

# UNIVERSIDAD CATÓLICA DE SANTA MARÍA

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERIAS

FÍSICAS Y FORMALES

PROGRAMA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECÁNICA

ELÉCTRICA Y MECATRÓNICA



## MANTENIMIENTO PREDICTIVO, PRUEBAS ELÉCTRICAS EN MOTORES ELÉCTRICOS DE INDUCCIÓN

Tesis presentada por el Bachiller:

**GIANCARLO JORGE PÉREZ COAGUILA**

Para optar el Título Profesional de:

**INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

**AREQUIPA – PERU**

**2013**



Dedicado a mi familia,  
aquella que siempre me  
apoyo y es el motor que me  
ayuda a lograr todo aquello  
que deseo.

## RESUMEN

El mantenimiento predictivo es uno de los métodos para llevar a cabo el mantenimiento de un motor eléctrico de inducción. Este mantenimiento consta de varios sistemas como: sensores de vibración, sensores de temperatura, pruebas estáticas, pruebas dinámicas y monitoreo de estos. La investigación trata del mantenimiento predictivo basado no en fuentes externas sino en el análisis eléctrico del motor de inducción. Este tipo de mantenimiento predictivo ayuda a diagnosticar el estado eléctrico del motor, mediante un sistema ordenado de pruebas eléctricas se puede saber el estado y estimar el tiempo de trabajo útil del motor hasta un próximo mantenimiento.

En el capítulo cuarto, se desarrolla la metodología para el análisis del motor eléctrico de inducción con pruebas eléctricas, mencionando pruebas que se aplican a motores eléctricos de inducción mediante recomendaciones y normas establecidas internacionales.

En el capítulo quinto, se realizan las pruebas mencionadas en el capítulo cuarto, comprobando los sistemas de análisis necesarios para conocer el estado eléctrico de un motor de inducción, además de ayudar a dar las recomendaciones del caso.

## ABSTRACT

Predictive maintenance is one of the methods for carrying out the maintenance of an electric induction motor. This support consists of various systems such as vibration sensors, temperature sensors, static tests, dynamic tests and monitoring of these. The research is based in predictive maintenance not from external sources but in the electrical analysis of the induction motor. This type of predictive maintenance helps to diagnose the motor electrical state, by an orderly system of electrical tests can know the condition and estimate the working time of the motor to a future maintenance.

In the fourth chapter, we develop the methodology for the analysis of electric induction motor with electrical testing, citing evidence that apply to electric induction motors with international recommendations and standards set.

In the fifth chapter, mentioned tests in chapter four are applied, checking the systems of analysis necessary for the electrical state of an induction motor, and help to give appropriate recommendations.

## ÍNDICE

RESUMEN

ABSTRACT

### CAPITULO I: ANTECEDENTES GENERALES

1.1. Título	06
1.2. Identificación del problema	06
1.3. Descripción del problema	07
1.4. Antecedentes	09
1.5. Objetivo general	10
1.6. Objetivos específicos	10

### CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Introducción a la teoría del motor eléctrico de inducción	11
2.1.1. Producción del campo magnético rotatorio	12
2.1.2. Principio de funcionamiento del motor trifásico de inducción	13
2.1.3. Deslizamiento	18
2.1.4. Fuerza electromotriz inducida en el rotor	19
2.1.5. Circuito equivalente del motor trifásico de inducción	21
2.1.6. Flujo de potencia	27
2.1.7. Tipo de rotores	29
2.1.7.1. Rotor bobinado	29
2.1.7.2. Rotor en corto circuito o jaula de ardilla	30
2.1.7.3. Rotor con doble jaula de ardilla	32
2.1.8. Conexión de bobinados estáticos	34

2.1.9. Control de la corriente de arranque	36
2.1.9.1. Arranque directo	31
2.1.9.2. Arranque a tensión reducida	31
2.1.9.3. Arranque estrella-triángulo	32
2.1.9.4. Arranque por variación de la resistencia del rotor	33

### CAPITULO III: PRUEBAS ELECTRICAS EN EL MOTOR

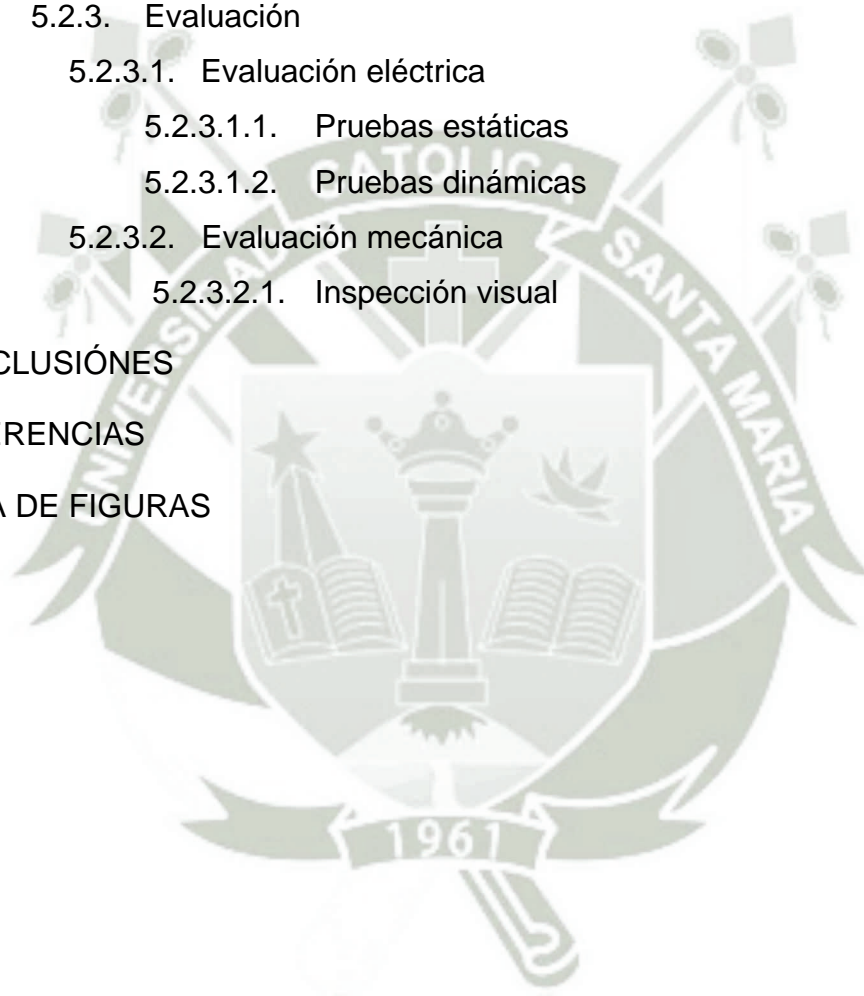
3.1. Pruebas eléctricas no destructivas	40
3.1.1. Prueba de resistencia óhmica	40
3.1.2. Prueba de resistencia de aislamiento	42
3.1.2.1. Factores que afectan la resistencia de aislamiento	49
3.1.2.2. Condiciones de medición	51
3.1.2.3. Índices de medición	57
3.1.3. Prueba de corrientes incrementales	60
3.1.4. Prueba de simetría de fases	63
3.1.5. Prueba de campo inducido	64
3.2. Pruebas eléctricas destructivas	65
3.2.1. Prueba de hipot	65
3.2.1.1. Principio de la prueba y consideraciones	70
3.2.2. Prueba de pulsos	71
3.2.2.1. Teoría de prueba de pulsos	72

### CAPITULO IV: CAUSAS PRINCIPALES DE FALLAS ELECTRICAS

4.1. Calidad de alimentación	75
4.2. Circuito de potencia	78
4.3. Condición del estator	80
4.4. Condición del rotor	82
4.5. Entrehierro	86

## CAPITULO V: ENSAYO DEL MOTOR ELECTRICO DE INDUCCION

5.1.	Introducción	88
5.2.	Pruebas reales estáticas y en vacío del motor de inducción	89
5.2.1.	Datos del motor eléctrico de inducción	89
5.2.2.	Resumen	90
5.2.3.	Evaluación	92
5.2.3.1.	Evaluación eléctrica	92
5.2.3.1.1.	Pruebas estáticas	93
5.2.3.1.2.	Pruebas dinámicas	105
5.2.3.2.	Evaluación mecánica	109
5.2.3.2.1.	Inspección visual	109
	CONCLUSIONES	114
	REFERENCIAS	115
	LISTA DE FIGURAS	117



## CAPITULO I

### ANTECEDENTES GENERALES

#### 1.1. Título:

Mantenimiento predictivo, pruebas eléctricas en motores de inducción.

#### 1.2. Identificación del problema

El motor eléctrico de inducción es utilizado en las industrias alrededor de todo el mundo, es uno de los elementos más importantes en cualquier proceso. Por tal razón es importante conocer sus fundamentos, funcionamiento, mantenimiento, etc. para poder dar solución a los problemas que se desarrollan en el motor.

### 1.3. Descripción del problema

Estudios recientes indican que el 90% de los fallos en máquinas ocurren a raíz del funcionamiento anormal de los componentes internos, como es el caso del motor principal. En esta línea, el mantenimiento correctivo del equipo es una práctica muy costosa, ya que implica paradas no programadas y daños provocados por las fallas de los equipos.

Las actuales exigencias de calidad consideran cada vez más necesaria la utilización de sistemas de monitoreo y detección de fallas, de modo de no interrumpir la producción, siendo los motores eléctricos de inducción los responsables en muchos casos, del correcto funcionamiento del sistema productivo.

Existen hoy muchas técnicas publicadas y herramientas avaladas comercialmente de detección de fallas en motores de inducción, que pueden garantizar un mayor grado de confiabilidad en su funcionamiento. A pesar de esto, la mayoría de las industrias aún no utilizan técnicas de detección y monitoreo de máquinas eléctricas.

La detección y diagnóstico de fallas exige el empleo de sensores adecuados. Enorme variedad de sensores pueden ser empleados para recolectar datos de parámetros de funcionamiento en motores eléctricos con el propósito de detectar y monitorear fallas. Entre los parámetros a medir por estos sensores se pueden resaltar los siguientes: tensión y corriente en el estator, densidad de flujo

magnético en el entrehierro, velocidad y posición del rotor, par entregado al eje, temperatura externa e interna, vibración, etc. Cuanto más sean los parámetros monitoreados (cada uno con su respectiva sonorización), mayor información puede llegar a extraerse con respecto al funcionamiento del motor. Sin embargo, existen algunos inconvenientes relacionados con la cantidad y tipos de sensores a utilizar en el motor. Pueden destacarse el costo de la sensorización requerida, la dificultad en la instalación de los sensores y fallos en la sensorización al producir una parada no programada en la producción.

Los sistemas de monitoreo de motores eléctricos suelen detectar una variedad de fallas en el motor, tales como: cortocircuitos en los bobinados del estator, rodamientos dañados, excentricidad y desbalance en el rotor, rotura de barras y anillos en el rotor, problemas de ventilación, etc.

La sensorización de temperatura y vibración ha sido una técnica utilizada desde hace décadas para el monitoreo de motores asíncronos, sin embargo, recientemente los estudios se han centrado en el monitoreo de la parte eléctrica del motor, haciendo énfasis en el análisis de la corriente de estator. La mayoría de los estudios se han abocado al análisis del espectro de frecuencia de la corriente de estator, con el fin de determinar fallas en el motor. Todas las técnicas de detección de fallas requieren un conocimiento previo de las medidas recolectadas, con el fin de distinguir

situaciones normales de trabajo de las condiciones de operación bajo fallo. Esta exigencia, en cuanto al conocimiento del comportamiento normal de la máquina se magnifica cuando existe en ella una gran cantidad de armónicos provenientes de características constructivas o de variación de la carga a la que se encuentra sometido el motor.

#### 1.4. Antecedentes

Los motores eléctricos no representaban mayores problemas económicos para el mantenimiento antes de empezar a crear máquinas de grandes potencias, es cuando su mantenimiento se vuelve muy costoso y difícil de financia tratándose de muchas máquinas de similares magnitudes.

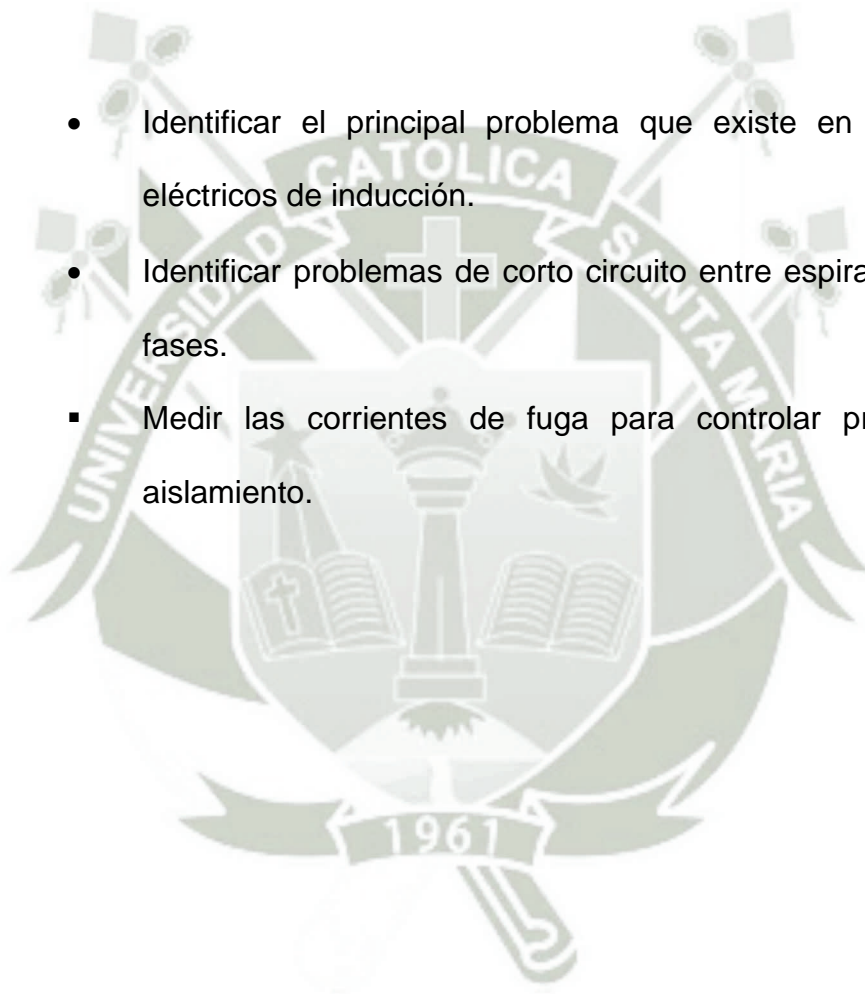
A mediados del siglo XX las pruebas eléctricas empiezan a tomar importancia y hasta el día de hoy se siguen evaluando parámetros de control y desenvolvimiento en la parte eléctrica del motor de inducción.

### 1.5. Objetivo general

Mostrar la metodología de aplicación de pruebas eléctricas destructivas y no destructivas para identificar problemas eléctricos en el motor eléctrico de inducción.

### 1.6. Objetivos específicos

- Identificar el principal problema que existe en los motores eléctricos de inducción.
- Identificar problemas de corto circuito entre espiras, bobinas o fases.
- Medir las corrientes de fuga para controlar problemas de aislamiento.



## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Introducción a la teoría del motor eléctrico de inducción

Los motores asíncronos o de inducción, son prácticamente motores trifásicos. Están basados en el accionamiento de un masa metaliza por la acción de un campo giratorio.

Están formados por dos armaduras con campos giratorios coaxiales: una es fija, y la otra móvil. También se les llama, respectivamente, estator y rotor.

El devanado del rotor, que conduce la corriente alterna que se produce por inducción desde el devanado del estator conectado directamente, consiste de conductores de cobre o aluminio vaciados en un rotor de laminaciones de acero. Se instalan anillos terminales de cortocircuito en ambos extremos de la jaula de ardilla o bien en uno de los extremos en el caso del rotor devanado.

Los motores de inducción de rotor devanado son menos utilizados, debido a su mayor costo, y a que requieren de más mantenimiento que los de jaula de ardilla.

### 2.1.1. Producción del campo magnético rotativo

Debido a que el sistema eléctrico industrial utiliza fuentes trifásicas de energía, la máquina de inducción se construye normalmente con tres devanados, distribuidos y desfasados espacialmente  $120^\circ$ . Cada una de las tres bobinas desfasadas espacialmente también están desfasadas en el tiempo  $120^\circ$  una de otras.

Cada bobina produce un campo magnético estático en el espacio. La amplitud de este campo se encuentra en la dirección del eje magnético de la bobina y varía senoidalmente en el tiempo. La combinación de los pulsantes producidos por las tres corrientes desfasadas temporalmente, circulando por las tres bobinas desfasadas espacialmente se transmite en un campo magnético distribuido senoidalmente en el espacio.

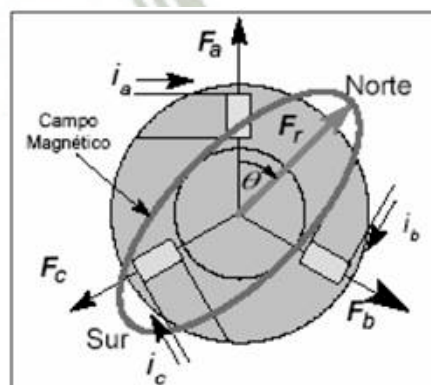


Fig. N° 2.1.- Distribución senoidal del campo magnético rotativo.

Puesto que el periodo o intervalo de tiempo de la variación senoidal de la corriente es el mismo en los conductores, la velocidad del campo magnético rotatorio (S), varía directamente con la frecuencia (f), pero inversamente con el número de polos (P):

$$RPM = 120 * f / p \dots\dots\dots (F-2.1)$$

**Dónde:**

F: frecuencia de trabajo [Hz]

P: número de polos

El número de polos depende de N, también de la distribución de los devanados, pero la velocidad depende de la frecuencia y no de otros factores.

### 2.1.2. Principio de funcionamiento del motor trifásico de inducción

Los motores de inducción o asíncronos, son los más utilizados debido a su robustez, sencillez constructiva y poco mantenimiento. La utilización de los mismos, es apta para aquellos requerimientos en los cuales no se deba mantener una velocidad constante, ya que este tipo de motores, disminuye ligeramente su velocidad con el aumento de la carga en su eje.

El estator de un motor trifásico de inducción está formado por un conjunto de tres bobinas simétricas, las cuales son alimentadas por un sistema trifásico balanceado de corrientes, lo cual da origen a un campo magnético giratorio de modulo constante.

Este campo magnético gira a la velocidad que llamamos de sincronismo. Coloquemos dentro del estator una espira, montada sobre un eje, cuyo único movimiento permitido es el de rotación tal como se muestra en la figura 2.2. En esta situación, en la cual tenemos un campo magnético de modulo fijo girando alrededor de la espira mencionada, esta concatenara un flujo magnético que varía con el tiempo, lo cual dará origen a una fuerza electromotriz inducida (Ley Faraday).

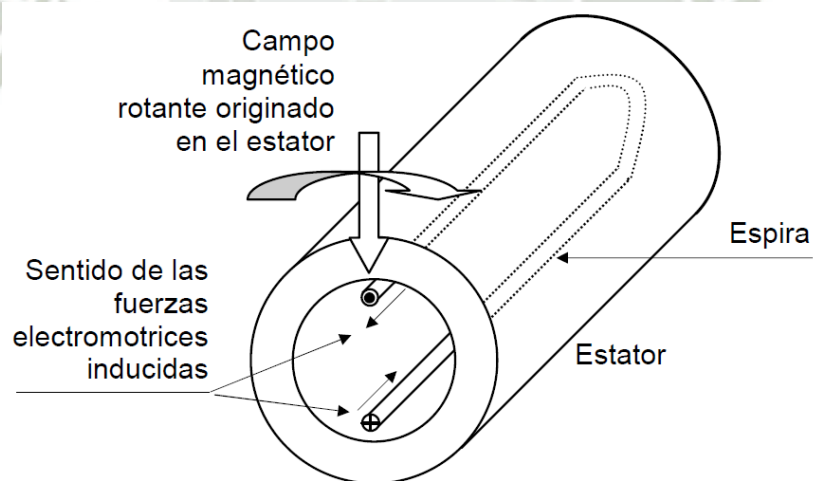


Fig. N° 2.2.- Fuerza electromotriz inducida en una espira

El sentido de la fuerza electromotriz inducida se puede obtener de acuerdo a la siguiente regla de la mano derecha:

- Se coloca la palma de la mano derecha recibiendo en forma perpendicular el flujo magnético.
- Se coloca el pulgar en dirección contraria al sentido del movimiento del campo magnético (en este caso en sentido anti horario).
- El sentido del resto de los dedos nos indica el de la fuerza electromotriz inducida. En la figura 2.3 se muestra un detalle de lo analizado.

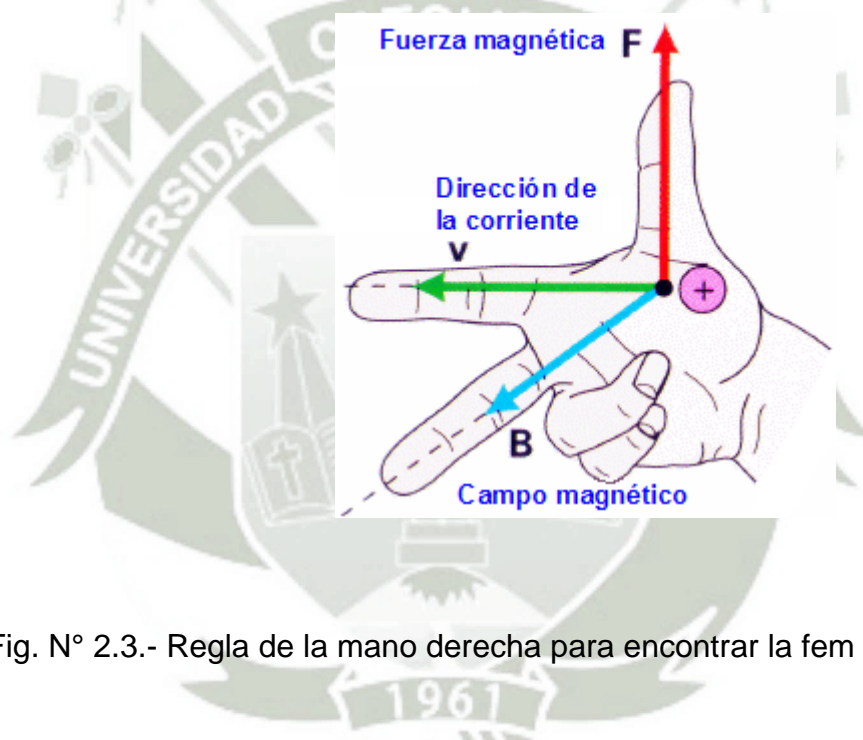


Fig. N° 2.3.- Regla de la mano derecha para encontrar la fem inducida

Si ahora cerramos la espira por ejemplo cortocircuitándola, tal como se muestra en la figura 2.4, circulara una corriente en el mismo sentido de la fuerza electromotriz inducida, cuyo valor dependerá de dicha fem y de la impedancia que presente dicha espira.

