

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA Y APLICADAS



INGENIERÍA ELÉCTRICA EN S.E.P
TESIS DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIEROS ELÉCTRICOS EN S.E.P

TEMA:

“IMPLEMENTACIÓN Y MONTAJE DE UN MOTOR – GENERADOR AC - AC TRIFÁSICO DE 5 [kW], EN EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI, CON LA ELABORACIÓN DE UN MANUAL DE OPERACIÓN, PARA REALIZAR PRÁCTICAS DEMOSTRATIVAS”.

AUTORES:

CISNEROS CALVOPIÑA OSWALDO GUSTAVO
YUGSI LANCHIMBA EDWIN PATRICIO

DIRECTOR:

ING. OSCAR MALLITASIG

LATACUNGA, ENERO DEL 2013

AUTORÍA

Los postulantes, declaramos bajo juramento que el trabajo de investigación aquí descrito es de nuestra autoría, además que este trabajo de investigación no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación personal y que se ha consultado en dichas bibliografías que se vinculan en este manuscrito.

.....
Oswaldo Gustavo Cisneros Calvopiña
C.I. 0502662794

.....
Edwin Patricio Yugsi Lanchimba
C.I. 0401589049

AVAL DEL DIRECTOR

En calidad de Director de Trabajo de Investigación sobre el tema:

“Implementación y Montaje de un Motor – Generador AC - AC Trifásico de 5 [kW] en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Técnica de Cotopaxi con la elaboración de un Manual de Operación para realizar prácticas demostrativas”, de **Oswaldo Gustavo Cisneros Calvopiña y Edwin Patricio Yugsi Lanchimba**, egresados de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, considero que dicho informe investigativo cumple con los requerimientos Metodológicos y aportes Científicos – Técnicos suficientes para ser sometida a la evaluación del Tribunal de Grado, que el Honorable Consejo Académico de la Unidad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, 21 de Enero del 2013

Ing. Eléc. Oscar Mallitásig

DIRECTOR DE TESIS

AGRADECIMIENTO

Nuestro más sincero y grande agradecimiento al Ing. Oscar Mallitasig por habernos guiado, compartiendo conocimientos y por ayudarnos en la realización de nuestro tema de tesis.

De manera especial al Ing. Xavier Proaño por compartir sus vivencias y experiencias.

Al Ing. Alfonso Echeverría por la confianza depositada y por apoyarnos incondicionalmente en el desarrollo de este proyecto.

Nuestro sincero reconocimiento y gratitud a la Universidad Técnica de Cotopaxi por abrirnos las puertas de la Institución, para podernos formar como profesionales, impartiendo conocimientos de vital importancia para nuestro desempeño en el campo profesional.

DEDICATORIA

En primer lugar agradezco a DIOS, por su infinita bondad y por darme la fuerza necesaria para vivir y seguir adelante en cada paso que doy.

Con mucho cariño a mi padre Gustavo Cisneros, “Un luchador de la Vida”, por confiar y apoyarme incondicionalmente en todo momento.

A mi querida madrecita Mercedes Calvopiña por ser la gestora de todos los logros de mi vida, por su amor profundo y fortaleza infinita, por no permitir que decayera ni un solo instante en la consecución de mis objetivos por ser mi ejemplo y mi más grande orgullo.

A mis queridos hermanos, Carolina, Katherine y David por su ayuda absoluta, su comprensión y por creer en mí.

A una persona especial Mayri, gracias por tu comprensión, tu paciencia, tus consejos y tú apoyo.

Y a toda mi familia que de una u otra forma me apoyaron incondicionalmente.

A la querida universidad, que al abrir sus puertas nos ha acogido como el segundo hogar para formarnos como profesionales útiles a la sociedad.

GUSTAVO

DEDICATORIA

El presente trabajo con el cual he alcanzado el sueño más anhelado y en el cual he plasmado todo el esfuerzo y sacrificio diario de todos los años de estudio le dedico a DIOS.

Por guiarme cada día en esta etapa de mi vida.

A mis padres José Yugsi y María Inés Lanchimba.

A mis hermanos Víctor, Jenny y Jhony por ser el pilar fundamental en el transcurso de toda mi carrera universitaria y por el apoyo incondicional en las buenas y en las malas ya que gracias al esfuerzo de ellos he llegado a la meta más grande en mi vida.

Y a toda mi familia que de una u otra forma me guiaron con sus consejos.

EDWIN

INDICE GENERAL DE CONTENIDOS

PAG.

PORTADA

AUTORÍA.....	ii
AVAL DEL DIRECTOR.....	iii
AGRADECIMIENTO	iv
DEDICATORIA.....	v
DEDICATORIA.....	vi
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT	xvii
AVAL DE TRADUCCIÓN	xviii
INTRODUCCIÓN.....	xix
CAPÍTULO I	1
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN DEL MOTOR DE INDUCCIÓN.....	1
1.1.1 Constitución.....	2
1.1.2 El Estator	3
1.1.3 El rotor tipo Jaula de ardilla.	3
1.1.4 Deslizamiento.	5
1.1.5 Par motor	6
1.1.6 Par de giro.....	7
1.1.7 Operación de la Máquina de Inducción.....	7
1.1.8 Circuito Equivalente de una Máquina de Inducción.....	10
1.1.9 Simplificación del Circuito.....	14

1.1.10 Torque Mecánico del Motor de Inducción.	16
1.1.11 Arranque de un Motor Trifásico de Inducción	18
1.1.12 Variadores para Motores de A.C.....	19
1.1.13 Composición de los Variadores de Frecuencia.....	20
1.1.14 Ventajas de los Variadores de Frecuencia.....	22
1.1.15 Fundamentos básicos sobre el control de velocidad de un motor trifásico de inducción.....	23
1.1.16 Formas de control de velocidad de un motor trifásico de inducción.....	23
1.1.17 Pruebas en Máquinas de Inducción.....	24
1.2 INTRODUCCIÓN A LOS GENERADORES ELÉCTRICOS	28
1.2.1 Importancia	28
1.2.2 Generador de corriente alterna	29
1.2.2.1 Definición	29
1.2.2.2 Tipos de Generadores de Corriente Alterna	29
1.2.2.3 Elementos del Generador de Corriente Alterna	31
1.2.2.4 Clasificación de los Generadores Sincrónicos	33
1.2.2.4.1 Generador de Polos Salientes.....	33
1.2.2.4.2 Generador de Rotor Cilíndrico.....	35
1.2.2.5 Principio de Funcionamiento de un Generador A.C sincrónico.	38
1.2.2.6 Principio de funcionamiento del motor sincrónico	39
1.2.2.7 Circuito equivalente de la máquina sincrónica.....	41
1.2.2.8 Pruebas en máquinas sincrónicas.....	43
1.2.2.8.1 Prueba de circuito abierto	43
1.2.2.8.2 Prueba de cortocircuito.....	45

1.2.2.9 Zona segura de operación del generador sincrónico	47
1.2.2.10 Límite por corriente de armadura.....	48
1.2.2.11 Límite por corriente máxima de campo	49
1.2.2.12 Límite por corriente mínima de campo	52
1.2.2.13 Límite de estabilidad de estado estable	53
CAPÍTULO II	58
2.1 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	58
2.1.1 Introducción.....	58
2.1.2 Método de estudio.....	58
2.1.3 Técnicas e instrumentos.	59
2.1.4 Resultados y análisis de la entrevista realizada a los docentes de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi.	59
2.1.5 Resultados y análisis de la encuesta.....	66
2.2 COMPROBACIÓN DE LA HIPÓTESIS	84
2.2.1 Planteamiento de la Hipótesis.....	84
a) Modelo Lógico	84
b) Modelo Matemático.....	84
2.2.2. Nivel de significación	85
2.2.3 Argumentación	85
2.2.3.1 Estadístico de prueba.....	85
2.2.3.2 Resolución de la fórmula.....	87
2.2.3.3 Regla de decisión	87
2.3 Decisión.....	89

CAPÍTULO III	90
3.1 PROPUESTA.....	90
3.2 DESARROLLO DE LA PROPUESTA	90
3.2.1 Tema:.....	90
3.2.2 Presentación.....	90
3.2.3 Justificación de la propuesta.....	91
3.2.4 Objetivos	92
3.2.4.1 Objetivo general.....	92
3.2.4.2 Objetivos específicos.....	92
3.2.5 Alcance.....	93
3.2.6 Desarrollo técnico de la propuesta.....	94
3.2.7 Selección de los elementos para el montaje del Grupo Motor - Generador	95
3.2.8 Ubicación de los elementos y accesorios en el banco de pruebas .	97
3.2.9 Descripción del diseño del módulo didáctico del Grupo Motor – Generador.....	104
3.2.10 Operación del grupo Motor - Generador (Sincronización con la barra infinita).....	106
3.2.11 Manual de Operación del Banco de Trabajo del Módulo Motor – Generador Sincrónico	109
3.2.12 Conclusiones.....	115
3.2.13 Recomendaciones.....	116
BIBLIOGRAFÍA	118
Bibliografía Consultada	118
Litografía.....	119

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Motor de Inducción Trifásico	2
Figura 1.2 Estator.....	3
Figura 1.3 Rotor Jaula de Ardilla	4
Figura 1.4 Corte Transversal de una Máquina Trifásica, Rotor Jaula de Ardilla...	4
Figura. 1.5 Curva de deslizamiento vs torque	8
Figura 1.6 Circuito del estator	10
Figura 1.7 Diagramas de Corrientes del Estator.....	11
Figura 1.8 Modelo Del Circuito Equivalente del Rotor.....	12
Figura 1.9 Circuito equivalente de la máquina de inducción	14
Figura 1.10 Circuito aproximado de la máquina de inducción, trifásica por fase.	15
Figura 1.11 Circuito aproximado de la máquina de inducción	15
Figura 1.12 Circuito separando la resistencia referida al motor en dos partes.....	16
Figura 1.13 Zona de operación como generador, motor y freno de la máquina de inducción.....	17
Figura 1.14 Tipos de arranque en motores de inducción	18
Figura 1.15 Circuito de prueba sin carga	24
Figura 1.16 Circuito de prueba con rotor bloqueado	26
Figura 1.17 Generador sincrónico de armadura estacionaria de 4 polos	30
Figura 1.18 Elementos de un Generador AC Simple.....	31
Figura 1.19 Tipos de rotores para generadores	32
Figura 1.20 Bobinas del estator de un generador de C.A	32
Figura 1.21 Rotor de polos salientes.....	33
Figura 1.22 Diagrama fasorial del generador de polos salientes.....	34

Figura 1.23 Rotor cilíndrico	36
Figura 1.24 Diagrama fasorial del generador de rotor cilíndrico	36
Figura 1.25 Funcionamiento de un generador sincrónico.....	38
Figura 1.26 Funcionamiento del motor sincrónico.....	40
Figura 1.27 Diagrama esquemático del generador y motor	41
Figura 1.28 Circuito equivalente de la máquina sincrónica.....	42
Figura 1.29 Prueba de Circuito Abierto.....	43
Figura 1.30 Curva característica de la prueba de Circuito Abierto.....	44
Figura 1.31 Circuito para la prueba de cortocircuito.....	45
Figura 1.32 Curva característica de la prueba en cortocircuito.....	47
Figura 1.33 Límite por corriente de armadura	49
Figura 1.34 Límite por corriente de campo máximo	52
Figura 1.35 Límite por corriente de campo mínima	53
Figura 1.36 Grafica de la P_{MAX} y Potencia considerando $ME P_{MAXME}$	53
Figura 1.37 Proceso que sigue para formar la curva del LEEE.....	55
Figura 1.38 Zona segura de operación del generador sincrónico	56
Figura 1.39 Estructura del banco de pruebas.....	97
Figura 1.40 Delineado mímico del tablero.....	97
Figura 1.41 Generador Sincrónico.....	98
Figura 1.42 Motor Sincrónico	98
Figura 1.43 Grupo Motor - Generador.....	99
Figura 1.44 Variador de frecuencia	99
Figura 1.45 Tarjeta - Fuente de Voltaje Continuo VDC.....	100
Figura 1.46 Voltímetro y Amperímetro DC.....	100
Figura 1.47 Central de Medida Digital (red).....	101

Figura 1.48 Central de Medida Digital (generador)	101
Figura 1.49 Sincronoscopio de focos.....	102
Figura 1.50 Sincronoscopio Electrónico	102
Figura 1.51 Pulsadores y luz piloto	103
Figura 1.52 Transformadores de corriente	103
Figura 1.53 Cableado del circuito de control	104

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Características según el tipo de motor.....	27
Tabla 1.2 Entrevista	60
Tabla 1.3 Entrevista	61
Tabla 1.4 Entrevista	62
Tabla 1.5 Entrevista	63
Tabla 1.6 Entrevista	64
Tabla 1.7 Entrevista	65
Tabla 1.8 Resultado de la pregunta N°1	66
Tabla 1.9 Resultado de la pregunta N°2	67
Tabla 1.10 Resultado de la pregunta N°3	68
Tabla 1.11 Resultado de la pregunta N°4	69
Tabla 1.12 Resultado de la pregunta N°5	70
Tabla 1.13 Resultado de la pregunta N°6	71
Tabla 1.14 Resultado de la pregunta N°7	72
Tabla 1.15 Resultado de la pregunta N°8	73
Tabla 1.16 Datos de la encuesta observada.....	85

Tabla 1.17 Resultados de la frecuencia esperada	86
Tabla 1.18 Cálculo del Chi-cuadrado	87
Tabla 1.19 Distribución Chi-cuadrado.....	88
Tabla 1.20 Elementos utilizados para el montaje del banco de pruebas.....	95
Tabla 1.21 Solución de Problemas del Banco de Pruebas	113

