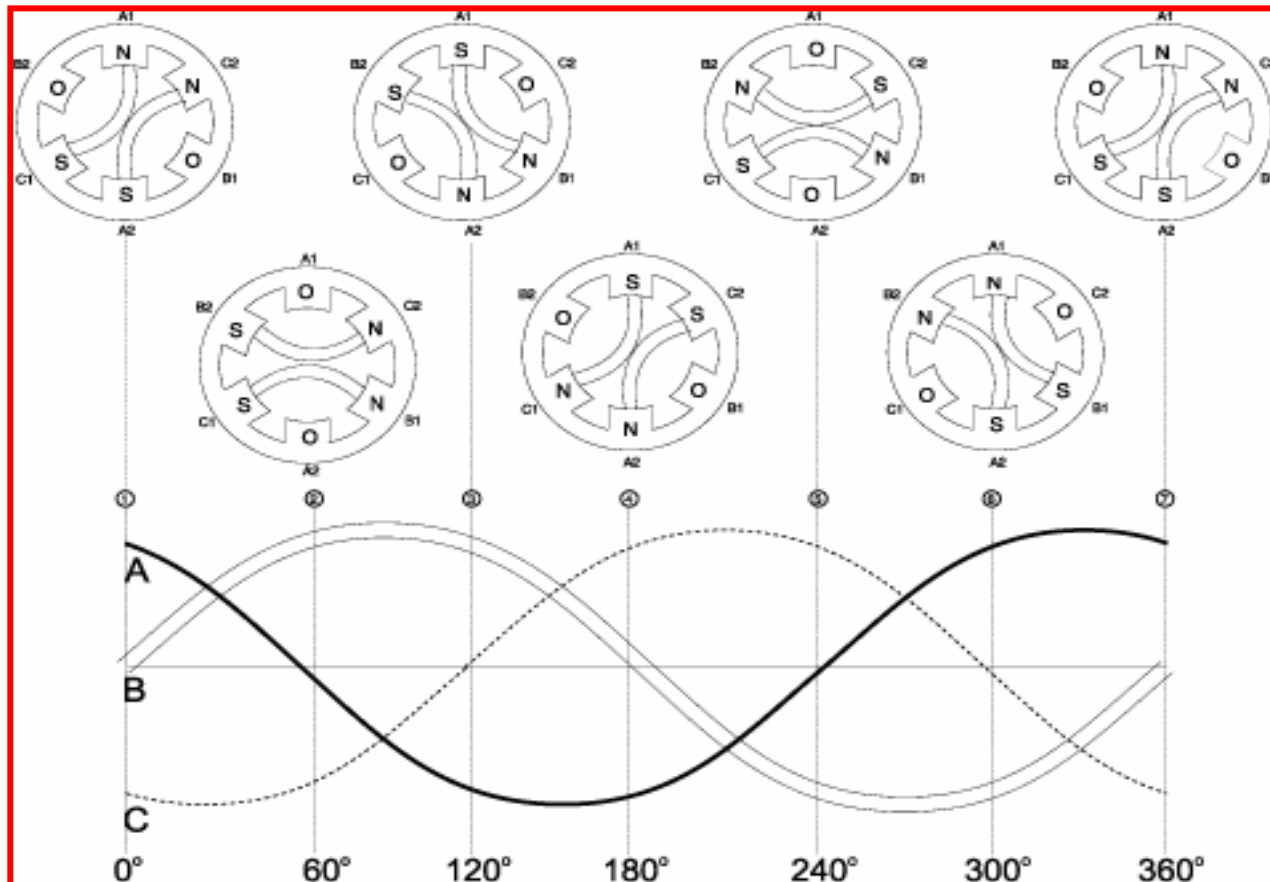


Figura 4. Cómo la energía trifásica produce un campo magnético que rota

Operación básica del motor de CA

- En la Figura 5 se muestra como van rotando los campos magnéticos del estator. De acuerdo con la figura, el estator tiene seis polos magnéticos y el rotor tiene dos polos.
- En el TIME 1, los polos A-1 del estator y el C-2 son polos Norte y los polos opuestos, A-2 y C-1, son los polos sur. El polo S del rotor es atraído por los dos polos N del estator y el polo N del rotor es atraído por los dos polos del sur del estator.

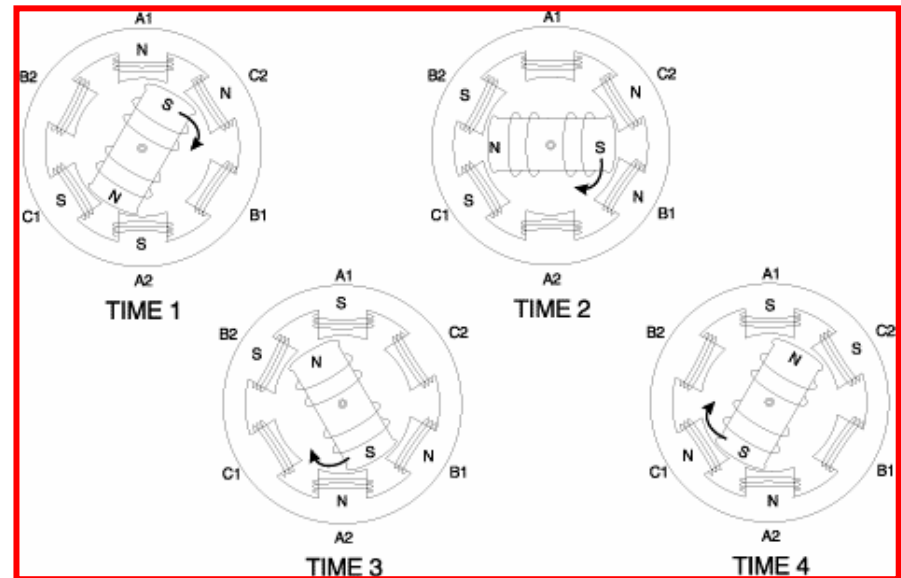


Figura 5. Rotación del campo magnético de un motor de CA.

Operación básica del motor de CA

- En el TIME 2, la polaridad de los postes del estator se cambia de modo que ahora el C-2 y B-1 son los polos N y C-1 y B-2 son los polos S.
- Entonces el rotor se ve forzado a rotar 60 grados para alinearse con los polos del estator según lo demostrado en la figura.
- En el TIME 3, B-1 y A-2 son los polos N.
- En el TIME 4, A-2 y C-1 son los polos N. Mientras que se realiza cada cambio, los polos del rotor son atraídos por los polos opuestos en el estator. Así, como el campo magnético del estator rota, el rotor se ve forzado a rotar con él.