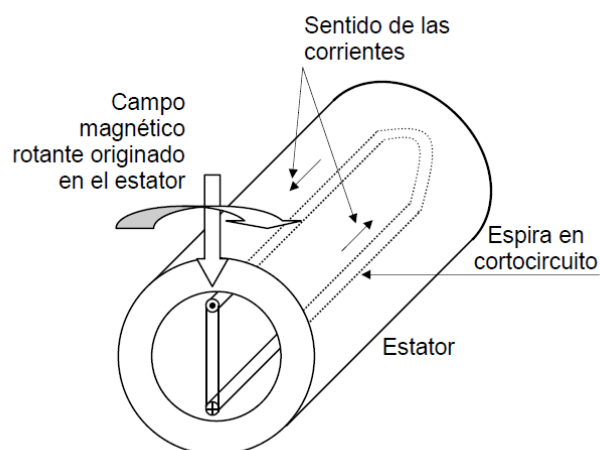


Fig. N° 2.4.- Circulación de corrientes con la espira en cortocircuito

En esta situación nos encontramos, con un conductor por el cual circula corriente y se encuentra en presencia de un campo magnético, lo cual da origen a fuerzas en los conductores, pudiendo determinar el sentido de las mismas mediante la mano izquierda de acuerdo a la figura 2.5.

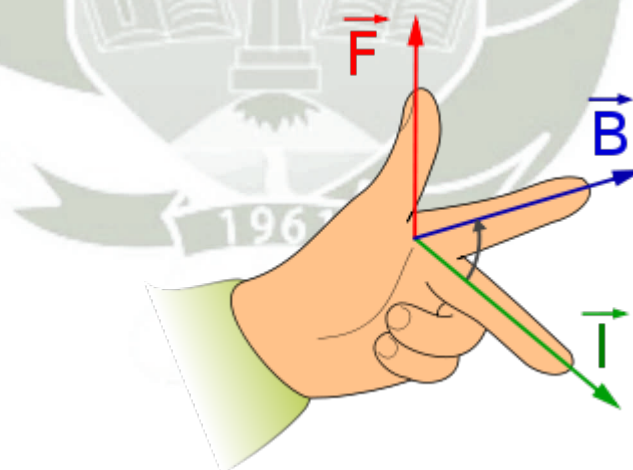


Fig. N° 2.5.- Regla practica para la obtención del sentido de la fuerza sobre conductores

Para determinar el sentido de las fuerzas se sigue el siguiente proceso:

- Se coloca la palma de la mano izquierda recibiendo en forma perpendicular el flujo magnético.
- Se colocan los dedos en el sentido de la corriente.
- El pulgar nos indica el sentido de la fuerza.

En nuestro caso, en el conductor superior la fuerza es hacia la derecha, y en el inferior hacia la izquierda, como se observa en la figura 2.6.

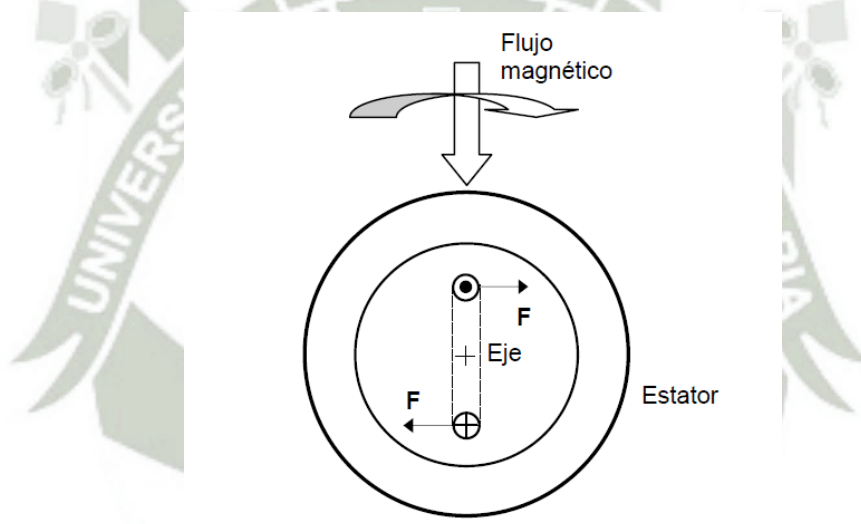


Fig. N° 2.6.- Sentido de las fuerzas sobre los conductores.

Dado que las fuerzas se originan, únicamente, a lo largo de los conductores paralelos al eje (Corriente perpendicular al flujo magnético), y estando estos separados, se produce una cupla que hace mover la espira, y estando esta montada sobre un eje, comienza a girar, siguiendo el movimiento del campo magnético rotante.

La espira aumenta su velocidad hasta llegar a una velocidad levemente inferior a la del campo magnético, ya que de alcanzar la misma, la espira no cortaría líneas de campo magnético, con lo cual no habría flujo concatenado variable lo cual llevaría a la desaparición de las fuerzas mencionadas, tendiendo la espira a disminuir su velocidad, con lo que volvería a aparecer la cupla.

La velocidad a la que gira es levemente inferior a la del campo magnético rotante, y la misma está determinada por el equilibrio entre la cupla motora analizada y las cuplas antagónicas o resistentes (debidas a la carga mecánica en el eje y los rozamientos propios).

### 2.1.3. Deslizamiento

El deslizamiento de una máquina de inducción se define como la velocidad relativa entre el campo magnético producido por las corrientes inyectadas en el estator y la velocidad mecánica del rotor, por unidad de la velocidad del campo.

Siendo la velocidad síncrona (120 f/p) en rpm del campo magnético rotatorio producido por el estator, “n” la velocidad del rotor, y esta además es inferior a la velocidad “ $n_s$ ” del campo magnético rotante.

Dicha diferencia se la suele expresar por medio del deslizamiento o resbalamiento de acuerdo a la siguiente expresión:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \dots\dots\dots (F-2.2)$$

De esta expresión, vemos que cuando el rotor está detenido ( $n = 0$ ), el deslizamiento toma un valor igual a “1”;

$$s = \frac{n_s - 0}{n_s} = 1 \dots\dots\dots (F-2.3)$$

En cambio si el rotor “girara” a la velocidad síncrona  $n = n_s$  (no lo puede hacer por si mismo) el resbalamiento toma el valor:

$$s = \frac{n_s - n_s}{n_s} = 0 \dots\dots\dots (F-2.4)$$

En general, a la velocidad del campo se le denomina velocidad síncrona de la máquina, y el deslizamiento indica que tan cerca se encuentra la máquina de esta velocidad. Si el rotor se la maquina gira a una velocidad mayor que la síncrona, el deslizamiento se hace negativo. Cuando se conocen todos los parámetros del modelo de una máquina de inducción y la fuente de alimentación, el deslizamiento determina el punto de operación. Por esta razón se utiliza esta variable para definir el estado de la máquina.

#### 2.1.4. Fuerza electromotriz inducida en el rotor

La “fem” que se induce en el rotor, depende de la velocidad del campo magnético del estator, con respecto a los conductores del rotor. Cuando el rotor está detenido, ve “pasar” al campo magnético a la velocidad síncrona, lo cual hace que en esta situación la “fem” tenga un valor máximo al cual llamaremos “E2”.

A medida que el rotor comienza a girar y aumentar su velocidad, la velocidad relativa del campo magnético con respecto a los conductores del rotor, disminuye y por lo tanto así lo hace la “fem” inducida, hasta llegar a un valor igual a "cero", si alcanzara la velocidad de sincronismo.

Aceptando que el aumento de la velocidad es lineal, los distintos valores que toma la “fem” se pueden graficar de acuerdo a la figura 2.14.



Fig. N° 2.7.- Fem inducida comparada con el resbalamiento.

De aquí surge que  $E_{2s} = s * E_2$ ..... (F- 2.5)

A la situación del rotor detenido se le conoce como rotor bloqueado

### 2.1.5. Circuito equivalente del motor trifásico de inducción

El circuito equivalente del motor trifásico de inducción o asíncrono, puede asimilarse al de un transformador.

En el estator, tenemos tres bobinas que originan un campo magnético rotante. Las mismas presentan una resistencia óhmica distribuida a lo largo de los conductores que las conforman. Además parte de las líneas de campo magnético se cierran a través del aire, conformando lo que llamamos flujo disperso. Al igual que en el transformador estos efectos los representamos por una resistencia concentrada y una reactancia de dispersión.

El núcleo magnético está dividido en dos partes, una fija que es el estator y otra móvil que es el rotor, lo cual implica una separación de aire entre ambas (entrehierro).

Por lo tanto, se va a necesitar una corriente magnetizante (bastante mayor que en el caso de un transformador debido al entrehierro mencionado), y además tenemos las pérdidas en el hierro. Ambos efectos los representaremos en forma análoga, mediante una resistencia y una reactancia en paralelo.

Las pérdidas en el hierro del rotor son muy pequeñas, cuando gira a la velocidad de régimen, ya que las frecuencias de las corrientes son pequeñas.

Luego el estator lo podemos representar por el siguiente circuito equivalente:

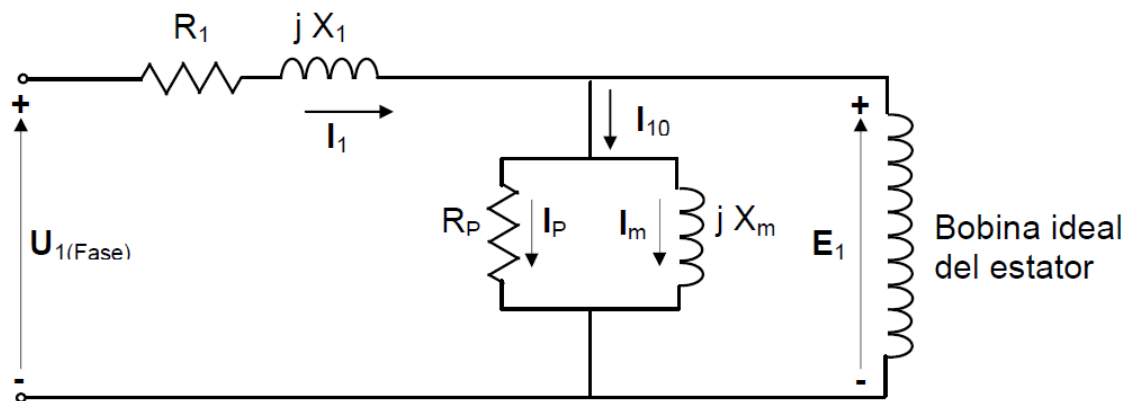


Fig. N° 2.8.- Circuito equivalente de una fase del estator.

**Dónde:**

- $R_1$  : La resistencia óhmica de la bobina estatórica de una fase [ $\Omega$ ]
- $X_1$  : Reactancia de dispersión de la bobina estatórica de una fase [ $\Omega$ ]
- $R_p$  : Resistencia que representa las pérdidas en el hierro por fase [ $\Omega$ ]
- $X_m$ : Reactancia de magnetización por fase [ $\Omega$ ]
- $U_1$  : Tensión de fase de alimentación al motor [V]
- $E_1$  : Fuerza electromotriz inducida de fase en la bobina estatórica [V]
- $I_1$  : Corriente estatórica con carga [A]
- $I_{10}$  : Corriente estatórica del motor en vacío [A]

En el rotor la fem inducida, dependerá de la velocidad del eje y del número de espiras del mismo.

También los conductores presentan resistencia óhmica y hay flujo disperso, el cual lo representaremos por una reactancia de dispersión cuyo valor está dado por:

$$X_{2s} = 2 * \pi * F_R * L_2 \dots\dots\dots (F-2.6)$$

Siendo el valor de la auto inductancia constante, la reactancia cambia su valor con la velocidad de la máquina, como lo hace la frecuencia  $F_R$ .

La reactancia con el rotor detenido o bloqueado tiene el siguiente valor:

$$X_2 = 2 * \pi * F * L_2 \dots\dots\dots (F-2.7)$$

Por lo tanto:

$$X_{2s} = 2 * \pi * s * F_R * L_2 = s * X_2 \dots\dots\dots (F-2.8)$$

Dado que normalmente los conductores del rotor están en cortocircuito, el circuito equivalente para el mismo es el de la figura 2.9.

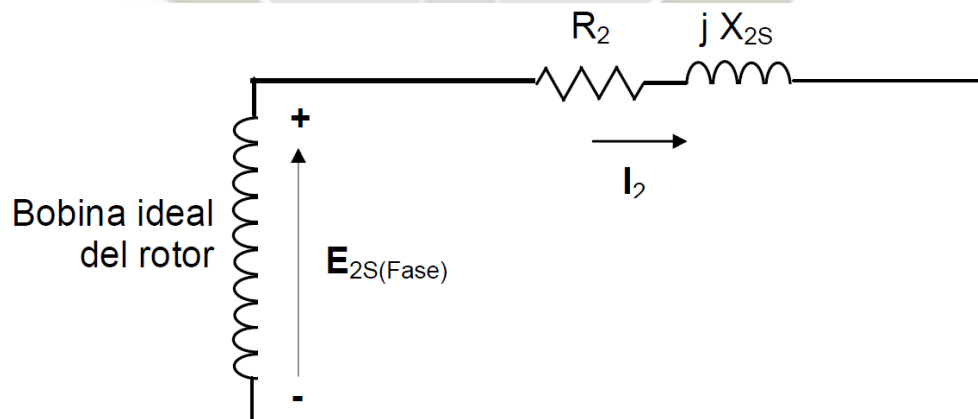


Fig. N° 2.9.- Circuito equivalente para una fase del rotor sin carga.

El valor de la corriente en el rotor de acuerdo al circuito está dada por:

$$I_2 = \frac{E_{2S}}{R_2 + jX_{2S}} \dots\dots\dots (F-2.9)$$

Esta corriente toma valores dependientes de la fem inducida y de la reactancia, si reemplazamos:

$$E_{2S} = s * E_2 \dots\dots\dots (F-2.10)$$

$$X_{2S} = s * X_2 \dots\dots\dots (F-2.11)$$

$$I_2 = \frac{s * E_2}{R_2 + js * X_2} \dots\dots\dots (F-2.12)$$

Dividiendo por el resbalamiento nos queda:

$$I_2 = \frac{E_{2S}}{\frac{R_2}{s} + jX_2} \dots\dots\dots (F-2.13)$$

De esta forma nos queda un circuito equivalente en el rotor, en el cual lo variable con la velocidad es la resistencia (desde el punto de vista matemático, no físico).

Teniendo los dos circuitos equivalentes del estator y del rotor, entre los mismos queda un acoplamiento inductivo, el cual lo podemos excluir, si referimos los valores del rotor al estator teniendo en cuenta la relación del número de espiras del estator y del rotor, igual a lo que se realizó para el transformador. En función de lo analizado el circuito equivalente por fase del motor trifásico de inducción, con sus valores referidos al estator es el de la figura 2.10.

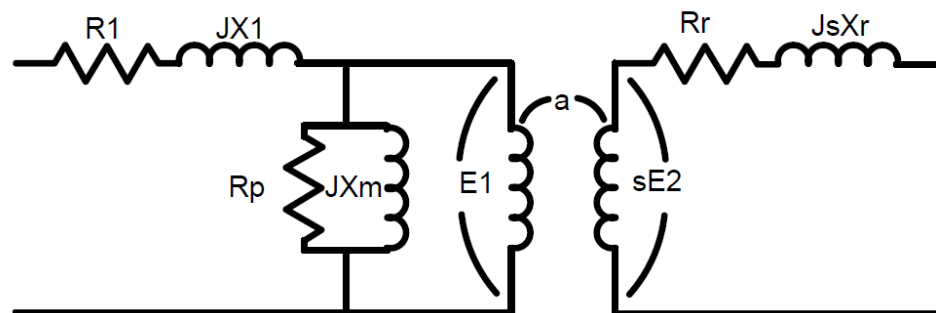


Fig. N° 2.10.- Circuito equivalente relacionado con el transformador ideal.

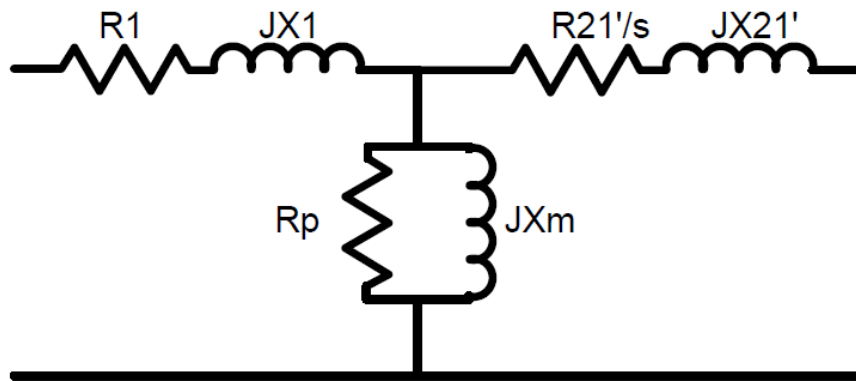


Fig. N° 2.11.- Circuito equivalente simplificado de una fase del motor trifásico de inducción.

La resistencia que aparece como variable en el rotor, la podemos descomponer de la siguiente forma:

$$\frac{R_{21}'}{s} = R_{21} + R_{21} * \frac{(1-s)'}{s} \dots \dots \dots (F-2.14)$$

Tomando en cuenta esta descomposición el circuito equivalente nos queda de la forma indicada en la figura 2.12.

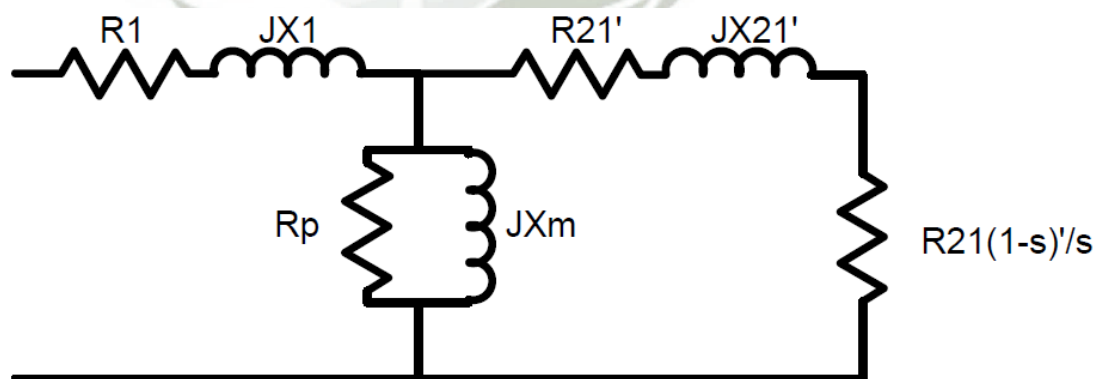


Fig. N° 2.12.- Circuito equivalente final por fase del motor trifásico de inducción.

### 2.1.6. Flujo de potencia

Como el circuito equivalente realizado es para una fase del motor, se debe tener en cuenta que la potencia en juego en dicho circuito representa la tercera parte del mismo. En la figura 8.29 se encuentra graficado el circuito equivalente y el flujo de potencia a través del mismo.

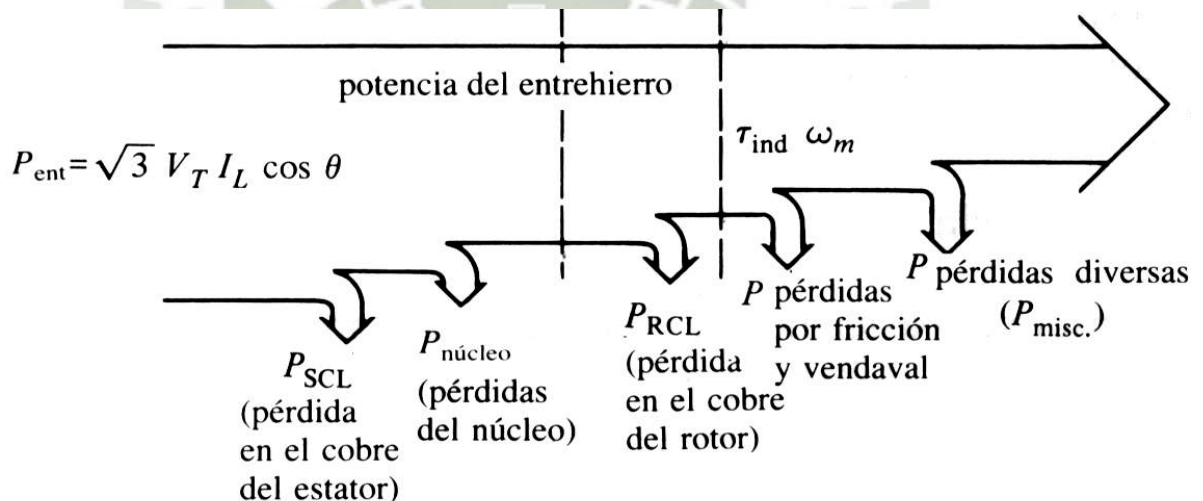


Fig. N° 2.13.- Diagrama del flujo de potencia en el motor

De la figura anterior los valores de potencia son los siguientes:

La potencia trifásica absorbida desde la red de suministro eléctrico está dada por:

$$P_{ab} = 3 * U_1 * I_1 * \cos \varphi = \sqrt{3} * U_{1L} * I_1 * \cos \varphi \dots (F-2.15)$$

$$P_{cuc} = 3 * R_1 * I_1^2 \dots\dots\dots (F-2.16)$$

Son pérdidas en el cobre de las tres fases del estator

$$P_{FE} = 3 * R_p * I_p^2 = 3 * \frac{E_1^2}{R_p} = \frac{E_1^2 L}{R_p} \dots\dots\dots (F-2.17)$$

Son pérdidas en el hierro del motor.

$$P_{CuR} = 3 * R_{21} * I_{21}^2 \dots\dots\dots (F-2.18)$$

Son las pérdidas en las tres fases del rotor

$$P_i = 3 * I_{21}^2 * R_{21} * \frac{(1-s)}{s} \dots\dots\dots (F-2.19)$$

Potencia interna

La potencia que llamamos interna es la potencia que nos queda después de haber quitado todas las pérdidas electromagnéticas que tiene el motor, lo cual nos indica que es la potencia que nos queda para suplir las pérdidas mecánicas y la potencia que entrega en el eje al equipo que impulsa, que se denomina potencia útil.

$$P_i = P_U + P_m \dots\dots\dots (F-2.20)$$

La potencia que pasa del estator al rotor a través del entrehierro, mediante el flujo magnético, la llamaremos potencia sincrónica y su valor está dado por:

$$P_s = P_i + P_{cuR} = P_{ab} - P_{cuc} - P_{Fe} \dots \dots \dots (F-2.21)$$

$$P_s = 3 * I_{21}^2 * R_{21} * \frac{(1-s)}{s} + 3 * I_{21}^2 * R_{21} = 3 * I_{21}^2 * \frac{R_{21}}{s}. (F-2.22)$$

$$R_{21} = \frac{P_{CuR}}{s} = \frac{P_i}{(1-s)} \dots \dots \dots (F-2.23)$$

### 2.1.7. Tipos de rotores

Los rotores de un motor de inducción son de rotor bobinado, de jaula de ardilla simple y de jaula de ardilla doble. Estos tienen diferentes aplicaciones siendo el más sencillo y de fácil mantenimiento el de jaula de ardilla simple.

