



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLAS DE HIDALGO**

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

**DIAGNOSTICO DE LOS MOTORES DE INDUCCION DE
ROTOR DEVANADO DEL LABORATORIO DE
INGENIERIA ELECTRICA**

TESIS

**Que para obtener el Título de
INGENIERO ELECTRICISTA**

Presenta

ALEJANDRO GARCIA SAMANO

Asesor de Tesis

**MAESTRO EN CIENCIAS
JORGE ALFREDO HUERTA BALCAZAR**

MORELIA MICHOACAN, FEBRERO 2015

Agradecimientos

A mis padres que me dieron la vida y me ayudaron a formarme como estudiante, pero sobre todo como ser humano.

A mis hermanos por apoyarme a concluir mi educación media superior y superior, tanto de manera moral como económica.

Agradezco a mi esposa que pese a las dificultades propias de un matrimonio, me apoyó incondicionalmente para terminar mi carrera profesional.

También agradezco a mi asesor, que me ayudó brindándome sus conocimientos y experiencia para realizar este trabajo. Además de invertir su tiempo.

A la Facultad de Ingeniería Eléctrica, que en el tiempo que estuve en ella me formó como profesionista comprometido con la sociedad y el desarrollo de la misma.

Agradezco a la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por educarme bajo los principios nicolaitas que han sido productores de grandes hombres, que hacen trascender los ideales de la misma.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia que siempre me apoyó de todas las formas necesarias para llevar a cabo este proyecto. Pero sobre todo a mis hermanos mayores que mostraron un gran interés en que lo realizara.

A mi esposa y mis hijos, les dedico el esfuerzo que me costó terminar la carrera y crecer juntos. Ellos son la motivación más grande que tuve para dar el último paso y terminar lo que hace algunos años emprendí, la carrera de Ingeniero Electricista.

Contenido

	Página
Agradecimientos	i
Dedicatoria	ii
Resumen	iii
Contenido	iv

Capítulo 1

Introducción	1
1.1 Introducción de las máquinas eléctricas.....	1
1.1.1 Máquina de CD.....	1
1.1.2 Máquinas de corriente alterna monofásicas.....	2
1.1.3 Máquinas de corriente alterna trifásicas.....	8
1.1.4 Máquinas de inducción.....	9
1.2 Objetivo de la Tesis.....	13
1.3 Justificación.....	13
1.4 Metodología.....	13
1.5 Descripción de los Capítulos.....	13

Capítulo 2.	Página
Máquina de inducción de rotor devanado.....	14
2.1 Introducción.....	14
2.2 Componentes principales.....	15
2.3 Funcionamiento de máquina de inducción.....	17
2.4 Circuito equivalente.....	21
2.4.1 Circuito de estator.....	22
2.4.2 Circuito de rotor.....	23
2.4.3 Circuito equivalente de la máquina de inducción.....	25
Capítulo 3.	
Pruebas realizadas al motor de inducción de rotor devanado.....	27
3.1 Introducción.....	27
3.2 Obtención de las curvas de saturación en vacío.....	27
3.3 Obtención de las curvas de saturación con rotor bloqueado.....	42
3.4 Obtención del circuito equivalente.....	51
Capítulo 4.	
Diagnóstico del motor de inducción de rotor devanado.....	61
Capítulo 5.	
Conclusiones y trabajos futuros.....	66

Lista de Símbolos y Abreviaturas

FMM	fuerza magneto motriz
CMR	campo magnético rotatorio
SEP	sistema eléctrico de potencia
ω_m	velocidad angular
ω_s	velocidad síncrona
X	Reactancia
R	Resistencia
P ₀	potencia real
E	tensión eléctrica
P	Polos
V	Voltaje
W	Watts
A	Amperes
Q ₀	potencia reactiva
S ₀	potencia aparente
Ω	Ohm
∞	Infinito
α	Ángulo
Φ	flujo magnético
β	campo magnético
I	Corriente
PE _o	pérdidas eléctricas
PM _{ec}	pérdidas mecánicas
P _{mag}	pérdidas magnéticas
Z	Impedancia
X _m	reactancia de magnetización
τ	Torque
Hz	Hertzio
S	Deslizamiento

Rpm	revoluciones por minuto
K	Constante
Sen	función trigonométrica seno
cos	función trigonométrica coseno
MW	mega watts
CD	corriente directa
Y	Conexión estrella

Lista de figuras

	Página
Fig. 1.1	Partes principales de un motor de corriente directa..... 2
Fig. 1.2	Circuito del motor monofásico de inducción de fase partida..... 4
Fig. 1.3	Circuito de motor monofásico de inducción con arranque por capacitor 4
Fig. 1.4	Circuito del motor con capacitor de marcha..... 5
Fig. 1.5	Circuito de motor monofásico con capacitor de marcha y de arranque... 6
Fig. 1.6	Circuito de motor monofásico de polos sombreados..... 7
Fig. 1.7	Partes principales de la máquina síncrona..... 9
Fig. 1.8	Partes de un rotor jaula de ardilla..... 10
Fig. 1.9	Rotor jaula de ardilla..... 10
Fig. 1.10	Rotor devanado con anillos deslizantes..... 11
Fig. 1.11	Conexión de los anillos deslizantes con las resistencias externas..... 11
Fig. 2.1	Rotor devanado..... 15
Fig. 2.2	Conexión del rotor y las resistencias externas..... 15
Fig. 2.3	Estator de un motor de inducción..... 16
Fig. 2.4	Campo magnético rotatorio..... 18
Fig. 2.5	Fuerza magneto motriz..... 20
Fig. 2.6	Circuito equivalente..... 22
Fig. 2.7	Circuito equivalente del embobinado de rotor equivalente..... 24
Fig. 2.8	Circuito equivalente estándar de una máquina de inducción..... 25
Fig. 3.1	Circuito eléctrico del motor conectado en estrella..... 29
Fig. 3.2	Circuito para la prueba de vacío..... 30
Fig. 3.3	Gráfica de corriente de línea..... 33
Fig. 3.4	Gráfica de potencia trifásica..... 34
Fig. 3.5	Gráfica de corriente de línea..... 37
Fig. 3.6	Gráfica de potencia trifásica..... 38
Fig. 3.7	Diagrama de circuito de rotor bloqueado..... 40
Fig. 3.8	Figura aproximada que se obtendrá al final de esta prueba..... 41

Fig. 3.9	Voltaje y corriente de línea.....	44
Fig. 3.10	Voltaje y potencia.....	45
Fig. 3.11	Voltaje y corriente de línea.....	47
Fig. 3.12	Voltaje y potencia.....	48
Fig. 3.13	Circuito equivalente exacto del motor.....	49
Fig. 3.14	Circuito equivalente aproximado.....	51
Fig. 3.15	Circuito aproximado en vacío.....	52
Fig. 3.16	Circuito aproximado con rotor bloqueado.....	53
Fig. 3.17	Circuito aproximado con valores.....	55
Fig. 3.18	Circuito con valores de sus parámetros.....	55
Fig. 3.19	Circuito aproximado con rotor bloqueado.....	57
Fig. 3.20	Circuito aproximado con valores.....	58
Fig. 3.21	Circuito con valores de sus parámetros.....	58
Fig. 4.1	Gráfica de voltaje de línea vs corriente de línea de los 2 motores.....	59
Fig. 4.2	Gráfica de voltaje de línea vs potencia trifásica de los 2 motores.....	60
Fig. 4.3	Gráfica de voltaje de línea vs la corriente de línea de ambos motores....	61
Fig. 4.4	Potencia trifásica contra voltaje de línea.....	61
Fig. 4.5	Valores proporcionados por el fabricante.....	62

Lista de tablas

	Página
Tabla 3.1 Medición de la resistencia en los devanados del motor.....	31
Tabla 3.2 Obtención de las curvas de saturación en vacío.....	32
Tabla 3.3 Medición de la resistencia de fase del motor.....	36
Tabla 3.4 Obtención de las curvas de saturación en vacío.....	37
Tabla 3.5 Parámetros de la prueba de rotor bloqueado motor 1.....	44
Tabla 3.6 Parámetros de la prueba de rotor bloqueado motor 2.....	47

Resumen

Este proyecto consiste en realizar pruebas como son; rotor bloqueado, prueba de vacío, además de pruebas inspección física, a los motores trifásicos de corriente alterna de rotor devanado, existentes en el Laboratorio de Ingeniería Eléctrica. Lo anterior con el fin de obtener un diagnóstico sobre el estado físico actual de las máquinas, y de esta manera, mostrar los resultados y observaciones al personal responsable del laboratorio, que sirva como un punto de partida en la toma de decisiones sobre la utilización de las mismas para las prácticas necesarias por los estudiantes de dicho laboratorio o cambiarlas por máquinas nuevas. También se puede tomar este trabajo, como punto de partida en algún programa de mantenimiento preventivo para los motores.

Abstract

This project involves testing such as; locked rotor, vacuum test, in addition to physical inspection tests, a three-phase ac motors winding rotor, existing in the Laboratory of Electrical Engineering. This in order to obtain a diagnosis on the current physical condition of the machines, and thus display the results and observations head of the laboratory staff to serve as a starting point in making decisions about the use of the same for the practices required by students in the laboratory or exchange them for new machines. You can also take this work as a starting point in a program of preventive maintenance for the engines.

Keywords:

Diagnostic tests rotor winding machine, equipment condition and maintenance.

Capítulo 1.

Introducción.

Para conocer el estado físico de las máquinas de inducción de rotor devanado, es necesario aplicarles pruebas eléctricas y mecánicas, con esto se puede lograr un diagnóstico confiable. Dichas pruebas son; prueba de vacío, de rotor bloqueado, prueba de resistencia de los devanados, entre otras. Una vez obtenidos los resultados se informara al encargado del laboratorio de ingeniería eléctrica, para que se considere el uso o cambio de dichos motores.

1.1 Introducción a las máquinas eléctricas.

Una máquina eléctrica es un dispositivo que convierte energía mecánica en energía eléctrica y viceversa. Cuando esta máquina utiliza energía mecánica y la transforma en energía eléctrica se denomina generador, y cuando utiliza energía eléctrica y la convierte en energía mecánica se le conoce como motor [Chapman. 2000].

El estudio y diseño de las máquinas eléctricas se encuentra entre las áreas más antiguas de la ingeniería eléctrica, su estudio comienza a finales del siglo XIX. En ese entonces las máquinas comenzaron a estandarizarse internacionalmente y llegaron a ser utilizadas por los ingenieros de todo el mundo [Chapman. 2000].

Estos dispositivos eléctricos se encuentran en cualquier campo de la vida cotidiana moderna, los utilizamos en equipos de aire acondicionado, refrigeradores, ventiladores, aspiradoras, herramientas eléctricas, etc. [Chapman. 2000].

1.1.1 Máquina de CD.

La máquina de CD puede ser utilizada como generador y como motor, aunque en el caso de generador ya no es utilizada debido a que es más práctico utilizar rectificadores electrónicos cuando se requiere corriente directa. Por lo que este tipo de máquina es utilizada principalmente como motor de CD [Chapman. 2000].

Funcionamiento de la máquina de CD.

Una máquina de CD tiene dos circuitos principales para su funcionamiento; el circuito de campo o estator y el circuito de armadura o rotor. El voltaje es suministrado a la armadura a través de las escobillas y el conmutador cuando funciona como motor. Mientras que cuando se usa como generador, se hace girar el rotor por un medio externo y se recoge a través del conmutador y las escobillas el voltaje de corriente directa inducido.

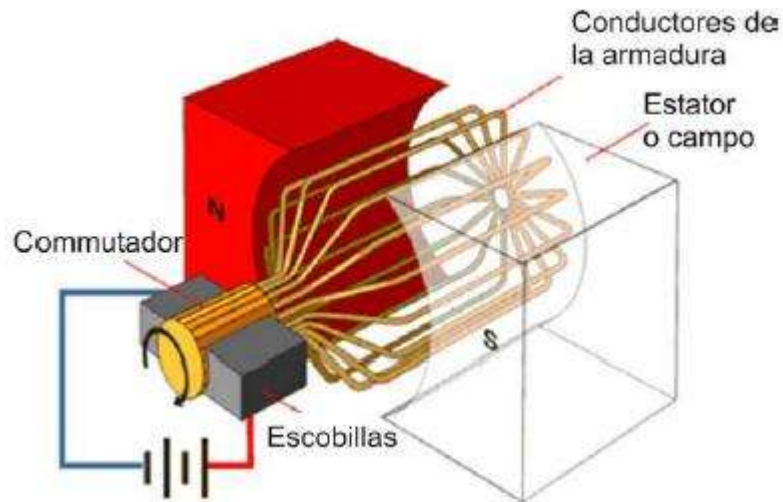


Figura 1.1 Partes principales de una máquina de corriente directa.

1.1.2 Máquinas de corriente alterna monofásicas.

Máquina de inducción monofásica.

Este tipo de máquinas son las más conocidas y utilizadas, las podemos encontrar en aparatos domésticos y herramientas portátiles. Puede ser utilizada como motor y como generador. Aunque en el caso del generador no es práctico su empleo debido a que no es muy eficiente. Por lo tanto, su uso principal es como motores de inducción monofásicos.

Existen muchos tipos de motores en el mercado, cada uno diseñado para satisfacer una necesidad específica.

Los motores de este tipo tienen regularmente rotor tipo jaula de ardilla por lo que son más robustos y económicos en lo que a mantenimiento se refiere.

Funcionamiento del motor monofásico de inducción.

Los motores monofásicos de inducción no producen en su estator campo magnético rotatorio, por lo que no rota. Debido a que no tiene un par de arranque propio es necesario utilizar un medio externo para producir el par necesario. Por lo anterior este tipo de motores tienen dos devanados; uno de trabajo o principal y otro de arranque o auxiliar cuya finalidad es producir un giro al rotor.

Tanto el devanado de trabajo como el devanado auxiliar están distribuidos en ranuras uniformemente espaciadas alrededor del estator, sin embargo el último se encuentra alojado en ranuras con orientación desplazada 90° en el espacio eléctrico con respecto al devanado principal, y tiene el mismo número de polos que el devanado principal.

Existen tres tipos de arranque para estos motores;

- 1.- Devanados de fase partida y arranque por resistencias.
- 2.- Devanados con capacitor.
- 3.- Polos estatoricos sombreados.

Motor de arranque por fase partida.

El devanado de arranque tiene menos vueltas, y el diámetro del alambre de cobre conductor es menor que el devanado de trabajo. Por lo tanto, el devanado de arranque tiene alta resistencia y baja reactancia. A la inversa, el devanado principal tiene más vueltas y alambre más grueso, por lo que presenta baja resistencia y alta reactancia: pero debido a su impedancia total menor, la corriente es más alta que en el devanado de arranque. Una vez que el motor ha alcanzado el 80% de su velocidad nominal, el devanado de arranque es desconectado por medio de un interruptor centrífugo, conectando el devanado principal que mantiene al motor trabajando en condiciones nominales.

La corriente en el devanado de arranque está retrasada unos 15° respecto al voltaje de suministro, mientras que la corriente mayor en el devanado principal está retrasada unos 40° con respecto al voltaje monofásico.

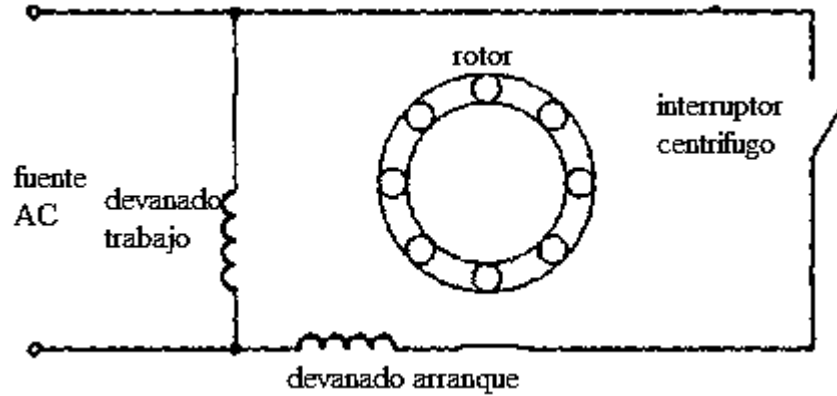


Figura 1.2 Circuito eléctrico equivalente del motor monofásico de inducción de fase partida.

Los motores de fase partida proporcionan un par de arranque que va de 1.5 a 2 veces el par nominal, y se construyen en tamaños que no pasan los $\frac{3}{4}$ de hp.

Motor de arranque por capacitor.

Para mejorar el bajo par de arranque que proporciona el motor de fase partida, se agrega un capacitor en serie al devanado auxiliar para producir una relación casi real de 90° entre las corrientes del devanado principal y el devanado de arranque o auxiliar. Elevando así el par de arranque a los límites normales del par nominal.

Debido a su mayor par de arranque que es de 3.5 a 4.5 veces el par nominal, y así reducida corriente para la misma potencia al instante del arranque. El motor de arranque por capacitor se construye en tamaños mucho mas grandes llegando incluso a ser de 7.5 hp.

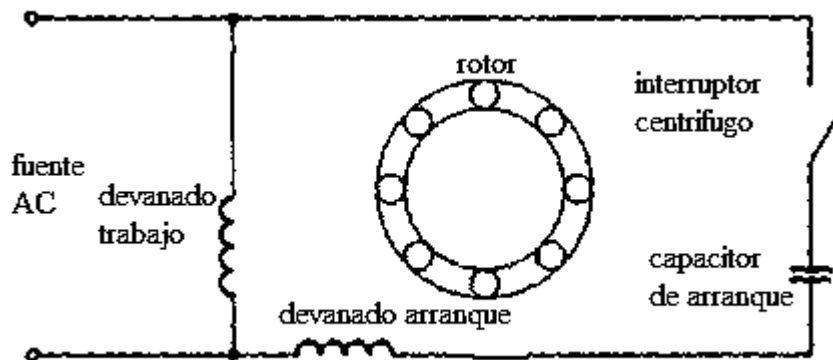


Figura 1.3 Circuito eléctrico equivalente del motor monofásico de inducción con arranque por capacitor.

Motor con capacitor de marcha.

Este motor tiene dos devanados con el mismo número de vueltas y mismo calibre del conductor, es decir, los devanados son idénticos.

Ya que trabaja en forma permanente como motor de arranque con capacitor, no necesita interruptor centrifugo.

El capacitor que se usa se diseña para servicio continuo y es del tipo baño de aceite. El valor del capacitor se basa más en su característica de marcha óptima que en la de arranque. Al momento del arranque la corriente en la rama capacitiva es muy baja. El resultado es que estos motores a diferencia de los de arranque por capacitor, tienen un par de arranque muy deficiente, de entre el 50 al 100% del par nominal, dependiendo de la resistencia del rotor.