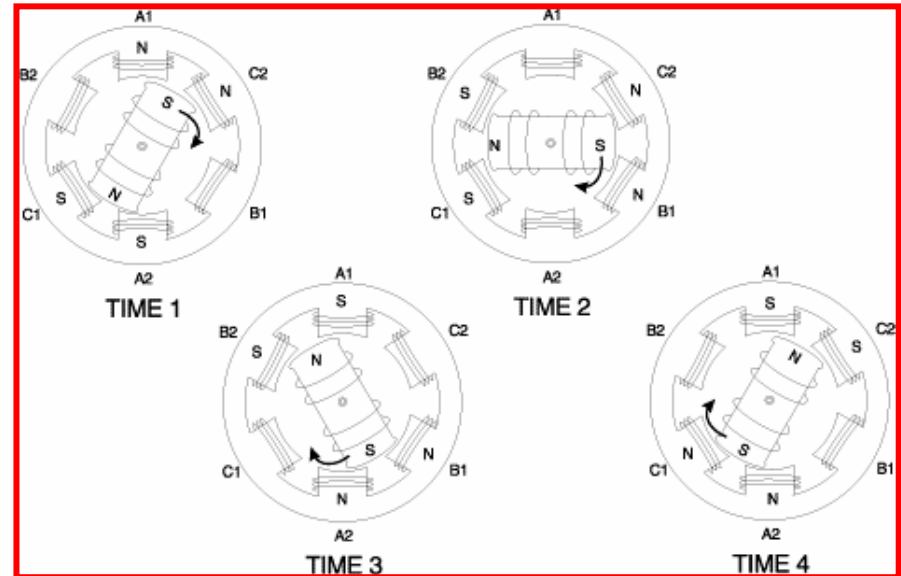


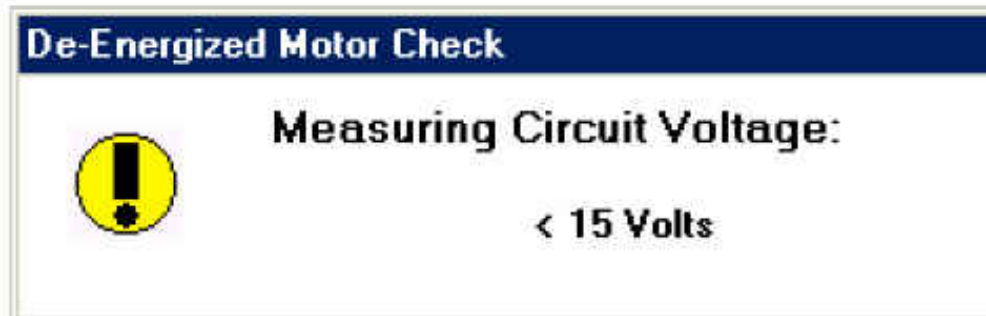
Figura 5. Rotación del campo magnético de un motor de CA.

Tipos de pruebas predictivas en motores eléctricos



Estándar IEEE 43-2000

- El estándar IEEE 43-2000 explica la forma de realizar la evaluación eléctrica de motores (Motor Circuit Evaluation MCE).
- La IEEE 43-2000 establece que para realizar una prueba el voltaje en los terminales del motor debe ser menor a 15 V entre línea y tierra

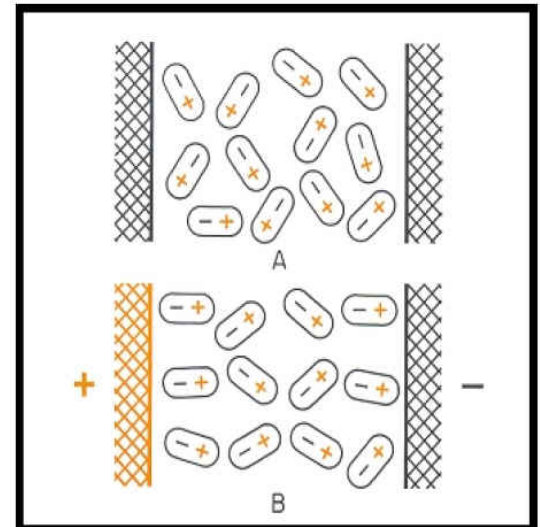


Definiciones

Resistencia de aislamiento: Es la aplicación de un voltaje DC a través de un aislamiento.

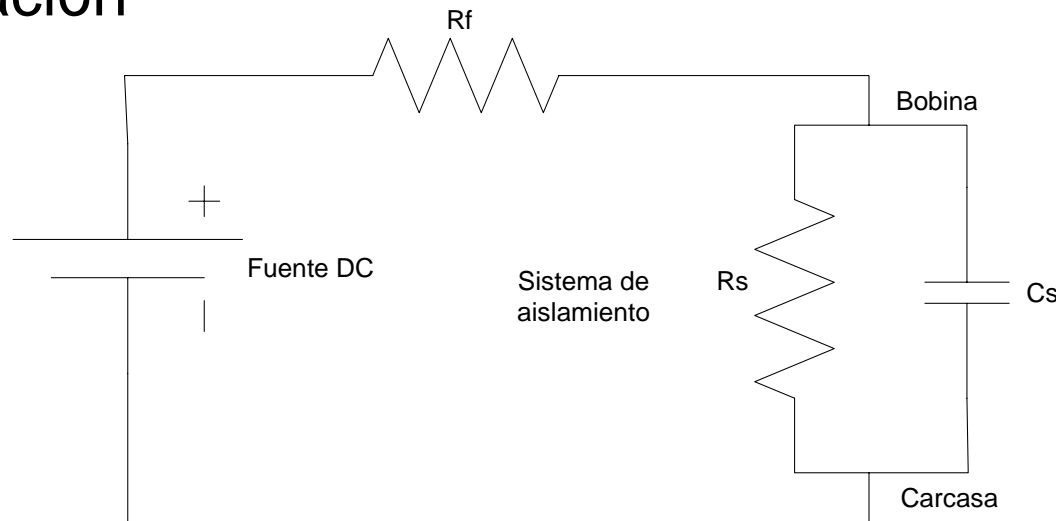
Corriente capacitancia: es la medición de la corriente de descarga debida a la geometría de la capacitancia. Se realiza con AC a alta frecuencia.

Corriente de absorción: es la corriente requerida para reorientar la polarización de las moléculas (epoxico, poliéster, etc) cuando se presentan una DC.



Resistencia de aislamiento

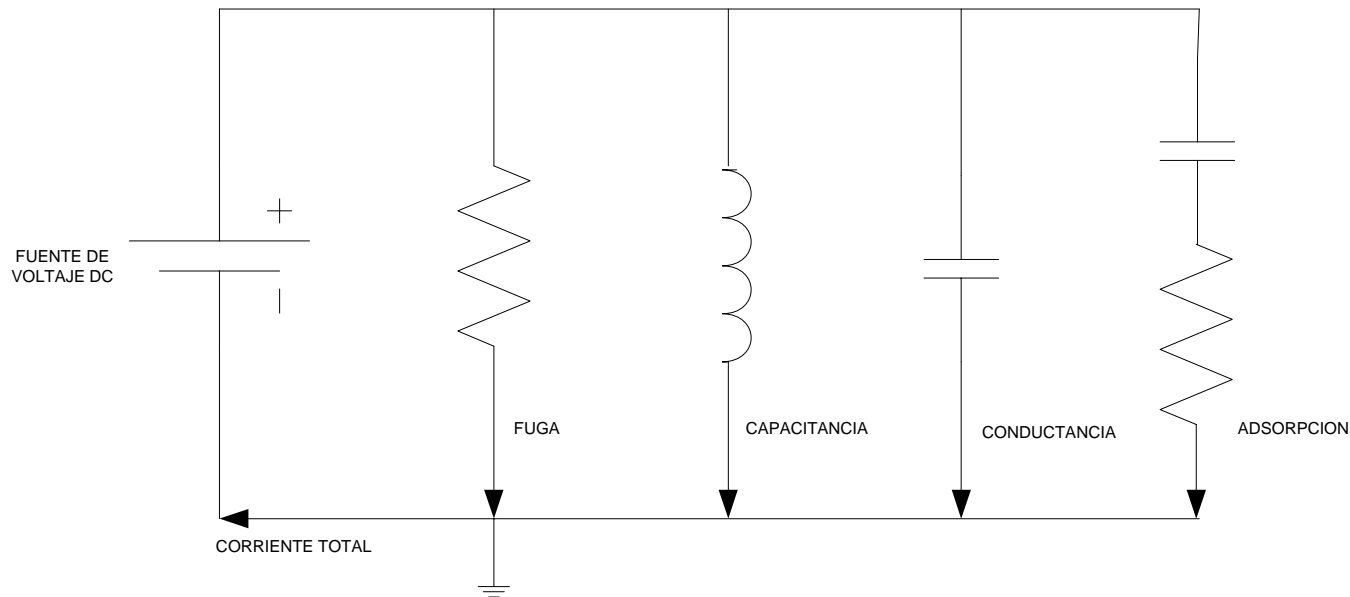
- La resistencia de aislamiento medible sobre un material dieléctrico es el resultado de la combinación de la resistencia volumétrica del cuerpo, en paralelo con la resistencia superficial del mismo.
- R_f depende del material, temperatura y la R_s con C_s son exclusivos de factores externos como humedad, contaminación