#### 2.1.7.1. Rotor bobinado

Los motores no cuentan con una sola espira, sino que se forman bobinas para lograr más conductores que aporten cupla. Un tipo de motor es el que tiene 3 bobinas con sus ejes magnéticos desplazados, a los efectos de formar un conjunto trifásico.

Dichas bobinas están unidas en un punto común, formando una conexión del tipo “estrella”, mientras que los otros terminales de las

bobinas se conectan al exterior de la maquina mediante unos anillos rozantes, tal como se muestra esquemáticamente en la figura 2.14.

Estos anillos están aislados eléctricamente entre si y también del eje del rotor, y cada uno de ellos conectado a cada terminal de las bobinas.

La conexión al exterior se efectúa, mediante escobillas o carbones que se deslizan sobre los anillos, efectuando la continuidad eléctrica entre una parte móvil y una parte fija.

Mediante estas escobillas se pueden conectar en serie con cada bobina una resistencia o bien cortocircuitar los tres extremos.

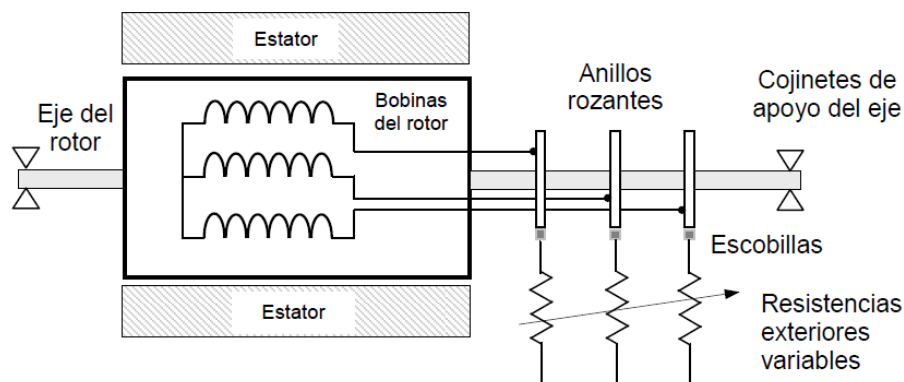


Fig. N° 2.14.- Esquema de conexión de las bobinas del rotor de anillos rozantes.

### 2.1.7.2. Rotor en cortocircuito o jaula de ardilla

Si colocamos en el rotor de la maquina una serie de conductores paralelos a su eje, tal como se muestra en la figura 2.15, en los

mismos vamos a tener fuerzas electromotrices inducidas, cuyo valor depende de la magnitud la inducción magnética, de la longitud de los conductores y de la velocidad con que el campo magnético pasa frente al conductor analizado.

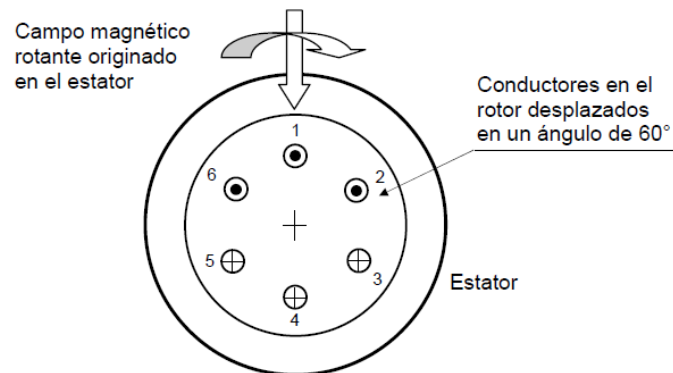


Fig. N° 2.15.- Detalle de los conductores en el rotor.

En el esquema se han tomado seis conductores desplazados  $60^\circ$  entre ellos, lo cual nos lleva a que las fuerza electromotrices inducidas en los mismos son de igual modulo pero desfasados en  $60^\circ$ , entre sí. Esto se puede representar fasorialmente, mediante un valor eficaz "E", igual para todos los conductores pero con un desfasaje de  $60^\circ$ . De acuerdo a la posición que se dibujó del campo magnético, en ese instante, las fem son salientes en los conductores superiores y entrantes en los inferiores, lo cual surge de aplicar la regla ya estudiada. En esta situación no hay circulación de corriente ya que no se presenta un circuito cerrado.

Si los extremos anteriores y posteriores de los conductores, los unimos mediante una corona, tal como se muestra en la figura 2.16,

circulara corriente por los mismos, valor que depende de la impedancia que presente dicho conductor.

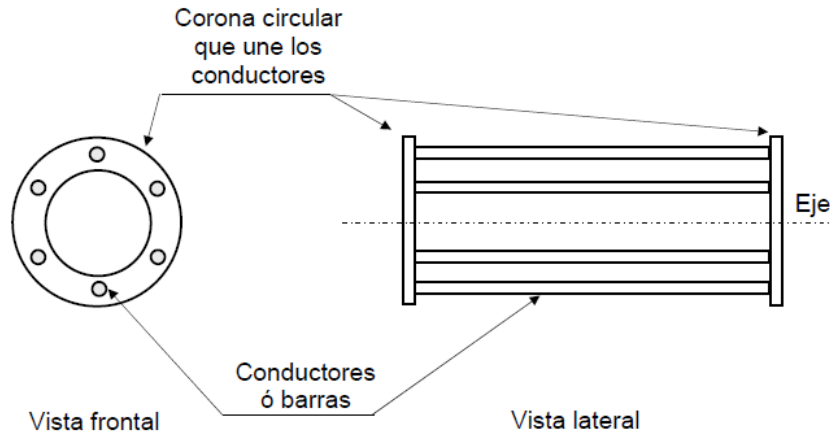


Fig. N° 2.16.- Esquema de un rotor con los conductores en corto circuito formando una jaula de ardilla.

### 2.1.7.3. Rotor con doble jaula de ardilla

Hay motores que se fabrican con una doble jaula, a los fines de aumentar en el arranque la resistencia del rotor, con lo que se disminuye la corriente y mejora la cupla. La forma constructiva, básicamente es la dibujada en la figura 2.17.

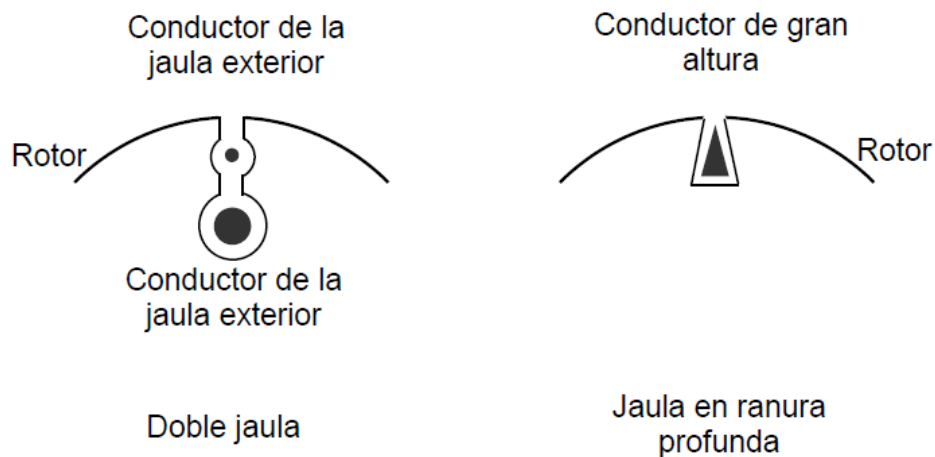


Fig. N° 2.17.- Rotores con doble jaula o con ranura profunda

De esta forma, el flujo de dispersión del conductor externo es mayor que la del interno, ya que las líneas de campo magnético del primero, se cierran en gran magnitud por el aire, mientras que la del conductor interno se cierran prácticamente por el núcleo ferromagnético

Esto hace que la inductancia del conductor exterior sea menor que la del interior. En cambio la resistencia óhmica del conductor exterior (menor sección) sea mayor que la del interior.

En el momento del arranque la frecuencia de las corrientes retóricas es máxima, por lo que la jaula exterior presenta una reactancia menor que la interior (y también menor impedancia), lo cual lleva a que las corrientes circulen en su mayor parte por la jaula exterior, lo cual trae aparejado mejor cupla de arranque.

A medida que aumenta la velocidad la frecuencia de las corrientes del rotor disminuyen y la reactancia va tomando menor influencia y

las corrientes comienzan a circular en mayor medida por la jaula interior de menor resistencia.

Este tipo de motor tiene la desventaja de su mayor costo, debido a su dificultad constructiva.

### 2.1.8. Conexión de los bobinados estáticos

Los bobinados del estator pueden ser conectados en estrella o en triángulo, dependiendo de la misma de la tensión de suministro y de lo que soporten dichas bobinas.

A tales efectos la bornera con la que viene equipado el motor, trae normalizada su disposición y su esquema es el de la figura 2.18.

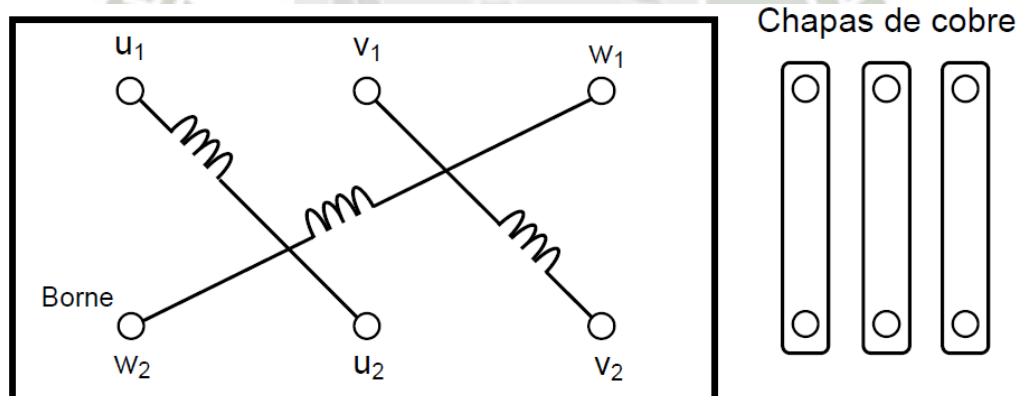


Fig. N° 2.18.- Disposición de los bobinados en un motor trifásico de inducción.

Las bobinas están conectadas como se muestra en la figura. Las distancia entre los bornes tanto vertical como horizontal son iguales, ya que normalmente cuenta con tres chapas de cobre, con dos

agujeros separados por dicha distancia, de forma tal de poder unir eléctricamente con ellas, dos bornes entre sí. De esa forma, los bobinados se pueden conectar en estrella o en triángulo de acuerdo a la disposición mostrada en la figura 2.19.

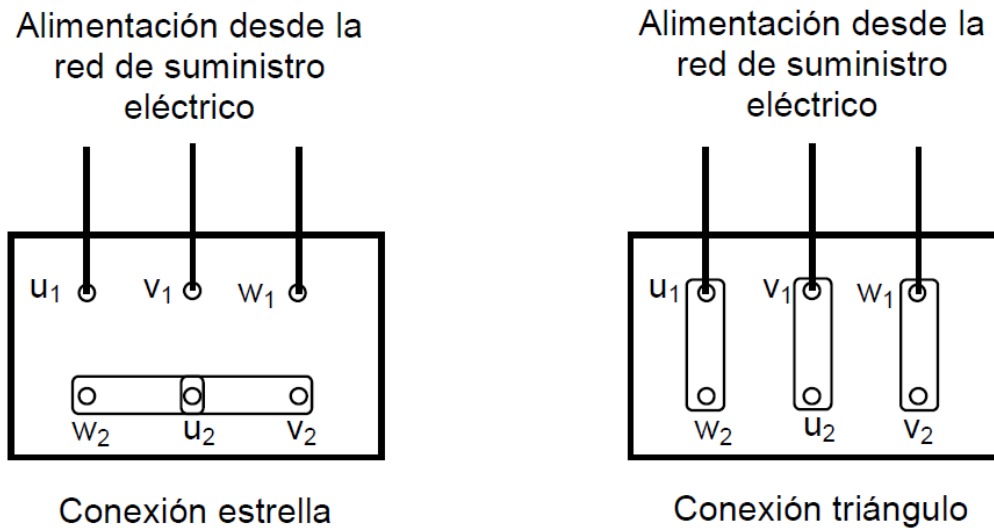


Fig. N° 2.19.- Esquema para conectar los bobinados en estrella o triángulo sobre la bornera.

Para efectuar la inversión del sentido de giro, se debe cambiar el sentido de giro del campo magnético rotante, para lo cual se debe proceder a cambiar la secuencia de alimentación, invirtiendo la conexión de dos de las fases, tal como se muestra en la figura 2.20.

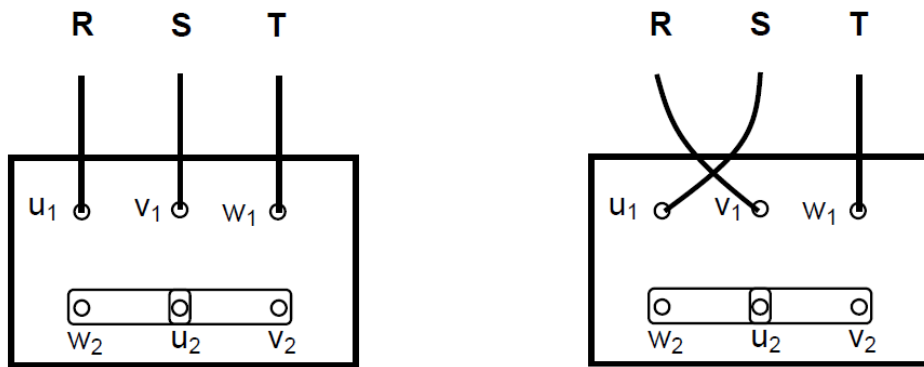


Fig. N° 2.20.- Inversión del sentido de giro de un motor de inducción trifásico.

### 2.1.9. Control de la corriente de arranque

A los efectos de reducir la corriente que toma en el momento de arranque este tipo de motores, la cual puede afectar a las instalaciones anexas al mismo, los sistemas que se utilizan son los siguientes:

#### 2.1.9.1. Arranque directo

Se puede realizar siempre que la red pueda suministrar la corriente de arranque, sin afectar otras instalaciones anexas (como computadoras, flujo luminoso en instalaciones de iluminación por efectos de la caída de tensión, etc).

Se utiliza normalmente en motores de pequeña potencia.

### 2.1.9.2. Arranque a tensión reducida

Para reducir la corriente de arranque, se aplica a los motores en el momento de arranque una tensión menor a la nominal o de plena potencia. Se debe tener en cuenta que la cupla motora se ve reducida con el cuadrado de la tensión aplicada, por lo que se debe verificar que la cupla resistente sea inferior a esta.

### 2.1.9.3. Arranque estrella-triángulo

El mismo consiste en arrancar el motor con sus bobinados conectados en estrella y luego que alcanza una cierta velocidad, cambiar la conexión a triángulo, recibiendo plena tensión.

Con esto se logra reducir la corriente de la línea a la tercera parte, pero también la cupla se reduce a la tercera parte.

En la figura 2.21 a y 2.21 b se ven las curvas de cupla y corriente en el proceso de arranque.

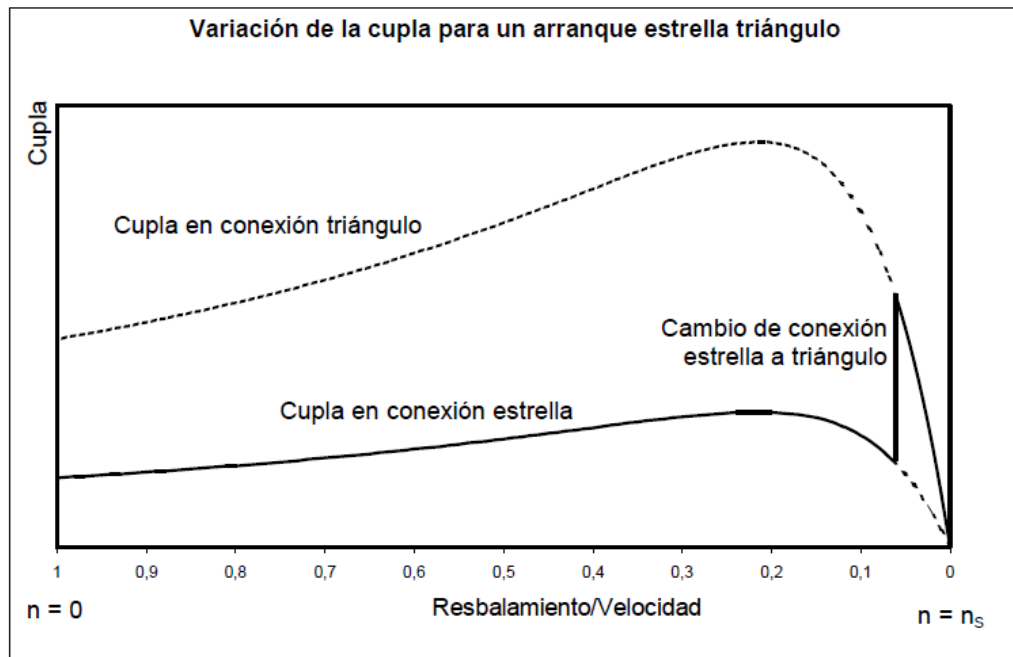


Fig. N° 2.21 a.- Variación de la cupla en un arranque estrella triángulo.

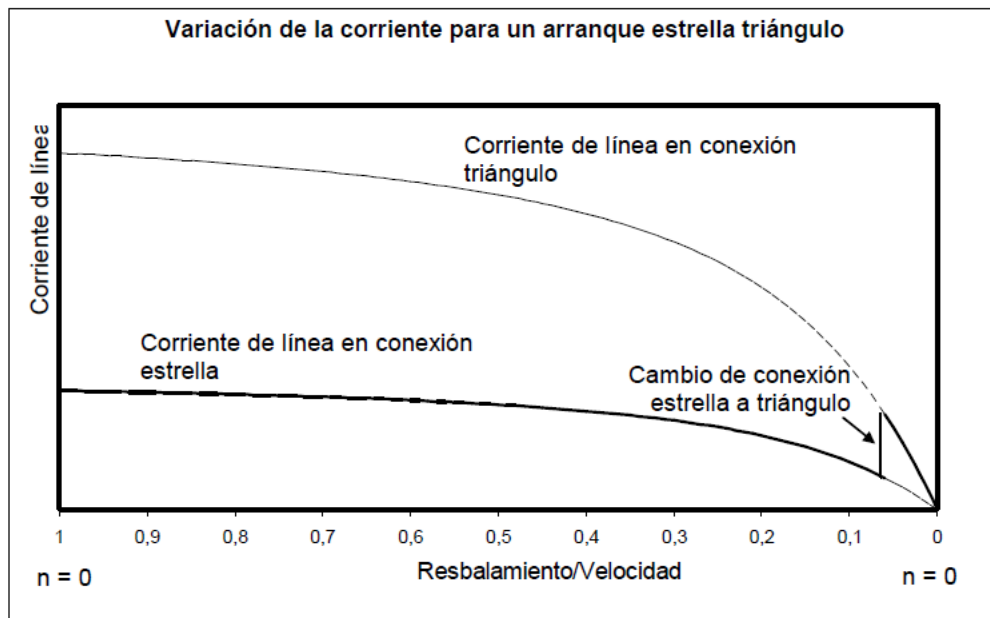


Fig. N° 2.21 b.- Variación de la corriente en un arranque estrella triángulo.

#### 2.1.9.4. Arranque por variación de la resistencia del rotor

Este método de arranque sólo se puede aplicar a motores de rotor devanado equipado con anillos deslizantes. Estos anillos van montados sobre el eje y están completamente aislados de este (ver figura N° 2.14). Como se comprueba fácilmente, al introducir una resistencia adicional en el devanado del rotor, se disminuye la corriente de arranque con relación a la corriente absorbida por el método de arranque directo.

Procedimiento: inicialmente introducir una resistencia adicional que haga que el par de arranque sea el máximo. Posteriormente, ir reduciendo la resistencia adicional hasta cero.

Este método presenta los siguientes inconvenientes:

- Aumenta el tiempo de arranque
- Es un método caro puesto que los motores de rotor devanado son más caros que los de jaula de ardilla.
- Aumentan las pérdidas debido a la potencia disipada en la resistencia adicional

## CAPITULO III

# PRUEBAS ELECTRICAS EN EL MOTOR ELECTRICO DE INDUCCION

### 3.1. Pruebas eléctricas no destructivas

Estas pruebas se llaman así por no afectar el estado del bobinado del motor durante su aplicación. Estas se aplican antes de realizar las pruebas eléctricas destructivas por ser primordiales para saber el estado eléctrico básico del motor.

#### 3.1.1. Prueba de resistencia óhmica

Esta prueba se basa en medir primeramente si existe o no continuidad entre bobinas para luego medir la resistencia óhmica, la cual no debe de variar más del 5 % ya que habría un desequilibrio

eléctrico el cual no se puede aceptar porque podría provocar una falla en el futuro.