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO N°1 CUESTIONARIO DE ENCUESTA	120
ANEXO N°2 ENTREVISTA.....	122
ANEXO N°3 - PRÁCTICA DE LABORATORIO.....	123
Parámetros eléctricos de la máquina de inducción.....	123
ANEXO N°4 - PRÁCTICA DE LABORATORIO.....	128
Prueba en motores trifásicos de inducción.....	128
ANEXO N°5 - PRÁCTICA DE LABORATORIO.....	135
Puesta en paralelo de un generador sincrónico con la barra infinita -curvas “V”, y operación en los cuatro cuadrantes	135
ANEXO N°6.....	141
Magnitudes y Unidades Eléctricas.....	141
ANEXO N°7.....	142
Datos Técnicos Nominales de los motores trifásicos	142
ANEXO N°8.....	143
Código de colores para los conductores unifilares	143

ANEXO N°9.....	143
Temperaturas máximas admisibles del conductor en condiciones normales y de cortocircuito.....	143
ANEXO N°10.....	144
Señalización, códigos de seguridad visual y auditiva de los PULSADORES según su función.....	144
ANEXO N°11.....	146
Tabla de colores según la función de los Indicadores Luminosos	146
ANEXO N°12.....	148
Banco de Pruebas para realizar prácticas demostrativas a pequeña escala.....	148
ANEXO N°13 Elementos Constitutivos del Banco de Pruebas.....	149
ANEXO N°14 Diagrama de Control del Banco de Pruebas	150
ANEXO N°15 Diagrama de Fuerza del Banco de Pruebas	151
ANEXO N°16 Diagrama del Variador de Frecuencia (VFD).....	152

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 2.1 Pregunta N°1	66
Gráfico 2.2 Pregunta N°2.....	67
Gráfico 2.3 Pregunta N°3.....	68
Gráfico 2.4 Pregunta N°4.....	69
Gráfico 2.5 Pregunta N°5.....	70
Gráfico 2.6 Pregunta N°6.....	71
Gráfico 2.7 Pregunta N°7.....	72
Gráfico 2.8 Pregunta N°8.....	73

RESUMEN

El presente proyecto ha sido dividido en 3 capítulos donde se desarrollarán los siguientes temas:

El primer capítulo, contiene las bases teóricas sobre el funcionamiento y operación de los motores trifásicos de inducción, generadores sincrónicos trifásicos y variadores de frecuencia, además se describe las pruebas que se puede realizar en este tipo de máquinas sincrónicas.

El segundo capítulo, contiene el tipo, métodos y técnicas de investigación utilizados, así como el diseño de instrumentos para la recolección de los datos y su posterior tabulación y graficación para el análisis e interpretación de resultados, finalmente se señalan las hipótesis de estudio.

En el tercer capítulo, se describe las partes principales de los elementos y equipos que se utilizó para el montaje de este banco de pruebas, se incluyen las conclusiones y recomendaciones finales respecto al desarrollo del proyecto. El trabajo concluye con los Anexos, las guías de laboratorio y el Manual de operación del Grupo Motor – Generador AC-AC Trifásico de 5 [kW], el cual será de mucha ayuda para su correcto funcionamiento.

ABSTRACT

This project has been divided into three chapters.

The first chapter contains the theoretical basis for the running and processing of three-phase induction motor, three-phase synchronous generators and inverters. Moreover, it describes the evidences that can be performed on this type of synchronous machines.

The second chapter contains the type, methods and investigation techniques used, as well as the design of instruments for the collection of data and its subsequent tabulation and charting for the analysis and interpretation of results. Finally, it shows the hypothesis of the study.

The third chapter defines the main parts of the items and equipment which were used for the assembly of this test; it includes the final conclusions and recommendations regarding the development of the project. The project achieves with Annexes, laboratory guides and Operation Manual Group Motor - Generator AC - AC Three Phase of 5 [kW], which will be very helpful for suitable operation.



AVAL DE TRADUCCIÓN

MSc. Gina Venegas A. con C.C 050159864, en calidad de Coordinadora de la Carrera de Ciencias de la Educación, mención Inglés de la Universidad Técnica de Cotopaxi, certifico que se ha realizado la respectiva revisión del Abstract, con el tema: **“IMPLEMENTACIÓN Y MONTAJE DE UN MOTOR – GENERADOR AC - AC TRIFÁSICO DE 5 [kW], EN EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI, CON LA ELABORACIÓN DE UN MANUAL DE OPERACIÓN PARA REALIZAR PRÁCTICAS DEMOSTRATIVAS”**, cuyos autores son: Cisneros Calvopiña Oswaldo Gustavo con C.C 0502662794 y Yugsi Lanchimba Edwin Patricio con C.C 0401589049, postulantes a Ingenieros Eléctricos en Sistemas Eléctricos de Potencia cuyo Director de Tesis es el Ing. Oscar Mallitasig.

Latacunga, 17 de enero del 2013

Docente,

.....
MSc. Gina Venegas A.
ENGLISH TEACHER

INTRODUCCIÓN

El propósito del presente trabajo consiste en implementar al Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con un Grupo Motor - Generador AC-AC Trifásico de 5 [kW], funcional y práctico; el mismo que permitirá reproducir a pequeña escala prácticas demostrativas de sincronismo de un generador con la red eléctrica y operación de la máquina sincrónica en los cuatro cuadrantes, parámetros eléctricos de la máquina sincrónica, determinación de las zonas seguras de operación del generador sincrónico, entre otras.

Se utilizó como partes principales para el montaje de este banco de pruebas; un motor trifásico de inducción de 5 [hp], un generador trifásico sincrónico de 5 [kW] y un variador de frecuencia, también se dispone de elementos de protección, los cuales fueron seleccionados en base a los catálogos del fabricante, es decir que este equipo está garantizado para su buen uso y desempeño práctico en lo que se refiere a pruebas y prácticas de Máquinas Eléctricas.

Con la implementación de este banco de pruebas, se pretende lograr muchos objetivos ya que será de gran utilidad para los estudiantes y los docentes de la carrera de Ingeniería Eléctrica, el mismo que ayudará a la enseñanza y comprensión de los conceptos teóricos vistos en clase, para mejorar las técnicas de aprendizaje.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO

1.1 INTRODUCCIÓN DEL MOTOR DE INDUCCIÓN

Dado que la mayoría de las máquinas utilizadas en la industria están en movimiento por motores asíncronos alimentados por corriente alterna trifásica, en este trabajo daremos unas ideas muy generales de este tipo de motores.

Los motores eléctricos satisfacen una amplia gama de necesidades de servicio, desde arrancar, acelerar, mover, o frenar, hasta sostener y detener una carga. El motor de inducción, es el motor de corriente alterna más utilizado, debido a su fortaleza y sencillez de construcción.

Estos motores se fabrican en potencias que varían desde una pequeña fracción de *hp* hasta varios miles de *hp*, y con una amplia variedad de velocidades, que pueden ser fijas, ajustables o variables.

Las máquinas de inducción son las más usadas en la industria gracias a su robustez, mínimos o nulos requerimientos de mantención y menores costos de operación ya que pueden operar directamente conectadas a la red eléctrica

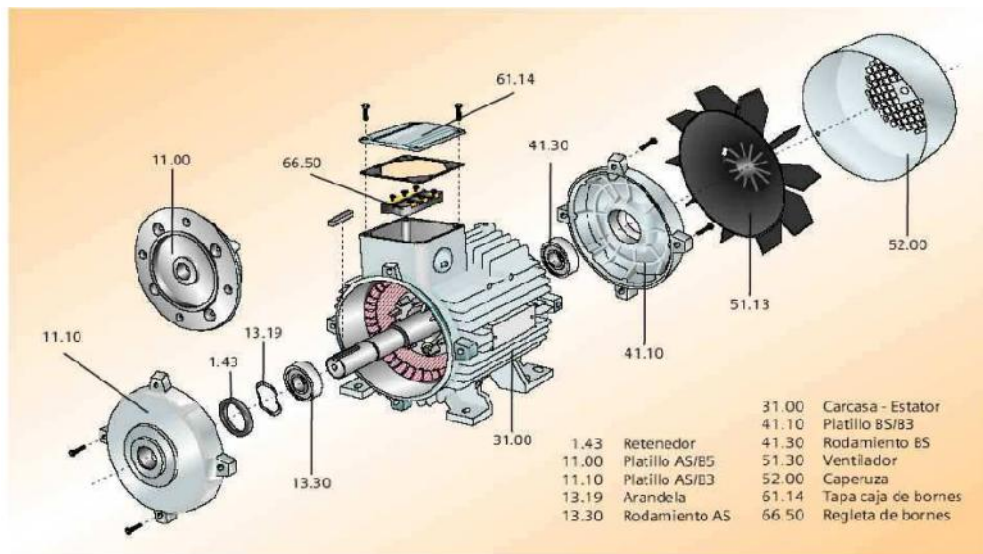
(frecuencia y voltaje constante), permitiendo accionar cargas a una velocidad esencialmente constante.

La máquina de inducción es un transformador generalizado que:

- Transforma energía eléctrica del estator hacia el rotor.
- Cambia de frecuencia.

Se basa en el flujo de energía mecánica, por esta razón, si a una máquina rotatoria se alimenta con energía eléctrica en el estator se obtendrá energía mecánica en el rotor, en caso contrario operará como generador.

Figura 1.1 Motor de Inducción Trifásico



Fuente: Manual de mantenimiento e instalación de motores eléctricos - Sumelec

1.1.1 Constitución

Una máquina de inducción está formada por un devanado de estator o armadura y por un devanado de rotor, este último puede ser tipo rotor de jaula de ardilla o

rotor devanado. El rotor siempre esta cortocircuitado, caso contrario trabaja como transformador.

1.1.2 El Estator

Está hecho de láminas de acero circulares con ranuras a lo largo de su periferia interior. Los lados de las bobinas se localizan en estas ranuras. En la práctica, por supuesto, el bobinado consistirá de varias bobinas distribuidas a lo largo de la periferia.

Figura 1.2 Estator



Fuente: <http://blog.espol.edu.ec/crielectric/category/instrumentos-electricos/>

1.1.3 El rotor tipo Jaula de ardilla.

Consiste en una serie de barras conductoras, colocadas en ranuras talladas en la cara del rotor y con sus extremos puestos en corto, por medio de anillos de cortocircuito, se caracteriza por su robustez, sencillez y economía. Es el más empleado.

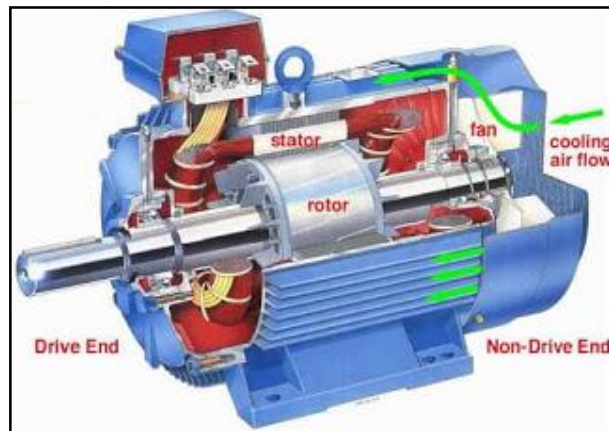
Figura 1.3 Rotor Jaula de Ardilla



Fuente: http://es.wikipedia.org/wiki/Jaula_de_ardilla

En la figura 1.4 se muestra un corte transversal de una máquina trifásica de inducción rotor jaula de ardilla, donde se aprecia el movimiento del rotor con todos sus componentes.

Figura 1.4 Corte Transversal de una Máquina Trifásica, Rotor Jaula de Ardilla



Fuente: <http://blog.espol.edu.ec/crielectric/category/instrumentos-electricos/>

Una máquina de inducción se alimenta con corriente alterna al estator y por inducción (acción transformadora), se induce voltaje en el devanado del rotor, que esta cortocircuitado, y por lo tanto por él circula corriente alterna que a su vez da

origen a un flujo. El flujo de la armadura adelanta al flujo del rotor y se produce un torque.

El flujo de la armadura y el flujo del rotor giran sincrónicamente, los flujos por lo tanto giran a la misma frecuencia.

Hay que indicar que la velocidad de giro del rotor es menor que la velocidad sincrónica, esto implica que las corrientes inducidas en el rotor tienen una frecuencia menor que las corrientes en el estator.

La diferencia entre la velocidad real de giro del rotor y la velocidad sincrónica de la máquina se denomina deslizamiento.

1.1.4 Deslizamiento.

El deslizamiento (s) se define mediante la expresión:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (\text{En por unidad}) \quad \textbf{Ecuación (1)}$$

Para este análisis se cumple que: $n_s > n$

La velocidad de giro del rotor (n), considerando el deslizamiento, corresponde a:

$$n_s - n_s s = n \quad \textbf{Ecuación (2)}$$

$$n_s \cdot (1 - s) = n \quad \textbf{Ecuación (3)}$$

La velocidad sincrónica (n_s) de una máquina rotatoria es función directa de la frecuencia, misma que en forma más usual corresponde a 60 Hz ó 50 Hz.

La frecuencia eléctrica (f_s) se relaciona con la mecánica (f_m), considerando el número P de polos, mediante la relación:

$$f_s = \frac{P}{2} f_m \quad \text{Ecuación (4)}$$

La frecuencia en función de la velocidad sincrónica viene dada por:

$$f_s = \frac{P}{2} \cdot \frac{n_s}{60} \quad \text{Ecuación (5)}$$

De donde se tiene que la velocidad sincrónica de la máquina es:

$$n_s = \frac{120}{P} \cdot f_s \quad \text{Ecuación (6)}$$

El deslizamiento produce voltajes de frecuencia proporcionales a él:

$$E_{rotor} = S \cdot E_{estator} \quad \text{Ecuación (7)}$$

$$f_{rotor} = S \cdot f_{estator} \quad \text{Ecuación (8)}$$

Una máquina de inducción trabaja como un transformador de voltaje y también como un transformador de frecuencia.