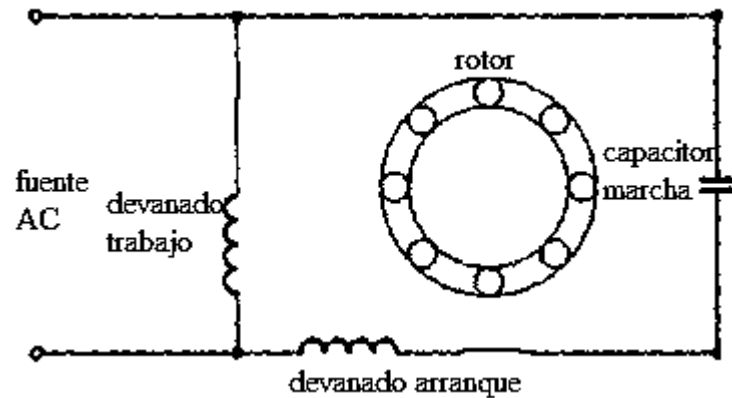


Figura 1.4 Circuito eléctrico equivalente del motor con capacitor de marcha.

Motor con capacitor de arranque y de marcha.

El motor de capacitor de marcha tiene un punto débil importante que es su bajo par de arranque. El motor de capacitor de arranque y de marcha, combina las ventajas de funcionamiento casi sin ruido y de control limitado de velocidad del capacitor de marcha con el alto par de arranque del motor de arranque por capacitor.

Se emplean dos capacitores durante el arranque del motor, uno de ellos el capacitor electrolítico de arranque, semejante al que se usa para el trabajo intermitente del motor de arranque por capacitor, tiene una capacidad bastante alta, de 10 a 15 veces el valor del capacitor de marcha se saca del circuito cuando el motor ha alcanzado el 80%

aproximadamente de su velocidad nominal por medio del interruptor centrífugo.

Entonces el motor continúa acelerado debido al capacitor de marcha, con el valor óptimo de capacitancia del dispositivo de aceite para trabajar en carga nominal o cerca de esta.

La ventaja principal del motor con dos capacitores es su alto par de arranque, aunado a su trabajo poco ruidoso y a su buen par de funcionamiento. Se clasifica como motor invertible, debido a que intercambiando las terminales de alguno de sus devanados se invierte el sentido de giro del motor.

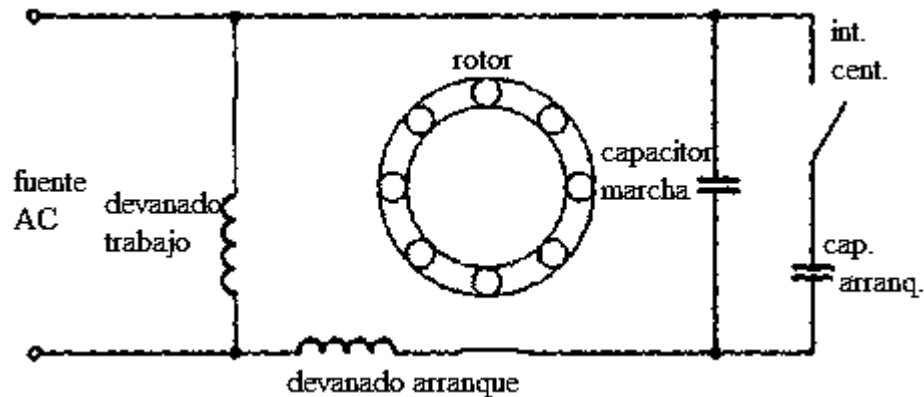


Figura 1.5 Circuito de motor monofásico con capacitor de marcha y de arranque.

Motor de polos sombreados.

Todos los motores que se describieron anteriormente emplean estatores con entrehierros uniformes con respecto a sus devanados de rotor y estator, que están distribuidos uniformemente en la periferia del estator. Los métodos de arranque se basan en general en el principio de la fase partida de producir un campo magnético rotatorio para iniciar el giro del rotor.

El motor de polos sombreados es, en general, un motor pequeño de potencia fraccionaria que no es mayor a 1/10 hp, aunque se han producido motores de hasta ¼ hp.

La gran ventaja de este motor estriba en su extrema simplicidad: un devanado monofásico de estator, rotor con jaula de ardilla vaciada y piezas polares especiales. No tiene interruptores centrífugos, capacitores, ni devanados de arranque, ni conmutadores. Tiene tan solo un devanado pero es inherente de arranque propio.

Las piezas polares especiales se forman con laminaciones y una bobina de sombreado en cortocircuito, o bien un anillo de cobre macizo de una sola vuelta, alrededor del segmento más pequeño de la pieza polar.

La bobina de sombreado está separada del devanado principal de ca, y sirve para proveer una división de flujo principal del campo, demorando el cambio de flujo en el segmento menor

El flujo en el segmento del polo sombreado siempre está en retraso al correspondiente en el segmento principal, tanto en tiempo como en estado físico, aunque no exista entre ellos una verdadera relación de 90° . El resultado es que se obtiene un campo magnético rotatorio, suficiente para generar un pequeño desbalanceo en los pares del rotor, tal que en el sentido de las manecillas del reloj es mayor que el contrario o viceversa, y el rotor siempre gira en el sentido del campo magnético rotatorio.

El motor de polos sombreados es robusto, barato, pequeño y necesita de poco mantenimiento. Desafortunadamente tiene bajo par de arranque, baja eficiencia y bajo factor de potencia. Tratándose de un motor pequeño, las dos últimas consideraciones no son serias. Su bajo par de arranque limita su aplicación a motores económicos de tornamesas, proyectores de cine, asadores eléctricos, ventiladores pequeños, maquinas expendedoras y otras cargas ligeras de servomecanismos.

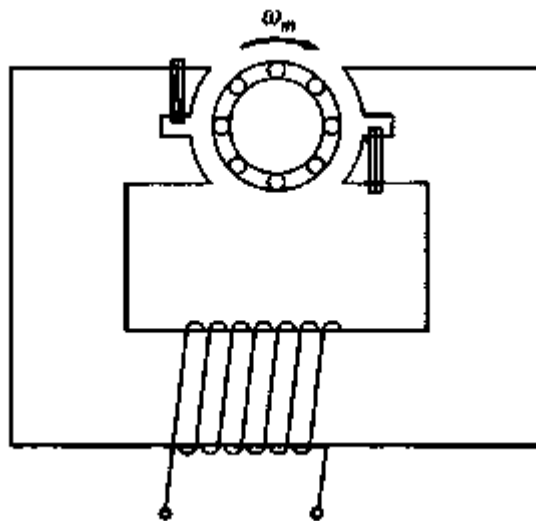


Figura 1.6 Circuito eléctrico equivalente del motor monofásico de polos sombreados.

1.1.3 Máquinas de corriente alterna trifásicas.

Máquina síncrona.

Una máquina síncrona o generador síncrono es aquella que transforma energía mecánica en energía eléctrica de corriente alterna. Es muy versátil, pues es usada como motor, como generador, o como condensador; con el fin de mejorar el factor de potencia en un sistema eléctrico. Como generador, puede operar en forma aislada teniéndose así frecuencias variables, o sincronizada a un sistema eléctrico de potencia (SEP) “red infinita”, con lo que su frecuencia será fija definida por el sistema.

Es la principal fuente de generación de potencia eléctrica en el mundo, produciéndose potencias de hasta 1500 MW.

Una máquina síncrona, cuenta con dos devanados, uno llamado devanado de campo que está en el rotor, el cual generalmente es de polos salientes y otro llamado devanado de armadura que se encuentra en el estator de la máquina.

En lo que se refiere a su velocidad, las máquinas síncronas se construyen con rotor cilíndrico, las de alta velocidad que son movidas por turbinas de vapor o de gas, y de polos salientes las de baja velocidad, que son impulsadas por turbinas hidráulicas.

Funcionamiento de la máquina síncrona.

Para hacer funcionar la máquina, se aplica una corriente de cd al rotor que produce un campo magnético. Luego se hace girar el rotor a través de un motor primario, logrando con esto tener un campo magnético rotacional dentro del motor. Este campo magnético giratorio, induce un voltaje trifásico en los devanados del estator cuando se utiliza como generador. Mientras que cuando funciona como motor, este campo magnético produce en el estator una fuerza contra electromotriz que interacciona con el campo del rotor para producir un campo magnético rotatorio hasta alcanzar la velocidad síncrona.

Aparte del devanado de CD en el rotor se le agrega un devanado de jaula de ardilla, el cual, cuando funciona como generador se utiliza para compensar los desequilibrios en la velocidad del rotor que producen oscilaciones en el mismo. Cuando es utilizada esta máquina como motor, el devanado tipo jaula de ardilla sirve para arrancar el motor como si fuera un motor de inducción.

LA MAQUINA SINCRONA

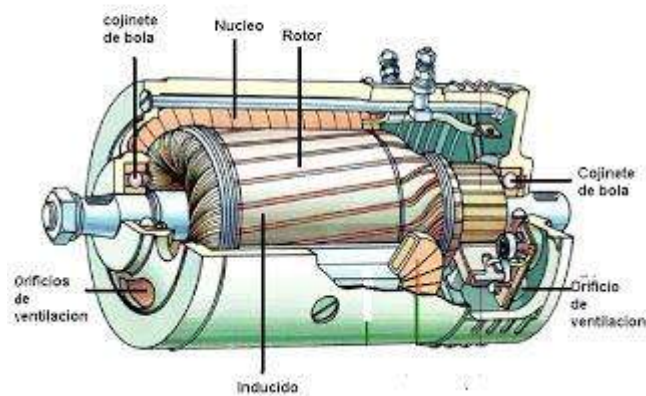


Figura 1.7 Partes principales de la máquina síncrona. [1]

1.1.4 Máquinas de inducción

Son las más usadas en la industria gracias a su robustez, mínimos o nulos requerimientos de mantenimiento, y bajos costos de operación ya que se pueden conectar directamente a la línea de alimentación (frecuencia y voltajes constantes), permitiendo accionar cargas a una velocidad constante.

Una máquina de inducción tiene una parte estacionaria que es el estator y una parte móvil que es el rotor.

El estator posee geometría cilíndrica, consiste en laminaciones de fierro, en las cuales sobre ranuras, se montan los devanados. El rotor también está compuesto por laminaciones y ranuras, pero existen 2 tipos; el tipo rotor bobinado en el cual un devanado trifásico

convencional es montado sobre las ranuras, y el tipo jaula de ardilla.

Al rotor jaula de ardilla se le inyecta aluminio fundido sobre las chapas de rotor apiladas formándose barras longitudinales que en el mismo proceso quedan cortocircuitadas en ambos extremos por anillos, por lo que se tiene un circuito cerrado sin conexiones externas.

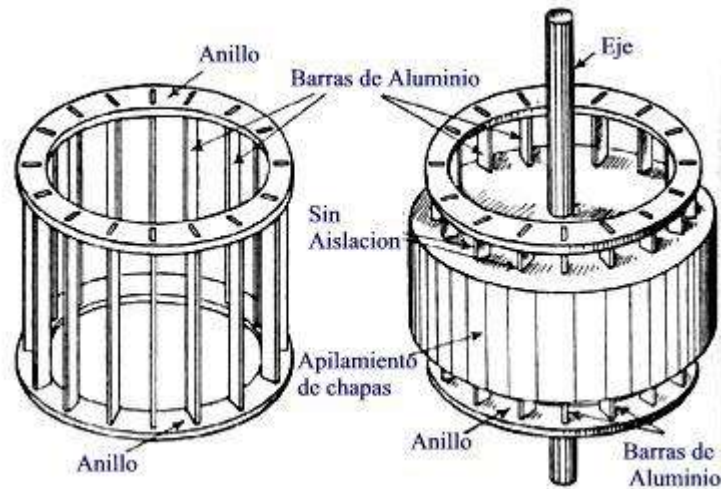


Figura 1.8 Partes de un rotor jaula de ardilla.

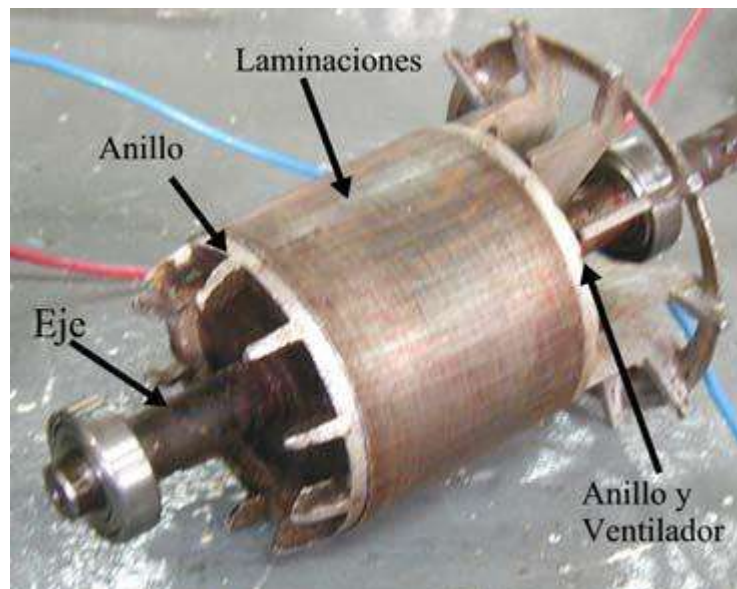


Figura 1.9 Rotor jaula de ardilla.

Mientras que el rotor bobinado tiene una bobina formada por un número determinado de vueltas de alambre aislado distribuido en las ranuras, estas bobinas pueden ser bifásicas o trifásicas pero con el mismo número de polos que el embobinado del estator.

Los embobinados del rotor se conectan a anillos deslizantes montados sobre el eje del rotor pero aislados entre sí, el circuito se completa con resistencias variables conectadas a los embobinados por medio de escobillas o carbones que se apoyan y establecen un contacto deslizante con los anillos, logrando el buen funcionamiento del motor.



Figura 1.10 Rotor devanado con anillos deslizantes.

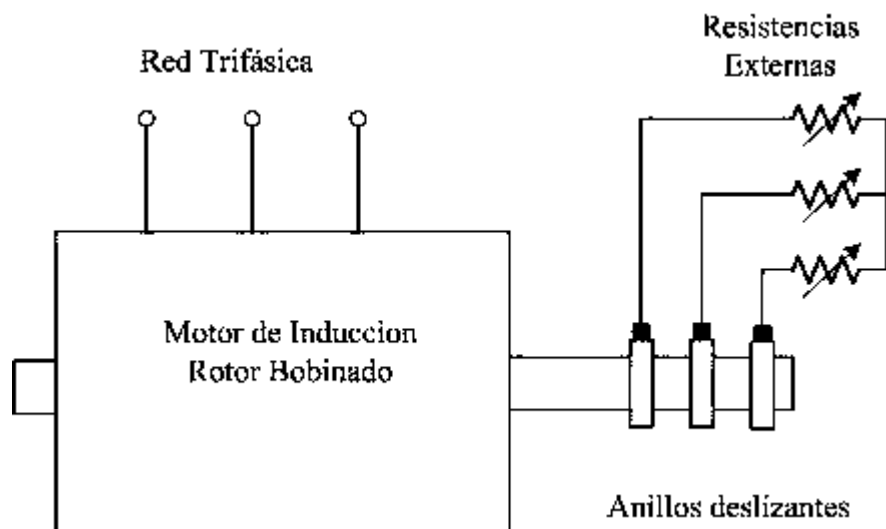


Figura 1.11 Conexión de los anillos deslizantes con las resistencias externas.

El voltaje en el rotor es inducido en los devanados del estator sin estar físicamente conectados por medio del alambre conductor. La característica distintiva de un motor de inducción es que no requiere corriente de campo CD para operar la maquina.

Aunque se puede utilizar una máquina de inducción como generador y como motor tiene muchas desventajas como generador y, por tanto, pocas veces es utilizado como tal. Por esta razón, las máquinas de inducción son utilizadas como motores de inducción.

Los motores de inducción de rotor devanado son más costosos que los de jaula de ardilla, y requieren mucho más mantenimiento debido a sus escobillas y a sus anillos deslizantes, por lo que son poco utilizados.

1.2 Objetivo de la tesis

El presente trabajo pretende lograr un diagnostico real y confiable, sobre el estado de las maquinas de inducción de rotor devanado del laboratorio de ingeniería eléctrica, para presentar las observaciones y conclusiones encontradas en el desarrollo del proyecto, a los responsables del laboratorio.

1.3 Justificación

Partiendo de la necesidad que se tiene en el laboratorio de ingeniería eléctrica, de conocer el estado físico actual de las maquinas de inducción de rotor devanado, se determino tomar esta tarea, para de esta forma apoyar al laboratorio y al mismo tiempo buscar obtener el título de ingeniero por medio de este trabajo.

1.4 Metodología

Realizando pruebas a los motores de inducción de rotor devanado, como lo son: pruebas de vacío, prueba de rotor bloqueado y pruebas mecánicas, se busca obtener el diagnostico sobre el estado físico de las maquinas.

1.5 Descripción de los capítulos

En el Capítulo 1, se presenta un bosquejo general de las diferentes máquinas eléctricas, características físicas y de funcionamiento.

Para el Capitulo 2, se delimita y se estudia a fondo a la máquina de corriente alterna de rotor devanado.

En el Capítulo 3, se procede a realizar las pruebas pertinentes para conocer el estado físico de las máquinas en cuestión, obteniendo sus parámetros de forma práctica y comparándolos con los parámetros reales proporcionados por los fabricantes de las máquinas descritas.

Capitulo 4 en esta parte se da el diagnostico de los estudios hechos a las máquinas para que se determine su utilización o remplazo en las practicas definidas para los estudiantes de las mismas.

Mientras que en el capítulo 5, se realizan las conclusiones y observaciones obtenidas del estudio realizado, así como las sugerencias sobre el estado y uso de las máquinas.

Capítulo 2. Máquina de inducción de rotor devanado

2.1.- Introducción

La máquina de inducción es el convertidor electromecánico más utilizado en la industria. Su invención se le debe a Tesla a finales del siglo XIX, y nace como solución al problema de utilizar la corriente alterna.

Existen máquinas de inducción que de acuerdo a la construcción del rotor se pueden dividir en dos; máquinas de inducción de rotor devanado y máquinas de inducción jaula de ardilla.

Un rotor tipo jaula de ardilla se compone de barras de cobre desnudo, un poco más largas que el rotor, las cuales están insertadas en las ranuras por uno de sus extremos. Los extremos opuestos se soldan a dos anillos de cobre para que todas las barras estén en cortocircuito entre sí. Toda la construcción se asemeja a una jaula de ardilla, de ahí deriva su nombre.