Tenemos la disposición mostrada en la fig. N° 3.1 la cual representa las 3 fases del motor U - V - W.

Como podemos observar en la figura nosotros tenemos que medir la continuidad entre la misma fase, es decir,  $U_1$  con  $U_2$ ,  $V_1$  con  $V_2$ ,  $W_1$  con  $W_2$  respectivamente.

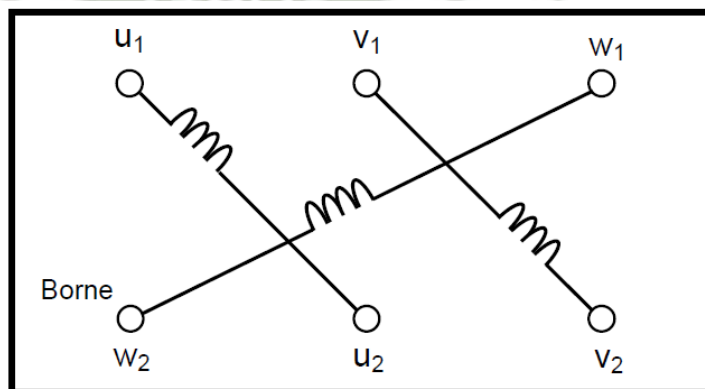


Fig. N° 3.1.- Disposición de fases de motor eléctrico.

Luego de haber comprobado la continuidad seguimos con la medición de resistencia óhmica. La resistencia la podemos medir entre cada bobina del motor, esto va a depender si la salida a la bornera cuenta con 3, 6, 9 cables de salida, los cuales son conectados en la bornera para hacer la conexión estrella o triángulo dependiendo de nuestra necesidad. Muchas veces a la bornera llegan solo 3 cables que representan las fases a energizar ya que la conexión la tienen internamente. Como normalmente no se sabe el

tipo de conexión tiene internamente se mide la resistencia óhmica entre fases, es decir,  $U - V$ ,  $U - W$ ,  $V - W$ .

Si nosotros tenemos más cables de salida podemos medir la resistencia de cada bobina o hacer la identificación de cada cable y hacer la conexión para proceder con la medición de fase a fase.

La medida de las 3 fases deben de ser similares y como mencionamos antes no superar el 5 % porque esto provoca un desbalance eléctrico.

### **3.1.2. Prueba de resistencia de aislamiento**

Al pasar de los años la resistencia de aislamiento de nuestro motor tiende a debilitarse por lo que es necesaria realizar esta prueba regularmente para saber si es necesario el mantenimiento o también poder saber si estamos en el caso de proceso reversible o no.

El proceso de medir una resistencia de aislamiento no es más que medir con un voltaje continuo al corriente resultante total. Esta corriente resultante viene a ser la suma vectorial de la corriente resistiva y capacitiva.

En estos años aun es una manera eficiente de medir la resistencia de aislamiento, tomando la corriente resistiva y capacitiva como factores a medir pero ya desde hace algunos años que la IEEE describe de 4 maneras de corrientes que vendrían a ser las mismas que medimos pero más disgregadas. Este es un muy buen aporte

para poder referir a un problema específicamente y ya no generalizar.

La corriente de fugas es clasificada según la IEEE como la suma de cuatro corrientes diferentes: a) corriente de fuga en la superficie ( $I_L$ ), b) corriente debida a la capacitancia ( $I_C$ ), c) corriente de conductancia ( $I_G$ ), d) corriente de absorción ( $I_A$ ). Un circuito equivalente de la corriente resultante total la mostramos en la figura 3.2.

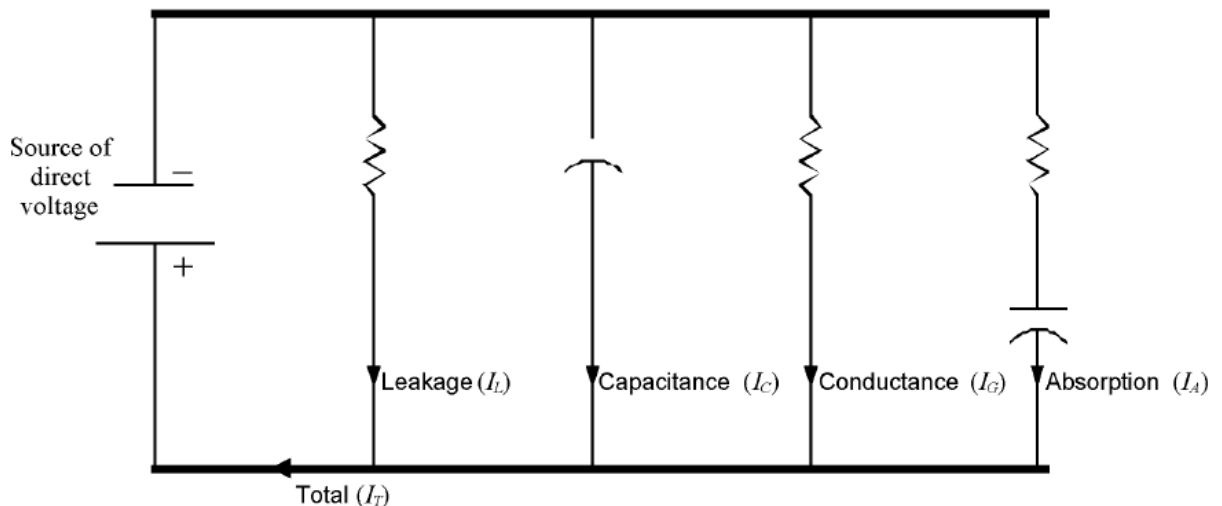


Fig. N° 3.2.- Circuito equivalente mostrando las cuatro corrientes medidas en una prueba de resistencia de aislamiento

- a) **Corriente de fuga en la superficie ( $I_L$ ):** Este tipo de corriente es continua en el tiempo, también inversamente proporcional a la resistencia de aislamiento, es decir si la corriente de fuga es muy alta la resistencia de aislamiento es muy baja. Esta corriente es consecuencia de la humedad, la grasa, el aceite o

algún otro tipo de sustancia que ayude a que haya un contacto falso entre el devanado y tierra del motor.

- b) **Corriente debida a la capacitancia ( $I_C$ ):** Es la corriente que toma la capacitancia, como su nombre lo dice, la que asume la geometría de la parte conductora. Esta no es de mucha consideración y no afecta en la medición, ya que empieza a desaparecer al cabo de un minuto y podemos asumir esto gracias a la siguiente formula.

$$I_C = \frac{E e^{-(t/RC)}}{R} \dots\dots\dots (F-3.1)$$

Dónde:

E = Tensión continua aplicada;

C = Capacitancia del espécimen;

R = Resistencia en serie total (es decir la resistencia interna del instrumento y la del circuito de medición);

t = Tiempo, de aplicación de la tensión "E"

- c) **Corriente de conductancia ( $I_G$ ):** Es la corriente debida a la conducción eléctrica o iónica que se da por el material aislante haciendo que haya fuga por el tipo de material usado.

d) **Corriente de absorción ( $I_A$ ):** También llamada corriente de polarización ya que depende de la polarización de los materiales impregnados, las moléculas de estos materiales tienden a ir en una dirección cuando se les aplica directamente corriente eléctrica, toma unos minutos que estas moléculas se reorienten y pueda reducir la corriente de fuga casi a cero.

➤ **Característica de la corriente resultante total**

Haciendo una comparación entre la resistencia de aislamiento o corriente total con el tiempo de la prueba podemos saber si los devanados están secos y limpios. Si los devanados están contaminados o húmedos la corriente será constante en el tiempo.

Podemos concluir que si los devanados están secos y limpios la corriente total tiende a reducirse con el tiempo, entonces la resistencia de aislamiento aumentaría dando como conclusión que el aislamiento se encuentra en buen estado.

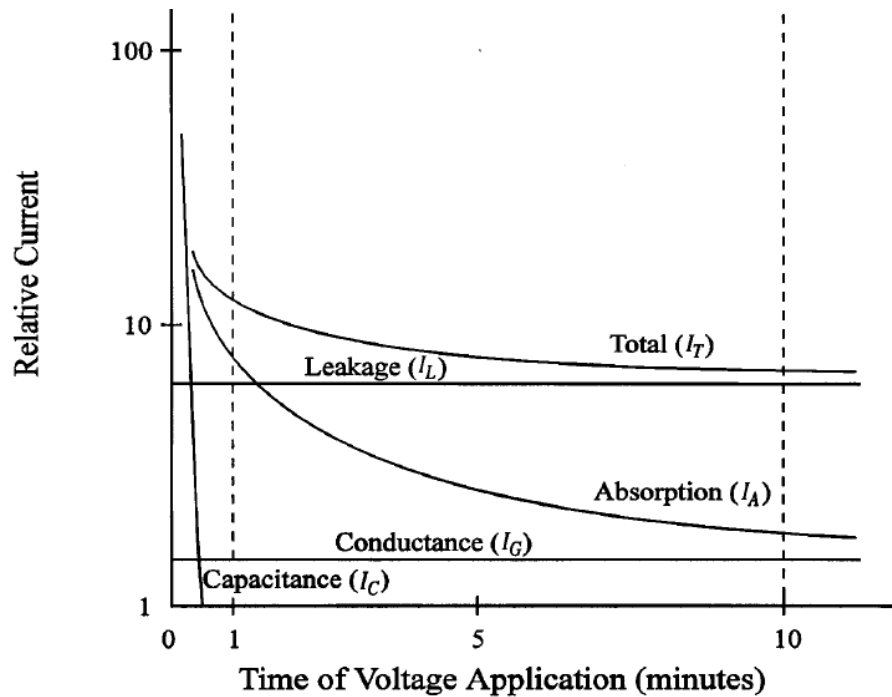


Fig. N° 3.3.- Tipos de corriente para un aislamiento

➤ **Lectura de la resistencia de aislamiento**

La prueba de resistencia de aislamiento consiste en la aplicación de voltaje en corriente continua y debe de estar restringido según el devanado del motor dependiendo de sus características eléctricas. Particularmente si se le aplica un voltaje alto a un motor de baja o si sus devanados están húmedos se estaría ocasionando la falla de aislamiento, es decir se estaría provocando la falla ya que este no estaría preparado para el alto voltaje o no tendría la resistencia suficiente como para soportar la carga de voltaje. La prueba de resistencia de aislamiento es

constante y varía de 500 hasta 10000 voltios dependiendo del voltaje de nuestra máquina, a continuación la tabla que nos recomienda la IEEE para realizar la prueba de resistencia de aislamiento.

Tabla N° 3.1.- Tabla de voltaje DC aplicado para la resistencia de aislamiento según IEEE 43-2000.

<b>VOLTAJE NOMINAL (V)</b>	<b>VOLTAJE DIRECTO DE APLICACIÓN PARA RESISTENCIA DE AISLAMIENTO (VDC)</b>
<1000	500
1000 – 2500	500 – 1000
2501 – 5000	1000 – 2500
5001 – 12000	2500 – 5000
>12000	5000 – 10000

Normalmente la resistencia de aislamiento aumenta rápidamente cuando recibe el primer voltaje y luego se normaliza hasta alcanzar un valor constante. En devanados secos la resistencia de aislamiento aumenta y es constante. En tipos de aislamiento antiguos es necesaria una medición por un lapso de 10 a 15 minutos como mínimo porque los materiales aislantes que fueron usados son de menor calidad. Podemos apreciar la clase de aislamiento en el siguiente cuadro. La clase de aislamiento eléctrico siguiente es dada por las normas UNE-EN 62114, 60085 y 60034-1.

Tabla N° 3.2.- Clase de aislamiento.

CLASE	TEMP. DE AISLAMIENTO	MATERIALES USADOS
Clase Y	90° C	Papel, algodón, seda, goma natural, Clorido de Polivinilo, sin impregnacion.
Clase A	105° C	Igual a la clase Y pero impregnado, mas nylon.
Clase E	120° C	Polietileno de teraftalato (fibra de terileno, film melinex) triacetato de celulosa: Enamel-acetato-polivinilo.
Clase B	130° C	Mica, fibra de vidrio (Borosilicato de alumino libre de alcalinos), asbestos: bituminizados, baquelita.
Clase F	155° C	Como los de la clase B pero con alkyd y resinas basadas en epoxy, poliuretano.
Clase H	180° C	Como los de clase B con algutinante resinoso de siliconas, goma siliconada poliamida aromatica (papel nomex y fibra), film de poliamida (enamel, varniz y film) y enamel de stermida.
Clase N	200 ° C	Como la clase B pero con aglutinantes inorgánicos apropiados (Teflon Mica, Mecanita, Vidrio, Ceramicos, Politetrafluoroetileno).
Clase R	220 ° C	Materiales a base de mica, vidrio, cerámica, poliamidas tipo Kapton.
Clase C	250 ° C	Materiales a base de cobinaciones de poliamidas como NKN.

Los materiales usados antiguamente son de clase Y y es necesario tener las consideraciones necesarias para este tipo de aislamiento.

Los materiales aislantes usados hoy en día son de clase F, H o C y estos tienden a obtener una resistencia de aislamiento constante a los tres minutos.

Cuando el devanado se encuentra sucio podemos darnos cuenta con facilidad ya que la medición nos da valores bajos (en  $K\Omega$ ).

### 3.1.2.1. Factores que afectan la resistencia de aislamiento

a) **Contaminación:** la suciedad es un factor importante, podemos encontrar dentro del motor aceite, grasa, carbón, lo cual es una molestia porque no nos permite una medición correcta e implicaría una mala toma de datos, hay que eliminar con cuidado todos estos factores que impiden un buen ensayo de pruebas para luego obtener resultados que realmente nos ayuden a diagnosticar el aislamiento del motor.

Si tenemos el motor montado, no podremos ver lo que tenemos dentro del motor, es decir no podemos apreciar aquellos factores que impiden una lectura adecuada por lo que si tuviéramos una lectura baja o incoherente no sabríamos exactamente cuál sería la causa.

Lo sugerido para tratar con esta suciedad es un lavado con agua o algún tipo de solvente dieléctrico, hay que tener en cuenta de

que no podemos lavarlo muchas veces porque esto debilitaría el aislamiento del motor, especialmente el agua.

**b) Humedad:** Es un factor muy importante ya que la humedad es la más influyente en lecturas de aislamiento, si existe humedad seguramente hay falso contacto y tendremos una baja medida de aislamiento o que tienda a cero. La humedad podría arruinar nuestro diagnostico desde el principio por lo que es la primera que hay que eliminar para obtener un buen ensayo de aislamiento. Para eliminar la humedad hay que secarlo al horno por un tiempo dependiendo de tamaño.

Hay que tener en consideración el clima en el momento de ensayo ya que influye mucho la humedad relativa que exista en ese momento.

**c) Temperatura:** La resistencia varia en una base exponencial con la temperatura, a medida de que la temperatura aumenta la resistencia de aislamiento cae. (F-3.2)

Describiéndolo simplemente la resistencia de aislamiento cae a la mitad por cada 10 °C que se incrementa la temperatura. Existe una temperatura base que es de 40 °C que se usa para comparar temperaturas, es decir, cuando tenemos una medición de 30 °C y una de 20 °C podemos compararlas llevándolas a la temperatura base de 40 °C.

Por ejemplo, la resistencia de aislamiento medida a 30 °C es de 5000 MΩ, si lo comparamos a la base de 40 ° C tenemos una lectura de 2500 MΩ.

$$R_c = \left[ (1/2)^{\left\{ \frac{(40-T)}{10} \right\}} \right] * R_t \dots\dots\dots(F-3.2)$$

Dónde:

$R_c$ = Resistencia de aislamiento a base 40°C

$R_t$ = Resistencia de aislamiento a la temperatura ambiente

$T$ = Temperatura ambiente a la cual se realizó la medición.

### 3.1.2.2. Condiciones de medición

Para una medición tenemos que tener en cuenta el registro de lecturas del motor como la temperatura del ambiente, humedad relativa, temperatura del devanado, tiempo de prueba, tipo de prueba de voltaje, tipo de conexión, es necesario convertir la resistencia de aislamiento a base de 40 °C para futuras comparaciones

#### a. Conexión para prueba

Hay que asegurar que las tres fases estén aisladas una de la otra y a tierra. Podemos comparar las fases y obtener el aislamiento

fase a fase. Si comparamos una fase a tierras las otras dos fases deben de ir a la misma tierra del estator. Cuando juntamos las tres fases podemos medir la resistencia de aislamiento de los devanados a masa.

Hay motores que tienen aditamentos externos como anillos rozantes, cables, switches, capacitores, aisladores de sobretensiones, transformadores de voltaje, si es el caso estos componentes influyen en la resistencia de aislamiento. Lo que se sugiere es retirar los aditamentos o llevarlos a tierra para que no intervengan en la medición.

#### **b. Método para la medición**

Para llevar a cabo la medición en esta prueba se puede realizar con un megóhmetro o también se pueden encontrar matemáticamente basándonos en la ley de ohm.

Megóhmetro. Es el instrumento de medición que se utiliza para medir resistencias de aislación eléctrica. Este instrumento provee uno o varios niveles de tensión de ensayo "E", que se seleccionan a voluntad, cuyos valores se deben mantener lo suficientemente estables durante el tiempo necesario para efectuar las mediciones. El valor de la resistencia de aislación medida, se lee directamente en la escala correspondiente.

**Aclaración:** Para ciertas mediciones, este instrumento se reemplaza por voltímetros, amperímetros adecuados, combinados con una fuente de tensión continua estabilizada.

$$R_{(t)} = \frac{E_{(t)}}{I_{(t)}} \dots\dots\dots (F-3.3)$$

Dónde:

$R_{(t)}$  = resistencia de aislamiento ( $M\Omega$ )

$E_{(t)}$  = voltaje (V)

$I_{(t)}$  = corriente ( $\mu A$ )

**c. Efecto de la magnitud de voltaje:** A medida que se aumenta el voltaje la resistencia de aislamiento debería de aumentar, si notamos que la resistencia decrece tenemos un problema y tenemos que parar para saber si es problema de contaminación en el devanado o si no estamos aplicando el voltaje recomendado.

**d. Efecto producido por mediciones con carga definida:** Este fenómeno se produce cuando se hace una medición y todavía se tiene los devanados con carga. No se puede hacer una medición porque habría un error de cargas residuales en el aislamiento. Muchas veces se comete el error de hacer una medición inmediatamente después de otra, es decir que no se espera a que se descargue los devanados.

Para asegurarnos que los devanados están completamente descargados podemos medir la corriente de descarga y tener la certeza de que no circula corriente alguna.

**e. Monitoreando la condición de aislamiento**

Las lecturas de resistencia de aislamiento se pueden comparar con lecturas anteriores, es bueno hacer un seguimiento de lecturas para saber cuánto fueron las lecturas anteriores y ser comparadas con las actuales. Para esto hay que tener las mismas condiciones de medición como temperatura del devanado, magnitud del voltaje, duración de la prueba. Si las temperaturas de lectura no es la misma se tiene que llevar a base 40°C.

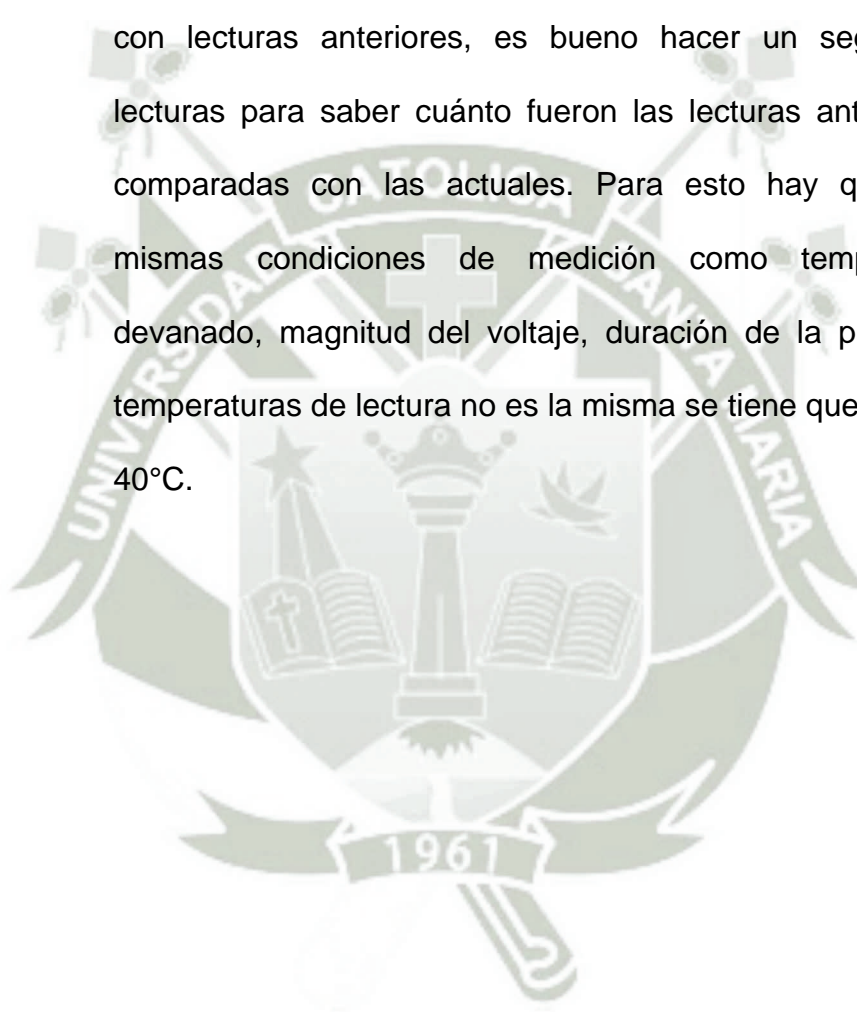


Tabla N° 3.3.- Resistencia de aislamiento mínimo recomendado para valores a 40°C según IEEE 43-2000.

RESISTENCIA MINIMA DE AISLAMIENTO (MΩ)	TIPO DE MUESTRA
$R_{\min} = KV + 1$	Para bobinados fabricados antes de 1970, para todos los bobinados de campo, y otros que no se mencionan abajo.
$R_{\min} = 100$	Para todas las armaduras y bobinados AC contruidos después de 1970 (en bobinados con platinas).
$R_{\min} = 5$	Para la mayoría de bobinados con alambre y platinas menores a 1 KV

**Nota:**

- $R_{\min}$  es la Resistencia mínima de aislamiento, en mega ohm y a 40 °C.
- KV es la tensión nominal de la máquina.