1.1.5 Par motor

Cuando las líneas del campo magnético cortan las barras del rotor, se produce en ellas una fuerza electromotriz que da lugar a corrientes que circulan en los sentidos opuestos (en los hilos más próximos a los polos) es decir, que se producen esas corrientes en hilo separado 180° . Estos hilos se ven sometidos a

unas fuerzas que tienden a moverlos en dirección perpendicular al campo magnético y produciendo con ello el llamado par motor.

1.1.6 Par de giro

El valor del par de giro del motor viene dado por:

$$\ddagger = \frac{f}{2} \left(\frac{P}{2} \right)^2 \Phi_{sr} F_r \text{sen} \alpha_{rf} \quad \text{Ecuación (9)}$$

DÓNDE: **P**= Número de polos

sr = Flujo en el entrehierro

Fr = Fuerza magnetomotriz del devanado de campo

1.1.7 Operación de la Máquina de Inducción

En el estudio de una máquina de inducción se requiere analizar las condiciones de arranque y operación normal.

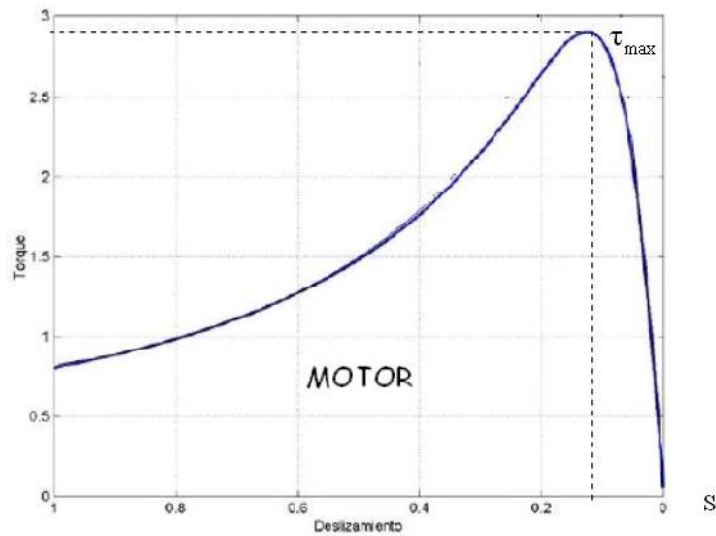
✓ En el arranque el rotor está detenido por lo que $n = 0$, por lo que el deslizamiento es:

$$s = \frac{n_s - 0}{n_s} = 1 \quad \text{Ecuación (10)}$$

✓ En operación normal

$$n = n_s \cdot (1 - s) \quad \text{Ecuación (11)}$$

Figura. 1.5 Curva de deslizamiento vs torque



Fuente: Máquinas Eléctricas y Electromecánicas- Schaum s, A Nasar

El torque electromagnético () que opera a la máquina, cuya gráfica se aprecia en la fig. 1.5, está dado por:

$$\ddagger = \frac{f}{2} \left(\frac{P}{2} \right)^2 \Phi_{sr} F_r \text{sen} u_{rf} \quad \text{Ecuación (12)}$$

DÓNDE: **P**= Número de polos
sr = Flujo en el entrehierro
Fr = Fuerza magnetomotriz del devanado de campo
urf = Angulo entre el flujo en el entrehierro y la fuerza magnetomotriz de campo

Si se considera constante al flujo en el entrehierro y que la fuerza magnetomotriz de campo es proporcional a la corriente del rotor, se tiene la expresión para el torque:

$$\ddagger = k \cdot I_R \cdot \text{sen} \angle_{F_r}^{W_{sr}} \quad \text{Ecuación (13)}$$

En condiciones nominales de operación, la corriente del rotor corresponde a:

$$I_R = \frac{E_R}{R_R + jX_R} = \frac{E_R}{R_R + j2f \cdot S \cdot f \cdot L_R} \quad \text{Ecuación (14)}$$

DÓNDE:

E_R = Voltaje inducido en el rotor

R_R, X_R = Parámetros del rotor

Puesto que el deslizamiento es pequeño, la parte reactiva de la impedancia es mucho menor que la resistiva y la corriente en el rotor se aproxima a:

$$I_R = \frac{S \cdot E_{estator}}{R_R} \quad \text{Ecuación (15)}$$

Este razonamiento justifica que, partiendo de la velocidad nominal muy cercana a la velocidad sincrónica en el rango del 3% a 10%, el torque varía linealmente en proporción al deslizamiento.

Los campos en el estator y en el rotor son estacionarios y giran a velocidad sincrónica, según se demuestra con el siguiente análisis:

$$v_{wrotor} = n + s \cdot n_s \quad \text{Ecuación (16)}$$

$$v_{wrotor} = n_s \cdot (1 - s) + s \cdot n_s \quad \text{Ecuación (17)}$$

$$v_{wrotor} = n_s - s \cdot n_s + s \cdot n_s \quad \text{Ecuación (18)}$$

$$v_{wrotor} = n_s = v_{westator} \quad \text{Ecuación (19)}$$

Estos campos son los responsables de mantener el torque permanente que mantiene la rotación.

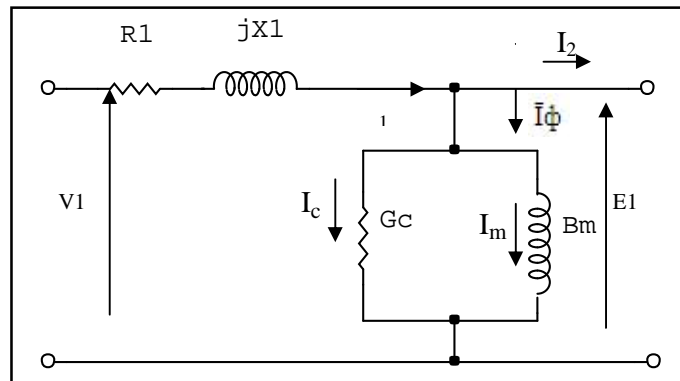
1.1.8 Circuito Equivalente de una Máquina de Inducción

El circuito que se va a obtener corresponde a una máquina de inducción trifásica, a la cual se aplicará corriente trifásica balanceada, la conexión de los devanados en armadura será en Y o Δ dependiendo del nivel de voltaje del sistema.

1.1.8.1 Circuito del Estator

El circuito correspondiente al estator y la rama de magnetización se indica a continuación.

Figura 1.6 Circuito del estator



Fuente: L. Tapia, "Máquinas Eléctricas" Ecuador, 2005

En la figura 1.6 tenemos:

R1 = resistencia de estator

X1 = reactancia de dispersión de estator

Gc = conductancia de pérdidas del núcleo

Bm = susceptancia magnetizante

V1 = voltaje de alimentación /fase

I1 = corriente de estator

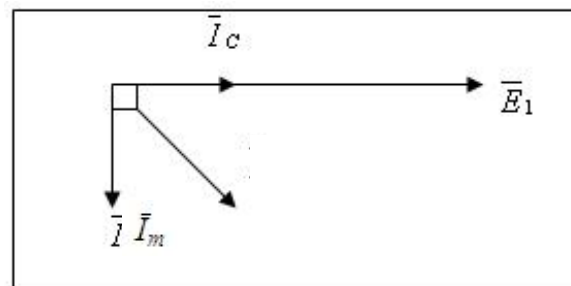
I = corriente de magnetización

E1 = fuerza contraelectromotriz

En este circuito se puede observar que la corriente I_1 de alimentación del estator por fase debe ser capaz de producir y mantener las corrientes I_0 e I_2 . I_0 es la corriente de excitación encargada de producir el flujo en el entrehierro y es función de E_1 , I_2 es la corriente que compensa la fuerza magnetomotriz del rotor. Esta última está referida al estator y toma el nombre de corriente de carga.

A las terminales de la rama de excitación aparece el voltaje inducido E_1 en el estator. Se puede observar que la corriente I_c que circula por la rama de la conductancia está en fase con la fuerza contraelectromotriz E_1 , y que I_m que es la corriente que circula por la rama de la susceptancia de magnetización está retrasada 90 grados respecto a E_1 .

Figura 1.7 Diagramas de Corrientes del Estator



Fuente: L. Tapia, "Máquinas Eléctricas" Ecuador, 2005

Los valores de conductancia y susceptancia se calculan a frecuencia nominal del estator.

La corriente I_2 crea una fuerza magnetomotriz que tiende a compensar la fuerza magnetomotriz producida por el rotor, de modo que:

$$F_{mm\ R} = F_{mm\ S} \quad \text{lo que implica: } N_S \cdot I_S = N_R \cdot I_R \quad \text{Ecuación (20)}$$

DÓNDE:

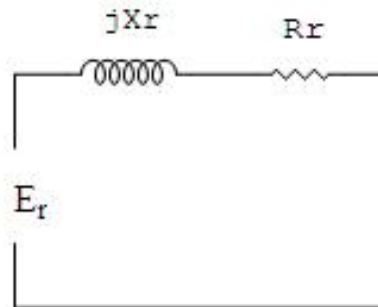
Fmm R = Fuerza magnetomotriz del rotor

Fmm S = Fuerza magnetomotriz del estator

1.1.8.2 Circuito del Rotor

El modelo del circuito equivalente del rotor, cuya gráfica se aprecia a continuación, se analizará para poder referirlo al circuito del estator, según el proceso desarrollado a continuación.

Figura 1.8 Modelo Del Circuito Equivalente del Rotor



Fuente: Máquinas Eléctricas Rotativas – José Manuel Aller Universidad Simón Bolívar

El circuito referido al estator se obtiene transformando las magnitudes del rotor hacia el estator (voltajes, corrientes e impedancias).

$$\frac{\bar{E}_R}{\bar{E}_{Re.s}} = \frac{N_R}{N_{Re.s}} \quad \text{Ecuación (21)}$$

DÓNDE:

R_{es} equivale a la magnitud del rotor referida al estator

$$\frac{\bar{E}_{Re5}}{\bar{E}_R} = \frac{N_{Re5}}{N_R} = a \quad \text{Ecuación (22)}$$

DÓNDE:

a es la relación de vueltas de las espiras del estator

Las magnitudes referidas al estator

$$\triangleright \frac{N_{Re5}}{N_R} = a \quad \frac{\bar{E}_{Re5}}{\bar{E}_R} = a \quad \bar{E}_{Re5} = a \cdot \bar{E}_R \quad \text{Ecuación (23)}$$

$$\triangleright \bar{I}_R * N_R = \bar{I}_{Re5} * N_{Re5}$$

$$\frac{\bar{I}_R}{\bar{I}_{Re5}} = \frac{N_{Re5}}{N_R}$$

$$\bar{I}_R = \frac{N_{Re5}}{N_R} * \bar{I}_{Re5}$$

$$\bar{I}_{Re5} = \frac{1}{a} * \bar{I}_R \quad \text{Ecuación (24)}$$

$$\triangleright \bar{E}_{Re5} = \bar{I}_{Re5} * Z_{Re5}$$

$$\bar{Z}_{Re5} = \frac{E_{Re5}}{I_{Re5}}$$

Remplazamos E_{RES} y la I_{RES} en la ecuación de \bar{Z}_{Re5}

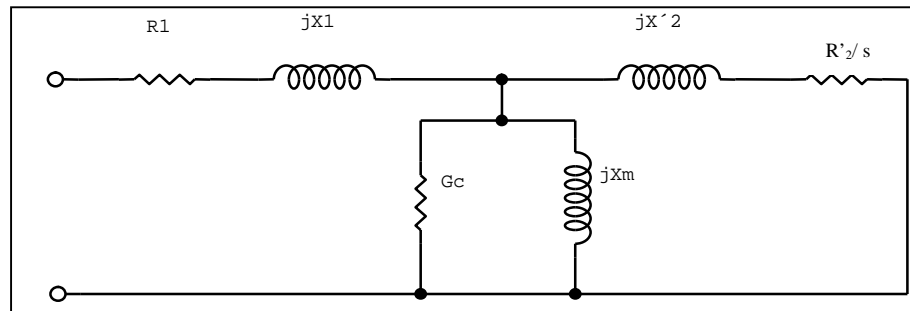
$$\bar{Z}_{Re5} = \frac{E_R * (N_{Re5} / N_R)}{I_R * (N_R / N_{Re5})}$$

$$\frac{\bar{E}_R}{\bar{I}_R} = \bar{Z}_R$$

$$\bar{Z}_{Re5} = a^2 * Z_R \quad \text{Ecuación (25)}$$

Al acoplar este resultado al circuito indicado en la figura 1.8 se tiene que el circuito equivalente de la máquina de inducción es el siguiente:

Figura 1.9 Circuito equivalente de la máquina de inducción



Fuente: L. Tapia, "Máquinas Eléctricas" Ecuador, 2005

En la figura 1.9 ($R'2/s$) es la resistencia del rotor referida al estator. Se hace notar que este modelo es similar al de un transformador con las siguientes variantes:

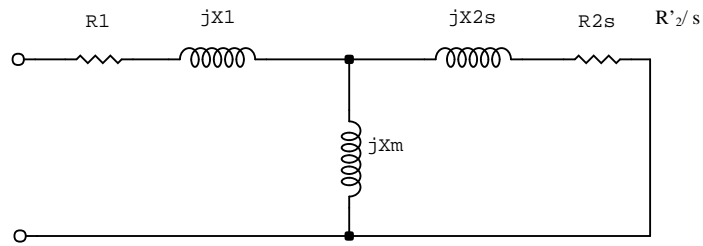
- ✓ El circuito del secundario (rotor) está en cortocircuito
- ✓ La resistencia del rotor depende del deslizamiento ($R'2/s$) y por lo tanto de la velocidad de giro de la máquina.