En este capítulo se estudiara la máquina de inducción de rotor devanado por lo que enfocaremos el trabajo en esta únicamente.

La máquina de inducción consta de un devanado montado en el estator de la máquina y de un rotor devanado.

El rotor tiene igual número de devanados y de polos que el estator, distribuidos también de manera semejante, pudiendo ser la máquina bifásica o trifásica. Las terminales de estos embobinados se conectan por medio de anillos deslizantes aislados montados sobre el eje del rotor, de modo que, mediante escobillas de carbón, se conecta a resistencias externas. Con dichas resistencias se logra modificar a voluntad la resistencia del rotor y esto tiene una fuerte incidencia sobre la característica par-velocidad.

2.2.- Componentes principales.

La máquina de inducción de rotor devanado cuenta con dos partes principales que son el estator estacionario y el rotor giratorio devanado.

El rotor se compone de laminaciones ranuradas. Estas están cuidadosamente apiladas para crear una serie de ranuras para el devanado de rotor, que son devanados trifásicos convencionales hechos de alambre de cobre aislado.

Un rotor devanado tiene un devanado trifásico similar al del estator. El devanado está distribuido uniformemente en las ranuras y casi siempre está colocado en Y con tres conductores. Las terminales están conectadas a tres anillos colectores, los cuales giran junto con el rotor. Los anillos colectores y las escobillas estacionarias permiten conectar resistencias externas en serie al devanado del rotor. Las resistencias externas se utilizan principalmente al momento del arranque, en condiciones de funcionamiento normal, las tres escobillas están cortocircuitadas. En la siguiente figura se muestra al rotor devanado con sus componentes.

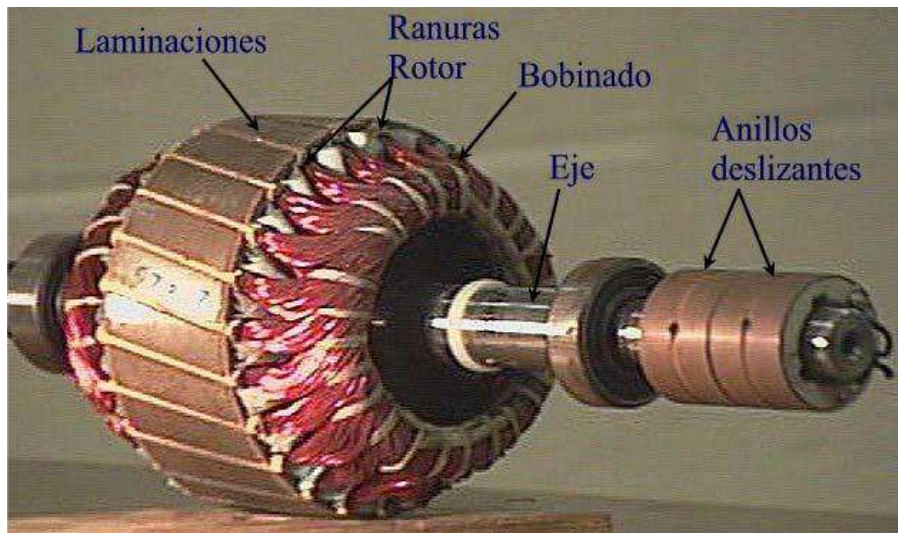


Figura 2.1 Rotor devanado.

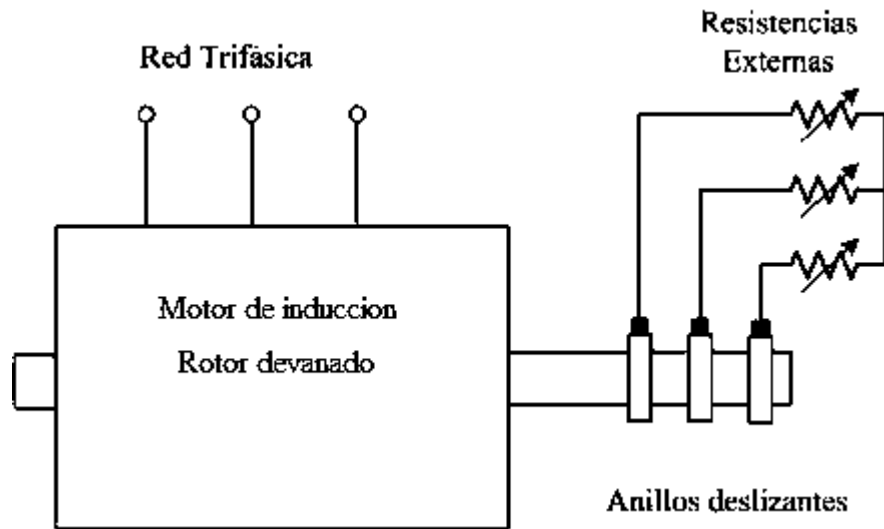


Figura 2.2 Conexión del rotor y las resistencias externas.

El rotor está separado del estator por un entrehierro que va de 0.4mm a 4mm según la potencia del motor.

El estator consta de un armazón de acero que soporta un núcleo cilíndrico hueco compuesto de laminaciones apiladas. Varias ranuras equidistantes entre sí, hechas en la circunferencia interna de las laminaciones, proporcionan el espacio para el devanado de estator. La siguiente figura muestra el estator de un motor de inducción.



Figura 2.3 Estator de un motor de inducción.

2.3.- Funcionamiento de la máquina de inducción de rotor devanado.

Campo magnético rotatorio.

Considérese un estator simple que tiene 6 polos salientes, cada uno de los cuales porta una bobina de 5 vueltas. Las bobinas que se encuentran diametralmente opuestas están conectadas en serie por medio de tres puentes o alambres de cierre que conectan respectivamente las terminales a-a, b-b, y c-c. Esto crea tres juegos idénticos de devanados AN, BN y CN que están separados mecánicamente 120° entre sí.

Las dos bobinas de cada devanado producen fuerzas magnetomotrices que actúan en la misma dirección. Los tres juegos de devanados están conectados en Y, por lo que forman un neutro común N. a causa de la posición perfectamente simétrica, las impedancias de línea a neutro son idénticas. En otras palabras, en lo referente a las terminales A, B, C, los devanados constituyen un sistema trifásico balanceado.

Si conectamos una fuente trifásica a las terminales A, B, C, las corrientes alternas I_a , I_b e I_c fluirán en los devanados. Las corrientes tendrán el mismo valor pero con el tiempo estarán desplazadas en un ángulo de 120° . Estas fuerzas producen fuerzas magnetomotrices que, a su vez, crean un flujo magnético. Este flujo es el que nos interesa.

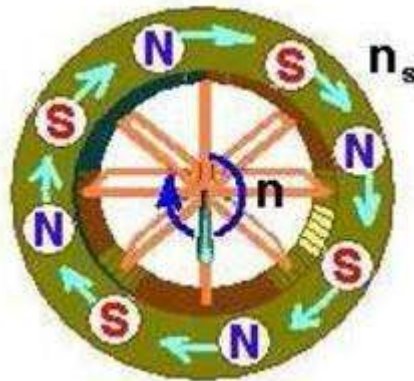
Para seguir la secuencia de eventos, suponemos que las corrientes positivas siempre fluyen en los devanados de la línea al neutro. A la inversa, las corrientes negativas fluyen del neutro a la línea. Además, para poder trabajar con números, supongamos que la corriente pico por fase es de 10 A. Por lo tanto, cuando $I_a = + 7$ A, las dos bobinas de la fase A juntas producirán una FMM de $7 \text{ A} * 10 \text{ vueltas} = 70$ Amperes-vueltas y un valor de flujo correspondiente. Como la corriente es positiva, el flujo es dirigido verticalmente hacia arriba.

Conforme pasa el tiempo, podemos determinar el valor instantáneo y la dirección de la corriente en cada devanado y establecer de esta manera los patrones de flujo sucesivos. Por lo tanto, en el instante 1 la corriente I_a tiene un valor de + 10 A, mientras que I_b e I_c tienen un valor de -5 A. la fmm de la fase A es de $10 \text{ A} * 10 \text{ vueltas} = 100$ amperes-vueltas,

mientras que las fmm de B y C son de 50 amperes-vueltas. La dirección de las fmm depende de los flujos de corriente instantáneos.

En lo que se refiere al rotor, los seis polos salientes juntos producen un campo magnético que tiene básicamente un amplio polo norte y un amplio polo sur. Esto significa que el estator de 6 polos produce en realidad un campo de 2 polos. El campo magnético combinado apunta hacia arriba.

En el instante 2, un sexto de ciclo mas tarde, la corriente I_c alcanza un pico de -10 A, en tanto que I_a e I_b tienen un valor de $+5$ A. Encontramos entonces que el nuevo campo tiene la misma forma que antes, excepto que se ha movido 60° en el sentido de las manecillas del reloj. En otras palabras el campo se ha movido un sexto de vuelta entre los instantes 1 y 2. Procediendo de esta manera para los instantes sucesivos, 3, 4, 5, 6 y 7, separados por intervalos de un sexto de ciclo, encontrando que el campo magnético realiza una vuelta completa durante un ciclo. Por consiguiente, la velocidad de rotación del campo depende de la duración del ciclo, y esta depende a su vez de la frecuencia de la fuente. Si la frecuencia es de 60 Hz, el campo resultante realiza una vuelta en $1/60$ s, es decir, 3600 revoluciones por minuto.



2.4. Fig. Campo magnético rotatorio [3]

Fuerza magnetomotriz.

Para examinar la FMM y flujo en el entrehierro se considera que la máquina está girando a una velocidad ω_m , menor que la síncrona, y en la misma dirección que el campo magnético giratorio. En estas condiciones el deslizamiento se define como;

$$S = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde ω_s se define como velocidad síncrona establecida por el devanado trifásico del estator y definida por;

$$\omega_s = (120f / P) \quad [\text{RPM}] \quad \text{Ecuación 2}$$

Con P numero de polos de la maquina y f es la frecuencia de la fuente de alimentación. El embobinado del rotor estaría formado por un conjunto de bobinas espaciadas 120 grados.

Al girar el rotor a la velocidad ω_m , los conductores de cada bobina estarán siendo cortados a una velocidad $(\omega_s - \omega_m)$ por el CMR, por lo que se inducirán en ellos tensiones de dicha frecuencia. En el momento en que el CMR está pasando frente a la fase “a” del rotor, la tensión neta inducida en esa fase retrasara en 90 grados al flujo del estator (y FMM del estator), (las tensiones de generación retrasan 90 grados los flujos que las producen). Por lo tanto si se cierra el embobinado de esta fase y asumiendo que no presenta inductancia, la corriente que circula producirá una FMM de rotor, que retrasa 90 grados a la FMM del estator. Idénticas consideraciones son validas para las restantes fases por lo que el torque medio estará dado por;

$$\tau = K F_r F_s \sin \delta = K F_r F_s \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde K está en función de las dimensiones geométricas de la maquina.

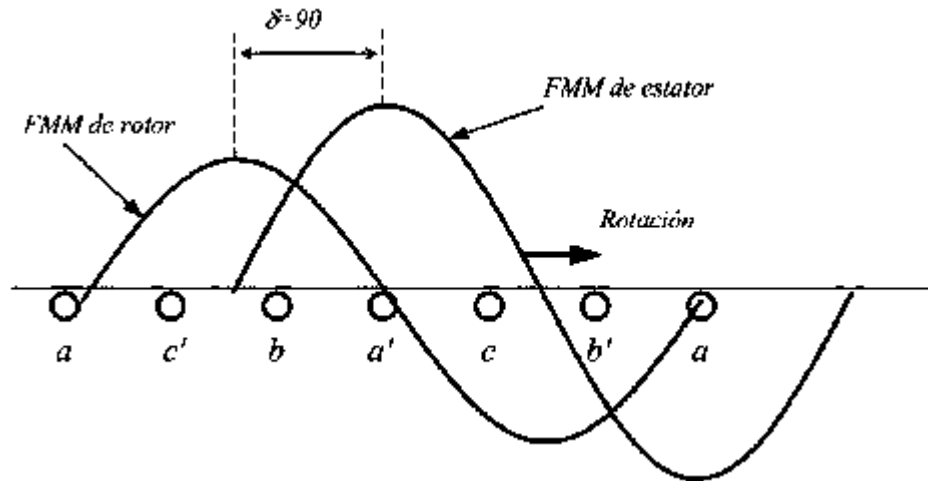


Figura 2.5. Fuerza magnetomotriz de estator y rotor para una bobina de rotor sin inductancia.

Ahora si el rotor devanado presenta una inductancia, la corriente que circulara retrasara a la fase generada en un ángulo α , y por lo tanto, entre la FMM de estator y rotor existirá - una desfase total de;

$$\delta = 90 + \alpha \quad \text{Ecuación 4}$$

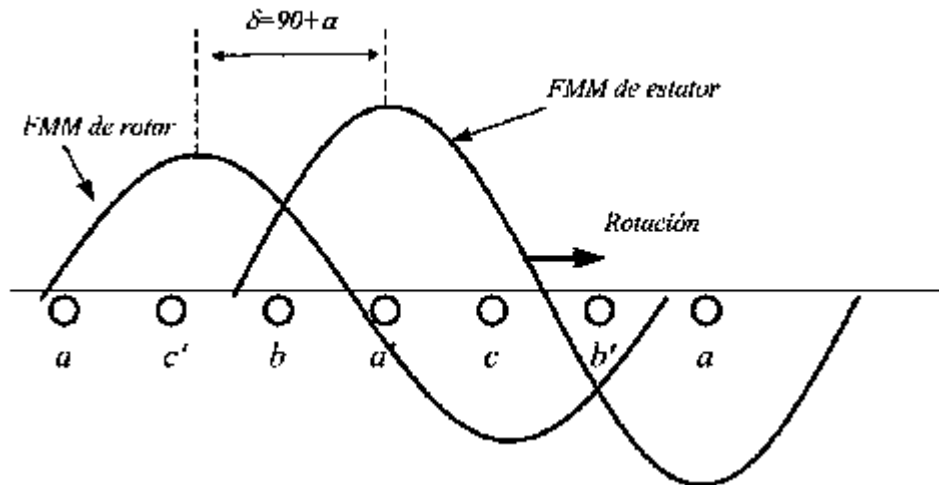


Figura 2.6. Fuerza magnetomotriz de estator y rotor para una bobina de rotor con inductancia.

Este desfase provoca un torque neto sobre el rotor, que se apartara del optimo, 90° , en

un ángulo α . Luego el torque se calcula como;

$$\tau = K F_r F_s \text{sen } (90 + \alpha) \quad \text{Ecuación 5}$$

Al permitir el flujo de corriente por las 3 fases del rotor, tales corrientes tendrán una frecuencia $(\omega_s - \omega_m)$, desfasadas en 120 grados entre si y retrasadas respecto del CMR del estator $90^\circ + \alpha$. Las corrientes así generadas producirán un CMR de velocidad $(\omega_s - \omega_m)$, respecto del rotor. Luego para un observador localizado en el estator, la velocidad del CMR del rotor es la composición de la velocidad mecánica del giro del rotor con la velocidad del CMR de rotor, esto es;

$$\text{Velocidad Rotor} + \text{velocidad CMR de rotor} = \omega_m + (\omega_s - \omega_m) = \omega_s$$

$$\text{Ecuación 6}$$

Es decir, el CMR del rotor gira a la velocidad síncrona, luego, para esta situación, se tienen dos CMR's girando a la velocidad ω_s respecto del estator, y desfasados permanentemente un ángulo igual a $(90^\circ + \alpha)$. El ángulo α es función de los parámetros de rotor; resistencia e inductancia de fuga.

Ahora si la velocidad mecánica del rotor es igual a la velocidad de CMR del estator, esto es $(\omega_s = \omega_m)$, las bobinas del rotor giran a la misma velocidad que el CMR del estator, los conductores no serán cortados por el CMR, no se inducirán tensiones, no circularan corrientes en el rotor, luego el torque medio será nulo.

2.4.- Circuito equivalente.

Para modelar la máquina de inducción se aprovecha la similitud que tiene con el transformador, en ambos casos el circuito del secundario (rotor en el caso de la máquina de inducción) se tienen corrientes y tensiones inducidas debidas al campo variable del circuito primario (estator en el caso de la máquina de inducción). De hecho si al motor de inducción de rotor devanado, se mantiene el rotor bloqueado y se miden las tensiones de estator para

una determinada condición de carga en el rotor, se aprecia que están en la relación del número de vueltas equivalentes en los dos embobinados.

2.4.1.- Circuito de estator.

El voltaje de la fuente aplicado al devanado del estator, difiere del voltaje inducido en la caída de voltaje en la impedancia de fuga del estator. Esto es;

$$V_1 = E_1 + I_1 (R_1 + jX_1) \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde V_1 es el voltaje de la fuente, E_1 es la tensión inducida o fuerza contra electromotriz, I_1 es la corriente del circuito de estator, y R_1 y X_1 son la resistencia y reactancia de fuga del estator, respectivamente.

El flujo resultante en el entrehierro es creado por una combinación de las fuerzas FMM de estator y de rotor. Como en el caso de los transformadores la corriente de estator puede ser dividida en dos componentes, una de carga y otra de excitación.

La corriente de carga I_2 produce una FMM que exactamente contrasta la FMM del rotor. La componente de excitación I_ϕ es la requerida para imponer el flujo resultante en el entrehierro y es función E_1 . Esta corriente de excitación puede ser descompuesta en una corriente asociada a las pérdidas en el hierro I_c que se encuentra en fase con E_1 y una de magnetización I_m . El circuito equivalente que representa cada una de estas corrientes de estator se muestra a continuación.

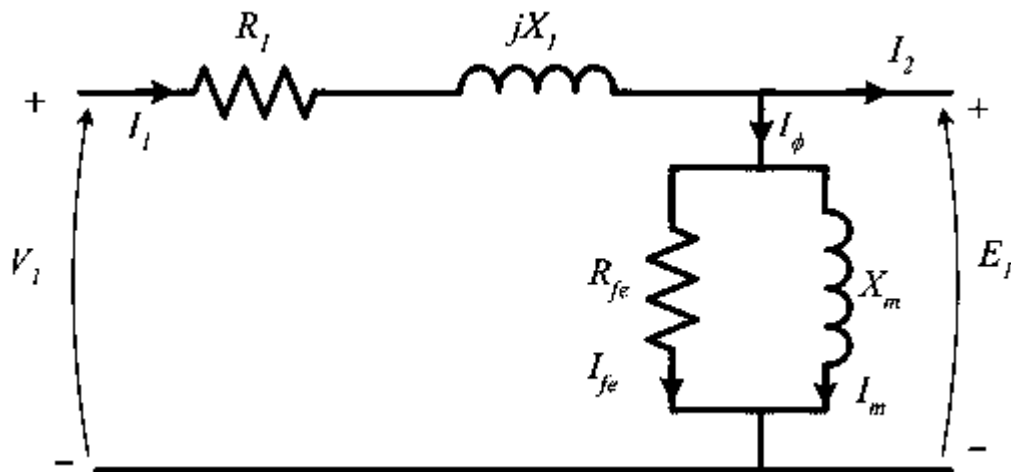


Figura 2.7. Circuito equivalente del embobinado de estator de una máquina de inducción.