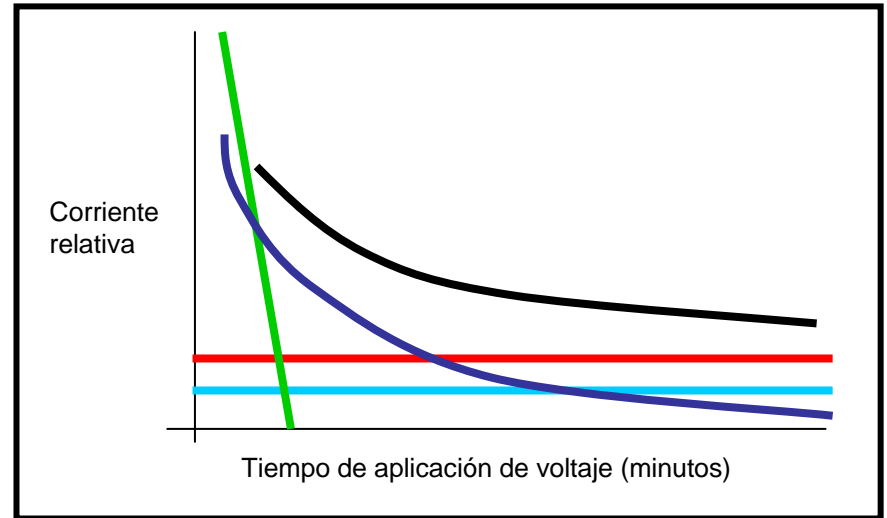
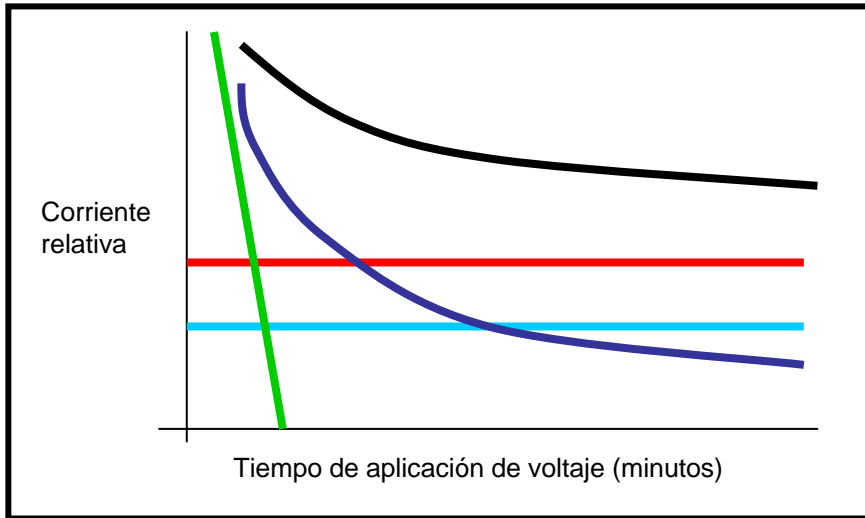
Circuito equivalente para un motor eléctrico bajo prueba en DC

Pruebas MCE

El MCE mide todas las corrientes, llamadas corriente total y calcula los valores de resistencia a tierra.



Efecto de la corriente Total en los devanados



- Total corriente
- I absorción
- I capacitancia
- I de fuga.
- I conductancia

Resistencia de aislamiento o total de corriente en aislamiento contaminados y con humedad.

En devanados limpios o secos la corriente total decrecimiento con el tiempo. Como resultado la corriente total disminuye y la resistencia a tierra aumenta.

Guía de aplicación de voltaje durante una prueba de aislamiento de resistencia.

- La cantidad de voltaje aplicado esta de acuerdo al voltaje de placa.
- En pruebas con alto voltaje el aislamiento puede sufrir sobre tensión de falla.
- Los equipos de prueba deben de tener corriente muy pequeñas entre 1 miliamperio o 1000 microamps.

Guidelines for DC Voltages to be Applied During Insulation Resistance Test

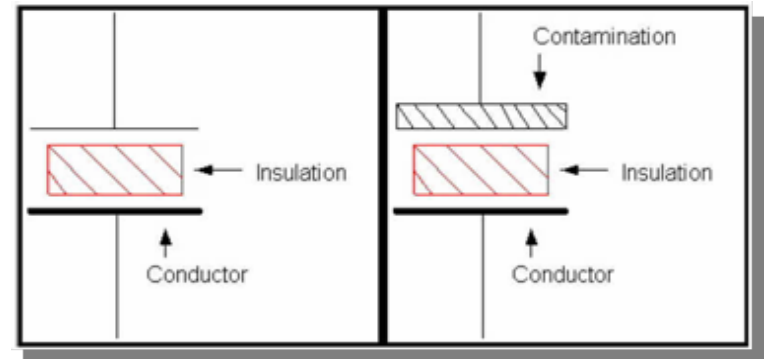
| Winding rated voltage (v) | Insulation resistance test direct voltage |
|---------------------------|---|
| < 1000 | 500 |
| 1000 – 2500 | 500 – 1000 |
| 2501 – 5000 | 1000 – 2500 |
| 5001 – 12,000 | 2500 – 5000 |
| > 12,000 | 5000 – 10,000 |

Ref. IEEE Std. 43-2000

[^] Rated line-to-line voltage for 3 phase ac machines, line-to-ground voltage for 1-phase machines, and rated direct voltage for dc machines or field windings.

Efecto de la contaminación en un motor

- La corriente de fuga depende de materiales extraños como es el aceite y depósitos de carbón sobre la superficie del devanado.
- Las sales produce fugas de corriente, que en devanados secos no son conductores, pero es parcialmente conductora cuando esta expuesta en humedad o aceite.
- Las razones del incremento de la capacitancia en un motor por la contaminación es porque trabaja como un capacitor