1.1.9 Simplificación del Circuito

El circuito equivalente puede simplificarse despreciando la resistencia que representa las pérdidas del núcleo; sin embargo, a diferencia del transformador no se puede despreciar la reactancia de magnetización X_m porque, en la máquina de inducción, la corriente que circula por la reactancia de magnetización es de aproximadamente 30 al 50 % de la corriente a plena carga y debido a que las reactancias de dispersión son mayores.

Muchas veces para máquinas grandes la resistencia del estator también se puede despreciar, por cuanto su valor es pequeño.

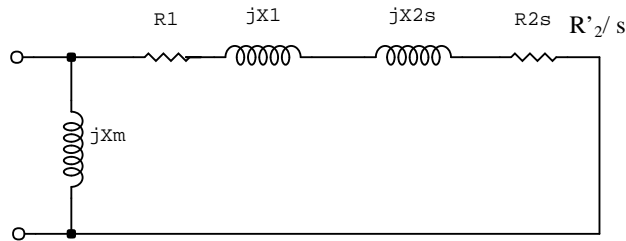
Figura 1.10 Circuito aproximado de la máquina de inducción, trifásica por fase.



Fuente: L. Tapia, “Máquinas Eléctricas” Ecuador, 2005

Otro circuito aproximado es el siguiente:

Figura 1.11 Circuito aproximado de la máquina de inducción

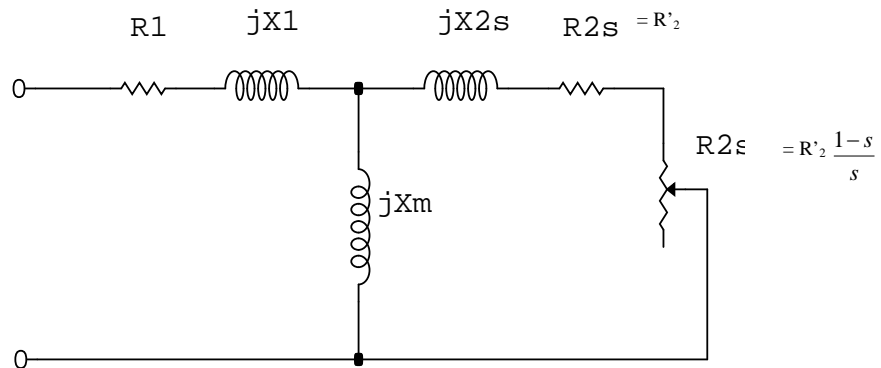


Fuente: L. Tapia, “Máquinas Eléctricas” Ecuador, 2005

Otro circuito se obtiene separando la resistencia referida del rotor en dos partes:

- La primera R_2' que representa las pérdidas en el cobre del rotor, y
- La segunda $R_2' \cdot \left(\frac{1-S}{S}\right)$ que representa la potencia mecánica interna entregada por la máquina al eje del rotor.

Figura 1.12 Circuito separando la resistencia referida al motor en dos partes



Fuente: Transformadores y Máquinas Eléctricas – Prof. Juan Carlos Jiménez II-2007

1.1.10 Torque Mecánico del Motor de Inducción.

El torque en su forma más simple es la relación entre la potencia y la velocidad angular, por lo tanto, el torque mecánico interno será:

$$\ddagger = \frac{P}{W_R} = \frac{P}{W_S \cdot (1-s)}$$

$$\ddagger = \frac{3 \cdot I_2^2 \cdot R_2'}{W_S \cdot (1-s)} \cdot \frac{(1-s)}{s}$$

$$\ddagger = \frac{3 \cdot I_2^2 \cdot R_2'}{W_S \cdot s}$$

Ecuación (26)

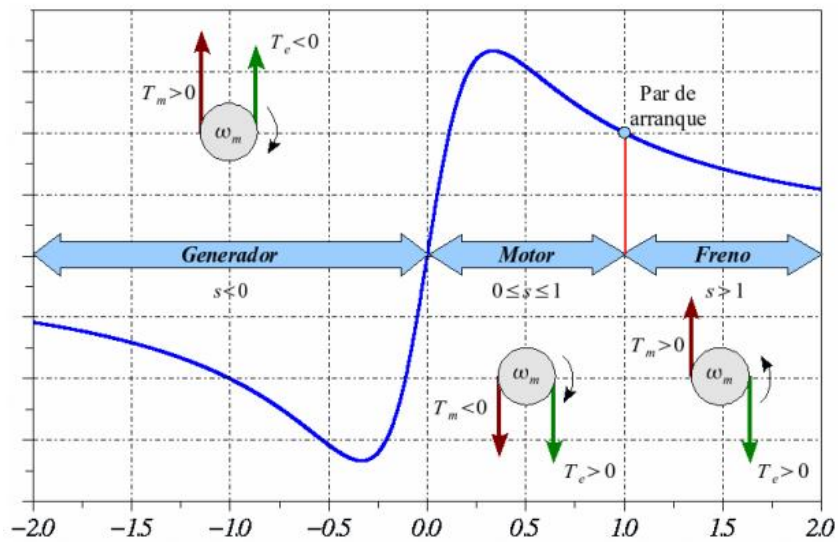
Cuando la máquina opera con un deslizamiento entre 1 y 0, esto es, cuando el rotor gira en la dirección del campo magnético que producen las corrientes del estator, trabaja como **MOTOR**.

Para obtener valores del deslizamiento mayores que uno, el motor debe impulsarse hacia atrás, es decir, contra la dirección de rotación del campo magnético, lo que conlleva a que la máquina tienda a frenarse.

La máquina operará como **GENERADOR** para deslizamientos menores que uno, para ello el estator deberá conectarse a una fuente de voltaje constante y su rotor deberá impulsarse a una velocidad mayor que la sincrónica mediante una máquina motriz. En este caso la frecuencia de la fuente de alimentación determinará la velocidad sincrónica y dicha fuente suministrará la potencia reactiva requerida para excitar al campo magnético del entrehierro.

En la figura 1.13 se puede observar la variación del torque en función del deslizamiento y de la velocidad y además las diferentes regiones de operación de la máquina de inducción.

Figura 1.13 Zona de operación como generador, motor y freno de la máquina de inducción



Fuente: Máquinas Eléctricas Rotativas – José Manuel Aller

1.1.11 Arranque de un Motor Trifásico de Inducción

Se denomina arranque de un motor al régimen transitorio en el que se eleva la velocidad del mismo desde el estado de motor detenido, hasta el estado del motor girando a la velocidad de régimen permanente.

Son necesarios los arrancadores para limitar la corriente de armadura que fluye cuando el motor se conecta, pues en el momento de arranque la corriente que alcanza el motor de inducción conectado directamente es de 5 a 8 veces la corriente del mismo a plena carga, y aunque puede ser de corta duración, produciría sobrecargas en la línea y consecuentemente caídas de voltaje muy incidente en la red.

Figura 1.14 Tipos de arranque en motores de inducción

Métodos de Arranque	Arranque directo de la red.	{ Sólo válido en motores pequeños
	Arranque mediante inserción de resistencias en el rotor.	{ Solo válido para motores de rotor bobinado y anillos rozantes
	Arranque con resistencias en el estator	{ Procedimiento poco empleado como remedio de urgencia
	Arranque estrella - triángulo	{ El método más barato utilizado cuando se dispone de 6 terminales en el motor
	Arranque con autotransformador	{ Reducción de la tensión durante el arranque mediante autotransformador
	Arranque con arrancadores estáticos	{ Reducción de la tensión durante el arranque mediante autotransformador

Fuente: Grupo Investigador

1.1.12 Variadores para Motores de A.C.

Los variadores de frecuencia (siglas AFD, del inglés Adjustable Frequency Drive; o bien VFD Variable Frequency Drive) permiten controlar la velocidad tanto de motores de inducción (asíncronos de jaula de ardilla o de rotor devanado), como de los motores síncronos mediante el ajuste de la frecuencia de alimentación al motor.

El Variador de frecuencia rectifica la corriente alterna requerida por el motor y la modula electrónicamente produciendo una señal de salida con frecuencia y voltaje diferente. Al variar la frecuencia, varía la velocidad de rotación ya que ambas son proporcionales, finalmente al variar la velocidad de operación, varía la producción.

Para el caso de un motor síncrono, la velocidad se determina mediante la siguiente expresión:

$$Nm = \frac{120 * f}{P} \quad \text{Ecuación (27)}$$

Cuando se trata de motores de inducción, se tiene:

$$Nm = \frac{120 * f * (1-s)}{P} \quad \text{Ecuación (28)}$$

DÓNDE:

- Ns = velocidad síncrona (*rpm*)
- Nm = velocidad mecánica (*rpm*)
- f = frecuencia de alimentación (*Hz*)
- s = deslizamiento (adimensional)
- P = número de polos (adimensional)

Como puede verse en las expresiones (*Ec.27*) y (*Ec.28*), la frecuencia y la velocidad son directamente proporcionales, de tal manera que al aumentar la frecuencia de alimentación al motor, se incrementará la velocidad de la flecha, y al reducir el valor de la frecuencia disminuirá la velocidad del eje. Por ello es que este tipo de variadores manipula la frecuencia de alimentación al motor a fin de obtener el control de la velocidad de la máquina.

Estos variadores mantienen la razón Voltaje / Frecuencia (V/Hz) constante entre los valores mínimo y máximos de la frecuencia de operación, con la finalidad de evitar la saturación magnética del núcleo del motor y además porque el hecho de operar el motor a un voltaje constante por encima de una frecuencia dada (reduciendo la relación V/Hz) disminuye el par del motor y la capacidad del mismo para proporcionar potencia constante de salida en el motor.

1.1.13 Composición de los Variadores de Frecuencia

El variador regula la frecuencia del voltaje aplicado al motor, logrando modificar su velocidad. Sin embargo, simultáneamente con el cambio de frecuencia, debe variarse el voltaje aplicado al motor para evitar la saturación del flujo magnético con una elevación de la corriente que dañaría el devanado del estator.

El variador de frecuencia permite controlar la velocidad de motores de inducción eléctricos, siendo que el control de velocidad es hecho cambiando la frecuencia de la salida de corriente enviada al motor, en el rango de 0 a 400 Hz. Este variador es alimentado por un sistema trifásico en dos rangos de voltaje: 200 a 240 Volt, 50 y 60 Hz o 380 a 480 Volt, 50 o 60 Hz

Una excelente forma de controlar la velocidad de un motor de inducción es variando la frecuencia del voltaje de alimentación.

Este método implica disponer de una fuente separada, en donde la frecuencia y voltaje pueden ser variados simultáneamente y en proporción directa una del otro;

ya que para obtener un flujo permanente en los motores, se deben mantener una relación constante entre el voltaje [V], y la frecuencia [f] de la fuente de alimentación, la razón de mantener una relación constante entre el voltaje aplicado y la frecuencia de la fuente, es porque el par desarrollado depende de la magnitud del flujo, y existen muchas aplicaciones en donde conservar el par constante, es de especial interés.

1.1.13.1 Los variadores de frecuencia están compuestos por:

1.1.13.1.1 Etapa Rectificadora

Convierte la tensión alterna en continua mediante rectificadores de diodos, tiristores, etc.

1.1.13.1.2 Etapa Intermedia

Existe un filtro para suavizar la tensión rectificada y reducir la emisión de armónicos.

1.1.13.1.3 Inversor o "Inverter"

Convierte la tensión continua en otra de tensión y frecuencia variable mediante la generación de pulsos. Actualmente se emplean IGBT's (Isolated Gate Bipolar Transistors) para generar los pulsos controlados de tensión. Los equipos más modernos utilizan IGBT's inteligentes que incorporan un microprocesador con todas las protecciones por sobrecorriente, sobrevoltaje, bajo voltaje, cortocircuitos, puesta a masa del motor, sobretemperaturas, etc.

1.1.13.1.4 Etapa de Control

Esta etapa controla los IGBT's para generar los pulsos variables de tensión y frecuencia. Y además controla los parámetros externos en general, etc.

Los variadores utilizan modulación PWM (Modulación de Ancho de Pulsos) y usan en la etapa rectificadora puente de diodos rectificadores. En la etapa intermedia se usan condensadores y bobinas para disminuir las armónicas y mejorar el factor de potencia a través de cálculos matemáticos.

1.1.14 Ventajas de los Variadores de Frecuencia.

La gran ventaja de estos equipos está representada por las funciones que brinda entre ellas se destacan:

1.1.14.1 Ajuste de Velocidad

Este equipo permite variar la velocidad en un rango más amplio que los demás sistemas y en un tiempo relativamente muy corto.

1.1.14.2 Ajuste de Arranque y Parada

Permiten el ajuste de las rampas de arranque y parada reduciendo los picos de corriente y controlando el torque en el sistema.

1.1.14.3 Ajuste de Torque

Se puede ajustar el torque de arranque para permitir arranques seguros, así mismo se pueden mantener el torque a bajas velocidades.

1. 1.15 Fundamentos básicos sobre el control de velocidad de un motor trifásico de inducción

El motor de corriente alterna, a pesar de ser un motor robusto, de poco mantenimiento, liviano e ideal para la mayoría de las aplicaciones industriales, tiene el inconveniente de ser un motor rígido en cuanto a la posibilidad de variar su velocidad. La velocidad del motor asincrónico depende de la forma constructiva del motor y de la frecuencia de alimentación.

Como la frecuencia de alimentación que entregan las compañías de electricidad es constante, la velocidad de los motores asincrónicos es constante, salvo que se varíe el número de polos, el deslizamiento o la frecuencia.