Nótese que no existe diferencia en forma entre este circuito equivalente y el deducido para el primario de un transformador. La diferencia se encuentra en la magnitud de los parámetros. En efecto, la corriente de excitación es considerablemente más grande en una maquina de inducción, debido a la presencia del entrehierro. En el caso de una maquina de inducción esta puede ser del 30 al 50% de la corriente de estator I_1 dependiendo del tamaño del motor, en el caso del transformador esta puede ser de 1 a 5%. Asimismo, la reactancia de fuga es mayor en un motor de inducción debido al entrehierro y a que los devanados se encuentran distribuidos en la periferia del estator y el rotor, mientras que en los transformadores se encuentran concentrados en un núcleo.

2.4.2.- Circuito de rotor.

En el caso del rotor ya sea jaula de ardilla o de rotor devanado reacciona frente a la FMM de estator creando una FMM del mismo número de polos de la distribución de corrientes del estator y que viaja a la misma velocidad. Esta reacción del rotor induce en los devanados del estator una tensión, la cual resulta en una corriente de compensación (carga) que hace que absorba mayor corriente de la fuente. Esta es la única forma de saber que ocurre en el entrehierro con la interacción de los flujos de estator y rotor.

Si se considera un rotor equivalente del tipo devanado que representa el rotor real, con el mismo número de fases y de polos que el devanado de estator, para un mismo flujo y velocidad, la relación entre la tensión inducida en el rotor real, E_{2s} y en el equivalente, E_{rotor} , está dada por;

$$E_{2s} = aE_{rotor} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde a es la relación de transformación entre el devanado del estator y el devanado del rotor equivalente.

Si ambos rotores son magnéticamente equivalentes, sus amperes-vueltas deben ser iguales, por lo que la relación entre la corriente en el rotor real I_{rotor} y la corriente en el rotor equivalente I_{2s} está dada por;

$$I_{2s} = I_{rotor} / a \quad \text{Ecuación 9}$$

De igual manera la relación de la impedancia de fuga del rotor equivalente a la del rotor

real debe ser;

$$Z_{2s} = E_{2s}/I_{2s} = a_2 E_{\text{rotor}} / I_{\text{rotor}} = a_2 Z_{\text{rotor}} \quad \text{Ecuación 10}$$

El voltaje, corriente e impedancia del rotor son referidas a las cantidades del estator mediante la definición de rotor equivalente. Ahora en términos de los valores del rotor se tiene que;

$$Z_{2s} = E_{2s} / I_{2s} = R_2 + j_2 X_2 \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde R_2 y X_2 son la resistencia y la reactancia de fuga del rotor referido, respectivamente.

El estator ve una onda de flujo y de FMM que gira a la velocidad síncrona. Este flujo induce en el estator una fuerza contra electromotriz E_1 y un voltaje de deslizamiento en el rotor E_{2s} . Debido a que la velocidad relativa debida a la onda de flujo con respecto al rotor es s veces la velocidad respecto del estator, la relación entre las tensiones inducidas es;

$$E_{2s} = s E_1 \quad \text{Ecuación 12}$$

Asimismo, la FMM de rotor debe contrarrestar la FMM de carga del estator I_2 y debido a que el numero de vueltas del embobinado equivalente es el mismo que el de estator se tiene que;

$$I_{2s} = I_2 \quad \text{Ecuación 13}$$

Luego se tiene que para el circuito de rotor;

$$I_{2s} = E_{2s} / R_2 + j_2 X_2 \quad \text{Ecuación 14}$$

El circuito equivalente que representa esta ecuación es el mostrado a continuación.

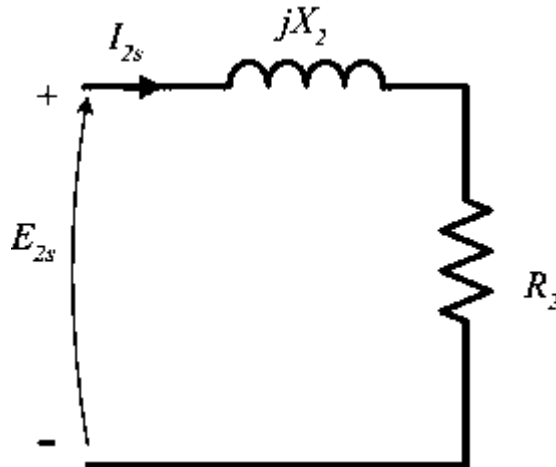


Figura 2.8. Circuito equivalente del embobinado de rotor equivalente

2.4.3.- Circuito equivalente de la máquina de inducción.

Desarrollando las ecuaciones del circuito de rotor a partir de la ecuación de las tensiones inducidas y tomando en cuenta que la FMM de rotor contrarresta la FMM de estator se tiene que;

$$I_{2s} = E_{2s} / R_2 + j_s X_2 = sE_1 / R_2 + j_s X_2 = E_1 / ((R_2/s) + jX_2) = I_2 \quad (\text{Ecuacion 15})$$

Es decir, el estator “ve” un voltaje en el entrehierro un voltaje inducido E_1 y una corriente de carga I_2 y por la ecuación anterior estas condiciones son idénticas a conectar una impedancia $R_2/s + jX_2$ a la tensión E_1 . Consecuentemente, el efecto del rotor sobre el circuito de estator, puede ser agregado incorporando una impedancia. El traspaso de potencia activa hacia el rotor se encuentra reflejado en la resistencia R_2/s que es función del deslizamiento y por lo tanto de la carga mecánica. Notar que cuando el voltaje y la corriente del rotor son reflejadas al estator, su frecuencia es la frecuencia del estator. Todo el fenómeno que ocurre en el rotor cuando se observa del estator ocurre a la frecuencia de este debido a que los embobinados del estator solo observan una onda de flujo y FMM que viajan a la velocidad síncrona. El circuito resultante es el mostrado en la figura siguiente;

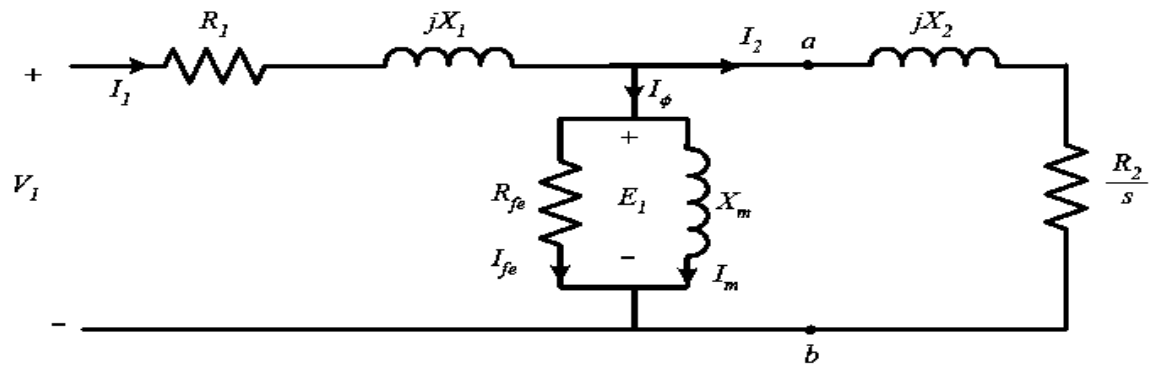


Figura 2.9. Circuito equivalente estándar de una maquina de inducción.

Capítulo 3. Pruebas realizadas al motor de inducción de rotor devanado.

3.1 Introducción.

Es necesario realizar pruebas eléctricas y mecánicas para de esta forma hacer el diagnóstico sobre el estado del motor de inducción de rotor devanado. Al realizar las pruebas vamos a obtener los datos necesarios para compararlos con los datos que nos proporciona el fabricante y poder alcanzar el objetivo. Dichas pruebas se describen a continuación;

3.2.-Obtención de curvas de saturación en vacío.

En esta prueba se tomarán las mediciones necesarias para trazar las curvas características de comportamiento del circuito magnético.

Cabe mencionar que las curvas son válidas solamente para la longitud y sección transversal del núcleo, así como el número de vueltas de la bobina de excitación, por lo que la curva obtenida representará solo al circuito en cuestión.

En esta prueba se obtendrán algunos resultados interesantes como son;

a).- Estado de saturación del circuito magnético. Permite verificar el buen desempeño del circuito magnético, para un voltaje y una frecuencia dada, a cada número de vueltas de la bobina le corresponde una sección de núcleo. Si la cantidad de hierro es adecuada a las bobinas, la saturación debe presentarse inmediatamente arriba del voltaje nominal.

Si el voltaje nominal queda en la región de saturación, significa que el núcleo es débil y el motor tendrá un alto índice de pérdidas magnéticas, que se manifiestan por sobrecalentamiento.

Si el voltaje nominal queda en la región lineal, mucho antes de que la curva pierda su pendiente, significa que el núcleo es muy robusto, lo cual es bueno para el funcionamiento de la maquina pero aumenta innecesariamente su costo.

Para obtener la curva de saturación se aplica escalonadamente una serie de valores de voltaje ($V_1, V_2, V_3, V_4, V_5\dots$), y se miden sus respectivas corrientes de excitación ($I_1, I_2, I_3, I_4, I_5\dots$). Ambas variables se pueden medir sin dificultad desde el interior de la maquina.

Pero como el embobinado del rotor, el cual en condiciones estáticas se comporta como el secundario de un transformador en corto circuito, provocaría una corriente considerable en la alimentación del motor en prueba, adicional a la corriente que se desea medir. Esta dificultad se supera alimentando las tres fases del motor permitiendo que el rotor gire libremente, absolutamente sin ninguna carga, con lo que se consigue una velocidad casi síncrona y se evita la inducción en el rotor.

Sin embargo, lo anterior no es valido para valores de voltaje muy pequeños, ya que el flujo magnético que se induce no es suficientemente fuerte para vencer las pérdidas por fricción y ventilación, por lo que en la práctica no se tendrán valores cercanos al origen de la grafica.

Mientras la maquina no alcanza su velocidad síncrona, en su alimentación se manifiestan corrientes elevadas de corto circuito en el rotor. En el momento en que estas corrientes bajan a un valor mínimo, se considera que el motor ha completado su etapa de arranque.

El valor de voltaje al cual el motor termina su arranque se llama voltaje mínimo de arranque. A partir de ese valor se pueden obtener los datos para el trazo de la curva.

Es conveniente medir la potencia consumida en cada escalón de voltaje, lo que permite trazar otra curva simultánea a las de saturación.

b).- *Determinación de pérdidas mecánicas.* Para el voltaje mínimo de arranque se da un cierto número de Watts que se disipan por pérdidas mecánicas por fricción y ventilación, y pérdidas eléctricas en los devanados.

$$\bar{W}_{min} = \text{pérdidas mecánicas} + \text{pérdidas eléctricas.}$$

El valor de las pérdidas será el nominal puesto que es cuando la máquina logra una velocidad que será con una diferencia insignificante su velocidad de trabajo.

Las pérdidas eléctricas, aunque no son las nominales, puesto que la corriente circulante no es la nominal, si es un valor que se debe tener en cuenta, puesto que la corriente por lo general no es despreciable debido al factor de potencia bajo.

Las pérdidas magnéticas si son de magnitud despreciable debido al valor pequeño de voltaje.

$$\text{Pérdidas mecánicas} = W_{\min} - 3I_1^2R$$

De donde la corriente I_1 es la corriente de fase, que se obtiene de la I_{\min} , según que el embobinado del motor este en circuito delta o estrella, y R es la resistencia efectiva de una fase.

c) Determinación de las pérdidas magnéticas.

Las pérdidas magnéticas se presentan cuando el motor se excita a su voltaje nominal. La potencia que identificamos como W_0 se disipa en pérdidas mecánicas nominales, pérdidas magnéticas nominales y pérdidas eléctricas.

$$W_0 = \text{pérdidas mecánicas} + \text{pérdidas magnéticas} + \text{pérdidas eléctricas.}$$

De donde se despejan las pérdidas magnéticas, quedando la siguiente ecuación;

$$\text{Pérdidas magnéticas} = W_0 - \text{pérdidas mecánicas} - 3I_2^2R$$

Procedimiento de la prueba.

Para llevar a cabo la prueba se necesita el siguiente equipo.

- 1.- Una fuente variable de voltaje
- 2.- Un voltímetro
- 3.- Un medidor de potencia trifásico digital
- 4.- Un motor de inducción de rotor devanado
- 5.- Un juego de puntas para conexión

Antes de iniciar la prueba se mide con el óhmetro la resistencia óhmica de una fase. Es conveniente que la maquina haya permanecido en reposo por varias horas, en un lugar exento de corrientes de aire y de cambios bruscos de temperatura, lo anterior para garantizar que los embobinados se encuentren a temperatura ambiente.

En la siguiente figura se muestra la medición de la resistencia de los devanados del motor.

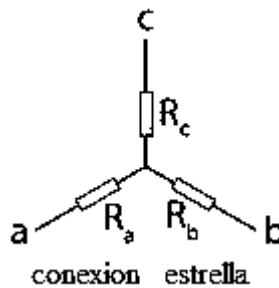


Figura 3.1 Circuito eléctrico del motor conectado en estrella.

Para el análisis delta, la resistencia de fase es igual a tres medios de la lectura. Si las tres lecturas tienen alguna diferencia (esta debe de ser muy pequeña), entonces se toma el promedio de lecturas.

$$R_f = 3/2 (L_1 + L_2 + L_3) / 3$$

o sea:

$$R_f = (L_1 + L_2 + L_3) / 2$$

Para el circuito estrella, la resistencia de fase es igual a un medio de la lectura. Si las tres lecturas tienen alguna diferencia, se toma el promedio de lecturas.

$$R_f = 1/2 (L_1 + L_2 + L_3) / 3$$

o sea:

$$R_f = (L_1 + L_2 + L_3) / 6$$

Después de medir la resistencia, se procede a armar el circuito de prueba, las escalas de los amperímetros y wattímetros se seleccionan aproximadamente para la corriente nominal

a plena carga del motor.

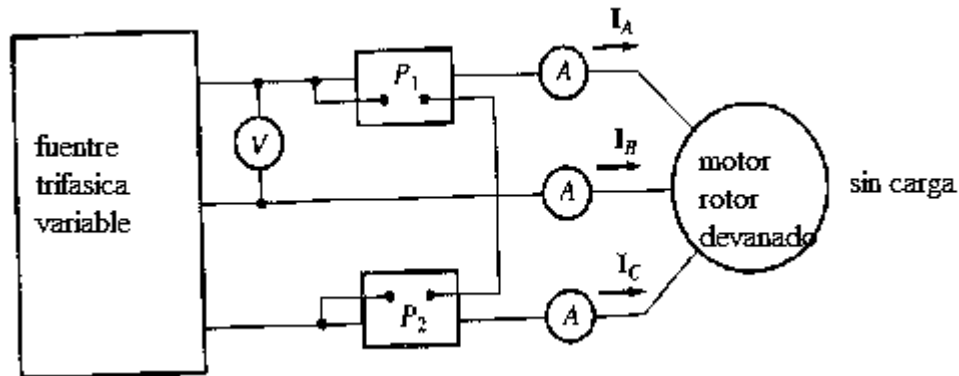


Figura 3.2 Circuito para la prueba de vacío.

Es necesario calentar los cojinetes y normalizar su lubricación, para esto se procede a arrancar el motor y se deja funcionando por unos 30 minutos aproximadamente. El voltaje aplicado puede elevarse hasta un 135% del valor nominal; si con esto se consigue una corriente cercana al valor nominal a plena carga (esto se debe al bajo factor de potencia y un alto grado de saturación), es suficiente para calentar los devanados del estator.

En el caso de que no se haya logrado el calentamiento de los devanados de estator, se efectúa un segundo calentamiento bloqueando el giro del rotor y excitando la maquina con un voltaje reducido, de tal modo que la corriente no sobrepase el valor nominal. Es necesario vigilar que no haya sobrecalentamiento debido a la falta de ventilación.

Para tener resultados confiables se hacen las pruebas a dos diferentes motores, al primero se le llamara motor de prueba 1 que corresponde al motor numero 1 del laboratorio de la facultad, y al segundo motor de prueba 2 corresponde al motor numero 3.

Los datos siguientes corresponden al motor de prueba 1.

Tabla 3.1 Medición de la resistencia en los devanados del motor

Medición de la resistencia de fase		
Lectura	Terminales	Resistencia de fase
L ₁	Devanado 1	12.3Ω
L ₂	Devanado 2	12.4Ω
L ₃	Devanado 3	12.3Ω

Con las mediciones obtenidas, calcule la resistencia de fase.

La resistencia efectiva es;

$$R = (R_1 + R_2 + R_3) / 3 = (12.3 + 12.4 + 12.3) / 3 = 12.33\Omega$$

Ahora se procede a tomar los valores de la prueba para la curva de saturación.

Tabla 3.2 Obtención de las curvas de saturación en vacío.

A ₁	A ₂	A ₃	V	I _L	W _T
----------------	----------------	----------------	---	----------------	----------------

0.28	0.29	0.30	20	0.29	16
0.32	0.31	0.32	30	0.31	16
0.20	0.21	0.23	40	0.21	17
0.20	0.20	0.22	50	0.20	24
0.20	0.21	0.23	60	0.21	24
0.22	0.22	0.25	70	0.22	24
0.26	0.25	0.28	80	0.26	24
0.28	0.28	0.31	90	0.29	24
0.32	0.31	0.35	100	0.32	26
0.36	0.35	0.38	110	0.36	32
0.39	0.38	0.42	120	0.39	32
0.41	0.43	0.44	130	0.42	40
0.47	0.48	0.50	140	0.48	40
0.52	0.50	0.55	150	0.52	48
0.57	0.55	0.60	160	0.57	56
0.62	0.60	0.64	170	0.62	64
0.67	0.65	0.70	180	0.67	72
0.72	0.70	0.75	190	0.72	80
0.78	0.76	0.81	200	0.78	80
0.83	0.81	0.85	208	0.83	80
0.90	0.89	0.93	220	0.90	96

La corriente de línea es el promedio de las lecturas en amperes:

$$I_L = (A_1 + A_2 + A_3) / 3$$

La potencia trifásica es la suma de las lecturas en watts:

$$W_T = W_1 + W_2 + W_3$$

Ahora se procede a dibujar la grafica de curvas saturación en vacío de corriente.