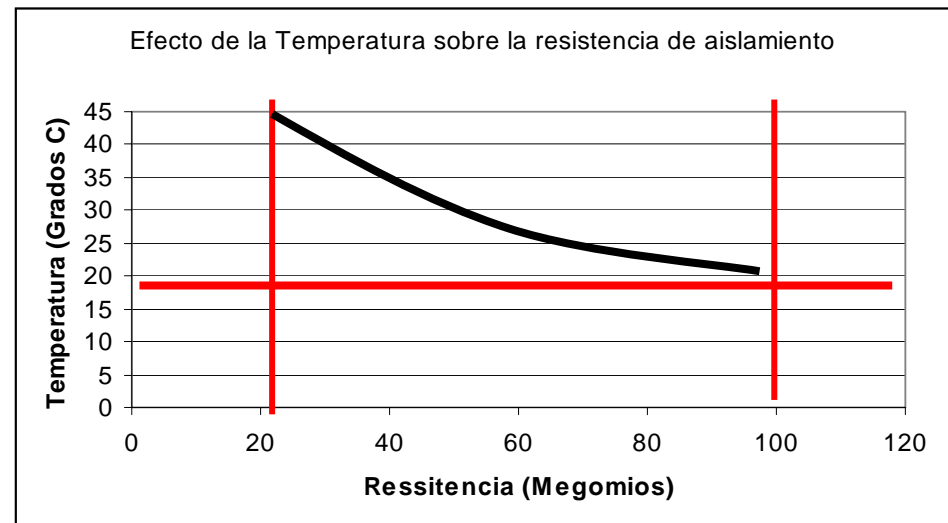


Efecto de la temperatura en el Aislamiento

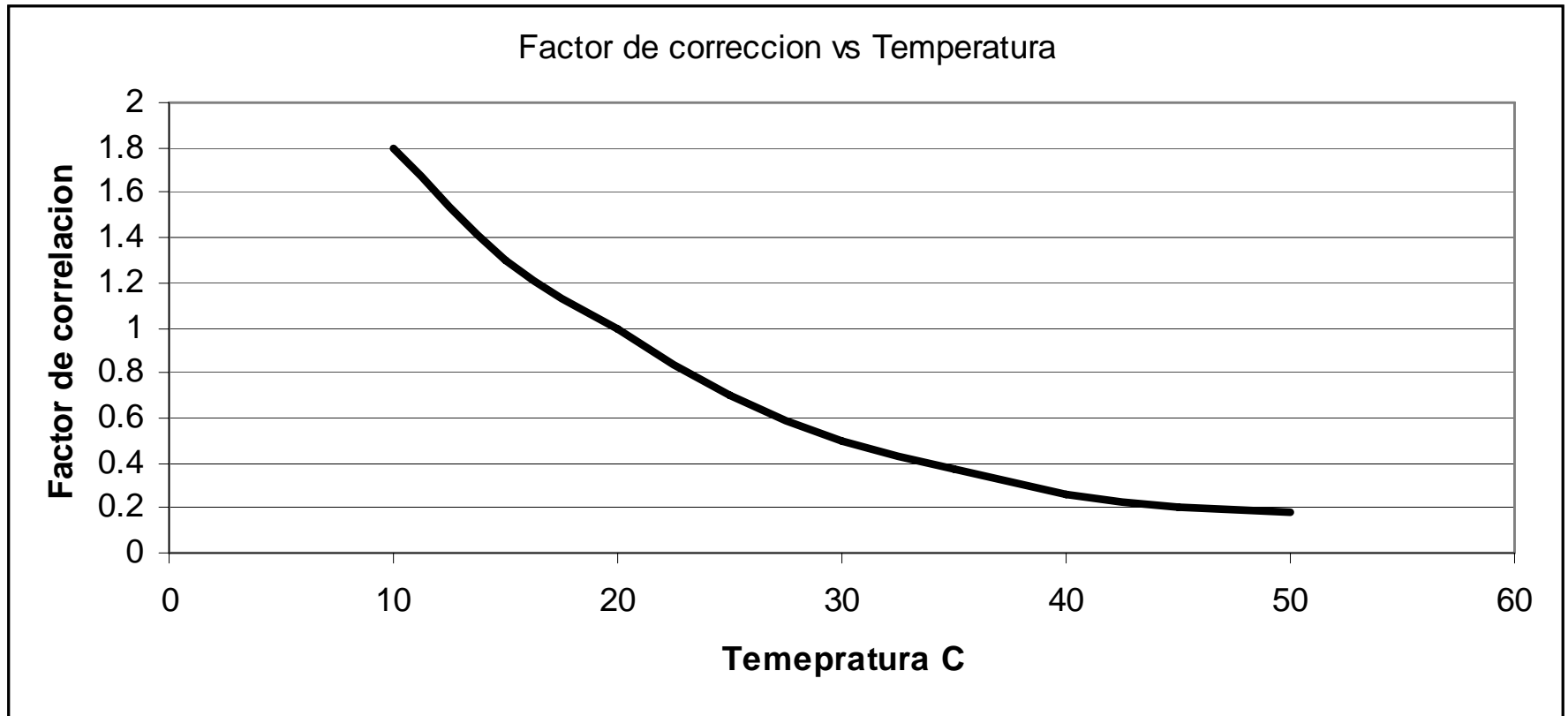
- En los materiales aislados (coeficiente negativo Kt) la resistencia es inversamente proporcional con respecto a la temperatura.
- IEEE ha desarrollado para las pruebas estándar de aislamiento el valor de temperatura en los devanados debe ser ajustado a 40 °C para mediciones en Mohm.
- Para otros tipos de temperatura se debe realizar una correlación de temperatura, de otro modo se tendrían valores con variaciones altas y bajas.

Regla de oro:

Un motor decreta su vida en un 50% por cada 10 °C de incremento de la temperatura de operación por encima de su diseño de aislamiento para el sistema.



Factores de corrección vs temperatura



Por que realizar pruebas en motores?

- **Seguridad en la Calidad** de las pruebas para nuevos equipos o motores operativos (prueba de línea base).
- **Tendencia** de la condición del motor entre periodos establecidos.
- **Diagnostico** de pruebas para evaluar y diagnosticar el estado o condición de falla de su circuito

Tipos de pruebas

MOTORES AC

- Pruebas estándares AC.
- Absorción Dieléctrica.
- Índice de Polarización.
- Pruebas del Rotor.

MOTORES DC

- Pruebas estándares DC
- Absorción Dieléctrica.
- Índice de Polarización.
- Prueba Conmutador barra a barra.

Pruebas Estándares

- **Medición Resistencia a Tierra.**
Indica la condición de aislamiento con respecto a tierra.
- **Capacitancia a tierra.**
Condición adicional de aislamiento
- **Resistencia Fase a Fase**
Indica puntos calientes con conexiones de alta resistencia
- **Inductancia Fase a Fase.**
Indica en el estator por defectos de excentricidad en rotor

Prueba Resistencia A Tierra RAT

- Indica la limpieza y la salud del sistema de aislamiento.
- Una baja RAT indica que el motor requiere ser limpiado.
- Si la acción no es tomada, el aislamiento puede fallar y devanados dañaren.
- IEEE y NFPA 70B establece que el mínimo valor de aislamiento R_m , corregido a 40 °C, es 1 megohm por 1000 voltios, mas 1 megohm

$$R_m = kV + 1$$

$$480 \text{ v } R_m = 1,48 \text{ megohms}$$

$$4160 \text{ v } R_m = 5,16 \text{ megohms}$$

Prueba Resistencia A Tierra RAT

- La prueba debe ser por un tiempo de 30 segundos.
- Un incremento $> 5\%$ de la línea base es para ***Precaución***.
- Un incremento $> 10\%$ de la línea base es para ***Alarma***.

Voltajes aplicados en RAT

Guidelines for DC Voltages to be Applied During Insulation Resistance Test

| Winding rated voltage (v) | Insulation resistance test direct voltage |
|---------------------------|---|
| < 1000 | 500 |
| 1000 – 2500 | 500 – 1000 |
| 2501 – 5000 | 1000 – 2500 |
| 5001 – 12,000 | 2500 – 5000 |
| > 12,000 | 5000 – 10,000 |

Ref. IEEE Std. 43-2000

[^] Rated line-to-line voltage for 3 phase ac machines, line-to-ground voltage for 1-phase machines, and rated direct voltage for dc machines or field windings.

Recommended Minimum Insulation Resistance Values at 40°C (All values in Mohm)

| | |
|------------------------|--|
| $IR_{1 \min} = kV + 1$ | For most windings made before about 1970, all field windings, and others not described below |
| $IR_{1 \min} = 100$ | For most DC armatures and AC windings built after 1970 (form wound coils) |
| $IR_{1 \min} = 5$ | For most machines with random wound stator coils and form wound coils rated below 1kV |

Prueba Resistencia Fase a Fase

- Pequeños desbalances de resistencia producen altos desbalances de voltaje.
- Un desbalance del 1% en voltaje resulta en un 7% de corriente de desbalance.
- El 3.5% de voltaje de desbalance, resulta en un 25% en un incremento de de la temperatura del devanado (EPRI).
- El nivel de **Precaución** esta en un 5% +- de cambio de la línea base.
- Un nivel de **Alarma** esta en un 10% +- del cambio de la línea base.

Prueba Estándar Capacitiva

- Esta prueba indica la limpieza de los devanados y cables
- Cuando la Capacitancia incrementa la Resistencia disminuye.
- Una alta capacitancia indica que el motor necesita ser limpiado y causa incremento de la temperatura.
- Un incremento del 100% sobre la línea base indica ***Precaución.***
- Un incremento del 200% sobre línea base indica ***Alarma***

Prueba estándar inductancia Fase a Fase.