**Diferencia entre aplicar voltaje continuo o voltaje alterno**

Cuando aplicamos voltaje continuo entre el conductor ejemplar y tierra usamos un amperímetro para medir la corriente. La resistencia es determinada por:

$$R = \rho * L/A \dots\dots\dots (F-3.4)$$

**Dónde:**

- **R:** resistencia óhmica [ $\Omega$ ]
- **$\rho$ :** Resistividad del material [ $\Omega * mm^2/m$ ]
- **L:** longitud del conductor [m]
- **A:** sección del conductor [ $mm^2$ ]

Los valores de resistividad de la grasa, aceite y agua que a menudo contaminan los devanados de nuestras maquinas rotativas, la prueba de voltaje continuo en una máquina contaminada nos da como resultado un a alta corriente de fuga y como subsecuencia una baja lectura de resistencia de aislamiento.

Si el material de aislamiento utiliza alguna combinación de algodón o material parecido, este tiende a absorber la suciedad y tener una baja resistividad. Este tipo de materiales se usaron antes de 1970 y si aplicamos voltaje continuo este no podrá detectar este tipo de problemas.

Supongamos que usamos mica como material aislante (esta tiene teóricamente resistencia infinita), solo si hubiera un vacío debido a la inapropiada impregnación, deterioro térmico o por ciclos térmicos, el voltaje continuo lo detectaría sin problemas.

Cuando usamos voltaje alterno y es conectado entre el conductor ejemplar y tierra, la capacitancia del conductor domina sobre la corriente. La capacitancia es determinada por:

$$C = \varepsilon * A/d \quad \dots\dots\dots (F-3.5)$$

**Dónde:**

- **C:** capacitancia [ $\mu\text{F}$ ]
- $\varepsilon$ : permitividad dieléctrica del material [ $\mu\text{F} / \text{mm}$ ]
- **A:** sección del conductor [ $\text{mm}^2$ ]
- **d:** espesor del material [ $\text{mm}$ ]

La permitividad dieléctrica de un sistema de aislamiento y fuertemente afectado por la presencia de vacíos y agua, el voltaje alterno es más sensible que el voltaje continuo y podría detectar este tipo de falla.

Ambos tienen sus ventajas pero debido a que los materiales aislantes han cambiado desde la década de los 70's es que la prueba de voltaje alterno ha pasado a ser de segunda mano.

**3.1.2.3. Índices de Medición**

- **Índice de absorción dieléctrica (DAI):** El índice de absorción dieléctrica es la resistencia medida en un 1 minuto entre la resistencia medida a los 30 segundos, esta medida nos sirve para determinar de una manera rápida si la resistencia de aislamiento es buena o no, es decir nos da a conocer la tendencia de la curva si comparamos resistencia vs tiempo. Si la

tendencia de la curva es positiva podremos deducir que va por buen camino la resistencia de aislamiento.

$$DAI = R_{1min} / R_{30s} \dots\dots\dots (F - 3.6)$$

Tabla N° 3.4.- Condición de aislamiento según el índice de absorción dieléctrica según la IEEE 43-2000.

Condición de aislamiento	Proporción de la absorción dieléctrica
Peligrosa	< 1
Cuestionable	1.0 a 1.4
Buena	1.4 – 1.6
Excelente	> 1.6

- **Índice de polarización (PI):** Se define el índice de polarización (IP) como la relación entre la resistencia de aislamiento medida a 10 minutos y a 1 minutos después de aplicada una tensión continua de prueba. Durante esos 10 minutos el nivel de tensión deberá ser estable. El valor de la resistencia a tierra deberá crecer con el transcurso del tiempo.

$$IP = R_{10min} / R_{1min} \dots\dots\dots (F - 3.7)$$

Tabla N° 3.5.- Índice de polarización mínimo según la IEEE 43-2000

CLASE TERMICA DE AISLAMIENTO	IP MINIMO
CLASE A	1.5
CLASE B	2.0
CLASE C	2.0
CLASE D	2.0

El índice de polarización es un valor que nos informa sobre el estado de humedad y limpieza de la máquina, basado en la suposición de que transcurrido un cierto tiempo desde el comienzo del ensayo, la corriente de absorción se habrá anulado. Un valor bajo del índice de polarización nos indicará que existe una corriente alta de conducción o de fugas. Los valores del índice de polarización están muy poco afectados por la temperatura, por lo que salvo en condiciones en que la prueba se haya realizado a elevada temperatura (por encima de los 40°C) no necesitan corrección. Asimismo, en este sentido, debemos considerar que no se produce un cambio de temperatura importante durante el tiempo en que dura el ensayo.

### 3.1.3. Prueba de corrientes incrementales

Este método de ensayo responde a los mismos principios que los demás métodos presentados antes, ya que permite evaluar la aislación de un equipamiento a través de un ensayo no destructivo con corriente continua. Sin embargo, a diferencia de los otros métodos en los que se mide directamente el valor de la resistencia de aislación  $R_A$ , en éste se mide la corriente  $I_T$  total que toma una aislación.

El ensayo de tensión-corriente incrementales consiste en medir la corriente  $I_T$  a los "t" segundos" (por lo general a los 60 s) de aplicado el incremento  $\Delta E$  de la tensión continua de ensayo. En ningún caso la mayor tensión que se alcance debe exceder el valor de  $E_{m\acute{a}x}$  recomendado en la tabla 3.1, para el equipamiento bajo ensayo. Para esto es preciso disponer de un equipo de ensayo que posea una fuente estabilizada de alta tensión continua (cuyo valor de tensión de salida sea variable a voluntad) un micro amperímetro y un kilo voltímetro.

Se recomienda incrementar la tensión en escalones de valor  $\Delta E$  constante, para que durante la marcha de la experiencia se pueda observar si la corriente  $I$ , se incrementó excesivamente en relación a su aumento en el escalón de tensión inmediato anterior. El aumento ( $\Delta I_T$ ) desmedido de  $I_T$  indica la posible presencia de alguna falla

incipiente, que puede agravarse si se continúa aumentando la tensión de ensayo. De ser así, puede haber dos posibilidades:

- a) Detener rápidamente el ensayo;
- b) Continuarlo hasta poner en evidencia la falla.

Con los valores obtenidos se puede graficar la corriente  $I_T$  en función del tiempo para los distintos escalones de tensión, como se observa en la figura 3.4, aunque lo más común es graficar la corriente  $I_T$  en función de la tensión continua aplicada  $E$ , tal como se ve en la figura 3.5.

También, durante la realización del ensayo se pueden registrar los valores obtenidos en una tabla, en la que se consignen la tensión aplicada  $E$ , la corriente total medida  $I_T$  y la diferencia entre la corriente de un escalón y la del escalón inmediato anterior, que permite apreciar si entre un escalón y el que le sigue, la corriente se ha incrementado peligrosamente (ver tabla 3.6).

Se considera que la aislación está en buen estado si la pendiente de la curva  $I_T$  en función de  $E$  tiende a mantenerse constante al aumentar la tensión  $E$ , dentro de la gama de tensiones definida por  $E < E_{m\acute{a}x}$  (véase el ejemplo de la tabla 3.1. graficado en la figura 3.5)

El motor ensayado es de media tensión y tiene una tensión nominal de 4000 V

En cuanto a las precauciones de seguridad para aplicar este método, son válidas las indicaciones dadas anteriormente.

Tabla 3.6.- Ejemplo de Valores en el Ensayo de Tensión y Corriente Incrementales.

E (Kv)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
$I_T$ ( $\mu$ A)	0.1	0.5	0.9	1.3	2.4	3.9
$\Delta I_T$ ( $\mu$ A)	0.4		0.4	0.4	1.1	1.5

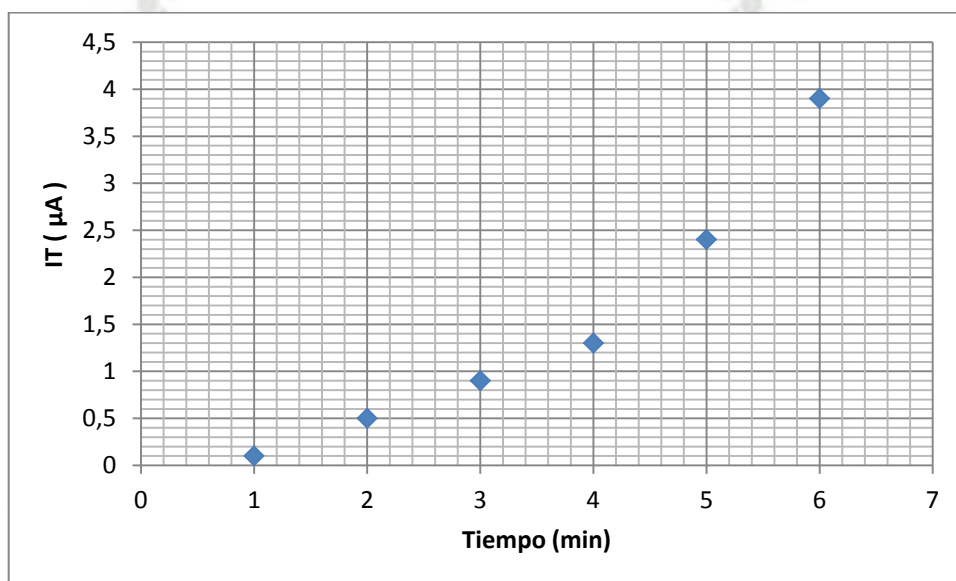


Fig. N° 3.4.-  $I_T$  en función del tiempo

Nota: A partir de los 2 kV se observan fuertes incrementos de la corriente que definen el punto crítico que puede poner en evidencia la existencia de alguna falla incipiente de la aislación.

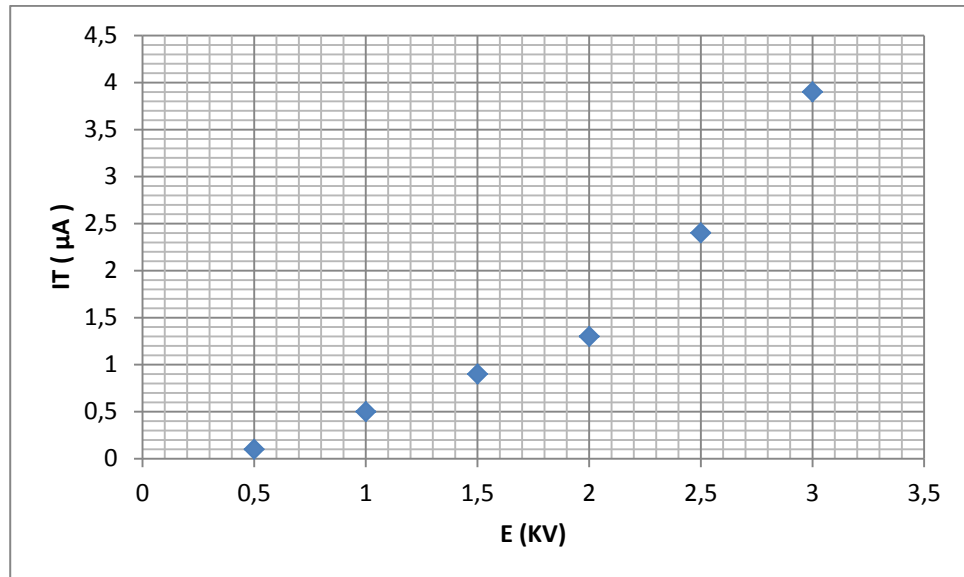


Fig. N° 3.5.-  $I_T$  en función de la tensión

#### 3.1.4. Prueba de simetría de fases

En la prueba de simetría de fases lo que se busca es saber si las bobinas están bien distribuidas, si se colocaron en el lugar correcto. Por lo general se aplica en la fabricación de bobinados para saber si fueron colocados en el lugar correcto, en bobinados ya hechos y que solo necesitan mantenimiento no es necesario hacer esta prueba a menos que se quiera encontrar una falla de fábrica.

La prueba se realiza con el rotor fuera del estator, el ensayo se hace en el estator y consiste en aplicar tensión pero solo en dos fases del rotor. Esto hará que se induzca corriente en las bobinas de estas dos fases más en la otra no, con una lina comprobamos si hay inducción (esto se muestra con vibración en la lina).

Por ejemplo, supongamos que el estator tiene 36 ranuras, tenemos que ir por todas las ranuras con la lana, una por una. En este caso como son 36 ranuras deberá ser 12 por fase, es decir que 24 debería vibrar si comprobamos con la lana y 12 no debería vibrar, pero esto no se da de manera continua sino que vibran 8 pertenecientes a 2 fases y 4 no vibran pertenecientes a la fase sin alimentación. Es decir tendría la siguiente simetría: 4-8-4 (4 no vibran, 8 vibran, 4 no vibran)

### **3.1.5. Prueba de campo inducido**

Para esta prueba necesitamos que el rotor este fuera del estator.

Se tiene que hacer la conexión normal del motor y suministrar energía al 20 y 30 % de la tensión nominal, esto dependerá del tamaño del motor eléctrico. Al suministrar esta tensión se generara un campo eléctrico producido por las bobinas del estator.

Con una jaula de ardilla de prueba se simulara el rotor, el estator tendrá que inducir corriente en toda su superficie y la jaula tendrá que girar en el mismo sentido en todo momento. De esta manera comprobamos que el campo que induce el estator es el correcto y que las bobinas fueron colocadas correctamente



Fig. N° 3.6.- Ensayo de campo inducido

### **3.2. Pruebas eléctricas destructivas**

Como su nombre lo indica, estas pruebas pueden afectar el estado del bobinado y hasta puede ocasionar daños irreversibles si se aplica sin tener las consideraciones necesarias para este tipo de pruebas.

#### **3.2.1. Prueba de hi-pot**

La prueba de hipot o de alta potencia demuestra que la pared de aislamiento a tierra de las bobinas pueden soportar un alto voltaje sin mostrar altas corrientes de fuga o sin quebrantar el material aislante.

La prueba de hipot es importante porque nos ayuda a determinar si hay alguna falla de aislamiento en el alambre.

La prueba consiste en aplicar un voltaje directo a los devanados de la máquina así como el megóhmetro pero más alto, según lo recomendado por Baker la tensión de aplicación será dos veces el voltaje nominal más mil voltios (Tabla N° 3.8).

En principio tiende a aplicar corrientes altas y podría mostrar el lugar de la falla, siempre y cuando no apliquemos una mayor tensión a la recomendada. Podemos apreciar la falla viendo cuidadosamente el bobinado y aumentando la tensión de aplicación hasta que el zumbido o el chisporroteo evidencie la falla.

Los niveles de tensión aplicados recomendados por IEC, ANSI, IEEE, y NEMA están basados en años de experiencia. La principal razón para aplicar esta sobretensión es que el aislamiento puede soportar condiciones que se pueden dar en su lugar de trabajo y no solo a la tensión a la que fue fabricada.

La IEEE recomienda aplicar 125 o 150 por ciento de la tensión de línea a línea y 1.7 veces la tensión alterna para pruebas de mantenimiento. Es decir que a la tensión nominal se le debe multiplicar por 1.25 o 1.5 y por 1.7.

Valores recomendados según:

Tabla N° 3.7.- Valores recomendados para ensayo de sobre tension  
según IEEE 95-1977.

<b>IEEE 95-1977</b>		
<b>V LINEA</b>	<b>VOLTAJE MINIMO DE PRUEBA <math>V_{\text{linea}} * 1.25 * 1.7</math></b>	<b>VOLTAJE MAXIMO DE PRUEBA <math>V_{\text{linea}} * 1.5 * 1.7</math></b>
480	1020	1224
575	1222	1466
600	1275	1530
2300	4888	5865
4160	8840	10608
6900	14663	17595
13800	29325	35190

Tabla N° 3.8.- Valores recomendados para ensayo de sobre tension  
según **BAKER INSTRUMENT**.

<b>BAKER INSTRUMENT</b>	
<b>V LINEA</b>	<b>EN SERVICIO</b>
	<b>2*E+1000</b>
480	1960
575	2150
600	2200
2300	5600
4160	9320
6900	14800
13800	28600

El ensayo puede ser alargado hasta un minuto según la IEEE 95 y grabar la corriente de fuga al minuto. La corriente de fuga varia en el tiempo de ensayo, esto se debe a que la corriente se estabiliza y si varia mucho es que el aislamiento es pobre o esta reseco.

Podemos tomar como dato final la medida hecha al minuto y el pico de corriente de fuga para tener un registro de la prueba y para futuras comparaciones.

Cuando evaluamos un motor electrico realizando pruebas estáticas esperamos obtener.

- a) Elevada rigidez dielectrica
- b) Capacidad de conservar las propiedades de aislamiento.

La vida esperada según normas del sistema de aislamiento son de 100 000 horas a temperatura maxima según la clase de aislamiento.

Podemos consideras 3 tipos de prueba de hipot:

- a) **Prueba de hipot convencional:** con esta prueba podemos llegar de manera rapida a la tension de prueba pero sabemos que es una prueba destructivas asi que nos arriesgamos usandola, podemos tener la certeza de usarla cuando la aplicamos a debanados nuevos.
- b) **Prueba de hipot tipo rampa:** de la misma manera hecha para un ensayo de aislamiento, este nos permite elevar el voltaje de manera mas lenta dependiendo de la persona que hara el ensayo. Permitiendo identificar las fugas de corriente en la superficie sin necesidad de llegar a un nivel critico.
- c) **Prueba de hipot tipo escalon:** esta prueba es menos estresante que las anteriores ya que nos permite avanzar de manera escalonada, es decir que nos permite avanzar de una manera lenta y segura. Esto tambien permite que las fugas de corriente se estabilicen. Por ejemplo: si la tension de aplicación es de 2000 voltios y el tiempo de prueba de 60 segundos, podemos dividir

2000 entre 15 segundos y obtenemos 4 divisiones de 500 voltios, los cuales tenemos que aplicarlos en un lapso de 15 segundos.

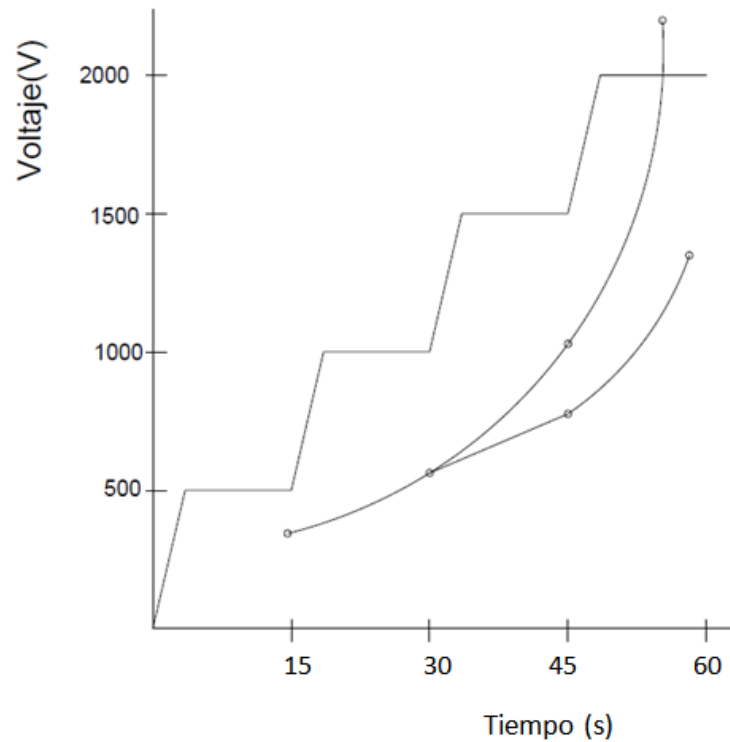


Fig. N° 3.7.- Grafico de tipos de prueba de hipot

### 3.2.1.1. Principio y consideraciones de la prueba hipot

Esta prueba solo evalúa el aislamiento entre conductores y la pared de la ranura del núcleo estatorico. Provee información valiosa de la fuerza dieléctrica del aislamiento. La prueba solo analiza la rigidez dieléctrica con la que cuenta el aislamiento del alambre usado y de otros aislantes ajenos al alambre.

No detecta fallas entre vueltas, espiras o cortos electricos.

Se recomienda que el debanado este seco y limpio antes de iniciar la prueba, ademas la carcaza del estator debe estar aterrada.

Los aditamentos externos al motor como RTD's o algunos sensores deben ser aterrados.

Si observamos una corriente de fuga muy alta seguramente esta escapando corriente y tendríamos que detener el ensayo ya que si continuamos podriamos averiar aun mas la falla.

### **3.2.2. Prueba de pulsos (surge)**

La prueba de pulsos es muy importante ya que el 80 % de todas las fallas en motores electricos comenzara entre las espiras de los devandos del estator o a causa de pobre aislamineto. Durante la prueba de pulsos, el equipo de prueba cargara un condensador el interior de la unidad y se descargara sobre la fase del motor, mientras mantiene las otras dos fases a tierra.

La pruba de pulsos es realizada para detectar daño de aislamineto entre espiras. Este tipo de problemas no puede ser detectado de otra manera mas que por la prueba de pulsos.

La prueba consiste en aplicar por un corto tiempo pero alta corriente de pulso a los devanados. Este rápido tiempo de aplicación del impulso inducirá según la ley de Lenz una diferencia de voltaje entre las espiras adyacentes dentro de los devanados.

Si el aislamiento entre dos espiras de alambre esta dañado o de alguna manera debilitado y si la diferencia de voltaje entro las espiras es suficientemente alta, habra un arco entre las espiras.

### 3.2.2.1 Teoría de la prueba de pulsos

Como mencionamos antes unos cortos pero altos pulsos de corriente son aplicandos a la bobina durante la prueba de pulsos para crear una gradiente de voltajes a travez de toda la longitud del alambre del devanado. Este gradiente produce una tension de voltaje momentanea entre vueltas. Los debandos tienden a responder a los pulsos con un zumbido observado en el osciloscopio.

La forma de onda que se observa durante el ensayo esta relacionado directamente con la inductancia de la bobina (hay otros factores pero el principal es la inductancia (L)). La bobina se convierte en un circuito L-C ya que el equipo de pulsos esta compuesto internamente por un capacitancia (C).