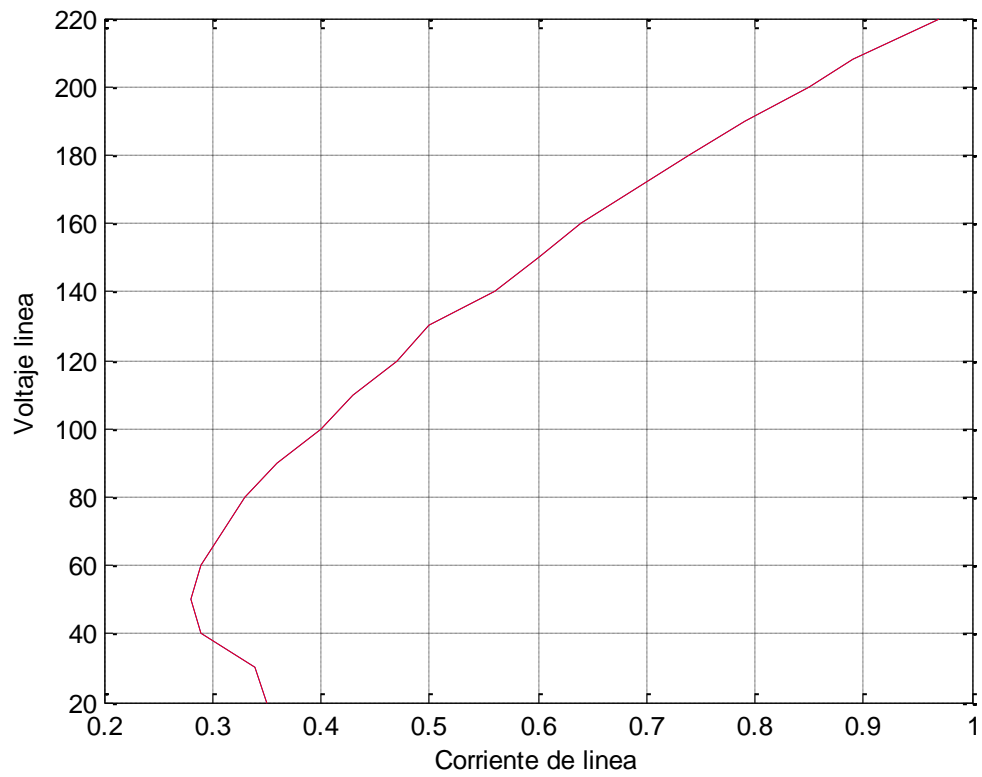


Figura 3.3 grafica de corriente de línea.

Luego dibujamos las curvas de saturación en vacío de potencia.

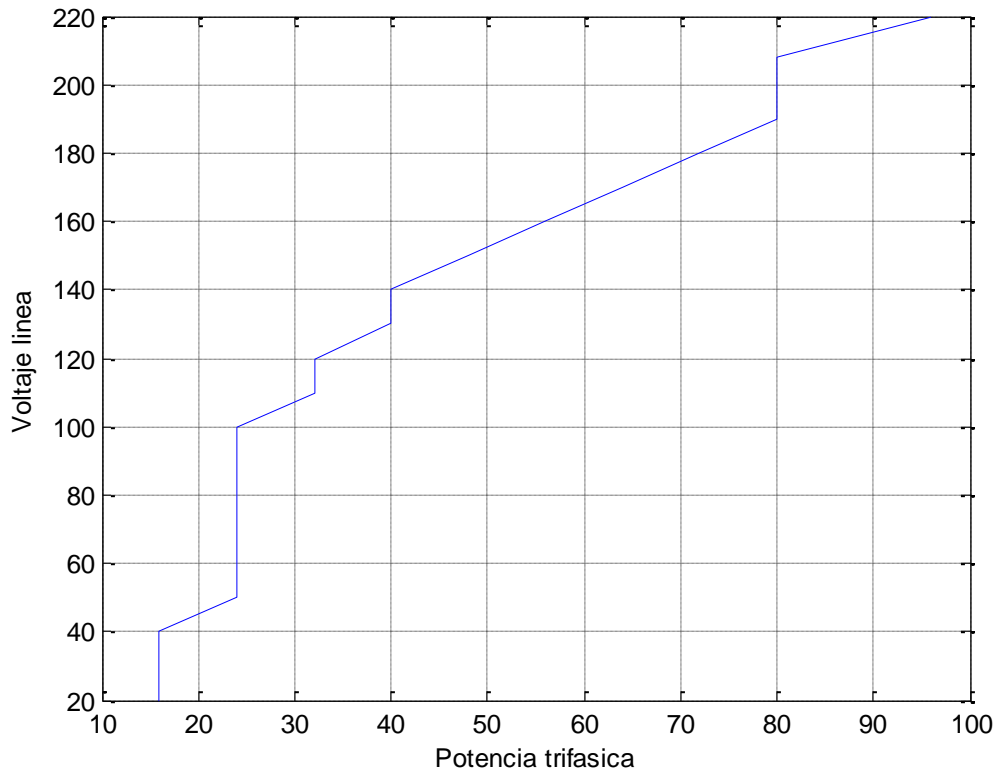


Figura 3.4 Grafica de potencia trifásica.

En las figuras anteriores observamos el comportamiento de los parámetros de corriente, voltaje y potencia, los cuales nos dan el comportamiento característico del circuito magnético.

Determinación de las pérdidas mecánicas.

De las figuras anteriores se tienen los valores de corriente y potencia que corresponden al voltaje mínimo de arranque, que se han de identificar como; I_{\min} y W_{\min} , y se anotan a continuación estos valores.

$$I_{\min} = 0.35 \text{ Amperes}$$

$$W_{\min} = 16 \text{ Watts}$$

La corriente de fase mínima de arranque se calcula:

$I_1 = I_{\min}$ si el embobinado esta en circuito estrella.

$$I_1 = 0.35 \text{ Amperes}$$

$$R = 12.33 \Omega.$$

Las pérdidas eléctricas mínimas de arranque para las tres fases son:

$$PE_a = 3 I_1^2 R$$
$$PE_a = 3 (0.35A)^2(12.33) = 4.53 \text{ W}$$

Finalmente las pérdidas mecánicas son las pérdidas totales menos las eléctricas.

$$P_{MeC} = W_{min} - PE_a$$
$$P_{MeC} = 16 - 4.53 = 11.47 \text{ W}$$

Determinación de las pérdidas magnéticas.

En las figuras anteriores se tienen los valores de corriente y potencia que corresponden al voltaje nominal, mismos que se identifican con las siglas I_0 y W_0 y que se consideraran como valores normales de giro en vacío.

$$I_0 = 0.83 \text{ Amperes} \quad W_0 = 80 \text{ Watts}$$

La corriente de fase en vacío se calcula:

$I_2 = I_0$ si el embobinado está en circuito estrella

Las pérdidas eléctricas en vacío se calculan con la corriente I_2 y la resistencia efectiva de fase a la temperatura de trabajo, siendo este último valor el mismo calculado en el paso anterior.

$$PE_0 = 3 I_2^2 R$$
$$PE_0 = 3(0.83)^2 12.33 = 25.48 \text{ W}$$

Las pérdidas magnéticas de la máquina son las pérdidas totales en vacío, menos las mecánicas y las eléctricas en vacío.

$$P_{mag} = W_0 - PM - PE_0$$
$$P_{mag} = 80 \text{ W} - 11.47 - 25.48 = 43.05 \text{ W}$$

Determinación de las pérdidas eléctricas.

Las pérdidas eléctricas con carga nominal aun no se pueden calcular porque faltan datos del rotor, mismos que se podrán obtener en la prueba siguiente.

Se presentan las pruebas realizadas al segundo motor el cual es identificado como motor número 3 en el laboratorio de ingeniería eléctrica.

Los datos siguientes corresponden al motor de prueba2.

Tabla 3.3 Medición de la resistencia de fase del motor.

Medición de la resistencia de fase		
Lectura	Terminales	Resistencia de fase
L ₁	Devanado 1	12.3Ω
L ₂	Devanado 2	12.5Ω
L ₃	Devanado 3	12.4Ω

Con las mediciones obtenidas, calcule la resistencia de fase.

La resistencia efectiva es;

$$R_{ef} = (R_1 + R_2 + R_3) / 3 = (12.3 + 12.5 + 12.4) / 3 = 12.4\Omega$$

Ahora se procede a tomar los valores de la prueba para la curva de saturación.

Tabla 3.4 Obtención de las curvas de saturación en vacío.

A ₁	A ₂	A ₃	V	I _L	W _T
0.21	0.23	0.25	20	0.23	8

0.20	0.20	0.21	30	0.20	16
0.18	0.18	0.19	40	0.18	16
0.18	0.19	0.20	50	0.19	16
0.20	0.20	0.20	60	0.20	24
0.22	0.23	0.25	70	0.23	24
0.26	0.26	0.29	80	0.26	24
0.29	0.29	0.32	90	0.29	24
0.33	0.33	0.35	100	0.33	24
0.36	0.36	0.39	110	0.36	32
0.40	0.40	0.43	120	0.40	32
0.44	0.44	0.46	130	0.44	40
0.48	0.48	0.51	140	0.48	40
0.53	0.52	0.55	150	0.53	48
0.57	0.57	0.59	160	0.57	56
0.62	0.61	0.64	170	0.62	64
0.67	0.67	0.69	180	0.67	72
0.72	0.72	0.74	190	0.72	80
0.77	0.77	0.80	200	0.77	80
0.82	0.82	0.85	208	0.83	80
0.89	0.89	0.91	220	0.89	88

Graficando los datos de voltaje y corriente se tiene:

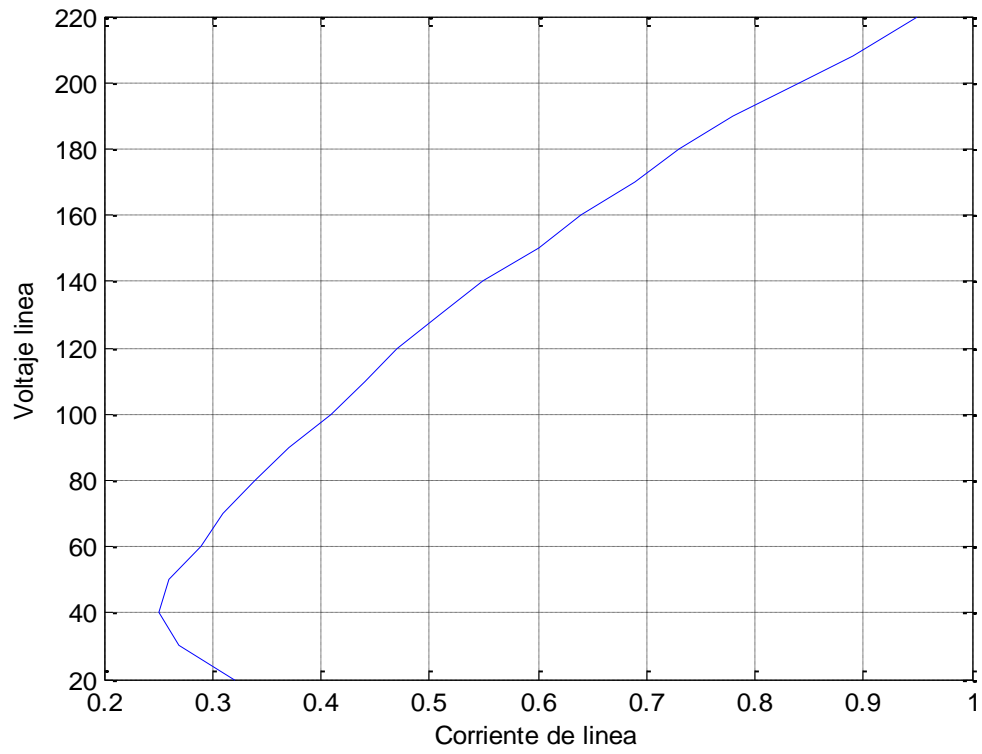


Figura 3.5 Grafica de corriente de línea.

Luego dibujamos las curvas de saturación en vacío de potencia.

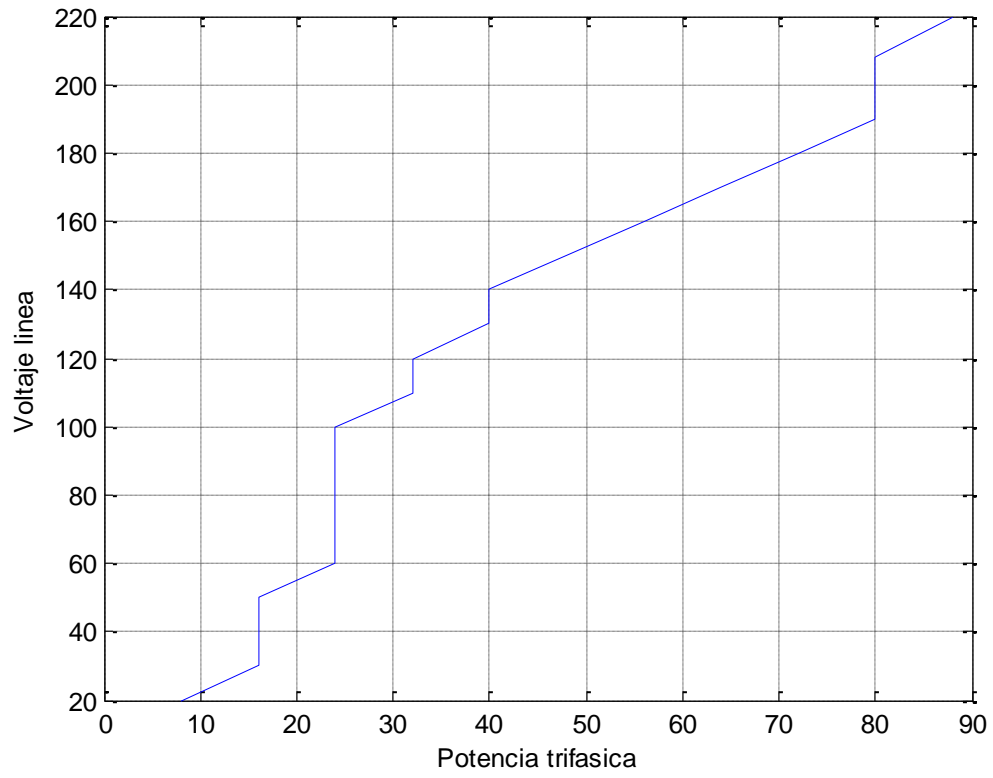


Figura 3.6 Grafica de potencia trifásica.

Determinación de las pérdidas mecánicas.

$$I_{\min} = 0.32 \text{ Amperes}$$

$$W_{\min} = 8 \text{ Watts}$$

$$I_1 = 0.32 \text{ Amperes}$$

$$R = 12.4 \Omega$$

Las pérdidas eléctricas mínimas (PE_a) de arranque para las tres fases son:

$$PE_a = 3 I_1^2 R$$

$$PE_a = 3 (0.32A)^2 (12.4) = 3.89 \text{ W}$$

Finalmente las pérdidas mecánicas ($PMec$) son las pérdidas totales menos las eléctricas.

$$PMec = W_{\min} - PE_a$$

$$PMec = 8 - 3.89 = 4.11 \text{ W}$$

Determinación de las pérdidas magnéticas.

$$I_0 = 0.83 \text{ Amperes}$$

$$W_0 = 80 \text{ Watts}$$

$$PE_0 = 3 I_0^2 R$$

$$PE_0 = 3(0.83)^2 12.4 = 25.62 \text{ W}$$

Las pérdidas magnéticas (P_{mag}) de la máquina son las pérdidas totales en vacío, menos las mecánicas y las eléctricas en vacío.

$$P_{mag} = W_0 - PM - PE_0$$

$$P_{mag} = 80W - 4.11 - 25.62 = 50.27 \text{ W}$$

Determinación de las pérdidas eléctricas.

Las pérdidas eléctricas con carga nominal aun no se pueden calcular porque faltan datos del rotor, mismos que se podrán obtener en la prueba siguiente.

3.3 Obtención de las curvas de saturación con rotor bloqueado

Para realizar esta prueba se le coloca un freno electromagnético a la flecha del motor para impedir el giro del rotor.

Se trata de obtener las graficas de corriente y potencia con respecto a los diferentes voltajes aplicados al motor.

En estado de rotor bloqueado, el sistema electromagnético de la maquina opera como un transformador con el secundario en cortocircuito, por lo que las corrientes en el devanado se elevaran peligrosamente, produciendo sobrecalentamientos rápidos.

Por esa razón, deben extremarse las precauciones al efectuar la prueba, para evitar cualquier daño a la maquina.

La prueba suele efectuarse a voltajes reducidos, ya que es posible extrapolar los resultados que se obtienen para saber cual hubiera sido el comportamiento del motor a voltajes más altos, inclusive el nominal. Pero en este caso se tomaron intervalos de voltaje, y dado que el motor no se calentó en exceso, los valores obtenidos son valores reales.

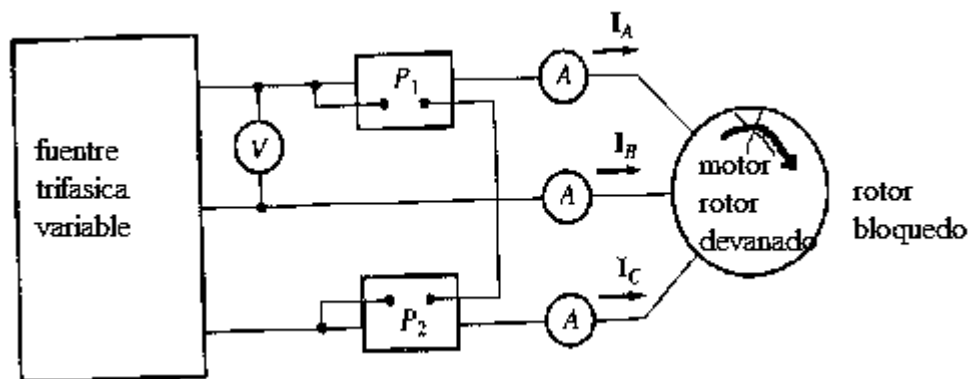


Figura 3.7 Diagrama de circuito de rotor bloqueado

En la siguiente figura se observa la aproximación de la grafica que se obtendría.