1. 1.16 Formas de control de velocidad de un motor trifásico de inducción

Se puede variar la velocidad del motor trifásico de inducción actuando sobre las variables de las que depende:

$$\left. \begin{aligned} s &= \frac{N_s - N_r}{N_s} \\ s &= \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} \\ N_s &= \frac{f \cdot 60}{\#P} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{array}{ccc} \text{Velocidad de rotación} & \text{frecuencia} & \text{deslizamiento} \\ \downarrow & \downarrow & \swarrow \\ N_r = N_s (1-s) = \frac{12 \frac{\text{rpm}}{\text{min}}}{\#P} (1-s) & & \end{array} \quad \text{Ecuación (29)}$$

1. 1.17 Pruebas en Máquinas de Inducción

Las pruebas en las máquinas de inducción se efectúan fundamentalmente para determinar la eficiencia o el rendimiento de la máquina, estas pruebas pueden ser pruebas sin carga y a rotor bloqueado.

Mediante estas pruebas se puede encontrar:

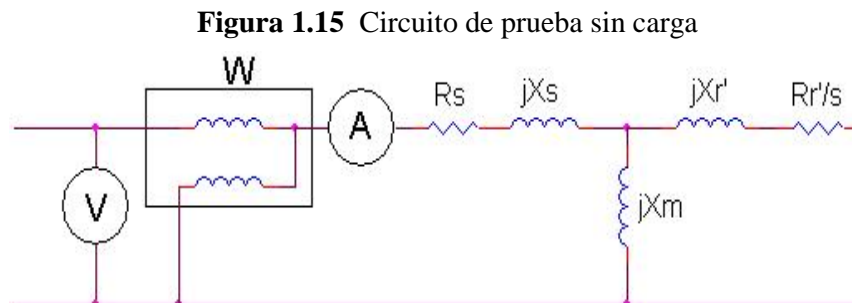
- ✓ Pérdidas rotacionales (pérdidas mecánicas), que corresponden, entre otros aspectos, a fricción, ventilación.
- ✓ Pérdidas en el cobre (pérdidas por efecto Joule)
- ✓ Los parámetros de las máquinas

Los datos que deben ser medidos a la entrada de la máquina, en los dos tipos de prueba, son los siguientes:

- ✓ Voltaje de línea
- ✓ Corriente de línea
- ✓ Potencia activa.

1. 1.17.1 Prueba sin carga (en vacío)

El circuito que debe conectarse se detalla a continuación:



Fuente: Apuntes de clase – Planificación de SEP

La prueba sin carga se realiza considerando los siguientes parámetros:

- 1) Se aplica voltaje nominal a la máquina.
- 2) No se conecta carga al eje.
- 3) Se mide la potencia de entrada, la corriente y voltaje sin carga (V_{NL} e I_{NL}).

La velocidad de la máquina es alta y cercana a la velocidad sincrónica, por lo tanto el deslizamiento es muy pequeño, entonces, Rr'/s es muy grande, en este caso la potencia medida corresponde a pérdidas en el estator, en el núcleo y a las mecánicas de rotación.

$$P_{NL} = P_{Cu \text{ estator}} + P_{(mec+Fe)} \quad \text{Ecuación (30)}$$

Al despejar de esta expresión las pérdidas rotacionales se tiene que:

$$P_{ROTACIONALES} = P_{NL} - 3 (I_{NL})^2 R_s \quad \text{Ecuación (31)}$$

Con las medidas obtenidas se puede encontrar la reactancia en vacío X_{nl} como función de las reactancias del estator X_s y de magnetización X_m .

$$Z_{nl} = \frac{V_{nl}}{\sqrt{3} I_{nl}} \quad \text{Ecuación (32)}$$

$$R_{nl} = \frac{P_{nl}}{3 I_{nl}^2} \quad \text{Ecuación (33)}$$

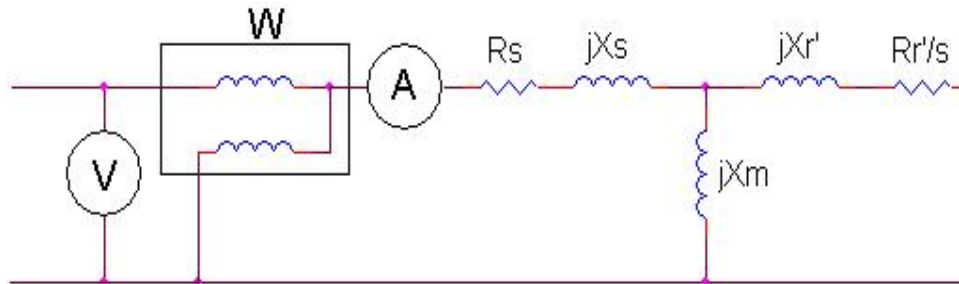
$$X_{nl} = \sqrt{Z_{nl}^2 - R_{nl}^2} \quad \text{Ecuación (34)}$$

$$X_{nl} \approx X_s + X_m \quad \text{Ecuación (35)}$$

1. 1.17.2 Prueba con rotor bloqueado (prueba de cortocircuito)

El circuito que debe conectarse se detalla a continuación:

Figura 1.16 Circuito de prueba con rotor bloqueado



Fuente: Apuntes de clase – Planificación de SEP

Para esta prueba el rotor se bloquea, con lo que la velocidad se reduce a cero ($n = 0$), y se alcanza la corriente nominal del estator aplicándole un voltaje pequeño.

Las pérdidas del núcleo son despreciables y las rotacionales son nulas.

La potencia de pérdidas corresponde a las pérdidas en el cobre del estator más las del rotor.

Con esta prueba se pueden determinar los parámetros de la máquina.

Se recomienda, que la prueba se realice para condiciones de corriente en el rotor y frecuencia similares a las requeridas para la eficiencia a determinarse, para ello se considera trabajar con una frecuencia igual a la cuarta parte de la nominal.

Puesto que la máquina está en reposo el deslizamiento es 1, por lo tanto la impedancia de la rama del rotor es menor que la reactancia de magnetización. Esta situación permite, en forma aproximada, despreciar dicha reactancia.

En este caso la reactancia a rotor bloqueado será aproximadamente igual a la suma de las reactancias del estator y la del rotor referida al estator:

$$X_{bl} = X_s + X_r' \quad \text{Ecuación (36)}$$

Con las medidas realizadas se tiene:

$$Z_{bl} = \frac{V_{bl}}{\sqrt{3} I_{bl}} \quad \text{Ecuación (37)}$$

$$R_{bl} = \frac{P_{bl}}{3 I_{bl}^2} \quad \text{Ecuación (38)}$$

$$X_{bl} = \sqrt{Z_{bl}^2 - R_{bl}^2} \quad \text{Ecuación (39)}$$

$$X_{bl} \approx X_s + X_r' \quad \text{Ecuación (40)}$$

Las relaciones entre las reactancias del estator y del rotor dependen del tipo de máquina, para ello se recurre a la siguiente tabla:

Tabla 1.1 Características según el tipo de motor

Tipo Motor	Características	Xs	Xr'
A	$\tau_{normal\ arr}$, $I_{nom\ arr}$	0.5	0.5
B	$\tau_{normal\ arr}$, $I_{baja\ arr}$	0.4	0.6
C	$\tau_{alto\ arr}$, $I_{baja\ arr}$	0.3	0.7
D	$\tau_{alto\ arr}$, Alto deslizamiento	0.5	0.5
	Rotor devanado	0.5	0.5

Fuente: Análisis y diseño aplicando Matlab de Jimmie J. Cathey. Pag. 337.

Con los resultados de la reactancia a rotor bloqueado, en vacío y al aplicar esta tabla se determina la reactancia de magnetización.

$$X_m = X_{nl} - X_s \quad \text{Ecuación (41)}$$

1.2 INTRODUCCIÓN A LOS GENERADORES ELÉCTRICOS

Los generadores y motores eléctricos son muy parecidos, es decir los generadores convierten la energía mecánica en energía eléctrica, en tanto que los motores cambian la energía eléctrica en energía mecánica; de hecho, están contruidos de la misma forma general y, ambos, dependen de los mismos principios electromagnéticos para su operación.

1.2.1 Importancia

Por ser una fuente de energía eléctrica estable y la más segura, los generadores eléctricos, cada vez adquieren más importancia e incorporan a nuevos usuarios.

Si faltara la energía eléctrica que producen los generadores, el mundo actual quedaría prácticamente paralizado. Si miramos a nuestro alrededor nos daremos cuenta de la importancia de la corriente eléctrica que producen los generadores, en el mundo moderno, el sistema de alumbrado, las fábricas y toda la vida industrial está accionada por la corriente eléctrica que producen los generadores. Los generadores son tan importantes en la vida moderna, como el corazón en la vida de nuestro organismo.

1.2.2 Generador de corriente alterna

1.2.2.1 Definición

Un generador de corriente eléctrica alterna, es todo dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial eléctrico entre dos de sus puntos (llamados polos, terminales o bornes) transformando la energía mecánica en energía eléctrica.

Esta transformación se consigue por la acción de inducción electromagnética, este fenómeno consiste en producir una fuerza electromotriz (F.E.M.) en un medio expuesto a un campo magnético variable, o en un medio móvil respecto a un campo magnético estático, es así que cuando dicho medio es un conductor se produce una corriente inducida; la F.E.M. se define como el trabajo que el generador realiza para pasar la unidad de carga positiva del polo negativo al positivo por el interior del generador.

1.2.2.2 Tipos de Generadores de Corriente Alterna

Existen dos tipos de generadores de corriente alterna.

1.2.2.2.1 Generador asincrónico o de inducción.

Son máquinas cuya corriente de campo se obtienen por inducción magnética en sus devanados de excitación, el proceso como generador requiere que la máquina entregue potencia eléctrica por el estator, la energía ingresa por el eje mecánico, atraviesa el entrehierro y llega al estator para ser suministrada a la respectiva carga.

Las máquinas de inducción funcionan como generador si hay una fuente de potencia reactiva (capacitores estáticos o una máquina sincrónica) disponible en el sistema de potencia. Un generador de inducción aislado presenta graves problemas de regulación de voltaje, pero cuando opera en

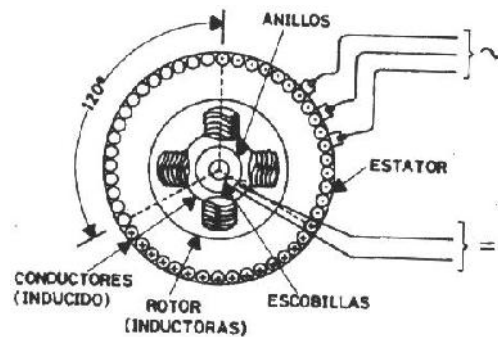
paralelo con un gran sistema de potencia, éste puede controlar el voltaje de la máquina.

Los generadores de inducción son máquinas pequeñas que se utilizan en fuentes de energía alternativas como molinos de viento o en sistemas de recuperación de energía, casi todos los generadores grandes en uso son generadores sincrónicos. La máquina de inducción es generalmente empleada en la industria cuando trabaja como motor.

1.2.2.2 Generador sincrónico o alternador:

Un generador sincrónico es un dispositivo para convertir potencia mecánica de un motor primario en potencia eléctrica AC de voltajes y frecuencia específicos. El término sincrónico se refiere al hecho de que la frecuencia eléctrica de esta máquina está confinada o sincronizada con su tasa mecánica de rotación del eje.

Figura 1.17 Generador sincrónico de armadura estacionaria de 4 polos



Fuente: Transformadores y Máquinas Eléctricas – Cantos Castillo Iván 2003

En la Figura 1.17, podemos ver que un generador sincrónico se le aplica una corriente DC al devanado del rotor, la cual produce un campo magnético.

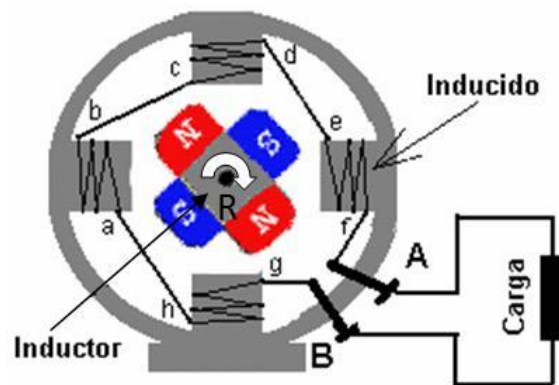
Entonces el rotor del generador gira mediante un motor primario y produce un campo magnético rotacional dentro de la máquina. Este campo magnético rotacional induce un grupo monofásico de voltajes en los devanados del estator del generador.

El generador sincrónico se utiliza para producir la gran mayoría de potencia eléctrica utilizada en todo el mundo.

1.2.2.3 Elementos del Generador de Corriente Alterna

Un generador de corriente alterna consta de dos partes fundamentales, el inductor, que es el que crea el campo magnético y el inducido que es el conductor el cual es atravesado por las líneas de fuerza contraelectromotriz de dicho campo.

Figura 1.18 Elementos de un Generador AC Simple



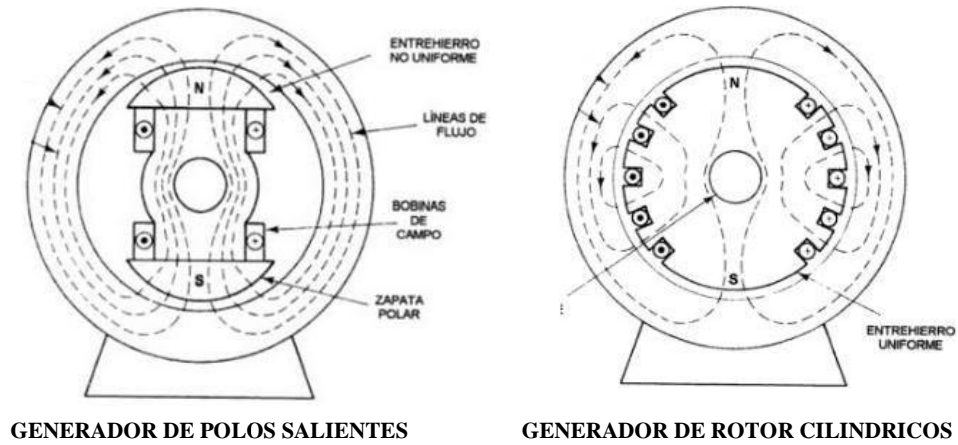
Fuente: <http://blogspot.com/2010/06/elementos-máquinas-y-sistemas.html>

1.2.2.3.1 El Inductor.

En el rotor se encuentran alojadas las bobinas del devanado de campo que inducen el voltaje en el devanado de armadura, en donde se encuentran las

bobinas que determinan si el generador es monofásico o trifásico. Desde el punto de vista constructivo, los rotores se construyen del tipo polos salientes para baja velocidad, o rotor de polo cilíndrico para alta velocidad, (Figura 1.19)

Figura 1.19 Tipos de rotores para generadores



Fuente: Máquinas Eléctricas y Transformadores –I.L Kosow

1.2.2.3.2 El Inducido.

El inducido o estator de un generador de corriente alterna, está compuesto por bobinas de alambre, se puede observar el aspecto de las bobinas del estator de un generador en la figura 1.20.