La inductancia es determinada por el número de vueltas en un devanado y el material usado en el conductor. La diferencia de la onda es determinado por la siguiente fórmula:

$$Frecuencia = \frac{1}{2*\pi*\sqrt{L*C}} \dots\dots\dots(F - 3.8)$$

Una prueba de pulsos puede detectar una falla entre vueltas debido al pobre aislamiento. Si el potencial es mucho mayor que el de la rigidez dieléctrica del material aislante, una o mas vueltas pueden ponerse en corto. En efecto de esto resulta que la bobina se reduce, si la bobina se reduce sus vueltas también y por ende la inductancia. Comparando con la formula, si la inductancia baja la frecuencia aumenta.

El voltaje tambien es reducido debido que depende también de la inductancia de la bobina:

$$\text{Voltaje} = L * \frac{di}{dt} \dots\dots\dots(F - 3.9)$$

Una reducción de inductancia ocurre cuando hay fallas entre vueltas, fase a fase, malas conexiones, conexiones abiertas.

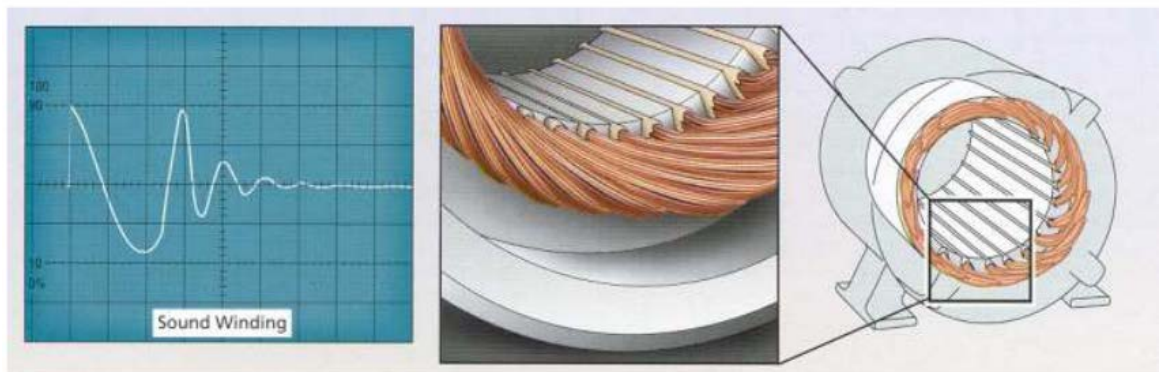


Fig. N° 3.8.- Onda de prueba de pulsos.

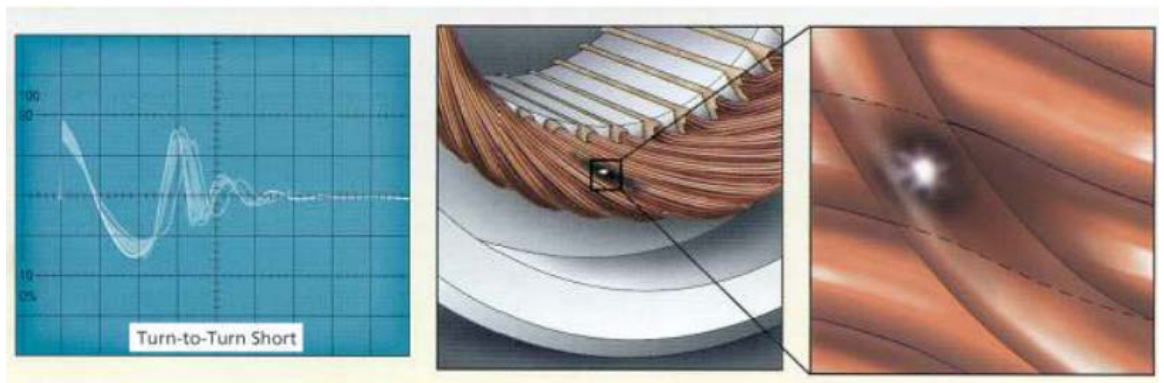


Fig. N° 3.9.- Corto entre espiras.



## CAPITULO IV

### CAUSAS PRINCIPALES DE FALLAS ELÉCTRICAS

#### 4.1. Calidad de alimentación

La calidad de la potencia se refiere a la condición de la señal de voltaje y corriente, dentro de los mecanismo que pueden desmejorar la calidad son las cargas monofásicas y trifásicas no lineales, variadores de frecuencia, equipos de arranque o de frenado, los picos de voltaje. Cualquiera de estos puede causar armónicos sobre el sistema de distribución el cual puede resultar en el sobrecalentamiento del sistema de aislamiento.

Cuando lo voltajes de fase no son iguales, las corrientes de secuencia negativa son introducidas en los devanados. Estas corrientes producen un flujo rotatorio opuesto al flujo del motor. A consecuencia de esto se reduce el par del motor y la temperatura aumenta disminuyendo el aislamiento del motor.

Cuando el desequilibrio de voltajes supera el 1% (NEMA MG-1) es mejor parar la máquina y no ponerla en funcionamiento.

Cuando un motor está operando por debajo de la tensión nominal habrá cambios ligeros y otros drásticos. Si nosotros suministramos voltaje menor al nominal la corriente aumentara para mantener el par del motor. Esto es preocupante ya que la corriente no puede exceder el límite de corriente nominal del motor. Si la corriente excede el valor nominal la temperatura de motor aumentara y esto dañara el sistema de aislamiento.

En cambio cuando el voltaje es alto teóricamente la corriente debería de disminuir pero no siempre sucede esto. El alto voltaje tiende a saturar la parte magnética y esto hace que se presente una corriente magnética que polarizará rápidamente el hierro más allá de lo normal.

Consecuencias del voltaje:

- a) La eficiencia a plena carga cae con el alto o bajo voltaje
- b) El factor de potencia mejora con el bajo voltaje y cae con el alto voltaje.
- c) La corriente de arranque aumenta con el alto voltaje

La mejor eficiencia en los motores eléctricos la encontraremos trabajando con el voltaje nominal.

La presencia de armónicos también es muy importante porque estas nos producen pérdidas eléctricas y disminuirán la eficiencia del motor.

Pongamos el ejemplo de cargas lineales que presentan esencialmente impedancia constante durante el ciclo de voltaje suministrado, esta presenta una onda de corriente proporcional al voltaje en toda la onda sinusoidal (ver figura N°4.1)

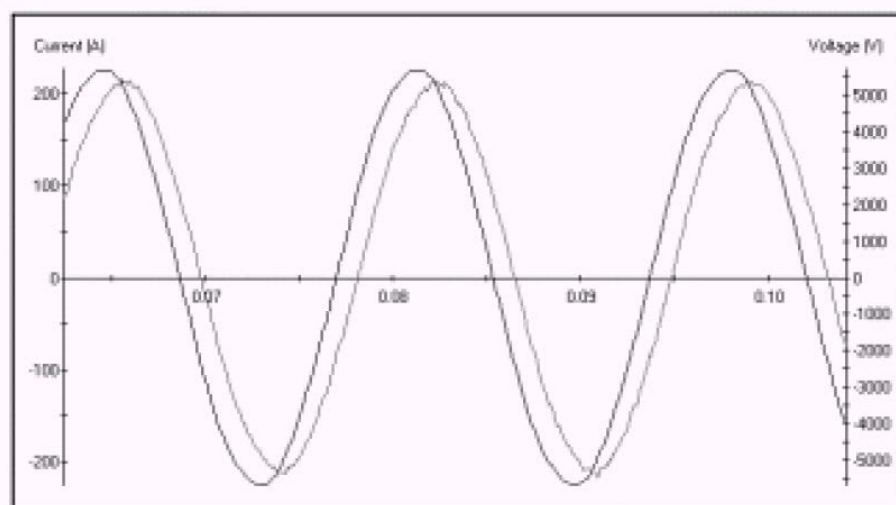


Fig. N° 4.1.- Onda de corriente proporcional al voltaje.

Mientras que en las cargas no lineales se muestra una corriente discontinua o cuya impedancia varía a través de todo el ciclo de la entrada de AC (ver figura N° 4.2), algunos ejemplos de cargas no lineales son las luminarias electrónicas, motores DC.

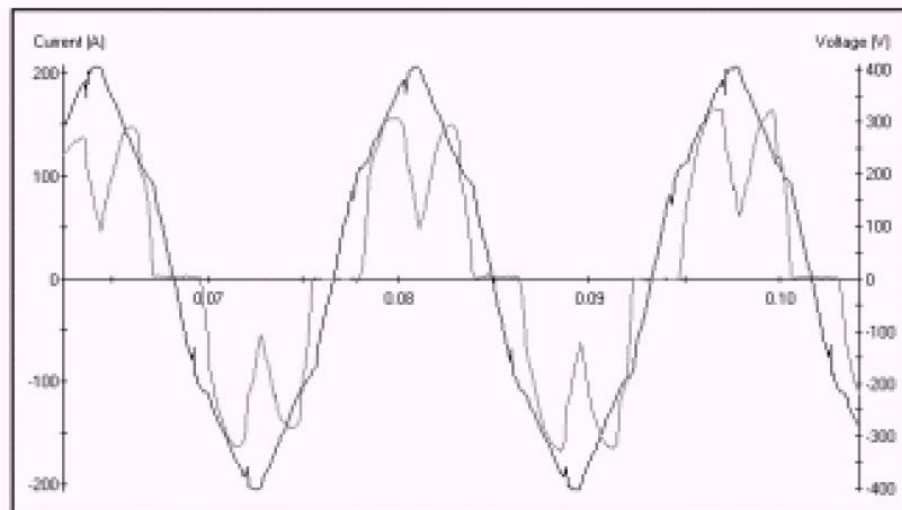


Fig. N° 4.2.- Corriente discontinua, efecto de armónicos.

Ambos armónicos pueden provocar altas temperaturas en el motor.

Por lo general no hay la necesidad de liberar los armónicos si la distorsión de voltaje no excede los límites establecidos por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) del 5 % de la armónico total y el 3 % para cualquier armónico individual. Los problemas de calentamiento se muestran cuando los armónicos alcanzan del 8 al 10 % a más y debemos corregir esta distorsión para alargar la vida del motor.

## 4.2 Circuito de potencia

Circuito de potencia refiere a todos los conductores y conexiones que existen desde las barras que suministran la potencia hasta los terminales del motor. Estos pueden incluir interruptores, fusibles, contactores, protección contra sobre carga, seccionadores y

borneras. En 1994 un estudio en un sistema industrial de distribución encontró que las condiciones y los conductores fueron causa del 46 % de las fallas que reducían la eficiencia del motor. Muchas veces nuestro motor se encuentra en buen estado de funcionamiento y es alimentado con un circuito defectuoso, causando problemas como desequilibrio de voltaje y de corrientes. Cuando estos problemas se hacen severos se requiere de corrientes mayores para sostener la potencia de salida provocando el aumento de temperatura y produciendo daños en el aislamiento.

Altas resistencias por las conexiones del circuito provocan desbalance en el voltaje terminal del motor y como consecuencias ya antes mencionadas como la pérdida de torque haciendo suministrar mayor corriente y esto ocasiona un daño prematuro del motor y además el pago de potencias en kilovatios-hora consumidos y quizás hasta una penalización.

Una entrega de potencia desequilibrada nos resulta:

- a) Un desequilibrio de voltaje nos puede causar un desequilibrio de corriente del 6-7 %, según la Asociación Servicio de Aparatos Eléctricos (EASA).
- b) Un desequilibrio de voltaje del 3.5 % puede aumentar la temperatura de los devanados en un 2.5 %, según el instituto de investigación de potencia eléctrica (EPRI).

- c) Un incremento de  $10^{\circ}$  C de la temperatura en los devanados puede ocasionar una reducción del 50 % de la vida útil del motor.

Mientras mayor sea el desequilibrio de voltaje, mayor la temperatura en los devanados y por lo tanto el motor fallará pronto. Los estándares NEMA recomiendan un desequilibrio del 1 % (MG 1-12.45)

Entonces concluimos que una alta resistencia en el sistema de distribución provoca desequilibrio de voltaje y de corriente, los cuales reducen significativamente la potencia de operación. Si el motor es alimentado con unos circuitos defectuosos, esto produce corrientes de secuencia negativa y en tanto los problemas se hacen más severos la potencia suministrada causará recalentamiento en los componentes adyacentes, daños en el rotor, en el estator, en el aislamiento, disminución de la vida del motor, pérdida de eficiencia.

#### **4.3. Condición de estator**

La falla en el estator se puede considerar uno de los principales ya que debido al desafío significativo en detección de fallas tempranas y la prevención de la falla del motor alrededor del bobinado del estator. Este se intensifica más en máquinas de voltaje más alto, donde el

daño a tiempo de paro se convierte mucho más corto, además que si el fallo llegase a darse sería mucho más costoso en su reparación.

Las fallas que se pueden dar en los bobinados del estator son:

- a) Corto espira-espira
- b) Corto fase-fase
- c) Corto espira tierra

Un corto entre espiras podría ocurrir con una impedancia más alta, permitiendo que el motor funcione durante un periodo extenso de tiempo antes que se destruya el arrollamiento por las corrientes altas. No es normal que encontremos motores con arrollamiento al azar ya que estos deben ser similares, la forma del enrollado no muestra una alta impedancia en la espira, por lo tanto se calentara rápidamente continuando con el corto entre espiras.

Un corto entre fases es identificado como un corto entre una o más fases entre sí, esta puede significar un fallo total debido al potencial de voltaje.

La meta de cualquier tecnología es identificar cualquier condición que conduzca a estas fallas para que puedan ser corregidas. Si estas fallas con corregidas se puede esperar una mayor vida del motor.

Las fallas en el estator con frecuencia terminan como un corto entre espiras, pero empiezan como otra cosa. Un ejemplo de esto es cuando un motor produce bastante vibración, esto produce

movimiento en el devanado, fricción y desgaste del aislante y posteriormente un corto entre espiras. Otro ejemplo es el de un rotor defectuoso el cual generara un calor intenso en la superficie del devanado debilitando el aislante del alambre.

#### 4.4. Condición del rotor

De las misma manera que el estator, fallas en el rotor pueden ocasionar daños catastróficos en el motor. Encendiendo un motor con barras rotas causara calor excesivo alrededor de las barras rotas y puede destruir el aislante alrededor de las placas o laminaciones. Además este calor puede afectar a los devanados del estator ya que estos no pueden resistir el calor generado por las barras rotas. Es difícil determinar si hay barras rotas si no se cuenta con la tecnología. Muchas veces se llega a un mantenimiento preventivo, haciendo cambio de rodamientos o hasta un rebobinado del estator siendo el problema de las barras rotas y cuando vuelve al servicio sigue con los mismos problemas.

##### *Prueba de influencia del rotor*

Un método para probar la condición del rotor es la prueba RIC (chequeo de influencia del rotor), el cual muestra un acople magnético entre el rotor y el estator, es decir que esta relación indica la condición entre el rotor y el entrehierro.

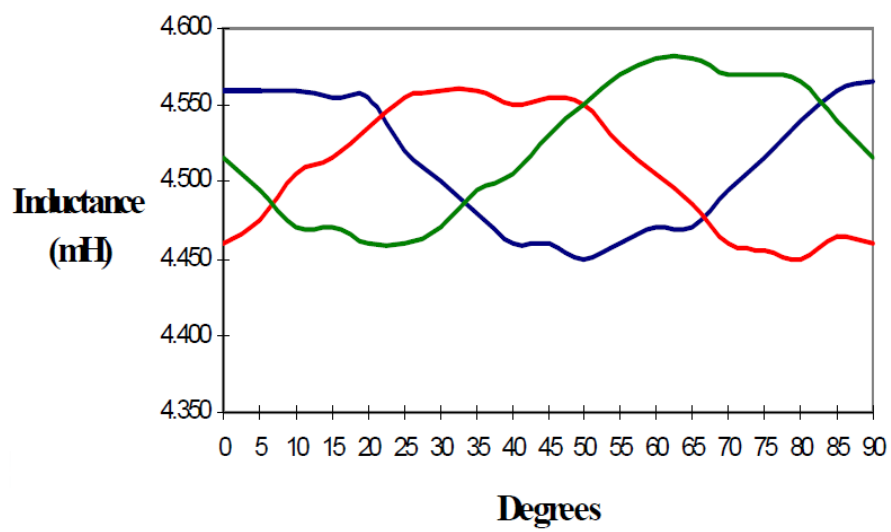


Fig. N° 4.3.- Ondas de un rotor con muestra de barras rotas.



La figura N° 4.3 muestra los cambio de inductancia en un rotor de barras rotas que causan un quiebre en el campo magnético generado alrededor de las barras rotas mientras que la figura N° 4.4 vemos que la inductancia no tiene una gráfica errática ni quebradiza.

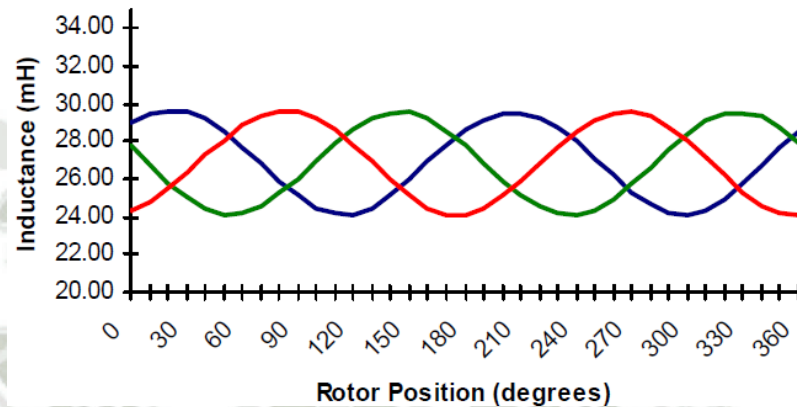


Fig. N° 4.4.- Ondas de un rotor con ninguna barra rota.

Otro método para evaluar la salud del rotor es el de arranque encendido. Las barras rotas crean una alta impedancia al rotor en el arranque, esta impedancia se refleja en el estator produciendo una caída de torque y de corriente (ver figura N° 4.5).

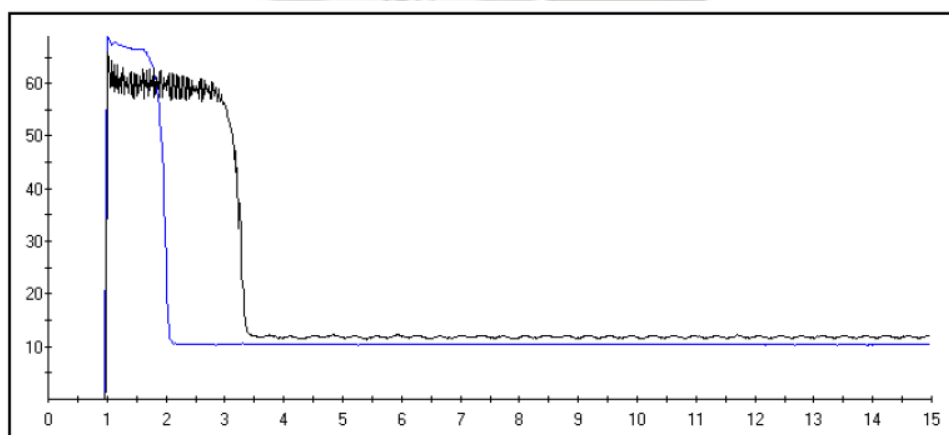


Fig. N° 4.5.- Caída de torque y corriente en arranque de motor con barras rotas

Si tenemos el motor desmontado es muy fácil determinar si hay o no barras rotas. Con un growler se induce tensión sobre las barras, si están vibran es porque está cerrando circuito y pasando tensión mientras si no vibrase sería porque la barra estaría rota y no puede cerrar circuito (figura N° 4.6).

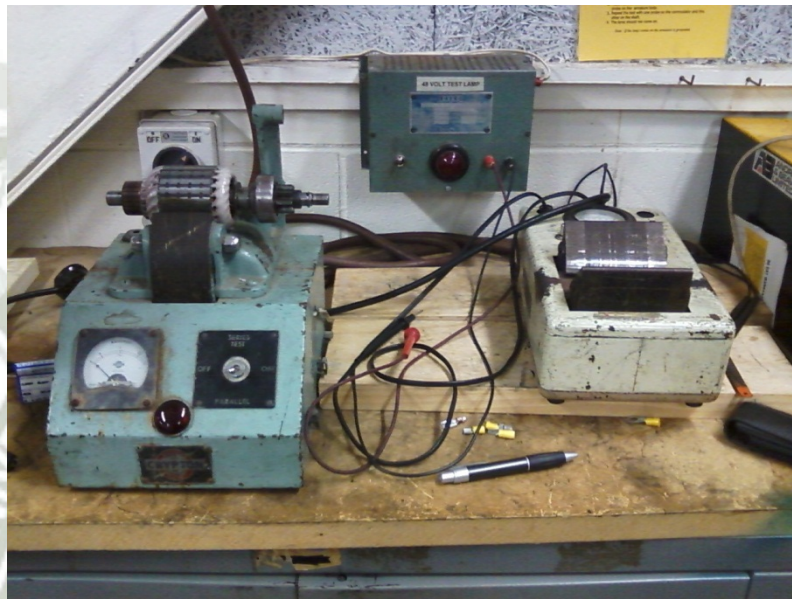


Fig. N° 4.6.- Growler para ensayo de barras rotas.

#### **Origen de fallas en el rotor**

- Desbalance de cargas mecánicas en el rotor
- Condición de rodamientos
- Mal montaje de rodamientos
- Deformación del eje
- Excentricidad del rotor
- Efectos de sobrecarga
- Desbalance en la alimentación de tensión
- Entrehierro asimétrico

#### 4.5. Entrehierro

La zona del entrehierro es el espacio que existe entre el rotor y el estator, cuando el espacio entre estos no es uniforme se produce una excentricidad. Debido a esta excentricidad se produce variación en el flujo magnético creando un desequilibrio en el flujo de corriente, existen dos tipos de excentricidades:

- a. Excentricidad estática: ocurre cuando el centro del eje no está en el mismo lugar que el centro del eje del estator. Un ejemplo cuando tenemos una fuerza constante radial al eje.
- b. Excentricidad dinámica: ocurre cuando el eje del rotor está en constante desalineamiento con el eje del estator, es decir oscilando en el centro y fuera de este. Un ejemplo claro es cuando el rodamiento está desgastado.

La excentricidad en el entrehierro desarrollara un desbalance de flujo magnético entre el estator y el rotor durante la operación. Este desbalance hará que se incrementen las vibraciones, desgaste mecánico y posiblemente rozamiento entre el rotor y el estator.

En la figura N° 4.7 apreciamos de manera exagerada la excentricidad.