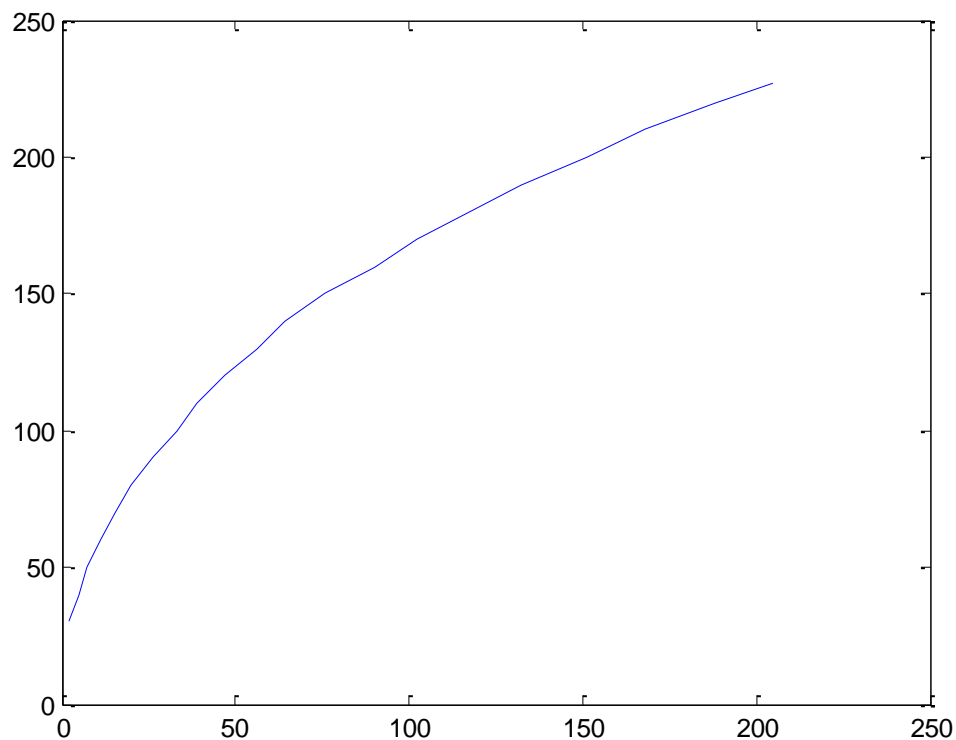


Figura 3.8 Figura aproximada que se obtendrá al final de esta prueba

Objetivos de la prueba.

Se determinara la intensidad de corriente en el momento de arranque de la maquina. Al efectuar mediciones al valor nominal de corriente, los wattmetros darán el valor total de las perdidas eléctricas que habían quedado pendientes en la primera prueba; esto se debe a que en la prueba de rotor bloqueado se provoca circulación de corriente tanto en los embobinados de estator como en los embobinados de rotor.

Procedimiento de la prueba.

El equipo que se utilizara es el siguiente;

- 1.- Un regulador de voltaje
- 2.- Un voltímetro
- 3.- Un medidor de potencia trifásico digital
- 4.- Un motor de inducción de rotor devanado

- 5.- Un freno electromagnético
- 6.- Juego de puntas para conexión

Al efectuar la prueba a voltaje nominal debe considerarse que la corriente puede llegar al 400 y 600% del valor nominal, en cuyo caso se requieren transformadores para los amperímetros y wattímetros.

Para un motor que está sometido a esta prueba constantemente, para fines didácticos, es necesario cuidarlo y no dejar que circule más del 200% de la corriente nominal durante un lapso lo más pequeño posible. Esto corresponde aproximadamente al 40% del voltaje nominal.

La prueba se inicia con los valores más altos determinados, ya que las sobre corrientes elevadas provocan una rápida elevación de la temperatura.

Las lecturas deben tomarse rápidamente, entre más alto sea el voltaje aplicado menos tiempo debe considerarse para poder tomar la lectura, se recomienda que no exceda los 5 segundos para tomar la lectura a voltaje nominal.

Si se detecta un sobrecalentamiento en la maquina, se recomienda suspender la prueba y dejar pasar un tiempo para que la maquina se enfrié.

Desarrollo de la prueba

Una vez seleccionados los instrumentos de medición, habiendo armado el circuito de prueba, se procede a realizar las mediciones.

Se recomienda tomar tres series de mediciones, el 200, 150 y 100% de la corriente nominal aproximadamente, ya que el tiempo es muy corto para ajustar lecturas exactas.

Se tomaron mediciones que van desde el 10% de la corriente nominal hasta el 100%, y

luego se tomaron las correspondientes a 150% y 200% de la corriente nominal.

Los datos obtenidos se tabularan de la forma siguiente, estos datos corresponden al motor número 1 del laboratorio de Ing. Eléctrica:

Motor de prueba 1.

Tabla 3.5 Parámetros de la prueba de rotor bloqueado.

A ₁	A ₂	A ₃	V	I	W
0.12	0.14	0.13	9.1	0.13	0
0.26	0.28	0.29	17.5	0.27	8
0.39	0.41	0.41	23.9	0.40	16
0.52	0.53	0.53	31.1	0.52	24
0.65	0.67	0.67	38.3	0.66	40
0.78	0.79	0.79	44.9	0.78	56
0.91	0.92	0.92	52.2	0.91	80
1.04	1.04	1.05	59.2	1.04	96
1.16	1.17	1.18	66.7	1.17	128
1.31	1.32	1.32	75.7	1.31	160
1.95	1.95	1.95	111.4	1.95	336
2.6	2.7	2.7	149	2.6	590

En la tabla que se muestra enseguida se muestran los valores de voltaje, corriente y potencia.

En la cuarta columna la corriente de línea será el promedio de las sumas de las corrientes por fase como se muestra en la siguiente formula.

$$I_L = (A_1 + A_2 + A_3) / 3$$

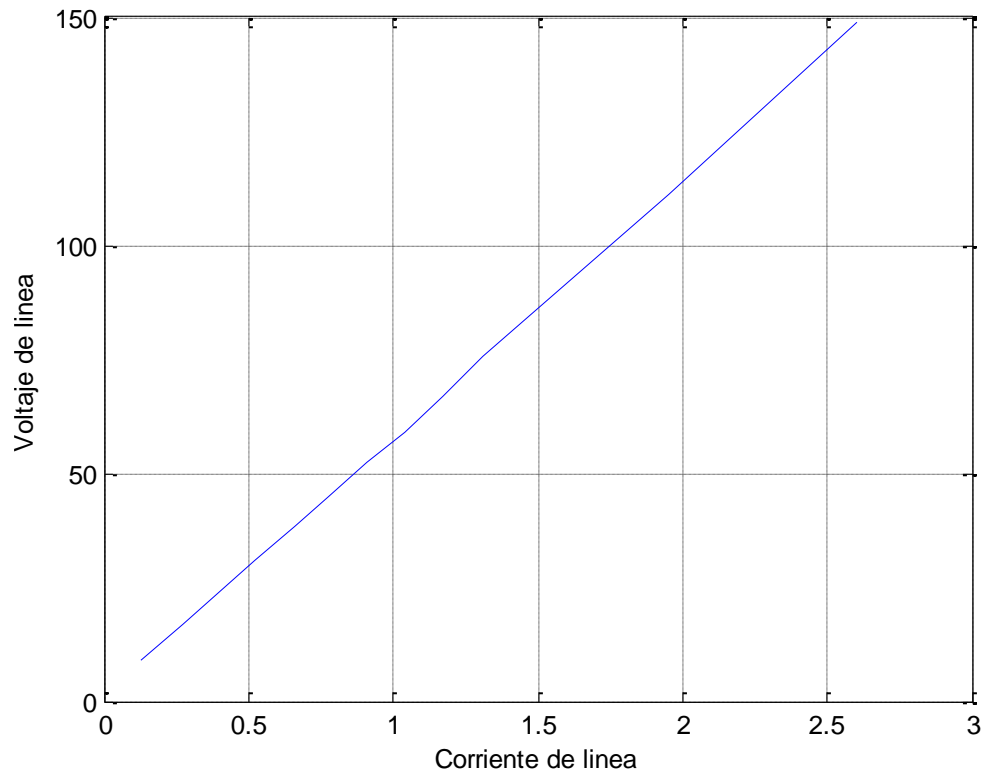


Figura 3.9 Voltaje y corriente de línea.

Luego se grafica el voltaje y la potencia trifásica.

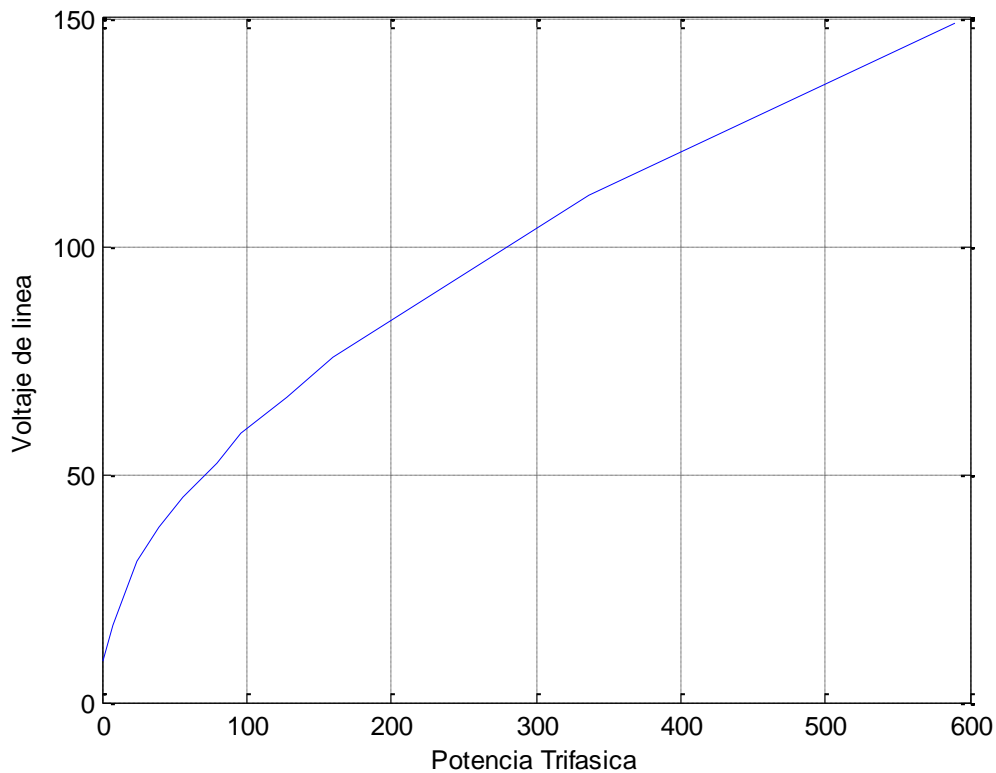


Figura 3.10 Voltaje y potencia.

Resultados

Pérdidas y eficiencia

En la prueba de rotor bloqueado a corriente nominal se obtienen los watts que se pierden por calentamiento del cobre, tanto en el estator como en el rotor.

Ahora se tienen las tres pérdidas y se hace la suma.

- Pérdidas mecánicas = 11.47 W
- Pérdidas magnéticas = 43.03 W
- Pérdidas eléctricas = 160 W
- Pérdidas totales = 214.5 W

Son las pérdidas que corresponden al motor número 1 del laboratorio, al cual llamamos motor de prueba 1.

La eficiencia del motor es;

Como el motor es de ¼ HP, al convertirlo en Watts nos resulta;

Potencia = 186.5 W

Eficiencia = (potencia de salida/ (potencia de salida + perdidas)) x 100

Eficiencia = (186.5 W / (186.5 + 214.5)) x 100 = 46.5%

Se puede ver que la eficiencia del motor es muy baja y corresponde solamente al régimen de plena carga y con los datos de placa del motor.

Los siguientes datos corresponden al motor número 3 del laboratorio de Ing. Eléctrica, que corresponde al motor de prueba 2:

Tabla 3.6 Parámetros de la prueba de rotor bloqueado.

A ₁	A ₂	A ₃	I	V	W
0.12	0.12	0.13	0.12	8.3	0
0.26	0.27	0.29	0.27	17.9	8
0.39	0.40	0.41	0.40	24.4	24
0.52	0.53	0.54	0.53	32.8	24
0.65	0.66	0.67	0.66	40	40
0.78	0.79	0.81	0.79	46.7	64
0.91	0.92	0.94	0.92	55.4	80
1.04	1.05	1.07	1.05	62.9	96
1.16	1.17	1.18	1.17	70.2	128
1.31	1.32	1.36	1.33	78.7	160
1.95	1.95	1.97	1.95	115.2	344
2.6	2.6	2.63	2.6	156	620

En la siguiente grafica se muestra el comportamiento de la corriente y el voltaje de línea.

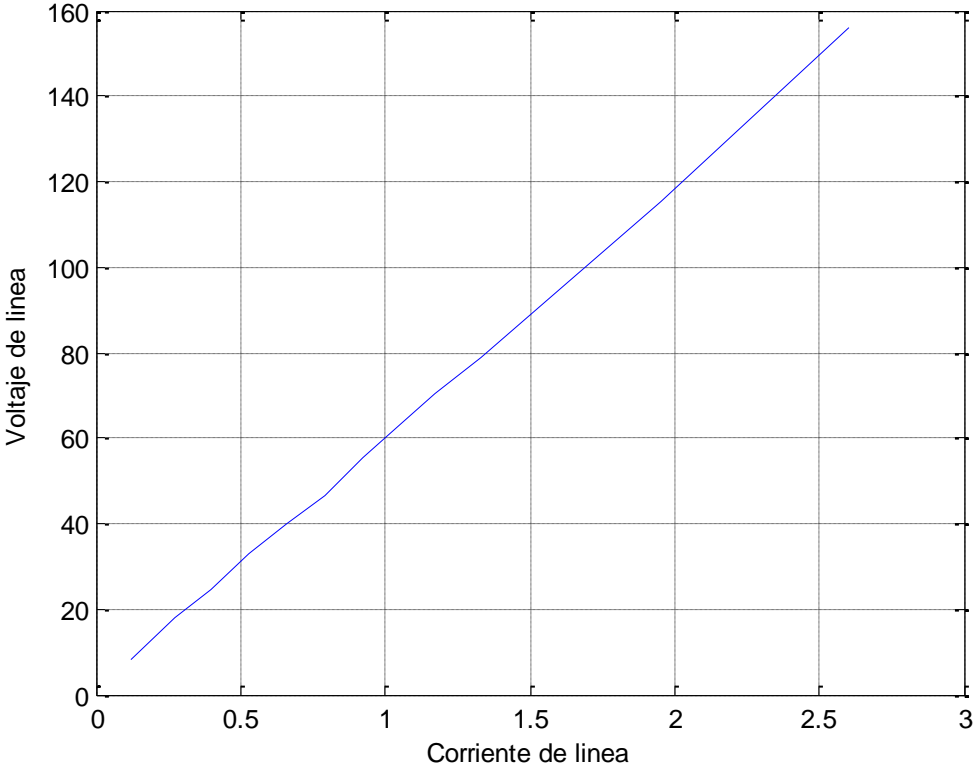


Figura 3.11 Voltaje y corriente de línea
Luego se grafica el voltaje y la potencia trifásica.

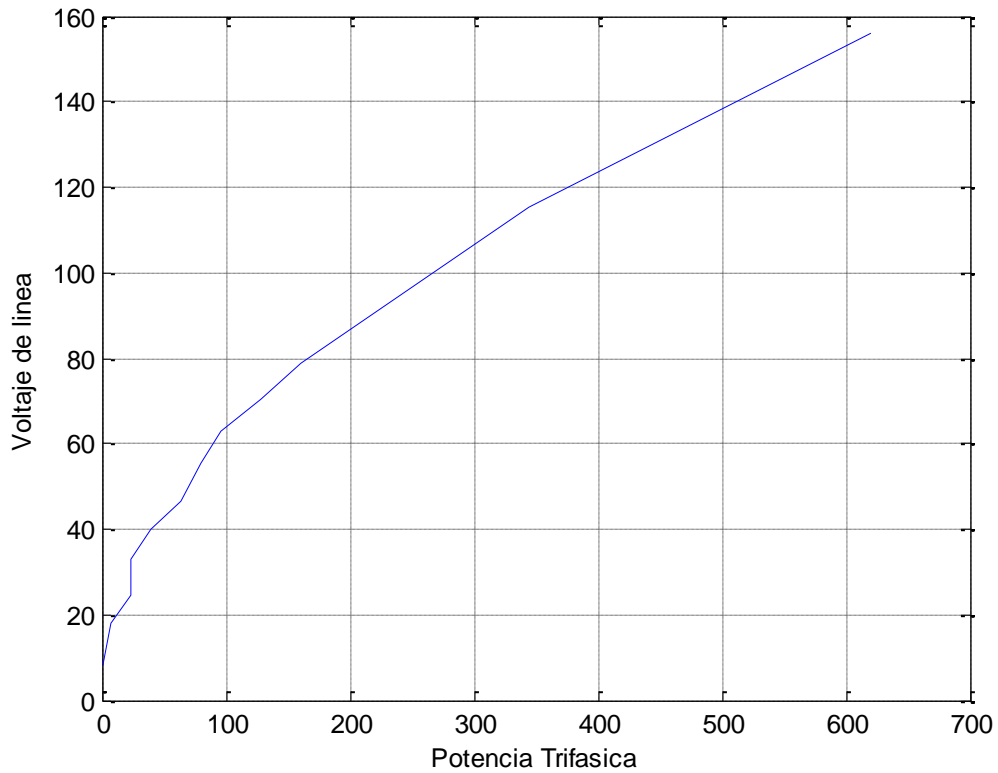


Figura 3.12 Voltaje y potencia.

Resultados

Pérdidas y eficiencia

En la prueba de rotor bloqueado a corriente nominal se obtienen los watts que se pierden por calentamiento del cobre, tanto en el estator como en el rotor.

Ahora se tienen las tres pérdidas y se hace la suma.

- Pérdidas mecánicas = 4.11 W
- Pérdidas magnéticas = 50.27 W
- Pérdidas eléctricas = 160 W
- Pérdidas totales = 214.38 W

La eficiencia del motor es;

Como el motor es de ¼ HP, al convertirlo en Watts nos resulta;

Potencia = 186.5 W

Eficiencia = (potencia de salida/ (potencia de salida + perdidas)) x 100

Eficiencia = (186.5 W/ (186.5 + 214.38)) x 100 = 46.5%

Se puede ver que la eficiencia del motor es muy baja y corresponde solamente al régimen de plena carga y con los datos de placa del motor.

3.4 Obtención del circuito equivalente.

Para obtener el circuito equivalente es necesario tomar una serie de datos sacados en la aplicación de pruebas anteriores como lo son; prueba de vacío y prueba de rotor bloqueado. Con los valores numéricos obtenidos se hace el análisis del circuito equivalente, y después se construyen las curvas típicas de operación del motor.