Figura 1.20 Bobinas del estator de un generador de C.A



Fuente: <http://www.buenastareas.com/ensayos/Caracteristicas-Del-Estator.html>

1.2.2.4 Clasificación de los Generadores Sincrónicos

De acuerdo a su diseño se pueden encontrar dos tipos de generadores sincrónicos.

1.2.2.4.1 Generador de Polos Salientes.

Este tipo de generadores se caracterizan por trabajar a bajas velocidades, por ende en su rotor se encuentran distribuidos un número de mayor de polos que en la máquina sincrónica de rotor cilíndrico. Este tipo de máquina es utilizada en centrales hidráulicas en las que el flujo de agua puede hacer rotar a la turbina en velocidades que van desde los 200rpm hasta los 1800 rpm.

Los devanados de este tipo de rotor se encuentran distribuidos en polos salientes como se muestra en la figura 1.21, los polos están preparados mecánicamente para brindar soporte a los devanados.

Figura 1.21 Rotor de polos salientes



Fuente: http://www.redinter.com.ar/nuestros_trabajos/reparacion.htm

$$P = \frac{V}{x_d} E \sin(\delta) + \frac{V^2}{2} \sin(2\delta) * \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \quad \text{Ecuación (43)}$$

DÓNDE:

- P= Es la potencia activa, por fase.
- E = Voltaje interno del generador.
- V = Voltaje terminal del generador.
- δ = Ángulo interno entre el voltaje interno y el voltaje terminal.
- Xd= Reactancia en eje directo del generador.
- Xq = reactancia de eje de cuadratura del generador.

La potencia reactiva por fase es:

$$Q = \frac{V}{x_d} E \cos(\delta) + \frac{V^2}{2} \cos(2\delta) \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) - \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} + \frac{1}{x_d} \right) \quad \text{Ecuación (44)}$$

DÓNDE:

- S= es la potencia reactiva, por fase.
- E = Voltaje interno del generador.
- V = Voltaje terminal del generador.
- δ = Ángulo interno entre el voltaje interno y el voltaje terminal.
- Xd= Reactancia en eje directo del generador.
- Xq = reactancia en eje de cuadratura del generador.

1.2.2.4.2 Generador de Rotor Cilíndrico

Este tipo de generador se caracteriza por que los devanados se encuentran uniformemente distribuidos en un rotor cilíndrico elaborado de acero sólido forjado; en el cual está elaboradas pequeñas hendiduras las cuales encaminan y sostienen a los conductores.

Figura 1.23 Rotor cilíndrico



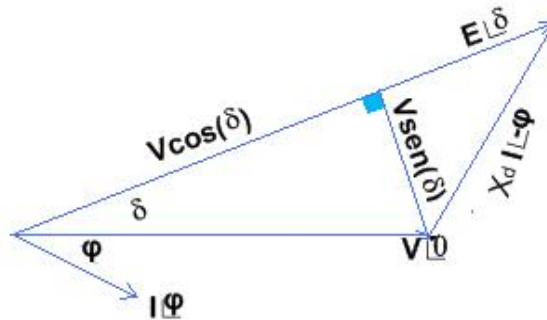
Fuente: <http://www.flickr.com/photos/cesacev/4069217383/>

Este tipo de generadores pueden trabajar a grandes velocidades y son utilizados en centrales térmicas de vapor o de gas. Dependiendo de la velocidad que suele ser de 800 o 3600 rpm el rotor tiene cuatro y dos polos respectivamente.

1.2.2.4.2.1 Representación Fasorial del Generador Sincrónico de Rotor cilíndrico.

A continuación se muestra el diagrama fasorial del generador de rotor cilíndrico despreciando la resistencia de armadura.

Figura 1.24 Diagrama fasorial del generador de rotor cilíndrico



Fuente: U.T.C, Cátedra de Dinámica de Máquinas Eléctricas, Componentes Simétricas

El voltaje inducido sin considerar la resistencia de armadura en la fase es:

$$E \angle \delta = V \angle \theta + j X_d I \angle \phi \quad \text{Ecuación (45)}$$

DÓNDE:

E = Voltaje interno del generador

V = Voltaje terminal del generador

δ = Ángulo interno entre el voltaje interno y el voltaje terminal

I = Corriente en el estator

ϕ = Ángulo de desfase entre el voltaje Terminal y la corriente en el estator

X_d = Reactancia en eje directo del generador

Los valores de la potencia suministrada, por fase, se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones:

$$S = Vt_a \cdot I_a \quad \text{Ecuación (46)}$$

DÓNDE:

S = Potencia aparente nominal en pu

I = Corriente en el estator.

$$P = \frac{V \sin(\delta)}{X_d} \quad \text{Ecuación (47)}$$

DÓNDE:

P = es la potencia activa, por fase.

E = Voltaje interno del generador

V = Voltaje terminal del generador

δ = Ángulo interno entre el voltaje interno y el voltaje terminal

X_d = Reactancia en eje directo del generador

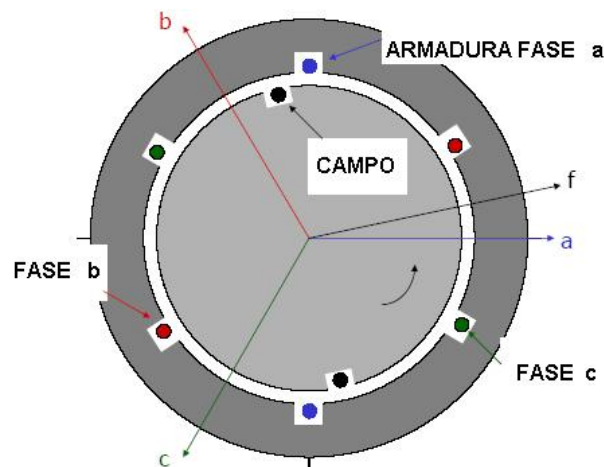
DÓNDE:

- Q = Es la potencia reactiva, por fase.
- E = Voltaje interno del generador
- V = Voltaje terminal del generador
- δ = Ángulo interno entre el voltaje interno y el voltaje terminal
- Xd= Reactancia en eje directo del generador

1.2.2.5 Principio de Funcionamiento de un Generador A.C síncrono.

Consideremos que el generador síncrono suministra energía a una carga de impedancia Z, el cual actúa como una fuente de voltaje cuya frecuencia queda determinada por la velocidad de la máquina motriz ($f = (P/2)*(n/60)$), mientras que la corriente y el factor de potencia dependen de la excitación del campo de la impedancia del generador y de la carga.

Figura 1.25 Funcionamiento de un generador síncrono



Fuente: <http://www.endesaeduca.com/conceptos-básicos/v.-funcionamiento-de-generadores>.

La corriente de armadura crea un campo magnético que gira a velocidad sincrónica, este campo reacciona con el campo magnético producido por la corriente continua del devanado de campo produciéndose el torque electromagnético, por la tendencia que tienen los campos a alinearse. El flujo de campo adelanta al de la armadura, es decir el primero jala al segundo.

El torque electromagnético se opone al giro, por lo que se requiere de una máquina de impulsión para suministrar el torque mecánico que sostenga la rotación.

El torque electromagnético es el mecanismo que usa el generador sincrónico para convertir energía mecánica en eléctrica.

1.2.2.6 Principio de funcionamiento del motor sincrónico

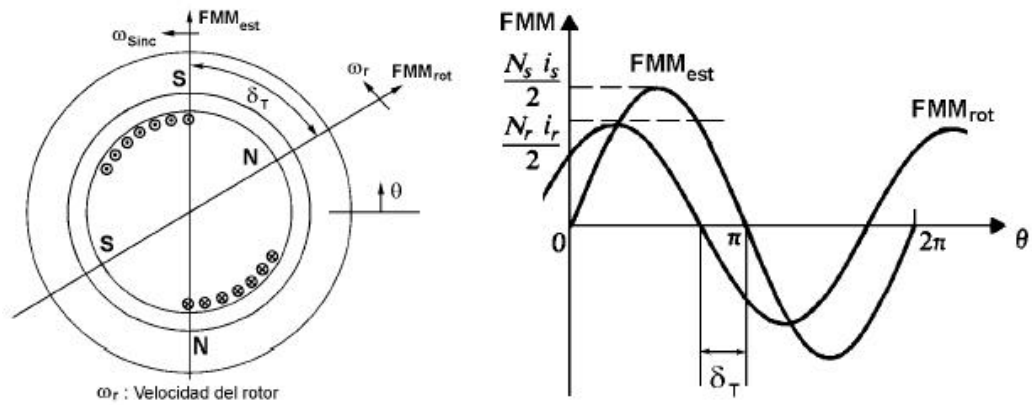
En los motores sincrónicos se suministra corriente a los devanados de la armadura creándose el campo magnético en éstos. Este campo magnético está girando a velocidad sincrónica.

En el rotor la corriente continua crea un campo magnético en su devanado.

Estos campos son constantes en magnitud y estacionarios entre sí.

El flujo de campo de la armadura gira adelante del flujo de campo del devanado conectado en el rotor, por lo que el primero jala al segundo.

Figura 1.26 Funcionamiento del motor sincrónico.



Fuente: Máquinas Eléctricas y Sistemas De Potencia Theodore Wildi 6 Ed.

El campo magnético de la armadura reacciona con el campo magnético del rotor creando un torque electromagnético estable.

La velocidad de giro del motor está determinada por el número de polos y es función de la frecuencia de la corriente de armadura.

El torque electromagnético está en la dirección de giro y compensa al torque de reacción necesario para impulsar la carga mecánica conectada al eje.

Para arrancar a los motores sincrónicos existen algunas formas, una de ellas es el empleo de un motor de inducción que impulsa la máquina hasta que ésta alcance la velocidad sincrónica.

1.2.2.7 Circuito equivalente de la máquina síncrona

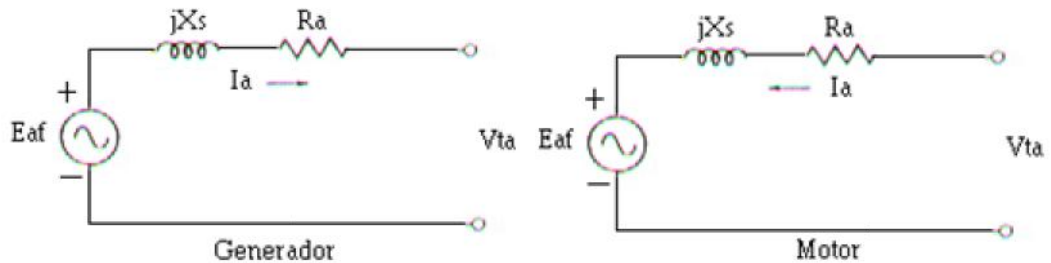
Las ecuaciones resultantes aplicables a las máquinas síncronas son:

$$v_{ra} = R_a i_a + L_s \frac{di_a}{dt} + e_{af}$$

$$V_{ta} = R_a I_a + jX_s I_a + E_{af} \quad \text{Ecuación (49)}$$

De estas ecuaciones se deduce el diagrama esquemático para la máquina síncrona. Nótese que el diagrama para motor y generador son similares y se diferencian en la dirección de la corriente de armadura. Para el motor la corriente va desde la fuente hacia la máquina y para el generador en sentido contrario.

Figura 1.27 Diagrama esquemático del generador y motor



Fuente: Máquinas Eléctricas y Sistemas De Potencia Theodore Wildi 6 Ed.

En el caso de un generador, considerando la relación entre la reactancia síncrona y las inductancias de dispersión y la debida a la componente espacial fundamental del flujo en el entrehierro, se tiene la siguiente ecuación del voltaje inducido:

$$E_{af} = R_a I_a + j\omega \left(\frac{3}{2} L_{aa0} + L_{al} \right) I_a + V_{ta}$$

$$E_{af} = R_a I_a + jX_a I_a + jX_l I_a + V_{ta} \quad \text{Ecuación (50)}$$

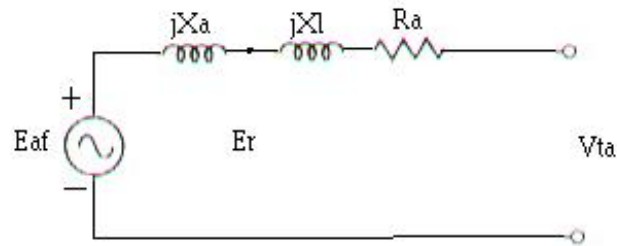
DÓNDE:

X_a es la reactancia que representa la reacción de armadura

X_l representa la reactancia de dispersión.

Al considerar lo expresado en esta ecuación se tiene el siguiente diagrama.

Figura 1.28 Circuito equivalente de la máquina síncrona



Fuente: Grupo de investigación

El voltaje E_r es el voltaje interno generado por el flujo resultante en el entrehierro, o voltaje detrás de la reactancia de dispersión. Este voltaje adelanta al flujo en el entrehierro por 90° .