- Indica la condición de las bobinas del estator.
- Detecta corrientes de fuga fase-fase y bobina-bobina.
- Detecta pérdida de barras en el rotor.
- El nivel de **Precaución** se tiene en un 5% +- de variación sobre la línea base.
- Nivel de **Alarma** para un 10% +-

Resumen tabla interpretación

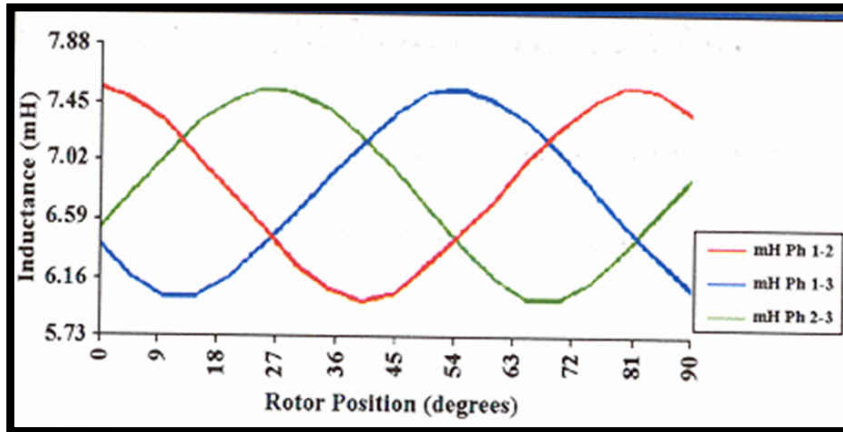
| TABLA DE INTERPRETACION | | |
|---|--------------------------|----------------|
| Test | Medicion | Condicion |
| Reistencia a Tierra RTG | OVR | Falla en Test |
| | Alta | Buena |
| | Menor de 100 Mohm | Precaucion |
| | Menor de 2 Mohm | Severo |
| Capacitancia a Tierra CTG | Zero | Falla en Test |
| | Baja y subiendo | Obsevacion |
| | Subiendo | Precaucion |
| | Subiendo a escala limite | Limpiar tierra |
| Desbalance Resistivo (Motores menores de 600V) | Menor de 2 % | Bueno |
| | Menor de 3 % | Precaucion |
| | Entre 3-5 % | Severo |
| Desbalance Inductivo (Motores menores de 600V) | Menor de 8% | Bueno |
| | Entre 8-12% | Precaucion |
| | Entre 12 -15 % | Severo |

| TABLA DE INTERPRETACION | | |
|---------------------------|------------|------------------------|
| Test | Condicion | Cambios desde Baseline |
| Reistencia a Tierra RTG | Precaucion | debajo de 5% |
| | Alarma | Debajo de 10% |
| Capacitancia a Tierra CTG | Precaucion | Subiendo mas de 100% |
| | Alarma | Subiendo mas de 200% |
| Desbalance Resistivo | Precaucion | debajo de 5% |
| | Alarma | Debajo de 10% |
| Desbalance Inductivo | Precaucion | debajo de 5% |
| | Alarma | Debajo de 10% |
| Indice de Polarizacion | Precaucion | Debajo de 2 |
| | Alarma | Debajo de 1 |

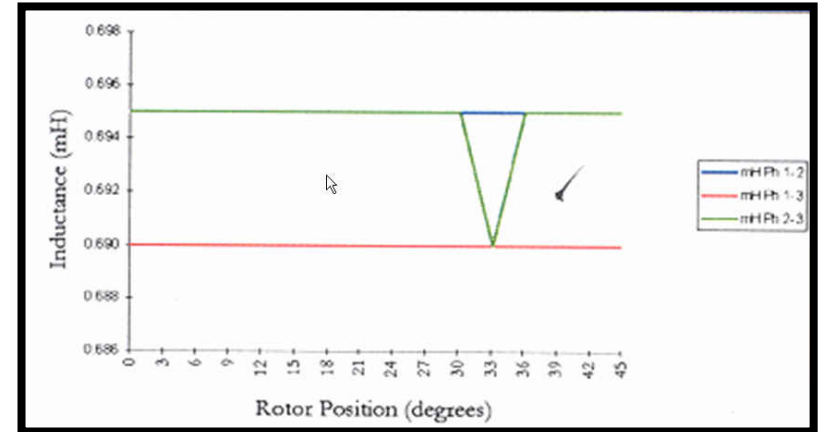
Chequeo influencia del rotor

- Mide la inductancia en el estator por rotación en diferentes posiciones del rotor.
- La rotación es motor 2 polos incrementos de 10 grados y 4 polos cada 5 grados.
- Analiza problema del rotor, excentricidad, alineamiento, defecto magnético, barras rotas y proceso de manufactura.

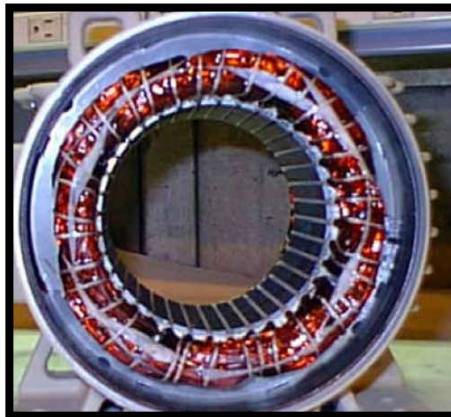
Graficas RIC



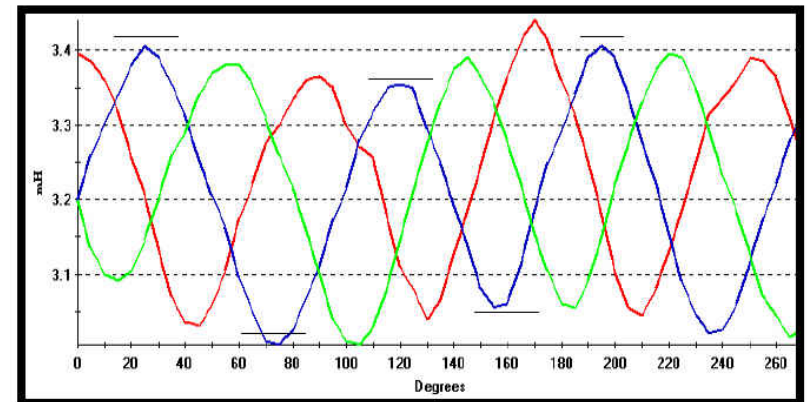
Rotor en Buen Estado



Rotor con falla, baja influencia



Rotor con falla excentricidad



Rotor falla excentricidad mas severa

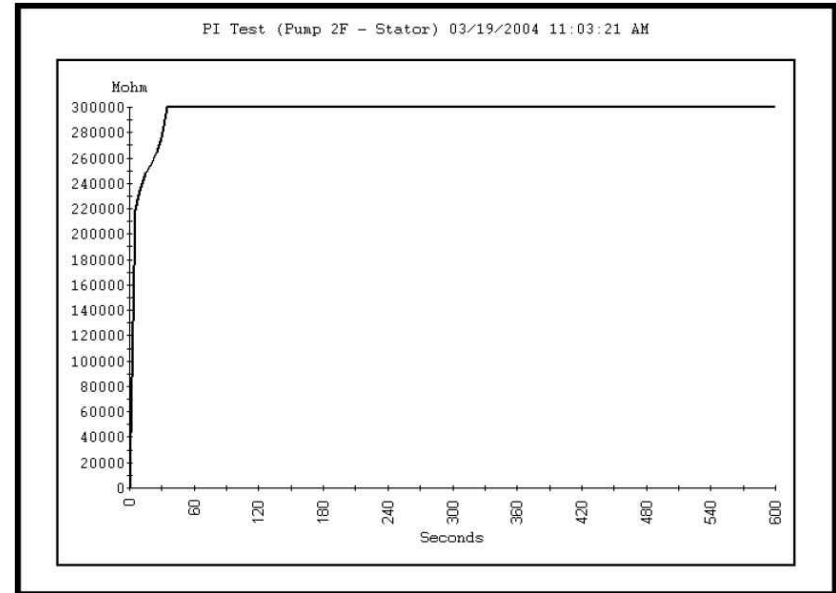
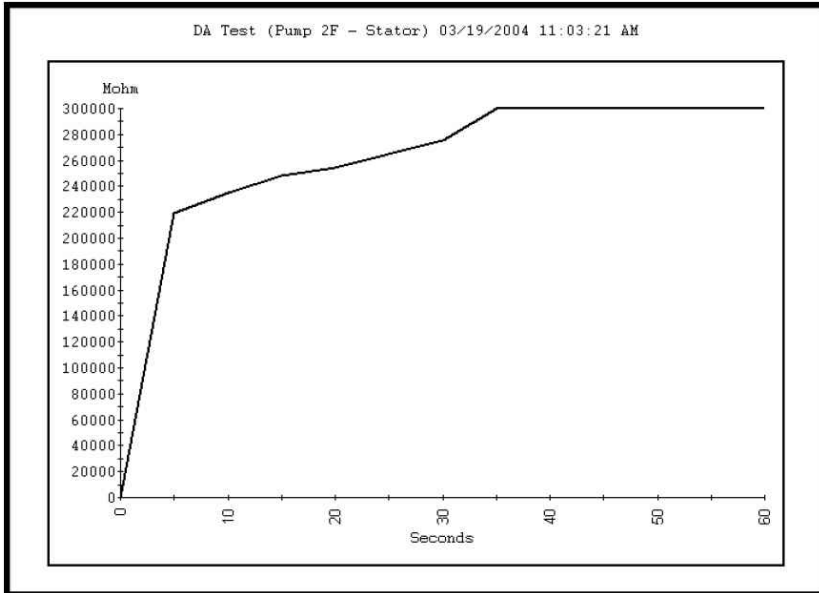
Prueba Índice de polarización IP e Índice de Absorción IA