El circuito equivalente consiste en un circuito eléctrico pasivo, sin acoplamientos magnéticos. La carga mecánica del motor se transforma en un elemento resistivo del circuito, de modo que todo el comportamiento se analiza exclusivamente en términos eléctricos. A continuación se describen las formulas que representan al circuito, las cuales se desprenden de las leyes y conceptos de la Física correspondiente a la teoría de motores.

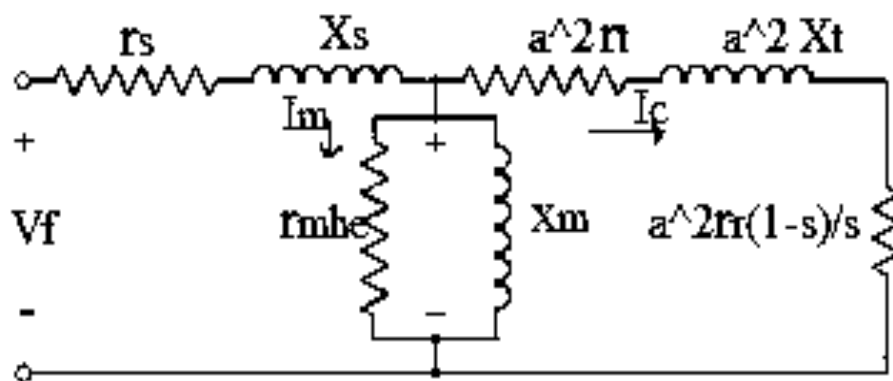


Figura 3.13 Circuito equivalente exacto del motor.

El circuito equivalente debe modelar el comportamiento de una fase por tanto a la izquierda del diagrama se le aplica el voltaje de fase V_f y una corriente I .

En el centro del dibujo, la corriente se divide en 2 partes, una pequeña que es la de magnetización I_m y la más importante que es la corriente de carga I_c .

Como se puede observar, este circuito tiene gran parecido al circuito equivalente del transformador, y en este caso lo carga siempre será resistiva, considerando esta analogía, se definirá al devanado del estator como el primario de un transformador, y el devanado del rotor como el secundario. Entre primario y secundario hay una relación de transformación “a” y la carga mecánica en la flecha se comporta como una resistencia de carga en el secundario.

r_s = Resistencia efectiva a la corriente alterna del embobinado del estator.

x_s = Reactancia originada por flujo disperso en el embobinado del estator.

r_{mhe} = Resistencia representativa de las pérdidas mecánicas, de histéresis y de corrientes de Eddy.

x_m = Reactancia de magnetización.

r_r = Resistencia del embobinado del rotor.

x_r = Reactancia originada por flujo disperso en el rotor.

$a^2 r_r$ = Valor de r_r referido al voltaje de estator.

$a^2 x_r$ = Valor de x_r referido al voltaje de estator.

$a^2 r_r (1-S) / S$ = Resistencia equivalente de la carga mecánica.

S = Deslizamiento.

Al fin de eliminar el acoplamiento magnético en el circuito para tener un solo voltaje de referencia, los parámetros del secundario aparecen multiplicados por el cuadrado de la relación de transformación, y el circuito secundario se encuentra conectado directamente con el primario.

Las resistencias de estator y rotor quedan ahora en serie en la parte de la derecha del

circuito, y para facilitar su análisis se juntan en un solo elemento.

$$R = r_s + a^2 r_r$$

Lo mismo sucede con las reactancias de dispersión de rotor y estator

$$X = x_s + a^2 x_r$$

Y por sencillez la resistencia de carga será igual a;

$$R_c = a^2 r_r (1-S) / S$$

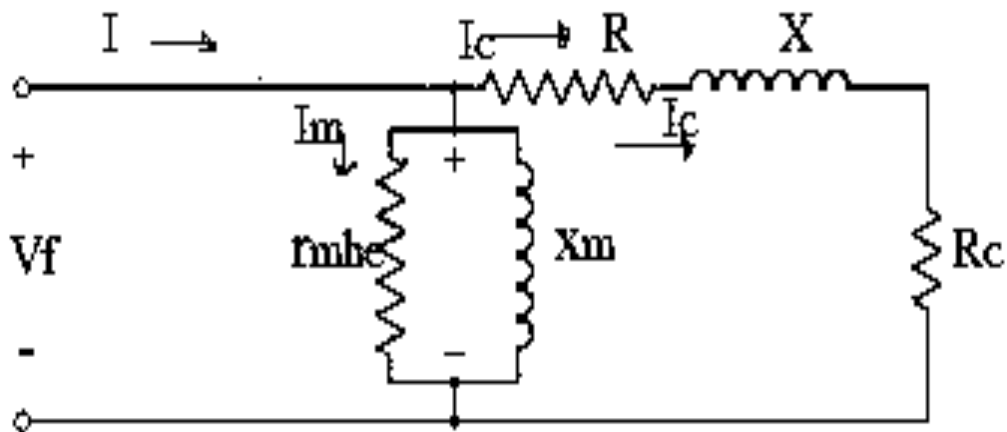


Figura 3.14 Circuito equivalente aproximado.

A la izquierda del circuito se tiene el V_f y entrando al circuito aparece la corriente de fase I la cual se divide en una parte pequeña que es la corriente de magnetización I_m y otra parte, la más importante que es la corriente de carga I_c .

Objetivos.

Mediante la prueba de vacío a voltaje nominal, y otra prueba con rotor bloqueado a corriente nominal se obtendrán los datos característicos del motor que permitan calcular los parámetros del circuito.

Con estos datos, se analizará el comportamiento del circuito bajo diferentes condiciones de carga. Tabulando estos datos se pueden construir las curvas características de respuesta del motor cuyas coordenadas serían el par desarrollado como abscisa, y la potencia mecánica, la corriente de línea, la velocidad, la eficiencia y el factor de potencia como

ordenadas.

Los puntos de las diferentes graficas que corresponden al estado de carga nominal deben concordar con los datos de placa del motor.

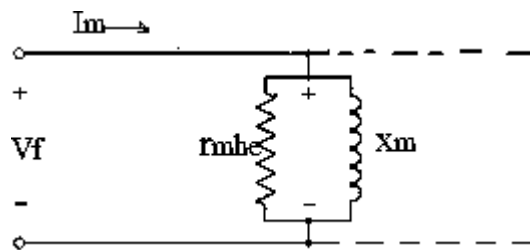
A continuación se presentan los datos y cálculos para el motor de prueba 1.

Determinación de los parámetros.

1.- prueba de vacío.

Los valores que se requieren para este paso son los obtenidos en la anterior prueba de vacío, solo que nos interesan únicamente los correspondientes al voltaje nominal.

A la izquierda del circuito tiene aplicado el voltaje de fase, y entrando, la corriente de fase.



3.15 Circuito aproximado en vacío.

Las potencias aparente, real y reactiva fluyen hacia los parámetros. La potencia aparente es el producto del voltaje por la corriente, mientras que la real es un tercio de la potencia trifásica leída en los wattímetros. De estas dos lecturas se calcula la reactiva.

$$V_f = V / \sqrt{3} \quad \text{para circuito estrella}$$

$$V_f = V \quad \text{para circuito delta}$$

$$I_{of} = I_o \quad \text{para circuito estrella}$$

$$I_{of} = I_o / \sqrt{3} \quad \text{para circuito delta}$$

$$S_o = V_f I_{of} \quad \text{potencia aparente}$$

$$P_o = W_T / 3 \quad \text{potencia real (} W_T \text{ es la potencia real trifásica en vacío)}$$

$$Q_o = \sqrt{S_o^2 - P_o^2} \quad \text{potencia reactiva}$$

De la prueba se obtienen los valores para V_f y para I_{of} .

$$V_f = 208/\sqrt{3} = 120V; \quad I_{of} = 0.83 \quad W_T = 80 W$$

La potencia real se disipa en la resistencia por perdidas mecánicas, de histéresis y de corrientes parasitas.

$$P_o = V_f^2 / r_{mhe}, \quad \text{de donde:} \quad r_{mhe} = V_f^2 / P_o$$

$$P_o = W_T / 3 = 80/3 = 26.66 W.$$

$$r_{mhe} = V_f^2 / P_o = (120)^2/26.66 = 540.13 \Omega$$

La potencia reactiva oscila en la reactancia de magnetización;

$$Q_o = V_f^2 / X_m, \quad \text{de donde:} \quad X_m = V_f^2 / Q_o$$

$$S = V_f (I_{of}); \quad S = (120)(0.83) = 99.6 VA$$

$$Q_o = \sqrt{S_o^2 - P_o^2} = \sqrt{(99.6)^2 - (26.66)^2} = 95.96 \text{ Vars}$$

$$X_m = (120)^2/95.96 = 150.06 \Omega$$

2.- Prueba de rotor bloqueado.

Al igual que en el caso anterior los datos necesarios para este paso, son los mismos que se obtuvieron en la prueba de rotor bloqueado, pero nos interesan solamente los que corresponden a la corriente nominal.

A la izquierda del circuito tiene aplicado el voltaje de fase, y entrando, la corriente de fase. Sus valores numéricos se deducen de los resultados de extrapolación.

Las potencias aparente, real y reactiva fluyen hacia los parámetros.

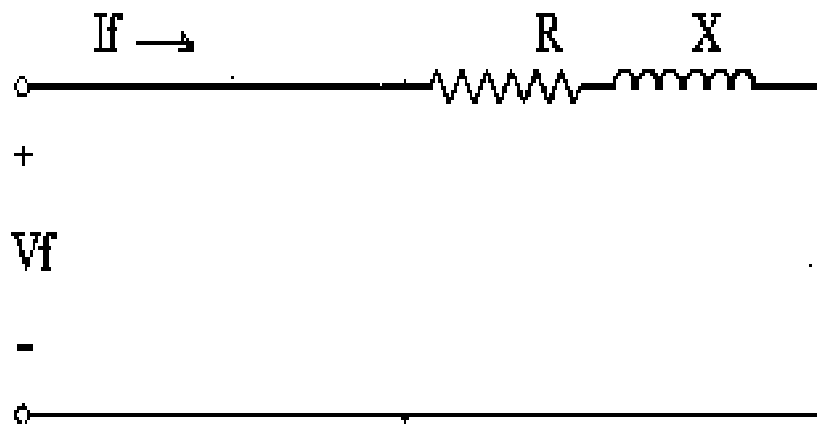


Figura 3.16 Circuito aproximado con rotor bloqueado.

$$\begin{aligned}
V_f &= V / \sqrt{3} && \text{para circuito estrella} \\
V_f &= V && \text{para circuito delta} \\
I_{af} &= I_a && \text{para circuito estrella} \\
I_{af} &= I_a / \sqrt{3} && \text{para circuito delta} \\
S_a &= V_f I_{af} && \text{potencia aparente} \\
P_a &= W_a / 3 && \text{potencia real (} W_a \text{ es la potencia trifásica de arranque)} \\
Q_a &= \sqrt{S_a^2 - P_a^2} && \text{potencia reactiva}
\end{aligned}$$

La potencia real se disipa en la resistencia de rotor y estator

$$\begin{aligned}
P_a &= I_a^2 R, \quad \text{de donde; } R = P_a / I_a^2 \\
I_a &= 1.31\text{A}; \quad V_f = 75.7/\sqrt{3} = 43.7\text{V} \quad W_a = 160 \text{ W.} \\
P_a &= W_a / 3 = 160/3 = 53.33 \text{ W} \\
R &= 53.33 \text{ W} / (1.31)^2 = 31 \Omega
\end{aligned}$$

La potencia reactiva oscila en la reactancia de dispersión de rotor y estator;

$$\begin{aligned}
S_a &= (43.7) (1.31) = 57.24 \text{ VA} \\
Q_a &= \sqrt{S_a^2 - P_a^2} = \sqrt{(57.24)^2 - (53.33)^2} = 20.79 \text{ Vars} \\
Q_a &= I_a^2 X, \quad \text{de donde; } X = Q_a / I_a^2 \\
X &= (20.79) / (1.31)^2 = 12.11 \Omega
\end{aligned}$$

Teniendo en cuenta que R es la resistencia de rotor y estator:

$$R = r_s + a^2 r_r$$

En donde R es el valor calculado anteriormente y r_s se midió antes de comenzar las dos pruebas, se puede despejar el término $a^2 r_r$:

$$\begin{aligned}
a^2 r_r &= R - r_s \\
a^2 r_r &= 31 - 12.33 = 18.67 \Omega.
\end{aligned}$$

El resultado obtenido pasa a ser coeficiente del quebrado en la expresión de la resistencia de carga.

$$R_c = a^2 r_r (1 - S / S)$$

En este caso se utilizó una máquina síncrona para asegurar que el deslizamiento sea igual a cero. Por lo tanto $S = 0$.

$$R_c = 18.67 (1 - 0/0) = \infty.$$

Con lo que se completa el valor numérico para todos los parámetros de la figura.

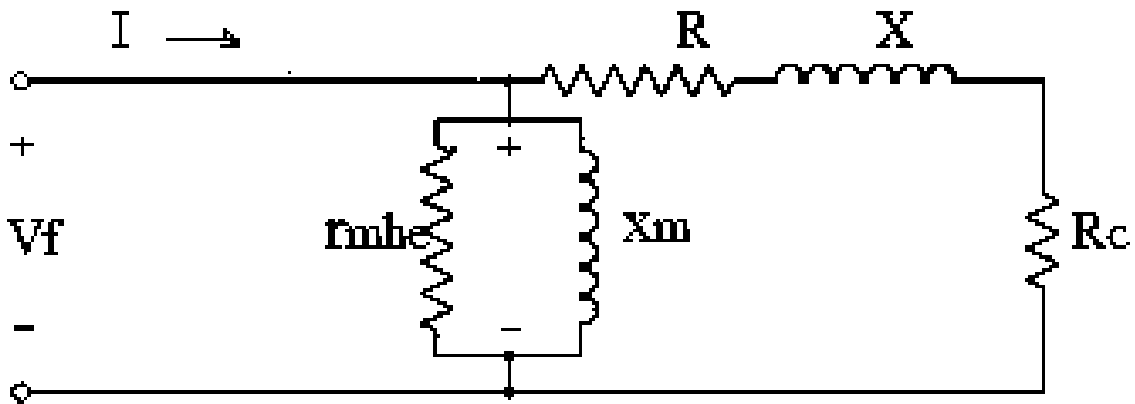


Figura 3.17 Circuito aproximado con valores.

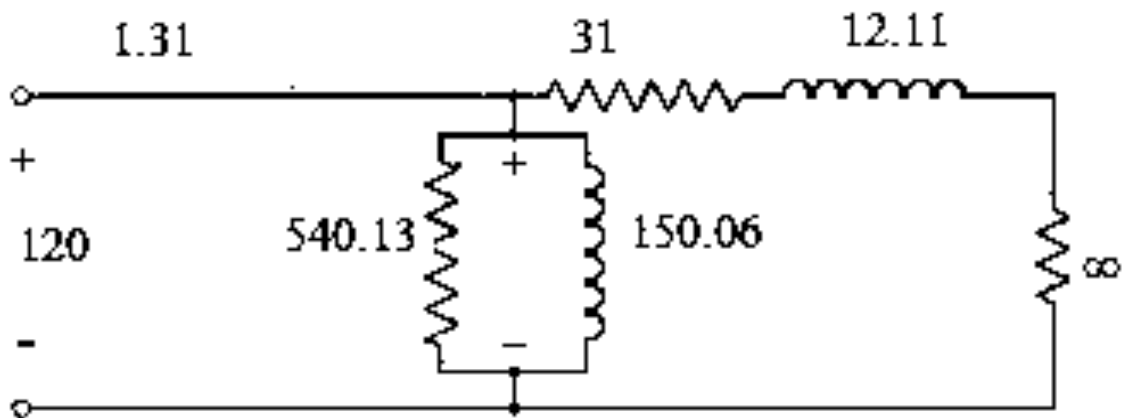


Figura 3.18 circuito con valores de sus parámetros.

Los datos y cálculos siguientes corresponden al motor de prueba numero 2.

Para el motor de prueba numero 2 tenemos:

De la prueba se obtienen los valores para V_f y para I_{of} .

$$V_f = 208/\sqrt{3} = 120V; \quad I_{of} = 0.83 \quad W_T = 80 W$$

La potencia real se disipa en la resistencia por perdidas mecánicas, de histéresis y de corrientes parasitas.

$$P_o = V_f^2 / r_{mhe}, \quad \text{de donde:} \quad r_{mhe} = V_f^2 / P_o$$

$$P_o = W_T / 3 = 80/3 = 26.66 W.$$

$$r_{mhe} = V_f^2 / P_o = (120)^2/26.66 = 540.13 \Omega$$

La potencia reactiva oscila en la reactancia de magnetización;

$$Q_o = V_f^2 / X_m, \quad \text{de donde:} \quad X_m = V_f^2 / Q_o$$

$$S = V_f (I_{of}); \quad S = (120) (0.83) = 99.6 VA$$

$$Q_o = \sqrt{S_o^2 - P_o^2} = \sqrt{(99.6)^2 - (26.66)^2} = 95.96 \text{ Vars}$$

$$X_m = (120)^2/ 95.96 = 150.06 \Omega$$

2.- Prueba de rotor bloqueado.

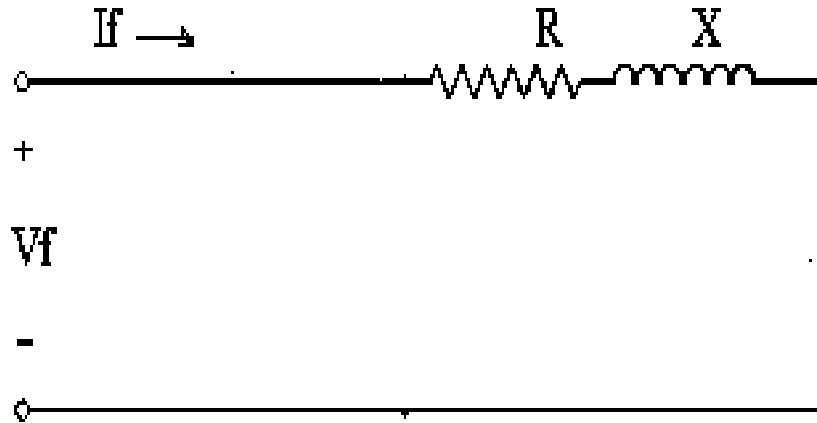


Figura 3.19 Circuito aproximado con rotor bloqueado.