Para máquinas síncronas sobre los 100 kVA, se tienen los siguientes valores característicos:

Las pérdidas de voltaje en la resistencia de armadura están en el orden del 1% del voltaje nominal.

- La resistencia de armadura está en el orden de 0.01 pu
- La reactancia de dispersión oscila entre un valor de 0.1 pu y 0.2 pu
- La reactancia síncrona tiene un valor en el orden de 1 a 2 pu.

Para máquinas pequeñas la reactancia síncrona está en el orden de 0.5 pu y la resistencia de la armadura en 0.05 pu.

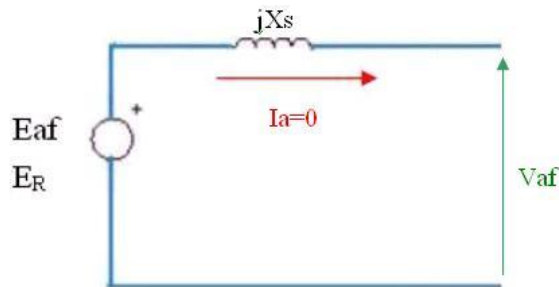
1.2.2.8 Pruebas en máquinas sincrónicas

Las pruebas que se indican a continuación se aplican para máquinas de rotor cilíndrico y de polos salientes.

1.2.2.8.1 Prueba de circuito abierto

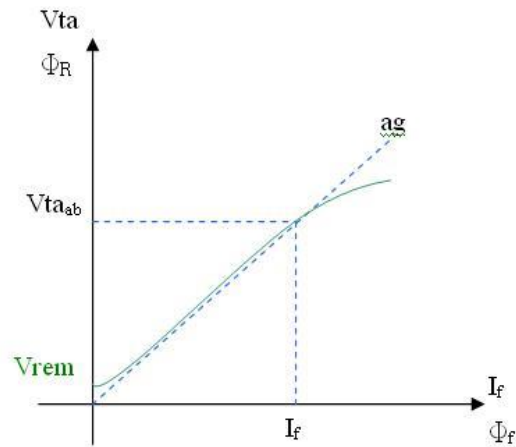
Esta prueba permite encontrar la relación entre el voltaje medido a terminales de la máquina y la corriente de excitación, sin embargo, debido a que la máquina está en circuito abierto el voltaje medido corresponde al voltaje inducido y por ello representa la relación entre la componente fundamental del flujo en el entrehierro y la fuerza magnetomotriz que actúa sobre el circuito magnético del campo. Con esta información se obtiene la curva de magnetización.

Figura 1.29 Prueba de Circuito Abierto.



Fuente: Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas - Fitzgerald

Figura 1.30 Curva característica de la prueba de Circuito Abierto.



Fuente: Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas - Fitzgerald

En la figura 1.30 tenemos que:

ag línea del entrehierro

Las pruebas se realizan girando la máquina en circuito abierto a velocidad sincrónica.

La velocidad sincrónica se puede medir directamente con un tacómetro.

Esta prueba se la realiza de la siguiente manera:

1. Se impulsa la máquina a velocidad sincrónica con los terminales de la armadura en circuito abierto y se miden el voltaje terminal y la corriente de excitación.
2. Se realizan mediciones hasta sobrepasar el valor del voltaje nominal en un valor determinado. Es necesario tomar nota del voltaje remanente. La curva que se obtiene es la de magnetización.

3. En la curva de magnetización se dibuja la línea del entrehierro.
4. Se mide la potencia de entrada, cuando se aplica la excitación, el valor corresponde a las pérdidas rotacionales sin carga que incluyen a las pérdidas mecánicas (fricción, ventilación, etc.) y a las pérdidas en el núcleo (proporcionales al flujo magnético del núcleo que es función del voltaje terminal aplicado), esto es:

$$P_{ent} = P_{mec.} + P_{Fe} \quad \text{Ecuación (51)}$$

5. Se mide la potencia de entrada, sin excitación, el valor corresponde a las pérdidas por fricción mecánica y del aire o ventilación.

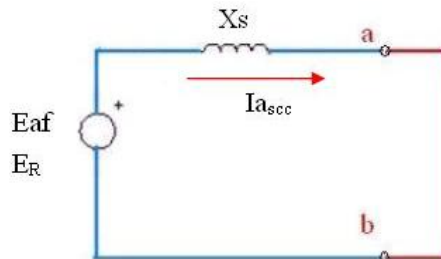
$$P_{ent} = P_{mecánicas} \quad \text{Ecuación (52)}$$

Con estos valores se puede calcular las pérdidas del núcleo a circuito abierto:

$$P_{FE} = P_{ent (con.exit.)} - P_{ent (sin.exit.)} \quad \text{Ecuación (53)}$$

1.2.2.8.2 Prueba de cortocircuito

Figura 1.31 Circuito para la prueba de cortocircuito.



Fuente: Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas - Fitzgerald

Esta prueba se realiza de la siguiente manera:

1. Se cortocircuitan los terminales de armadura, girando la máquina a velocidad sincrónica.
2. Se mide la corriente de corto circuito, para ello la excitación se va aumentando poco a poco hasta llegar a la corriente nominal de la máquina.

La fuerza magnetomotriz resultante crea el flujo en el entrehierro que genera el voltaje:

$$E_r = I_a R_a + j I_a X_a \quad \text{Ecuación (54)}$$

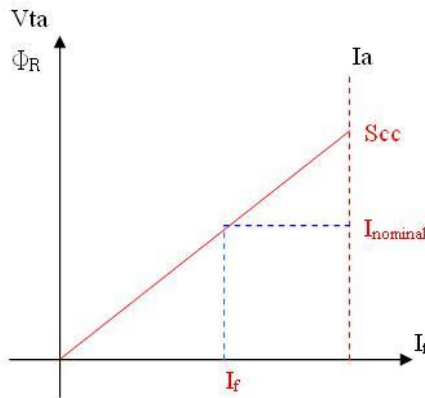
En esta expresión se tiene que la caída de voltaje en la resistencia de la armadura es despreciable y el voltaje en la reactancia es pequeño, debido a que la reactancia de dispersión es del orden de 0.15 pu.

Esto implica que el voltaje de entrehierro y por ende el flujo resultante están también en dicho orden, lo cual conduce a afirmar que la máquina está trabajando en la zona lineal de la curva de magnetización y por ello la relación entre la corriente de cortocircuito y la corriente de excitación es una línea recta.

Con los resultados de las dos pruebas se calcula el valor de la reactancia sincrónica no saturada, para ello se considera una excitación adecuada del campo y se determina la corriente de cortocircuito en la armadura ($I_{a,sc}$), con ese mismo valor de corriente de campo se determina el voltaje de excitación ($E_{af,ag}$) en la línea del entrehierro. Con estos datos se determina la reactancia no saturada al aplicar la siguiente relación:

$$X_{s,ag} = E_{af,ag} / I_{a,sc} \quad \text{Ecuación (55)}$$

Figura 1.32 Curva característica de la prueba en cortocircuito.



Fuente: Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas - Fitzgerald

1.2.2.9 Zona segura de operación del generador sincrónico

La demanda de energía es impredecible, no se puede saber con certeza los requerimientos de potencia activa y reactiva a los terminales del generador, por esta razón su punto de operación (P, Q) varía constantemente. La potencia activa que se entrega está relacionada directamente con el control de frecuencia, mientras que la potencia reactiva ayuda en el control de voltaje, por lo tanto es indispensable contar con la suficiente reserva de las dos (P y Q) con el fin de mantener el voltaje y la frecuencia constantes.

La cantidad de potencia activa y reactiva que el generador es capaz de entregar está limitada por algunos factores los cuales serán analizados posteriormente. Los límites de potencia activa y reactiva son representados a través de curvas que relacionan estos dos valores y muestran claramente las zonas seguras de operación.

Para la correcta aplicación de los esquemas de protección para generadores es importante conocer los límites operativos de cada componente para que los parámetros de calibración de los relés no permitan que las magnitudes eléctricas (voltaje, corriente, potencia, frecuencia, etc.) sobrepasen dichos límites.

Se considerarán los siguientes límites para la operación segura del generador:

- ✓ Límite por corriente máxima del devanado de armadura
- ✓ Límite por corriente máxima de campo
- ✓ Límite de estabilidad en estado estable

1.2.2.10 Límite por corriente de armadura

La corriente de armadura está relacionada directamente con la potencia aparente S del generador, según la ecuación de la potencia aparente se tiene:

$$S = V I \quad \text{Ecuación (56)}$$

DÓNDE:

S = Potencia aparente.

V = Voltaje terminal.

I = Corriente de armadura.

La corriente máxima de armadura puede ser conducida por los devanados sin exceder sus límites de temperatura.

$$I = \frac{S}{V} \quad \text{Ecuación (57)}$$

Si el voltaje V es constante, la corriente varía directamente con la potencia aparente S , con esto se puede usar esta magnitud para hacer el análisis de los límites de corriente de armadura.

Si la máxima potencia aparente es constante para cualquier punto operativo, se plantean las siguientes ecuaciones.

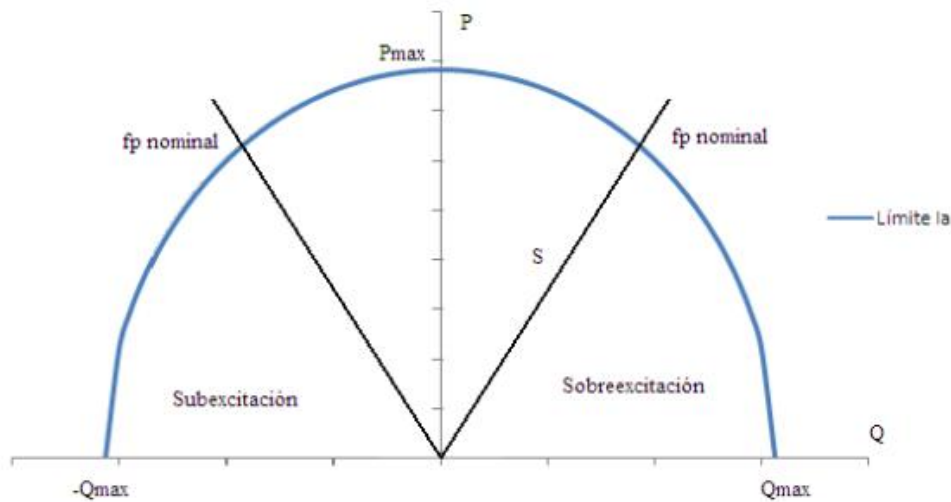
$$I_e = \frac{S}{V} + I_0$$

Ecuación (58)

La expresión (58) es la ecuación de una circunferencia de radio S . La relación entre P y Q se muestra en la figura 1.33. Los valores negativos de P no se consideran ya que la potencia que entrega el generador no puede ser negativa.

Figura 1.33 Límite por corriente de armadura

CURVA DE CAPACIDAD DEL GENERADOR



Fuente: I. CALERO, “Protección de Generadores Eléctricos”, tesis, Quito 2008.

1.2.2.11 Límite por corriente máxima de campo

La corriente que circula por el rotor produce calentamiento en los devanados, y el calentamiento impone el límite para no producir daños en los devanados. La relación entre la potencia P y Q , para determinar la corriente de campo, es un círculo con centro en el punto $(0, -Vt^2/x_d)$ y radio E . El voltaje máximo de excitación ($E_{m\acute{a}x}$) se obtiene para condiciones nominales.

El análisis general se hace para el generador de polos salientes, donde la potencia activa y reactiva vienen dadas por las siguientes expresiones:

$$P = \frac{V * E}{x_d} \sin(\delta) + \frac{V^2}{2} \sin(2\delta) \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \quad \text{Ecuación (59)}$$

$$Q = \frac{V * E}{x_d} \cos(\delta) + \frac{V^2}{2} \cos(2\delta) \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) - \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) \quad \text{Ecuación (60)}$$

El voltaje interno E está relacionado directamente con la corriente de campo según la ecuación:

$$E = N\omega\phi_{rot} \quad \text{Ecuación (61)}$$

El flujo del rotor está en función de la corriente de campo, y la relación entre los dos pueden ser obtenidas a través de la curva de magnetización del generador.

Para encontrar E_{max} primero se debe conocer el ángulo interno del generador por medio de la ecuación:

$$E_q \angle = V + jX_q I \quad \text{Ecuación (62)}$$

Dónde E_q se encuentra ubicado en la misma dirección de E por lo tanto el ángulo puede ser tomado de la ecuación anterior.

La corriente nominal I_n se calcula con la siguiente ecuación:

$$P_n = V_n * I_n \quad f_p \quad \text{Ecuación (63)}$$

$$I_n = \frac{P_n}{V_n * f_p} \quad \text{Ecuación (64)}$$

DÓNDE:

P_n = potencia Nominal

I_n = corriente Nominal

V_n = Voltaje nominal

fp = factor de potencia

Conocido P e I se calcula E_{max} . Por medio de la ecuación de P

$$E_{max} = \frac{P_n - \frac{V^2 \sin^2(\delta)}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right)}{\frac{V}{\sin(\delta)} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right)} \quad \text{Ecuación (65)}$$

Con E_{max} se puede encontrar la curva de límite por corriente máxima de campo, graficando P y Q para un voltaje interno E_{max} variando desde 0° hasta δ_{max} en las ecuaciones de P y Q. δ_{max} se obtiene derivando P respecto a δ e igualando la ecuación a cero, debido a la potencia extra producida por la saliente de los polos, mientras que, en un generador cilíndrico $\delta = 90^\circ$.