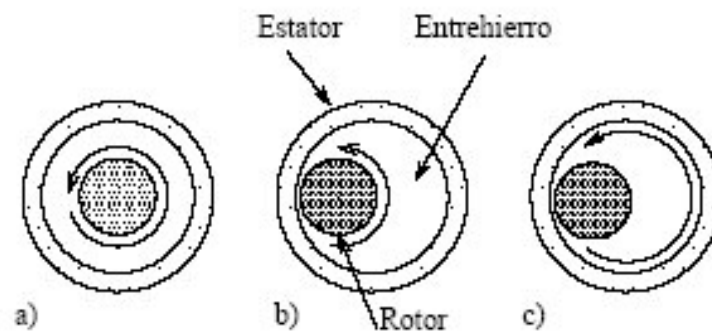
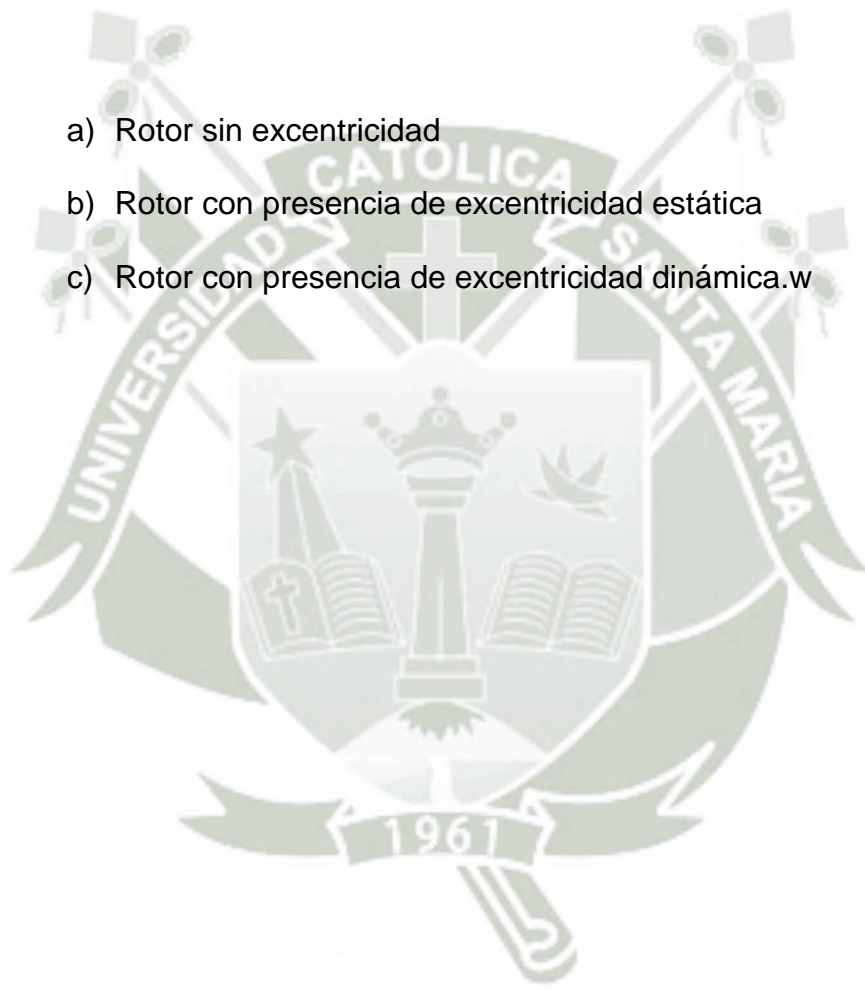


Fig. N° 4.7.- Tipos de excentricidad.

- a) Rotor sin excentricidad
- b) Rotor con presencia de excentricidad estática
- c) Rotor con presencia de excentricidad dinámica.w



## CAPITULO V

### ENSAYO DE MOTOR ELÉCTRICO DE INDUCCIÓN

#### 5.1. Introducción

El motor ensayado es un motor asíncrono, al cual se le evaluará, se le hará un análisis y posterior diagnóstico.

El motor será evaluado con las pruebas redactadas en esta investigación, además se mostrarán los datos del motor y datos del ensayo aplicando los diferentes instrumentos que sean necesarios.

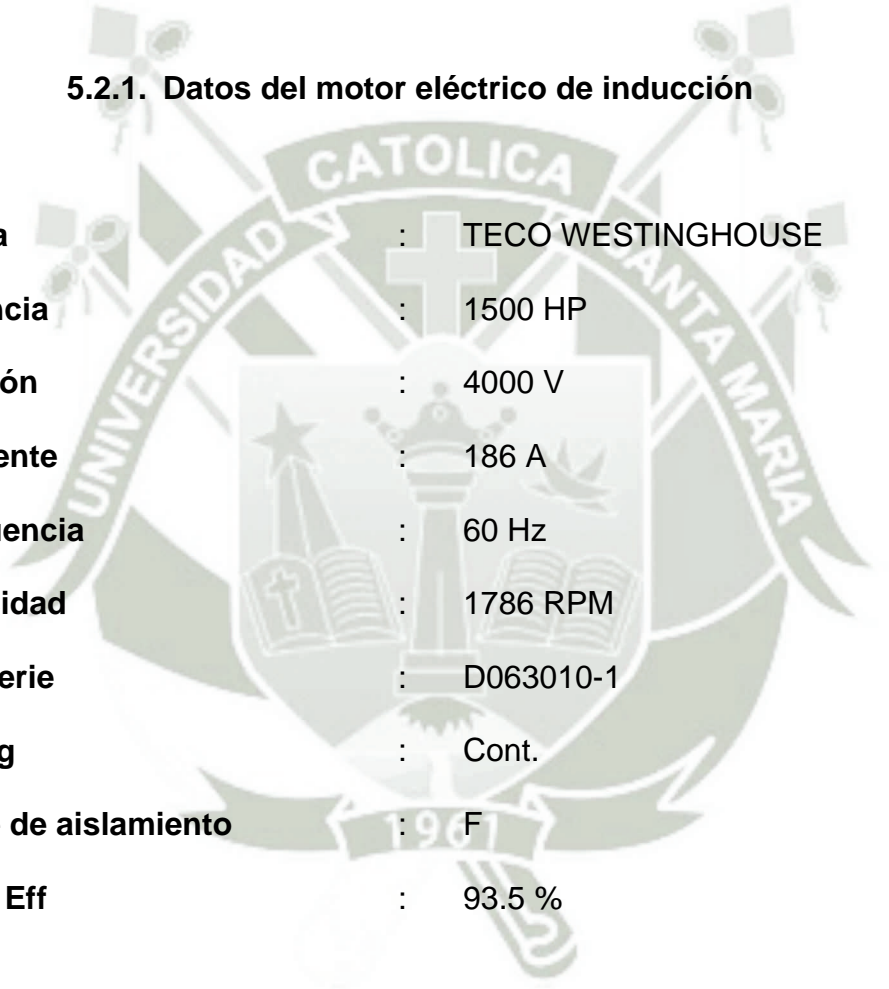
La finalidad del ensayo es aplicar las pruebas eléctricas, con lo que ayudaremos a la mejor comprensión de la teoría de la investigación.

Saber cómo es que se aplica en muchos talleres de mantenimiento y hacer más eficiente el trabajo en estos aplicando nuevas técnicas y estándares para la mejor evaluación en motores eléctricos de inducción.

## 5.2. Pruebas reales estáticas y en vacío del motor de inducción

Estas pruebas se basan en análisis estáticos y dinámicos de un motor de media tensión. A medida que vamos avanzando se va explicando que prueba se está haciendo y en qué momento del proceso.

### 5.2.1. Datos del motor eléctrico de inducción



<b>Marca</b>	:	TECO WESTINGHOUSE
<b>Potencia</b>	:	1500 HP
<b>Tensión</b>	:	4000 V
<b>Corriente</b>	:	186 A
<b>Frecuencia</b>	:	60 Hz
<b>Velocidad</b>	:	1786 RPM
<b>No. Serie</b>	:	D063010-1
<b>Rating</b>	:	Cont.
<b>Clase de aislamiento</b>	:	196 F
<b>Nom. Eff</b>	:	93.5 %



- b) Luego viene el proceso de desmontaje siguiendo con las **pruebas después de desmontaje**.
- c) Continúa el proceso **de lavado, horneado, barnizado y nuevamente horneado**.
- d) Se inicia el proceso de montaje, para seguir con las **pruebas después de montaje**.
- e) **La pruebas finales** o pruebas dinámicas se dan cuando el motor está en movimiento y por un periodo de una hora

#### Actividades a realizar

##### Estator

- Limpieza del bobinado con detergente dieléctrico.
- Tratamiento térmico (Horneado por 36 Horas).
- Pruebas evaluación Mecánicas – Eléctricas de componentes y Piezas.
- Tratamiento térmico previo para Barnizado (Horneado por 12 Horas).
- Barnizado de superficie.
- Tratamiento térmico posterior al Barnizado (Horneado por 16 Horas).
- Pruebas evaluación Eléctricas de Liberación para Montaje.

### **Rotor**

- Pruebas previas de evaluación Mecánicas – Eléctricas (Rotor de la jaula de ardilla) de componentes y Piezas.
- Limpieza.
- Tratamiento térmico (Horneado por 36 Horas).
- Pruebas de evaluación Mecánicas (Control de medidas de ajuste de eje) – Eléctricas (Rotor de la jaula de ardilla) de componentes y Piezas posterior a la limpieza y liberación para montaje.
- Balanceo dinámico.

### **Adicional**

- Instalación de rodamientos: (1) 6330 M, (1) 6326 M/C3.

### **5.2.3. Evaluación**

En la evaluación se hace eléctrica como mecánicamente, ambas son mejor descritas en su proceso.

#### **5.2.3.1. Evaluación eléctrica**

La evaluación eléctrica consta de algunas pruebas ya descritas en la investigación, las cuales nos ayudaran a dar un diagnóstico del estado eléctrico del motor de inducción.

### 5.2.3.1.1.- Pruebas Estáticas

#### A. Antes del Desmontaje – Prueba inicial

Antes de proceder con el desmontaje de los componentes y piezas del motor, se realizó la prueba inicial para obtener un primer diagnóstico del estado del motor:

#### Prueba N° 01.- Resistencia de Aislamiento.

CONDICIONES DE PRUEBA			
Equipo Utilizado		Condiciones Ambientales	Conexión
<b>Tipo</b> :	Megóhmetro	<b>Temp.</b> : 25.9 °C	-
<b>Marca</b> :	MEGABRASS	<b>Ambiente</b>	

Tabla N° 3.1: Directrices para voltajes de corriente continua que se aplicarán durante la prueba de resistencia de aislamiento.

Tensión nominal del motor (V)	Tensión continua de ensayo de resistencia de aislación (V)
<1000	500
1000-2500	500-1000
2501-5000	1000-2500
5001-12000	2500-5000
>12000	5000-10000

VALORES OBTENIDOS					
TENSION DE PRUEBA 2500 VDC					
Bornes de prueba	AISLAMIENTO (GΩ)			DAI	PI
	TIEMPO (min)				
	0,5	1	10		
L <sub>1</sub> vs L <sub>2</sub> vs L <sub>3</sub> vs masa	6.39	11.9		1.88	

La medida de resistencia de aislamiento se encuentran dentro de los valores aceptables, según norma ANSI/IEEE Std. 43 – 2000, IEC60085-01.

Aplicamos la resistencia por 1 minutos, como vemos los valores están dentro de los establecidos y no es necesario seguir hasta los

10 ya que para eso encontramos el DAI que nos ayuda con el diagnóstico rápido del estado del motor.

### B. Después del Desmontaje

Pruebas estáticas completas para dar un diagnóstico a detalle del estado del motor, determinándose lo siguiente:

#### Prueba N° 02.- Resistencia óhmica.

CONDICIONES DE PRUEBA			
Equipo Utilizado		Condiciones Ambientales	Conexión
<b>Tipo</b> :	Microhmimetro	<b>Temp.</b> :	-
<b>Marca</b> :	AEMC	<b>Bobinado</b> :	

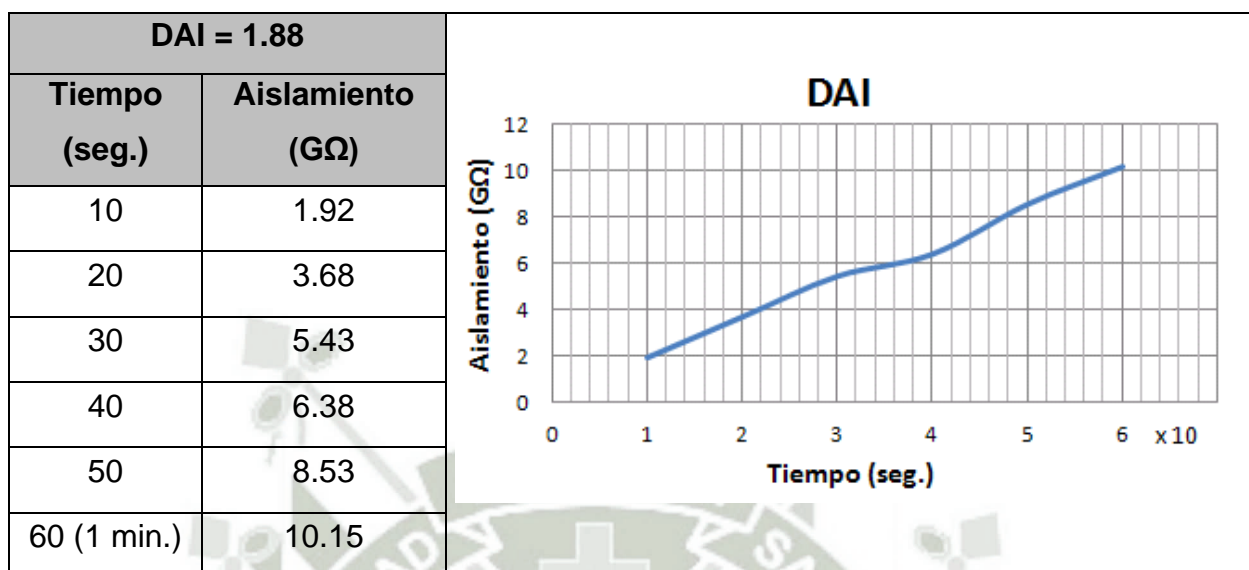
VALORES OBTENIDOS	
Bornes del Estator Principal	Resistencia Óhmica (mΩ)
L <sub>1</sub> – L <sub>2</sub>	83.8
L <sub>2</sub> – L <sub>3</sub>	83.7
L <sub>1</sub> – L <sub>3</sub>	83.9

**Prueba N° 03.- Resistencia de aislamiento**

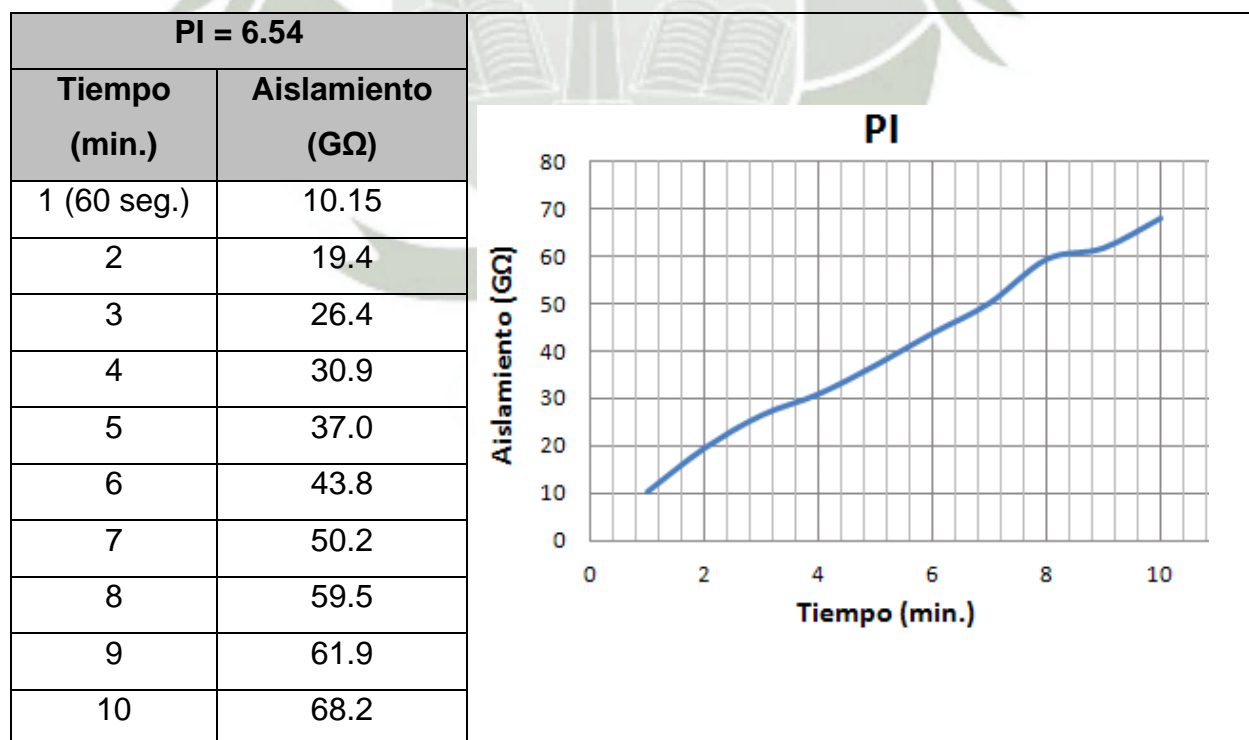
CONDICIONES DE PRUEBA					
Equipo Utilizado		Condiciones Ambientales			Conexión
<b>Tipo</b>	:	Megóhmetro	<b>Temp.</b>	:	24 °C
<b>Marca</b>	:	MEGABRASS	<b>Bobinado</b>		—

VALORES OBTENIDOS					
TENSION DE PRUEBA 2500 VDC					
Bornes de prueba	AISLAMIENTO (GΩ)			DAI	PI
	TIEMPO (min)				
	0,5	1	10		
L <sub>1</sub> vs L <sub>2</sub> vsL <sub>3</sub> vs masa	5.43	10.15	68.2	1.88	6.54

**Gráfico N° 5.1.-** Tendencia del aislamiento en el primer minuto de ensayo “DAI” (Prueba N° 03).



**Gráfico. N° 5.2.-** Tendencia del aislamiento en los diez minutos de ensayo “PI” (Prueba N° 03).



**Tabla N° 3.3:** Valores mínimos recomendados para la resistencia de aislación a 40°C (Valores en MΩ, según ANSI/IEEE Std. 43 – 2000).

Resistencia de aislación mínima R1 min =kV+1	Máquina bajo ensayo
R1 min = 100	La mayoría de bobinados fabricados antes de 1970
R1 min = 5	Para bobinados fabricados posteriormente a 1970
	Para bobinados con tensión nominal inferior a 1 kV

- Nota:**
1. La resistencia de aislación a 1 minuto es la mínima recomendada, en MΩ, a 40 °C, ensayando el bobinado completo de la máquina.
  2. kV es la tensión de línea nominal de la máquina en Kv.

**Tabla N° 3.5** Valores mínimos recomendados de índice de polarización para todas clases de aislamiento en componentes de máquinas – según IEC 60085-01:1984.

Tipo de aislamiento	IP mínimo
Clase A	1.5
Clase B	2.0
Clase F	2.0
Clase H	2.0

- Nota:**
1. La prueba de PI no es aplicable a devanados de campo no aislados.
  2. Si la resistencia de aislamiento en 1 minuto está por encima de 5000 MΩ, el PI calculado puede no ser significativo en tales casos, el P.I. puede no tenerse en cuenta como una medida de la condición del devanado.

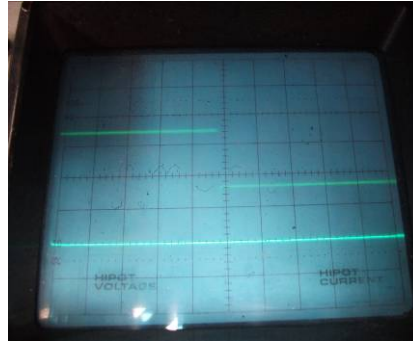
**Prueba N° 04:** Pruebas al Estator con Equipo Baker.

CONDICIONES DE PRUEBA	
Equipo Utilizado	
<b>Tipo</b>	: Analizador de Aislamiento de Bobinado
<b>Marca</b>	: Baker Instrument Co

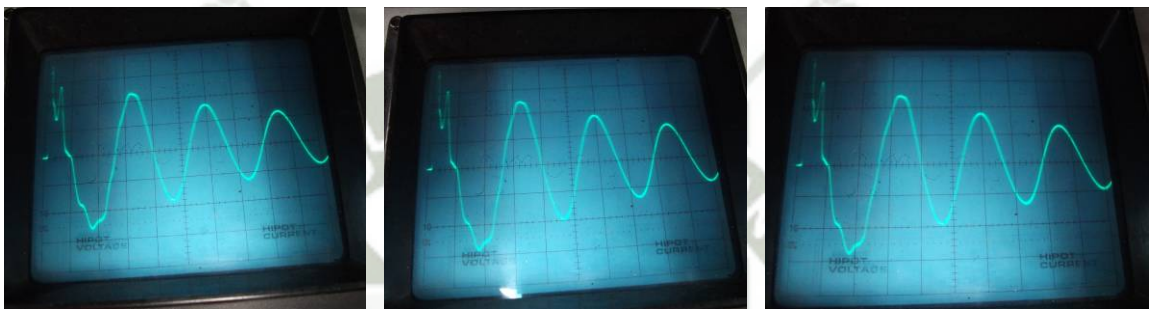


**Fotografía N° 5.2.-** Pruebas de HI-POT y Comparación de Pulsos con Equipo Baker - Después del Desmontaje.

Resultado de Prueba				
Prueba de HiPot - Estator a Masa	9.0 KVDC	Durante 1 min.	:	Bien
Prueba de Pulsos al Bobinado del Estator	9.0 KVDC	En las 3 fases	:	Bien
<b>*Norma IEEE 95 - 2002</b>				



**Fotografía N° 5.3.-** Prueba de HI-POT – Muestra el valor de la corriente de fuga ( $I_f = 1.7 \mu A$ ).



$L_1 - L_2$

$L_2 - L_3$

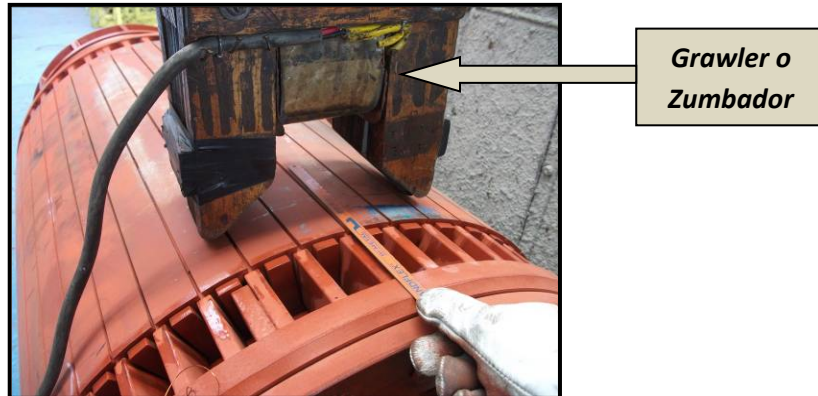
$L_3 - L_1$

**Fotografía N° 5.4.-** Prueba de Comparación de Pulsos – Muestra la superposición de las ondas.

**Nota:** La Prueba de Comparación de Pulsos muestra una similitud en la inductancia de las fases  $L_1 - L_2$  y  $L_3$ .