La potencia real se disipa en la resistencia de rotor y estator

$$P_a = I_a^2 R, \text{ de donde; } R = P_a / I_a^2$$

$$I_a = 1.33 \text{ A; } V_f = 78.7/\sqrt{3} = 45.43 \text{ V } W_a = 160 \text{ W.}$$

$$P_a = W_a / 3 = 160/3 = 53.33 \text{ W}$$

$$R = 53.33 \text{ W} / (1.33)^2 = 30.15 \Omega$$

La potencia reactiva oscila en la reactancia de dispersión de rotor y estator;

$$S_a = (45.43) (1.33) = 60.42 \text{ VA}$$

$$Q_a = \sqrt{S_a^2 - P_a^2} = \sqrt{(60.42)^2 - (53.33)^2} = 28.39 \text{ Vars}$$

$$Q_a = I_a^2 X, \text{ de donde; } X = Q_a / I_a^2$$

$$X = 28.39 / (1.33)^2 = 16.05 \Omega$$

$$R = r_s + a^2 r_r$$

$$a^2 r_r = R - r_s$$

$$a^2 r_r = 30.15 - 12.4 = 17.75 \Omega.$$

El resultado obtenido pasa a ser coeficiente del quebrado en la expresión de la resistencia de carga.

$$R_c = a^2 r_r (1 - S / S)$$

En este caso se utilizo una maquina síncrona para asegurar que el deslizamiento sea igual a cero. Por lo tanto $S = 0$.

$$R_c = 17.75 (1 - 0/0) = \infty.$$

Con lo que se completa el valor numérico para todos los parámetros de la figura.

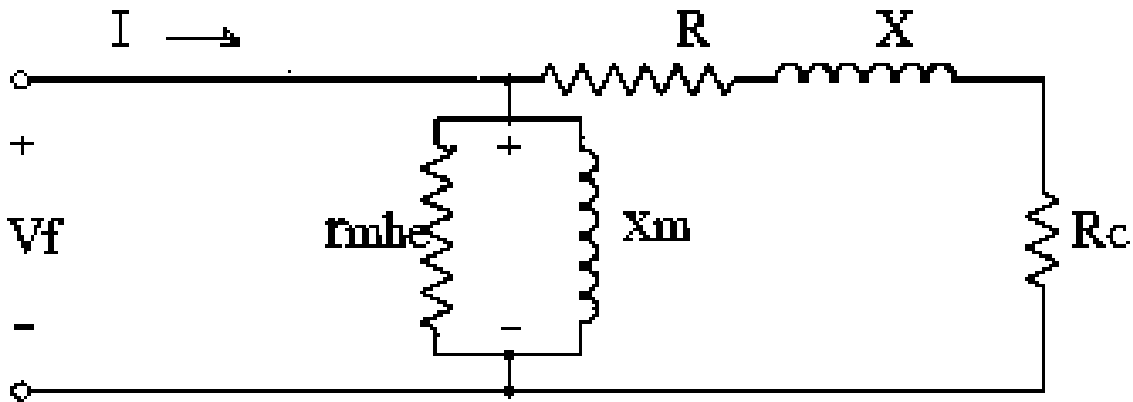


Figura 3.20 Circuito aproximado con valores.

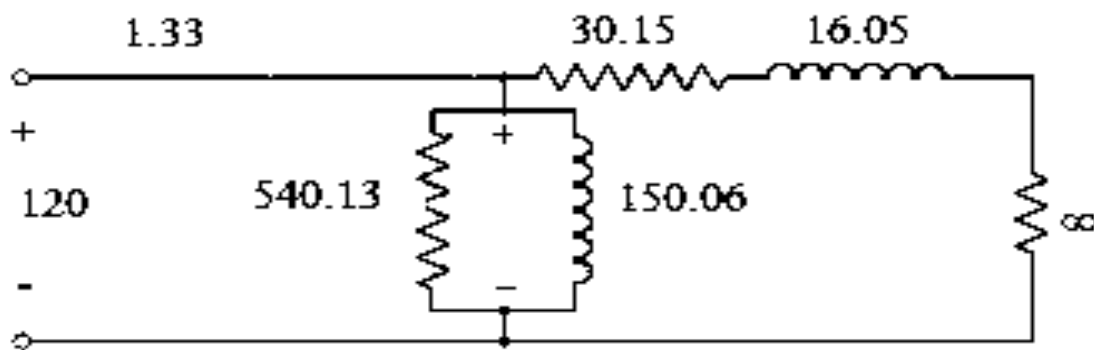


Figura 3.21 Circuito con valores de sus parámetros.

Capítulo 4. Diagnostico del motor de inducción de rotor devanado.

De las pruebas aplicadas obtuvimos los resultados para analizar al motor de inducción de rotor devanado, por lo que procederemos a compararlos con los datos proporcionados por el fabricante, para de esta forma poder dar un diagnostico sobre el estado de dicho motor.

En las siguientes ilustraciones se muestra el comportamiento de los motores en la prueba de vacío. La primera figura muestra el comportamiento del motor 1 (en azul), y del motor 2 (en rojo). Observándose comportamientos similares.

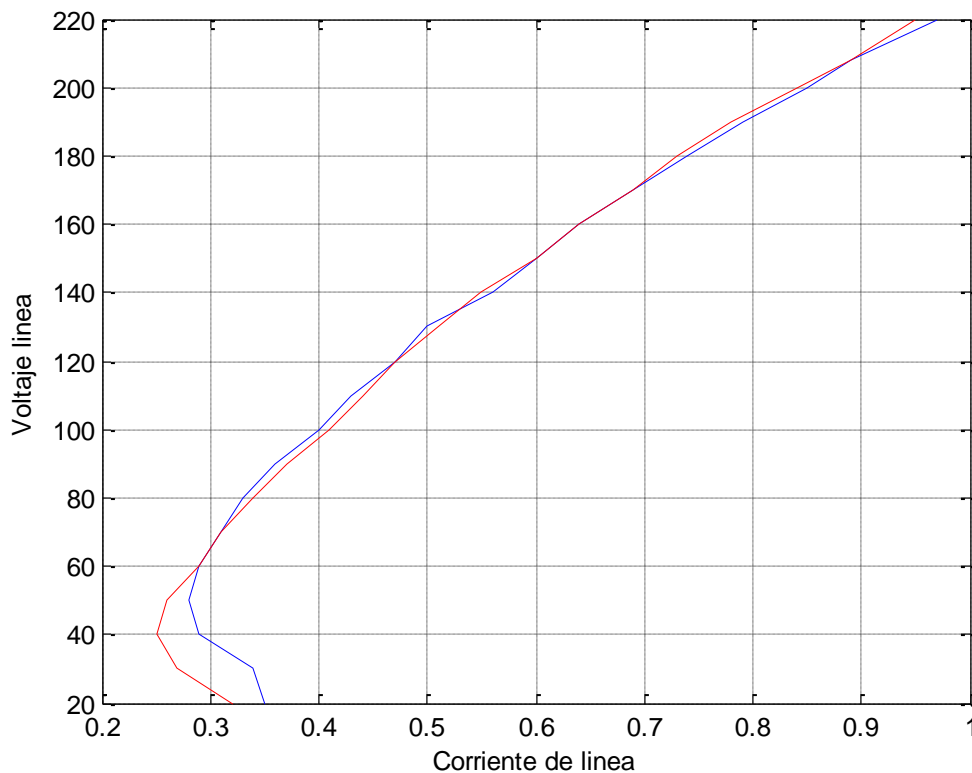


Figura 4.1 grafica de voltaje de línea vs corriente de línea de los 2 motores.

En cuanto a la potencia de dichos motores vs el voltaje de línea se tiene el comportamiento mostrado. Para el motor 1 (azul), y para motor 2 (rojo).

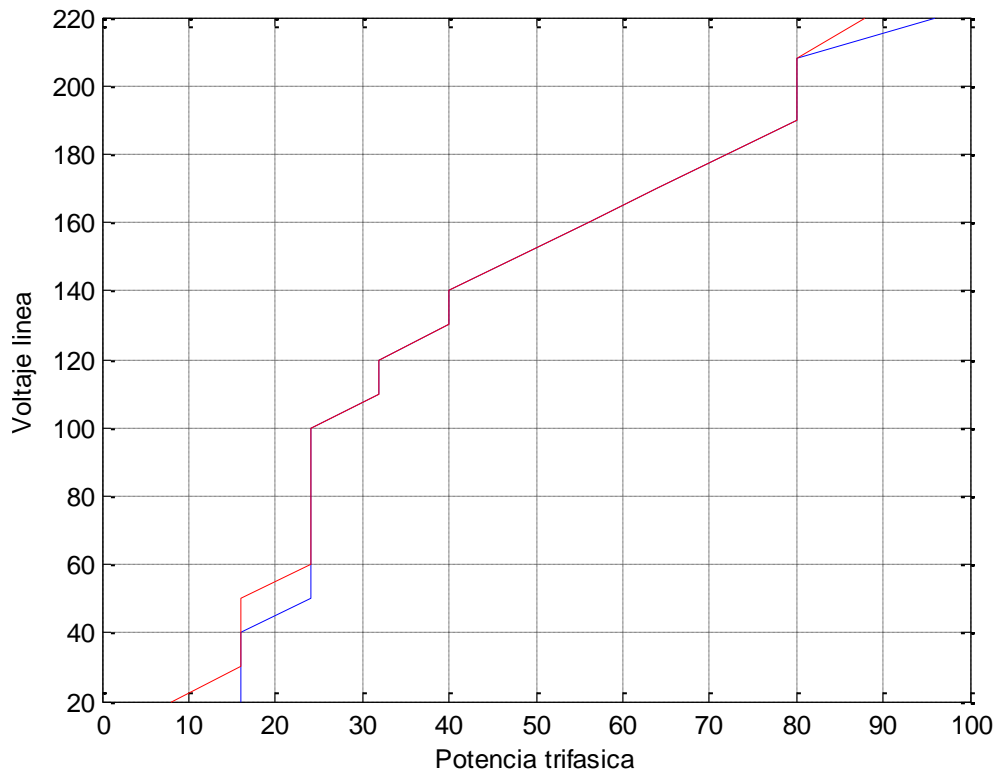


Figura 4.2 Grafica de voltaje de línea vs potencia trifásica de los 2 motores.

En lo referente a la prueba de rotor bloqueado, se obtuvieron las siguiente graficas. En la figura siguiente se muestra el comportamiento del voltaje de línea vs la corriente de línea de los 2 motores en cuestión, para el motor 1 (en azul) y para el motor 2(en rojo).

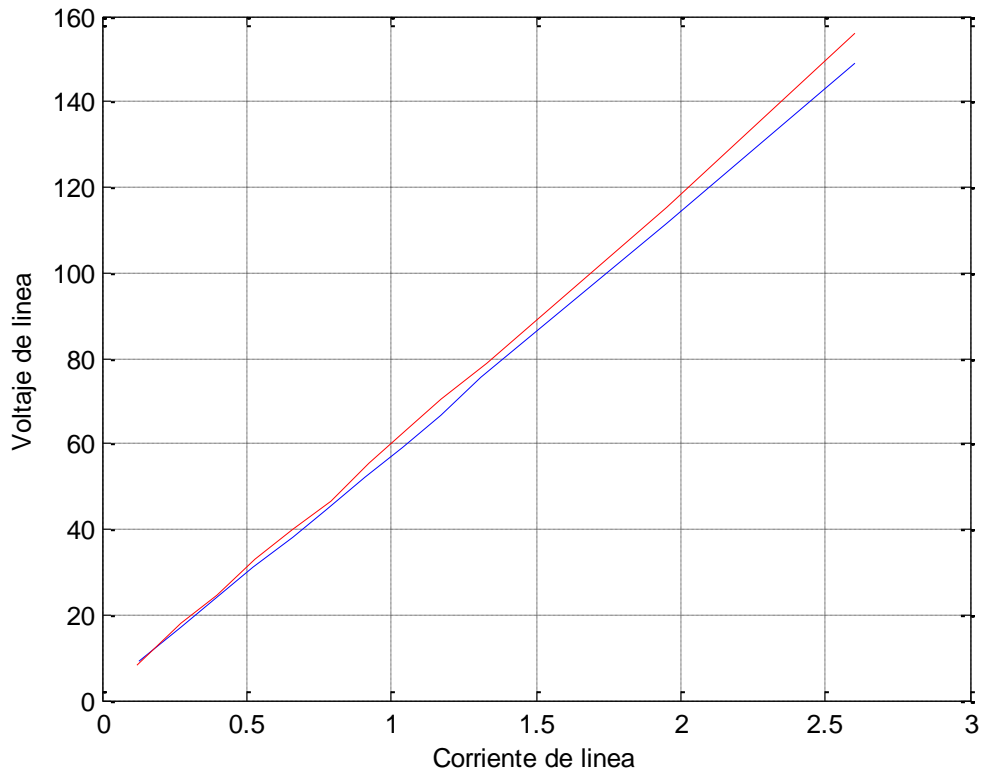


Figura 4.3 Grafica de voltaje de línea vs la corriente de línea de ambos motores.

Para la potencia en la prueba de corto circuito se obtuvo el siguiente comportamiento de la potencia para los 2 motores, motor 1 en azul y motor 2 en rojo.

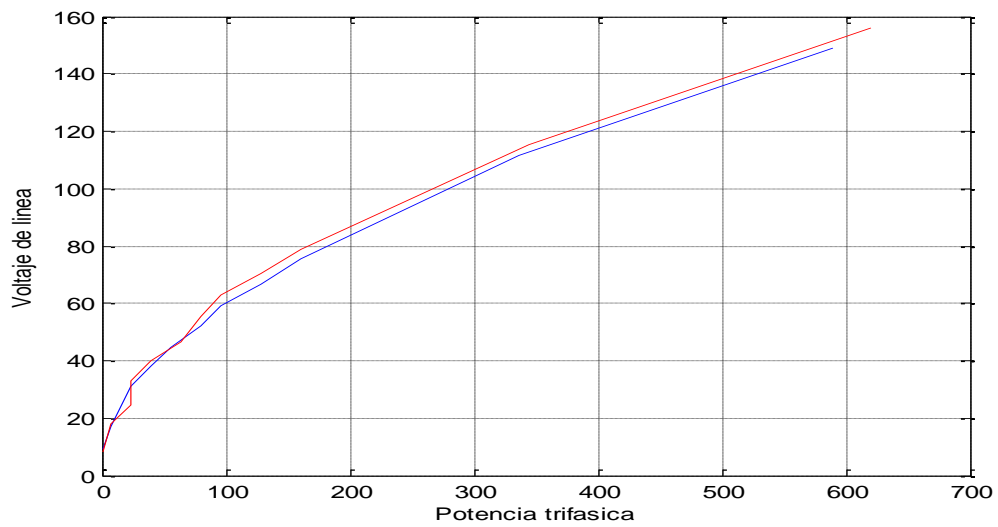


Figura 4.4 Potencia trifásica contra voltaje de línea.

El fabricante de estos motores Lab-Volt, nos proporciona los siguientes parámetros para el motor de rotor devanado.

EMS 8231 - Wound Rotor Induction Motor

Magnetizing Reactance (X_m)	= 180 Ω
Stator Leakage Reactance (X_1)	= 8,8 Ω
Rotor Leakage Reactance (X_2)	= 8,8 Ω
Stator Winding Resistance (R_1)	= 12,5 Ω
Rotor Winding Resistance (R_2)	= 3,9 Ω
Turns Ratio (N_1/N_2)	= 516/264
Rotor moment of Inertia (J)	= 0,0024 $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ (0,057 $\text{lb}\cdot\text{pi}^2$)

MACHINE	MODELE	ENROULEMENT	RESISTANCE A 25° C (OHMS)		
			MIN.	TYP.	MAX.
ROTOR BOBINE	8231	STATOR ROTOR (SANS BALAIS PAR PHASE)	12,2 3,8	12,5 3,9	12,8 4,0

Figura 4.5 valores proporcionados por el fabricante.

Tomando los datos de la tabla anterior que son $X_m = 180\Omega$ y $R = 12.5 \Omega$ proporcionados por el fabricante de estas maquinas se concluye:

Las maquinas estudiadas, se conservan en buen estado pues la diferencia de resistencia es de apenas 0.17 y 0.1 Ω , lo cual es insignificante entendiendo que nuestros instrumentos de medición tienen algún margen de error.

En lo que se refiere a la reactancia de magnetización (X_m), en los datos del fabricante nos proporcionan un valor de 180 Ω . Mientras que en uno de nuestros cálculos obtuvimos un valor igual a 150.06, teniendo una diferencia de 29.94 Ω . En este caso si hay un diferencia considerable.

Capítulo 5. Conclusiones y trabajos futuros.

Debido a que en el laboratorio de ingeniería eléctrica, se tienen muchos motores de inducción de rotor devanado, se tomó la decisión de elegir una muestra de estos, definiéndose tomar 2 motores para realizarles las pruebas y determinar su estado físico.

En lo que respecta a la prueba de circuito abierto a voltaje nominal para la obtención de los parámetros del circuito equivalente, fue necesario utilizar una máquina síncrona, para lograr que el campo magnético giratorio, estuviera efectivamente a la velocidad síncrona, que es de 1800 rpm. Y que el campo magnético del rotor y estator estuvieran sincronizados.

Mientras que en la prueba de corto circuito, no fue necesario extrapolar los valores, con el objetivo de ver el comportamiento de la corriente y voltaje de corto circuito, ya que la máquina no se calentó demasiado en la práctica. Por lo que prácticamente se duplicó la corriente nominal sin que la máquina se calentara en exceso.

Se compararon los datos obtenidos en las prácticas con los proporcionados por el fabricante, concluyéndose lo siguiente:

En nuestro caso la resistencia de estator es igual a 12.33 y 12.4 Ω respectivamente. Por lo que de acuerdo a los datos mostrados anteriormente y que son proporcionados por el fabricante, donde dicha resistencia es de 12.5 Ω , se concluye;

Al obtener el circuito equivalente y los valores de sus parámetros para cada una de las máquinas estudiadas, nos damos cuenta que no difieren en forma significativa con los valores proporcionados por el fabricante, por lo que **se puede concluir que las máquinas aun se encuentran en buen estado.**

Solo se encuentra diferencia en lo que se refiere a la reactancia de magnetización por lo que se concluye que han sufrido un desgaste, pero no es significativo.

Referencias

1.- Wildi, Theodore. Maquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia. México: Pearson educación. 2007

2.- J. Chapman, Stephen. Maquinas Eléctricas. Venezuela: Mc Graw Hill. 2000.

3.- Pérez Amador, Víctor. Pruebas de Equipo Eléctrico 2. México: Limusa. 1983

4.- Ricard Bosch, Tous, Maquinas Eléctricas, España: Pedroza. 2005

[1] <http://javierdavidvenegas.blogspot.com/2010/05/la-maquina-sincrona>

[2] <http://www.freewebs.com/electronicaindustrial.html>

[3] <http://www.mty.itesm.mx//deptosie/>