- Indican el estado de asilamiento del devando de estator y circuito de potencia.
- IP es a 10 min / 1 min (mas preciso)
- IA es a 1 min / 30 seg.
- Las corrientes de Absorción, capacitancia y fuga afectan la prueba.
- El decremento del IP e IA es por acumulamiento de mugre, edad del aislamiento y humedad acumulada.

Prueba Índice de polarización IP e Índice de Absorción IA

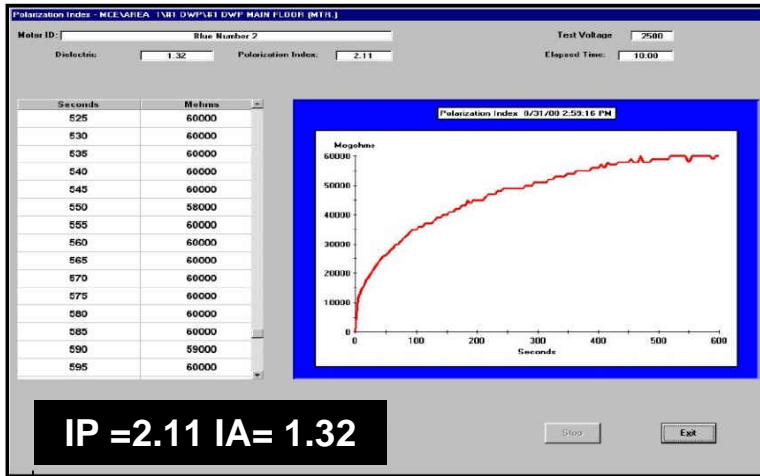
| Valor IA | Valor IP | Condición del motor | Acción recomendada |
|------------|------------|---------------------|--|
| > 1.5 | > 2.0 | Buena | Continuar monitoreo según programa |
| 1.25 – 1.5 | 1.25 – 1.5 | Observación | Monitoreo a mas frecuencia |
| 1.0 – 1.25 | 1.0 – 1.25 | Moderada | Aumenta nivel de peligro, Aislamiento motor o cable. Incrementar frecuencia monitoreo |
| < 1.0 | < 1.0 | Severa | Nivel de peligro Alto, limpieza de motor, lavado, secado. Limpieza acometida. |

Graficas IP y IA

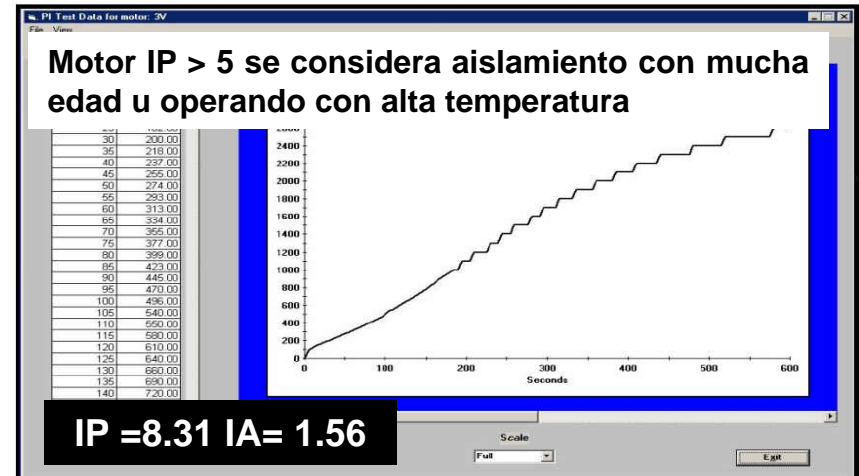


- Grafica de un buenos resultados en las pruebas IA e IP en un motor eléctrico.

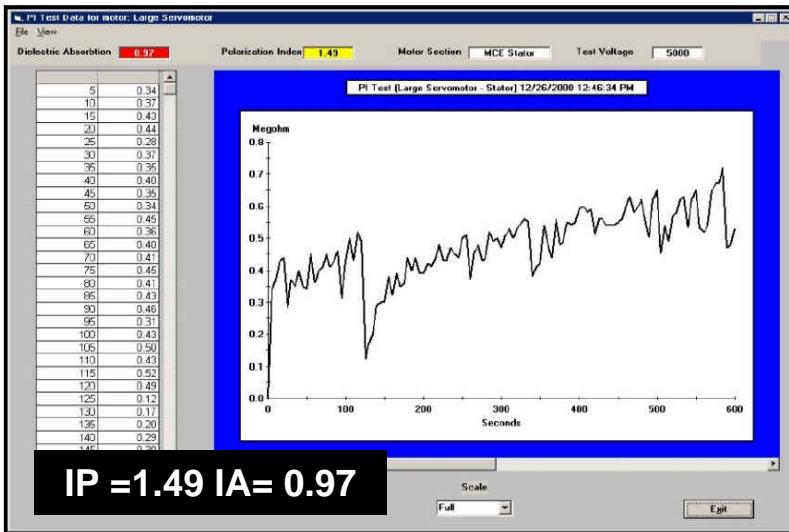
Graficas IP y IA



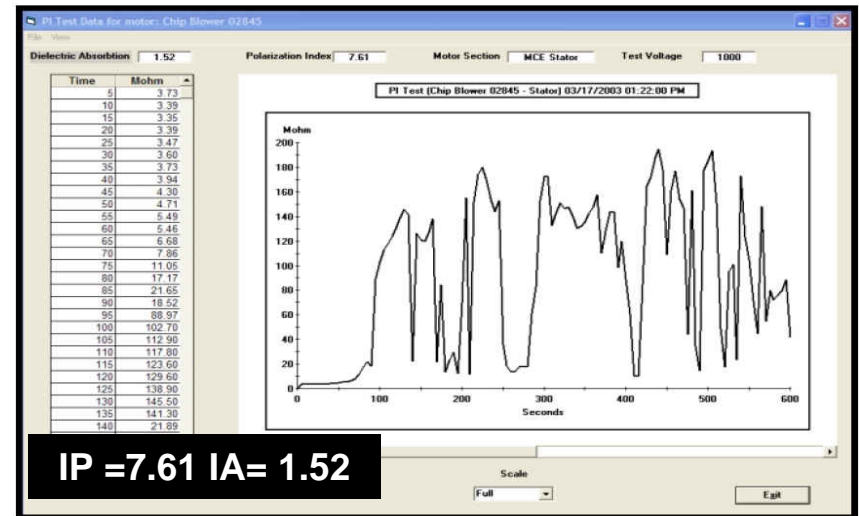
Motor con buen IP



Problema en edad del aislamiento



Motor con falla a tierra



Problema contaminación o humedad

Caso Histórico: Motor 200 hp, 480v

| | |
|---------------|-------------|
| Test Date | 01/01/1999 |
| Test Time | 04:21:03 PM |
| | BASELINE |
| Voltage | 500 |
| Motor Temp | 40 |
| D/A Ratio | 1.08 |
| Polar. Index | 1.29 |
| Test Location | Motor |

| Test Date | 12/28/1998 | 12/28/1998 | 12/30/1998 | 01/12/1999 | 01/12/1999 |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Test Time | 09:23:54 AM | 03:53:55 PM | 04:42:05 PM | 12:11:54 PM | 05:27:45 PM |
| Frequency | 1200 | 1200 | 1200 | 1200 | 1200 |
| | BASELINE | | | | |
| Charge Time | 30 | 30 | 30 | 30 | 30 |
| Voltage | 500 | 500 | 500 | 500 | 500 |
| Motor Temp | 27 | 32 | 32 | 32 | 29 |
| Measured Mohm | 11.3 | >2000 | 18.3 | >2000 | >2000 |
| Corrected Mohm | 4.6 | OVR | 10.5 | OVR | OVR |