**Prueba N° 05.-** Prueba de Cortocircuito del Rotor con Grawler

Tipo de jaula de ardilla	: De barras	N° de jaulas	: Uno	N° de barras	: 40
Prueba con Grawler	: Bien	Barras abiertas	: 0	% del daño	: 0



**Fotografía N° 5.5.-** Prueba con Grawler– Detecta si las barras del rotor se encuentran dañadas o abiertas.

**C. Pruebas después del Montaje – Pruebas después del mantenimiento.**

**Prueba N° 06.- Resistencia Óhmica.**

CONDICIONES DE PRUEBA			
Equipo Utilizado		Condiciones Ambientales	
<b>Tipo</b> :	Microhmimetro	<b>Temp.</b>	: 21.6 °C
<b>Marca</b> :	AEMC	<b>Bobinado</b>	

VALORES OBTENIDOS	
Bornes del Estator Principal	Resistencia Óhmica (mΩ)
L <sub>1</sub> – L <sub>2</sub>	84.4
L <sub>2</sub> – L <sub>3</sub>	84.6
L <sub>1</sub> – L <sub>3</sub>	84.6

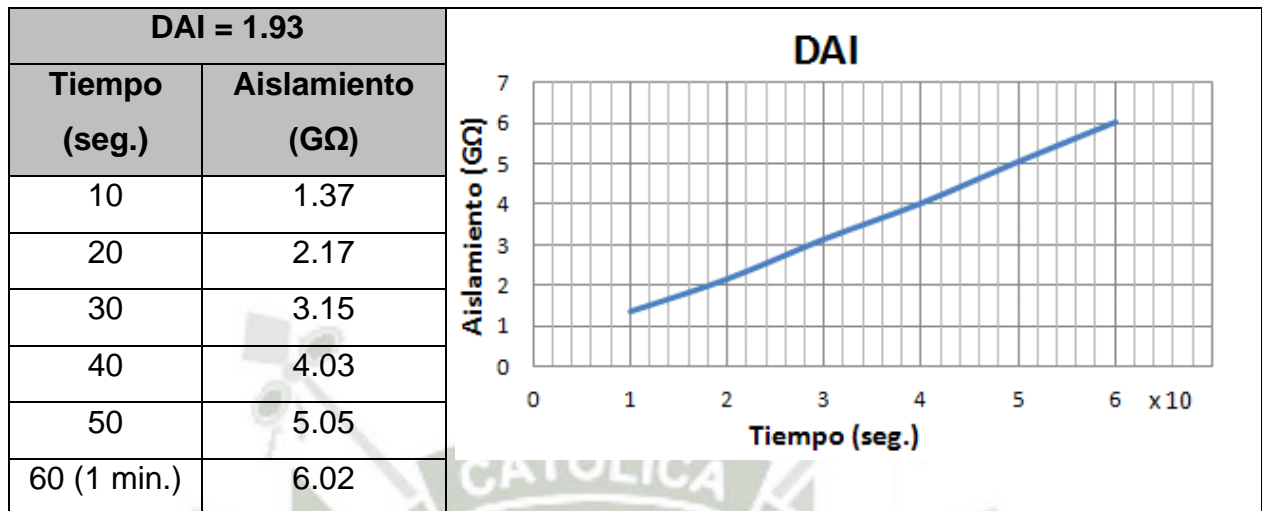
Pruebas finales, para posteriormente arrancar el motor en vacío:

**Prueba N° 07.- Resistencia de Aislamiento.**

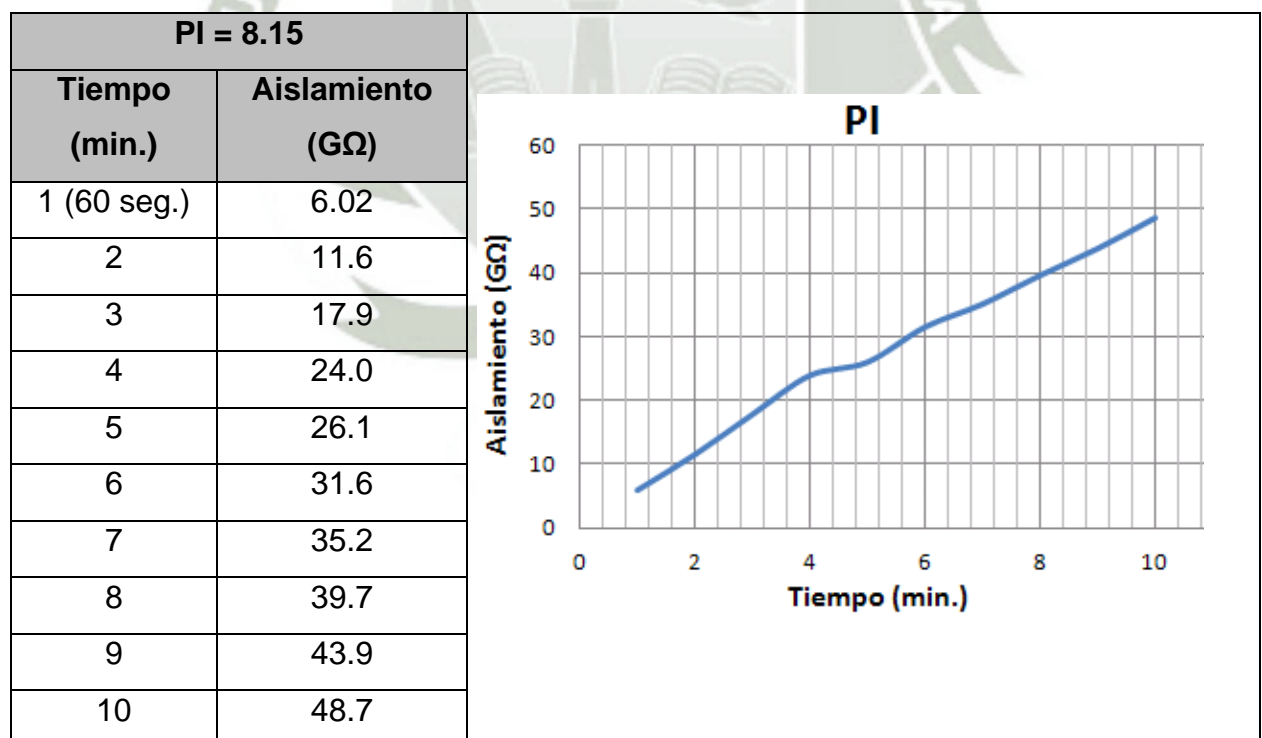
CONDICIONES DE PRUEBA					
Equipo Utilizado			eCondiciones Ambientales		
<b>Tipo</b>	:	Megóhmetro	<b>Temp.</b>	:	21.4 °C
<b>Marca</b>	:	MEGABRASS			

VALORES OBTENIDOS					
TENSION DE PRUEBA 2500 VDC					
Bornes de prueba	AISLAMIENTO (GΩ)			DAI	PI
	TIEMPO (min)				
	0,5	1	10		
L <sub>1</sub> vs L <sub>2</sub> vs L <sub>3</sub> vs masa	3.15	6.02	48.7	1.93	8.15

**Gráfico N° 5.3.-** Tendencia del aislamiento en el primer minuto de ensayo “DAI” (Prueba N° 07).



**Gráfico N° 5.4.-** Tendencia del aislamiento en los diez minutos de ensayo “PI” (Prueba N° 07).



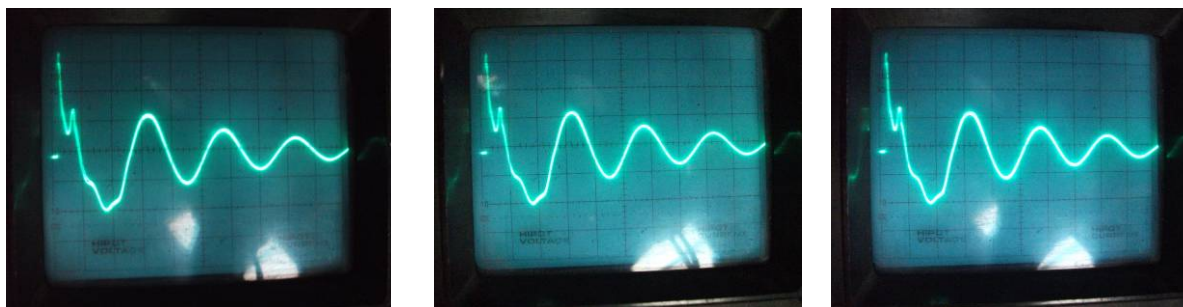
**Prueba N° 08: Pruebas con Equipo Baker.**

CONDICIONES DE PRUEBA	
Equipo Utilizado	
<b>Tipo</b>	: Analizador de Aislamiento de Bobinado
<b>Marca</b>	: Baker Instrument Co

Resultado de Prueba				
Prueba de HiPot - Estator a Masa	9.0 KVDC	Durante 1 min.	:	Bien
Prueba de Pulsos al Bobinado del Estator	9.0 KVDC	En las 3 fases	:	Bien
<b>*Norma IEEE 95 - 2002</b>				



**Fotografía N° 5.6.-** Prueba de HI-POT – Muestra el valor de la corriente de fuga ( $I_f = 2.0 \mu A$ ).



$L_1 - L_2$

$L_2 - L_3$

$L_3 - L_1$

**Fotografía N° 5.7.-** Prueba de Comparación de Pulsos – Muestra la superposición de las ondas.

#### 5.2.3.1.2. - Pruebas Dinámicas

##### A. Después del Montaje

Después de realizadas las pruebas estáticas finales, se procedió a aplicar tensión para observar el comportamiento en vacío del motor.

##### Prueba N° 09: Pruebas de Funcionamiento en Vacío.4

Tensión en Línea	2089 – 2089 – 2089 V
Corriente en Vacío	25.2 – 25.1 – 25.1 A
Frecuencia	60 Hz
Velocidad	1785 RPM
Temp. Ambiente	19.8 °C
Temp. Lado Acople	30.4 °C
Temp. Lado No Acople	23.2 °C
Tiempo de Prueba	1 Hr

**Prueba N°10:** Medida de Vibraciones en Vacío.

CONDICIONES DE PRUEBA	
<b>Equipo Utilizado</b>	
<b>Tipo :</b>	Analizador de Vibraciones
<b>Marca :</b>	SEMAPI

Punto de Medición	Dirección	Valor Total (mm/s) - RMS
1-Lado Acople	Horizontal	1.2
	Vertical	1.4
	Axial	0.8
2-Lado No Acople	Horizontal	1.1
	Vertical	1.3
	Axial	0.5



- 2.- La altura del eje H de una máquina sin patas o de una máquina con pies levantados o cualquier máquina vertical, se debe tomar como la altura de eje H de una máquina horizontal en el mismo marco básico. Cuando el soporte es desconocido, la mitad del diámetro de máquina puede ser utilizada.

### Fotografías de las pruebas dinámicas



**Fotografía N° 5.8.-** Medida de Resistencia de Aislamiento - Después del Montaje.



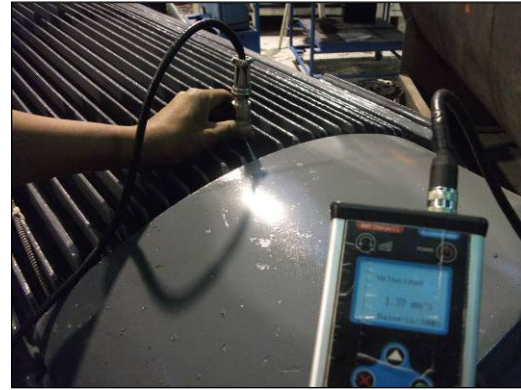
**Fotografía N° 5.9.-** Medida de Resistencia Óhmica - Después del Montaje.



**Fotografía N° 5.10.-** Prueba en Vacío - Alimentación de Tensión.



**Fotografía N° 5.11.-** Medición de Temperatura Lado No Acople.



**Fotografía N° 5.12.-** Lectura de Temperatura Lado Acople - Después de Vibración del Montaje.

**Fotografía N° 5.13.-** Lectura del Nivel Después del Montaje.

### 5.2.3.2.- Evaluación Mecánica

#### 5.2.3.2.1.- Inspección visual:

Se procedió con el proceso de desmontaje de los componentes y piezas del motor de la **TECO WESTINGHOUSE** de 1500 HP determinándose lo siguiente:

#### **Estator**

Luego de retirada la carcasa superior (Tapa o sistema de refrigeración), se observó la presencia de grasa por lo que se procedió a realizar las siguientes actividades:

- Limpieza del bobinado con detergente dieléctrico.

- Tratamiento térmico.
- Pruebas evaluación Mecánicas de componentes y Piezas.
- Tratamiento térmico previo para Barnizado.
- Barnizado de superficie.
- Tratamiento térmico posterior al Barnizado.

### **Rotor**

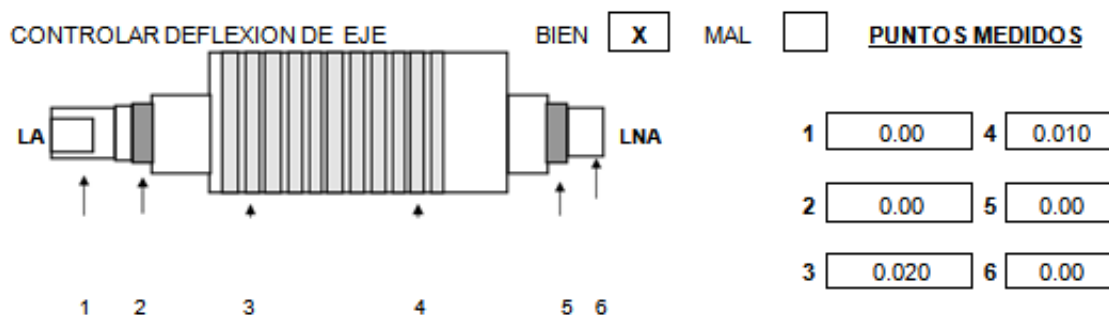
Desmontaje del rotor para colocarlo sobre dos caballetes para realizarle las siguientes actividades:

- Limpieza de los asientos de los rodamientos en el eje, ya que se detectó presencia de oxidación.
- Lavado, Tratamiento térmico, para mejorar su aislamiento de las condiciones en que se encontró y Pintado con Aislante Eléctrico.
- Pruebas de evaluación Mecánicas (Control de medidas de ajuste de Eje y Tapas).

Descripción	Lado Acople (mm)	Lado No Acople (mm)	Recomendación
Diámetro. Interior de tapas, alojamiento de rodaje	320. <sup>+0.00</sup>	280. <sup>+0.005</sup>	<b>BIEN.</b>
Diámetro de eje, asiento de rodaje	150. <sup>+0.020</sup>	130. <sup>+0.020</sup>	<b>BIEN.</b>
Rodamientos	6330 M	6326 M/C3	<b>CAMBIAR RODAJES.</b>

Referencia: Norma IEC Stds, 60072-1, C.1.4

- Control de la deflexión del eje.



**Fig. 5.5.-** Control de deflexión del eje.

- Balanceo dinámico del rotor.
- Montaje Rotor en el estator, rodamientos (Grasa utilizada en cada rodamiento LGWA2/1) y componentes (Contratapas y tapas).



## CONCLUSIONES

- La metodología usada en esta investigación garantiza el funcionamiento del motor de inducción y ayuda a predecir una futura falla.
- Se llega a la conclusión que el principal problema en motores eléctricos de inducción es el aislamiento de los bobinados entre si y a masa.
- Se considera como el principal problema en cortos eléctricos el aislamiento débil en el alambre.



## REFERENCIAS

- Maquinas electricas y transformadores - CAISSE, ARTHUR
- Curso de transformadores y motores de induccion – Gilberto Enriquez Harper.
- The development of the electric motor – A.W.A. Van Geloven.
- Maquinas Electricas – Waldemar Godoy. V.
- Diagnóstico en línea y fuera de línea de motores de inducción de baja, mediana y alta tensión - *Francisco Antonio Carvajal, José Manuel Ramírez y Luis Fernando Arcos.*
- Norma IEEE-std-43-2000, IEEE recommended practice for testing insulation resistance of rotating machinery.
- Método de prueba de IEEE 43-2000 (R2006), “La Práctica Recomendada para Pruebas de Aislamiento de Resistencia de Maquinaria Rotatoria,” (IEEE 43).
- Evaluation standard for vibration monitoring ISO 10816-3
- IEEE 95-2002 Recommended Practice for Insulation Testing of AC Electric Machinery (2300 V and Above) With High Direct Voltage
- IEC 60085-01:1984.Valores mínimos recomendados para IP
- NEMA Standards Publication Condensed MG 1-2007 Information Guide for General Purpose Industrial AC Small and Medium Squirrel-Cage Induction Motor Standards.
- IEC 34-15 - 1995 Rotating Electrical Machines - Part 15: Impulse Voltage Withstand Levels of Rotating A.C. Machines with Form-Wound Stator Coils.

- EASA Standard AR100-1998 Recommended Practice for the Repair of Rotating Electrical Apparatus.
- IEC 60034-1 (1999-08) Consolidated Edition, Rotating Electrical Machines Part I: Rating & Performance Ed. 10.2.
- IEEE 112-1991 Test Procedures for Polyphase Induction Motors and Generators.
- IEEE 113-1985 Guide on Test Procedures for DC Machines.
- IEEE 115-1983 Test Procedures for Synchronous Machines.
- IEEE 429-1972 Evaluation of Sealed Insulation Systems for AC Electric Machinery Employing Form-Wound Stator Coils.
- IEEE 432-1992 Guide for Insulation Maintenance for Rotating Electrical Machinery (5hp to less than 10,000hp).
- IEEE 434-1973 Guide for Functional Evaluation of Insulation Systems for Large High-Voltage Machines.
- IEEE 522-1992 Guide for Testing Turn-To-Turn Insulation on Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Rotating Electric Machines.
- Guía del motor: Información técnica básica de motores de inducción de baja tensión ABB automation power products.

### III. LISTA DE FIGURAS

- Figura N° 2.1 : Distribución senoidal del campo magnético.
- Figura N° 2.2 : Fuerza electromotriz inducida en una espira.
- Figura N° 2.3 : Regla de la mano derecha para encontrar la fem inducida.
- Figura N° 2.4 : Circulación de corrientes con la espira en cortocircuito.
- Figura N° 2.5 : Regla practica para la obtención del sentido de la fuerza sobre conductores.
- Figura N° 2.6 : Sentido de fuerza sobre los conductores.
- Figura N° 2.7 : Fem inducida comparada con el resbalamiento.
- Figura N° 2.8 : Circuito equivalente de una fase del estator.
- Figura N° 2.9 : Circuito equivalente de una fase del rotor.
- Figura N° 2.10 : Circuito equivalente relacionado con el transformador ideal.
- Figura N° 2.11 : Circuito equivalente simplificado de una fase del motor trifásico de inducción.
- Figura N° 2.12 : Circuito equivalente final de una fase del motor trifásico de inducción.
- Figura N° 2.13 : Diagrama de flujo de potencia en el motor.
- Figura N° 2.14 : Esquema de conexión de las bobinas del rotor de anillos rozantes.
- Figura N° 2.15 : Detalle de los conductores en el rotor.

- Figura N° 2.16 : Esquema de un rotor con los conductores en cortocircuito formando una jaula de ardilla.
- Figura N° 2.17 : Rotores con doble jaula o ranura profunda.
- Figura N° 2.18 : Disposición de los bobinados en un motor trifásico de inducción.
- Figura N° 2.19 : Esquema para conectar los bobinados en estrella o triángulo.
- Figura N° 2.20 : Inversión del sentido de giro de un motor de inducción trifásico.
- Figura N° 2.21a : Variación de la cupla en un arranque estrella triángulo.
- Figura N° 2.21b : Variación de la corriente en un arranque estrella triángulo.
- Figura N° 3.1 : Disposición de las fases de un motor eléctricos.
- Figura N° 3.2 : Circuito equivalente mostrando las cuatro corrientes medidas en una prueba de resistencia de aislamiento.
- Figura N° 3.3 : Tipos de corriente total en función de la tensión aplicada.
- Figura N° 3.4 : Corriente total en función del tiempo.
- Figura N° 3.5 : Corriente total en función de la tensión aplicada.
- Figura N° 3.6 : Ensayo del campo inducido.
- Figura N° 3.7 : Grafico del tipo de pruebas de hipot.
- Figura N° 3.8 : Onda de prueba de pulsos.

- Figura N° 3.9 : Corto entre espiras.
- Figura N° 4.1 : Onda de corriente proporcional al voltaje.
- Figura N° 4.2 : Corriente discontinua, efecto de armónicos.
- Figura N° 4.3 : Ondas de un rotor con muestra de barras rotas.
- Figura N° 4.4 : Ondas de un rotor con ninguna barra rota.
- Figura N° 4.5 : Caída del torque y corrientes en arranque de motor con barras rotas.
- Figura N° 4.6 : Growler para ensayo de barras rotas.
- Figura N° 4.7 : Tipos de excentricidad.
- Figura N° 5.1 : Tendencia de aislamiento DAI después de desmontaje
- Figura N° 5.2 : Tendencia de aislamiento PI después de desmontaje.
- Figura N° 5.3 : Tendencia de aislamiento DAI después de montaje
- Figura N° 5.4 : Tendencia de aislamiento PI después de montaje.
- Figura N° 5.5 : Control de deflexión del eje.