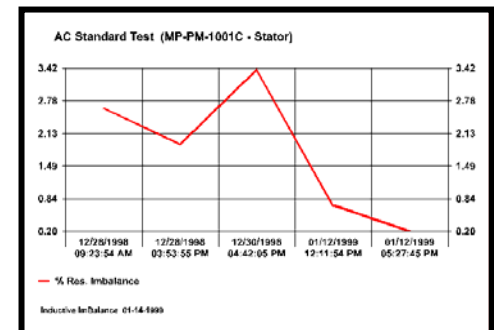
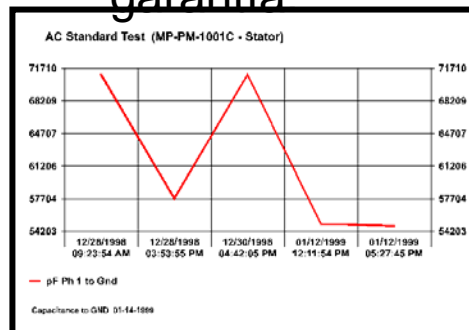
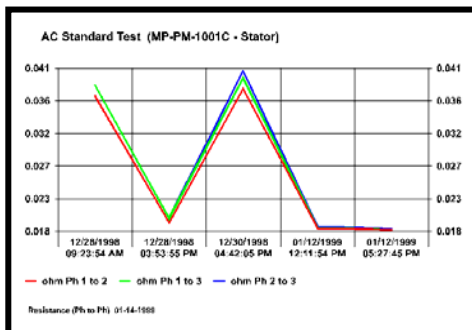
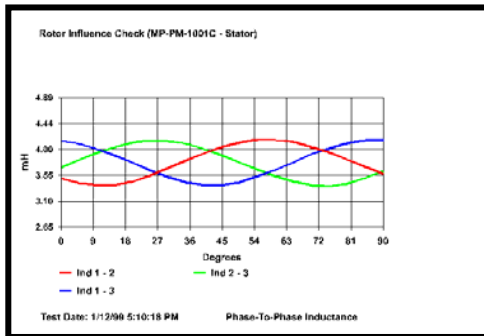
Resultado del análisis

Realizar otro monitoreo en un período de un mes.

Si la condición persiste, desmontar el motor y desarmar para una inspección del estator.

Si la falla continúa solicitar el cambio del motor por uno nuevo, como un reclamo por

garantía



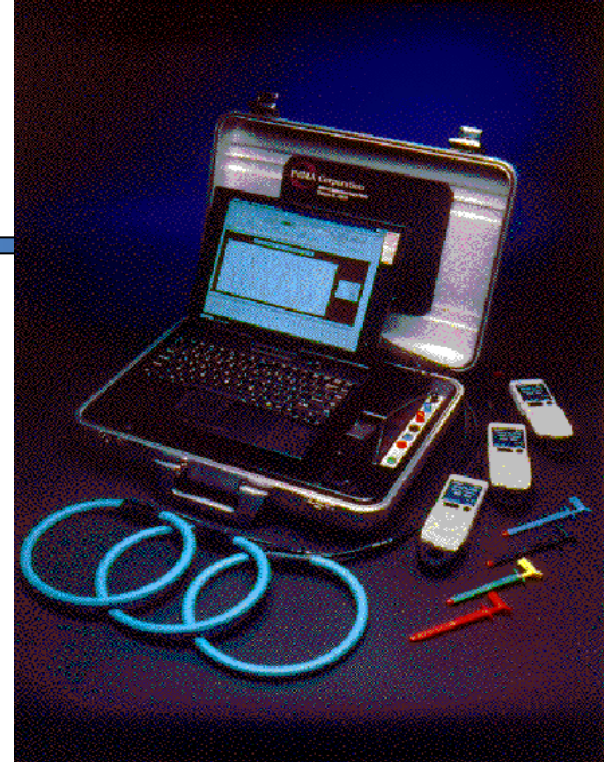
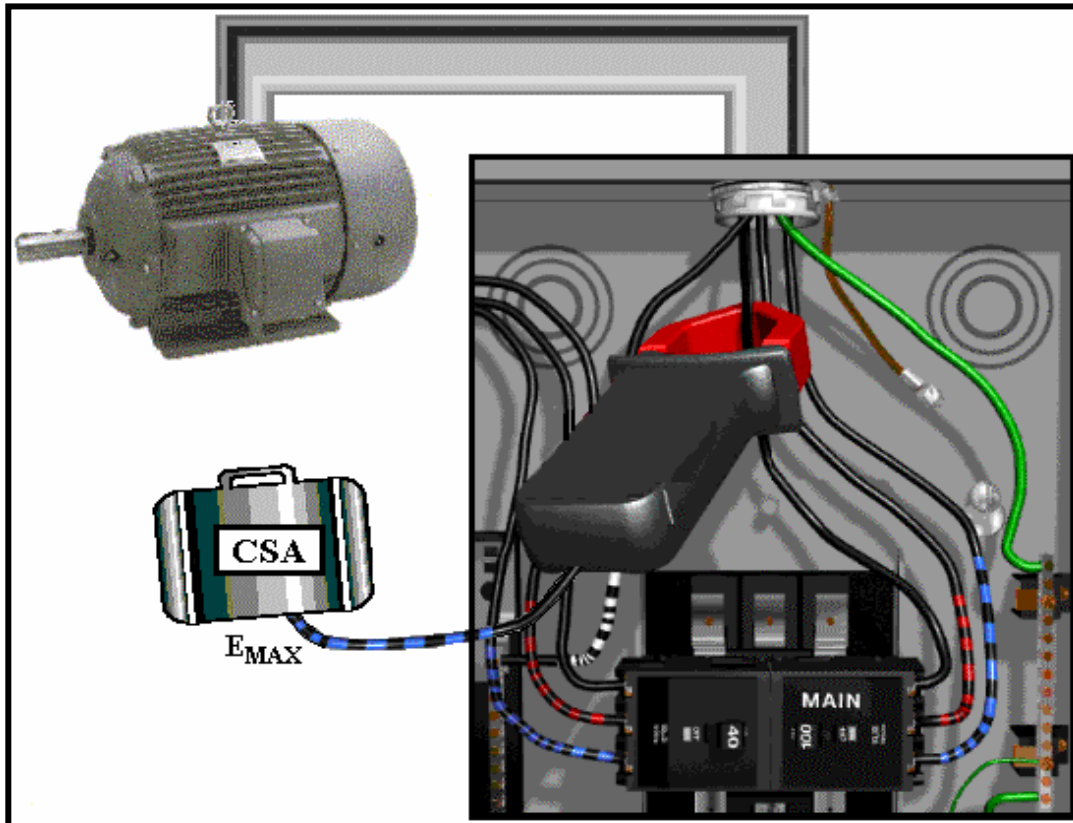
Análisis de motores eléctricos en línea

Emax & Empath

Análisis Fallas motores en línea

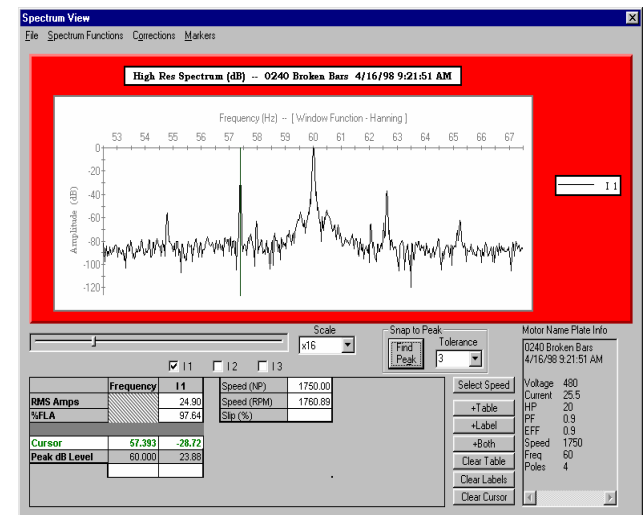
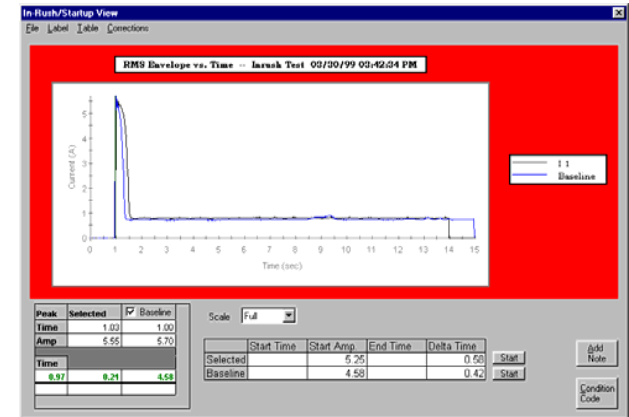
EMPATH = Electric Motor Performance
Analysis & Trending Hardware

MCEMAX = Nombre adoptado por Pdma



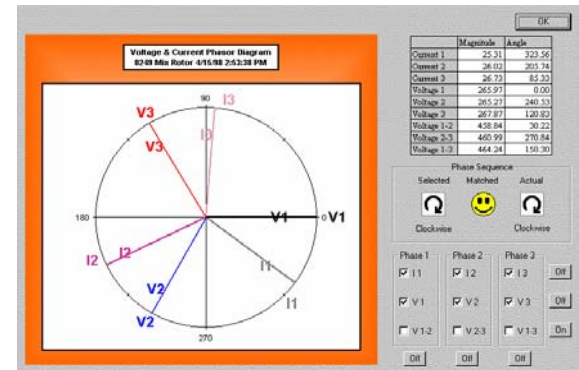
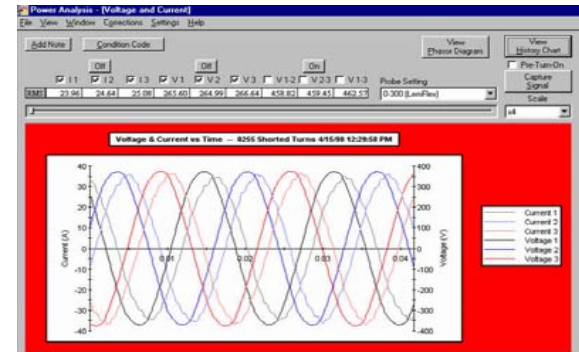
Análisis de la corriente en el motor

- Medición de la condición de un motor con el análisis de corriente
 - In-Rush
 - Excentricidad
 - Air Gab
 - Análisis de barras rotas
 - Fallas en los ejes.

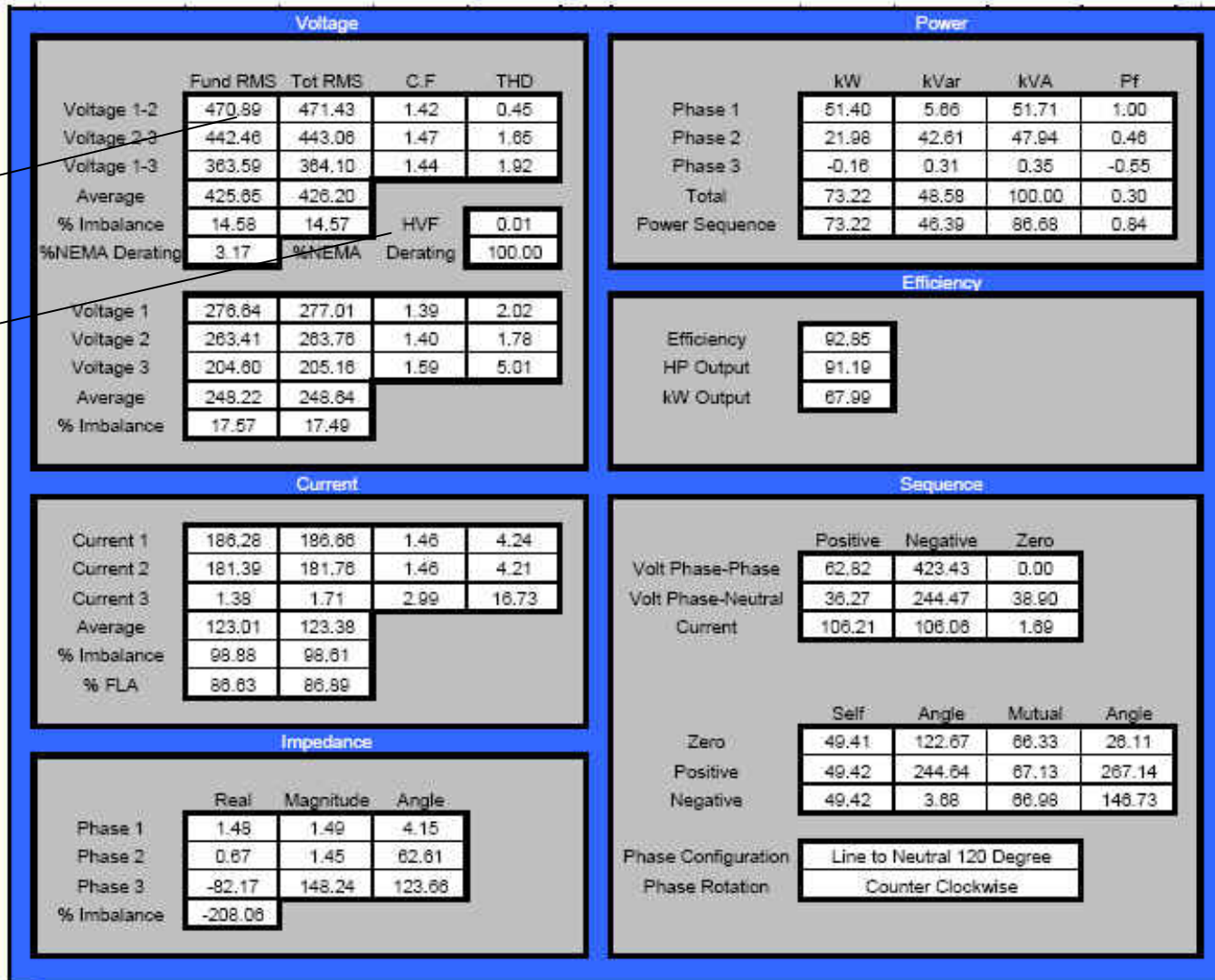


Análisis de la Potencia en el motor

- Medición de la condición de un motor con el análisis de Potencia.
 - Distorsión armónica en V y I.
 - Desvalance de voltaje y I.
 - Verificación fasorial
 - Impedancia de desbalance en el estator



Análisis de la Potencia en el motor



Análisis de la Potencia en el motor

| Análisis histórico | Parámetro desviación | Causa Falla | Acción Recomendada |
|----------------------------|----------------------|--|--|
| Voltaje Línea-Línea | > 5% | Fase con problemas Degradación aislam. Conexión floja. | Limpieza de conexiones Limpieza de motor. |
| Voltaje V-N | > 1% | Alta resistencia conex. Alta I sec. Negativa. Sobrecalentamiento | Limpieza conexión Realizar IP |
| Distorsión Total Armónicos | > 3% | Sobrecalentamiento Cargas monobásicas Computadores, VFD | Colocar Condensadores Revisar cargas de VFD |

% Full load Amps: Operacion del motor >70% FLA

Medición con Empath



**Gracias por su tiempo y
Atención**

William M. Murillo