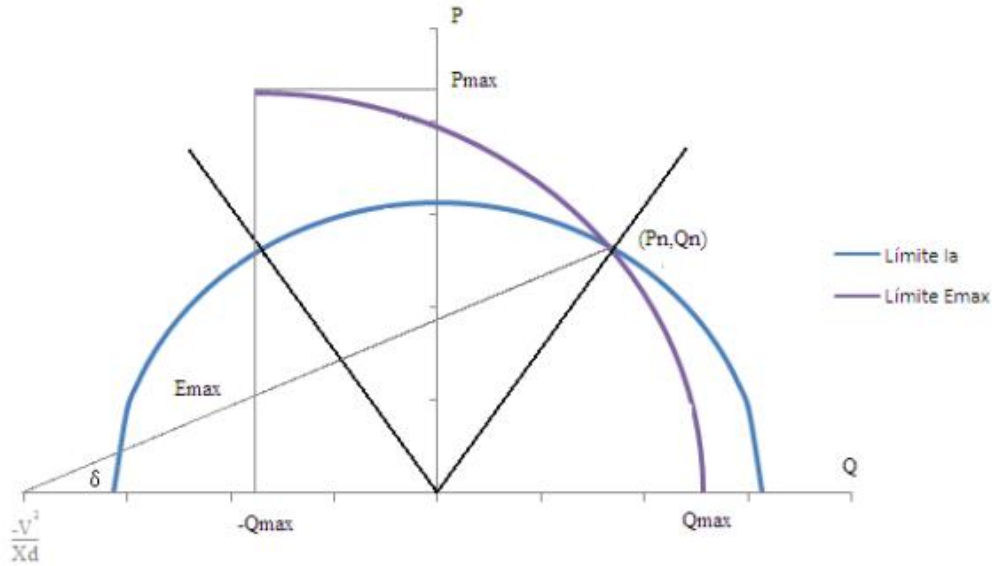
$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{V E_{max}}{X_d} \cos(\delta) + V^2 \cos(2\delta) \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) = 0 \quad \text{Ecuación (66)}$$

Despejando δ de la expresión anterior se obtiene δ_{max} y junto con E_{max} se calcula Q_{max}

$$Q_{max} = \frac{V E_{max}}{X_d} \cos(\delta_{max}) + \frac{V^2}{2} \cos(2\delta_{max}) \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) - \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} + \frac{1}{X_d} \right) \quad \text{Ecuación (67)}$$

Figura 1.34 Límite por corriente de campo máximo

CURVA DE CAPACIDAD DEL GENERADOR



Fuente: I. CALERO, “Protección de Generadores Eléctricos”, tesis, Quito 2008.

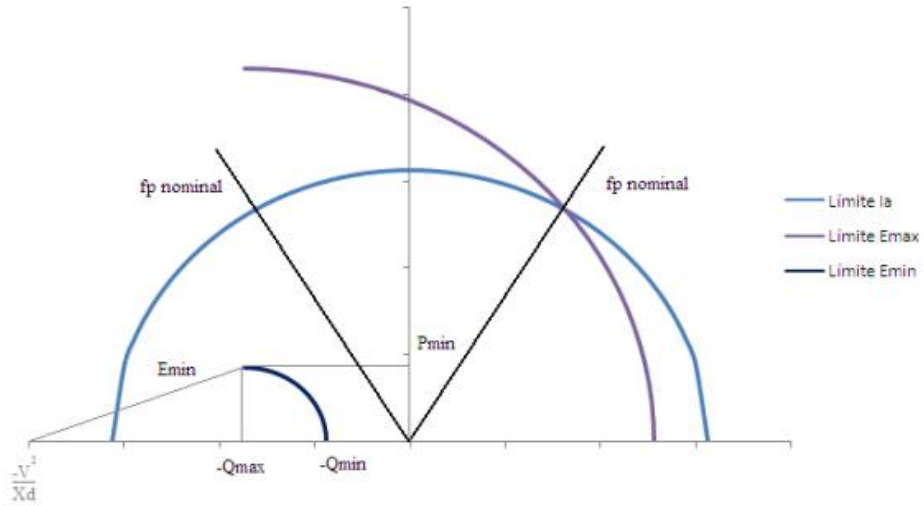
1.2.2.12 Límite por corriente mínima de campo

Si la corriente de excitación es muy pequeña puede que el generador no tenga el suficiente torque magnético para mantener el sincronismo, por lo que podría perder estabilidad. Por esta razón existe un límite mínimo de corriente de campo que se puede expresar como porcentaje de la corriente máxima de campo.

Este valor es recomendado por el fabricante. Una vez conocido $I_{f_{min}}$ y E_{min} , se encuentra la curva del límite por corriente mínima de campo con el mismo procedimiento que se empleó para encontrar la curva del límite por E_{max} , esto se realiza reemplazando $E_{máx}$ por E_{min} en las ecuaciones presentadas en la sección anterior.

Figura 1.35 Límite por corriente de campo mínima

CURVA DE CAPACIDAD DEL GENERADOR

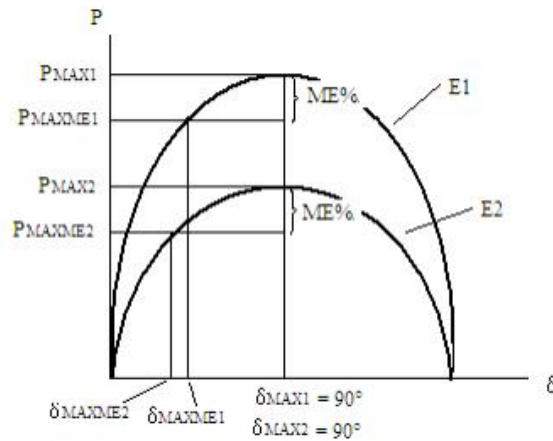


Fuente: I. CALERO, “Protección de Generadores Eléctricos”, tesis, Quito 2008.

1.2.2.13 Límite de estabilidad de estado estable

El Límite de estabilidad de Estado Estable evita que el generador trabaje en la zona de inestabilidad, limitando la potencia P_{max} transferida a una P_{maxME} considerando un margen de seguridad respecto a la P_{max} , para cada valor de excitación. El valor del (ME%), es la misma para cualquier excitación.

Figura 1.36 Gráfica de la P_{MAX} y Potencia considerando ME P_{MAXME} .



Fuente: I. CALERO, “Protección de Generadores Eléctricos”, tesis, Quito

Para encontrar la curva de Límite de Estabilidad en Estado Estable, se calcula la $P_{max\ ME}$, que está en función de la potencia máxima que el generador puede entregar, y el margen de estabilidad (ME%), para un determinada excitación.

$$P_{max\ ME\ 1} = P_{max\ 1} - ME\ \% \quad \text{Ecuación (68)}$$

E_{max} es calculada de distinta manera, dependiendo del tipo del rotor. Para el generador de rotor cilíndrico, E_{max} se calcula en P_{max} con $\delta = 90^\circ$, con la siguiente ecuación.

$$E_{max\ 1} = \frac{P_{max\ 1} \cdot X_d}{V \cdot \sin(90)} \quad \text{Ecuación (69)}$$

Para el generador de polos salientes es necesario derivar P respecto a δ e igualar a cero, donde se evalúa P para la máxima excitación E_{max} .

$$\frac{dP}{d\delta} = \frac{V \cdot E_{max}}{x_d} \sin(\delta_{max}) + \frac{V^2}{2} \sin(2\delta_{max}) \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) = 0 \quad \text{Ecuación (70)}$$

$$P_{max\ 1} = \frac{V \cdot E_{max}}{x_d} \sin(\delta_{max}) + \frac{V^2}{2} \sin(2\delta_{max}) \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \quad \text{Ecuación (71)}$$

Remplazando $P_{max\ ME\ 1}$ y $E_{max\ 1}$ en la ecuación de P , se despeja $\delta_{max\ ME\ 1}$

Ecuación (72)

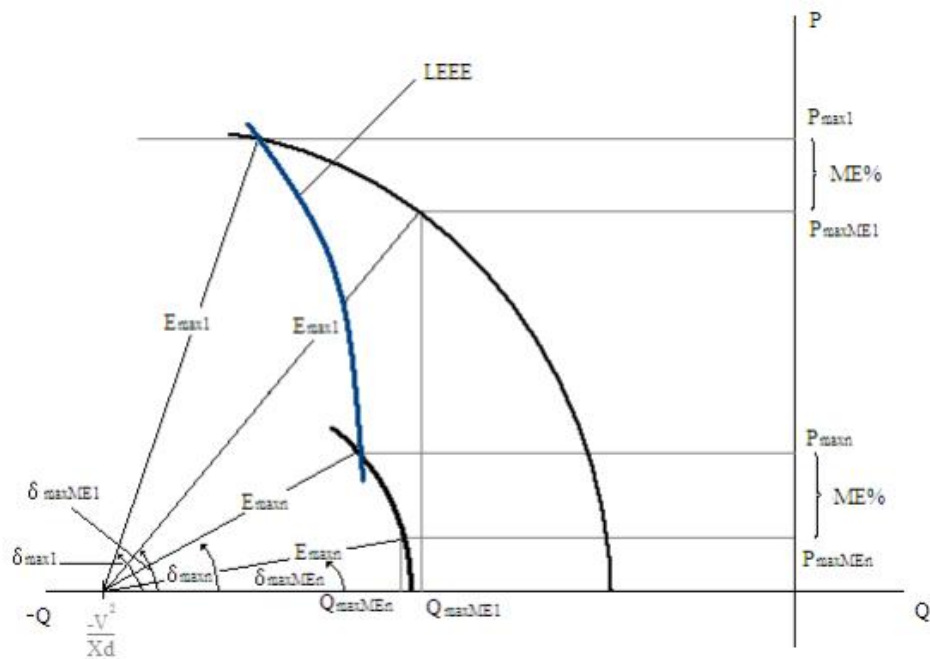
$$P_{max\ ME\ 1} = \frac{V \cdot E_{max\ 1}}{x_d} \sin(\delta_{max\ ME\ 1}) + \frac{V^2}{2} \sin(2\delta_{max\ ME\ 1}) \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right)$$

Conociendo $\max ME1$ y $E_{\max 1}$ se calcula $Q_{\max ME1}$ con la siguiente ecuación:

Ecuación (73)

Con $P_{\max ME1}$ y $Q_{\max ME1}$ se forma el primer punto de la curva, para encontrar los otros puntos se repite el proceso anterior.

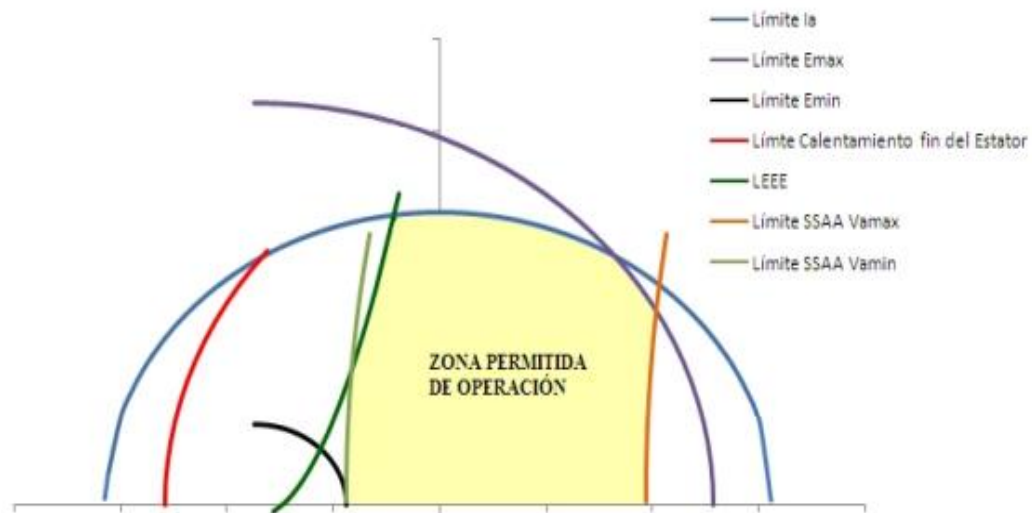
Figura 1.37 Proceso que sigue para formar la curva del LEEE.



Fuente: I. CALERO, "Protección de Generadores Eléctricos", tesis, Quito 2008.

A continuación se muestra la figura 1.38 donde se encuentra la zona segura de operación del generador sincrónico.

Figura 1.38 Zona segura de operación del generador sincrónico



Fuente: I. CALERO, “Protección de Generadores Eléctricos”, Tesis, Quito 2008.

- ✓ La curva del límite por corriente de armadura indica la limitación del calentamiento debida al devanado de armadura.
- ✓ La línea de máxima potencia mecánica, indica la máxima potencia que puede entregar la turbina en condiciones de operación normal.
- ✓ La línea de mínima potencia mecánica, indica la mínima potencia que puede entregar la turbina en condiciones de operación normal.
- ✓ La curva de corriente máxima de campo, indica la limitación del calentamiento debido al devanado de campo
- ✓ La curva de corriente mínima de campo, indica la mínima corriente con la que puede operar, ya que, si existe una corriente muy pequeña de campo puede que el generador no tenga el suficiente torque magnético para mantener el sincronismo por lo que podría perder estabilidad.

- ✓ La curva de límite de estabilidad de estado estable, representa la máxima potencia activa que se puede transmitir sin que el generador pierda estabilidad considerando un porcentaje con margen de estabilidad.

- ✓ La intersección de las curvas del límite de por corriente de armadura y límite por corriente máxima de campo, determinan el punto de operación normal del generador, punto en el cual se determina la capacidad de potencia activa y reactiva.

CAPÍTULO II

2.1 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

2.1.1 Introducción.

En este capítulo se realiza un análisis de los datos obtenidos de la entrevista realizada a los Ingenieros Eléctricos de la Universidad Técnica de Cotopaxi, así como también los datos obtenidos de las encuestas aplicadas a los estudiantes de séptimo y octavo semestre de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, con lo cual se pretende corroborar la necesidad de implementar el Laboratorio de Máquinas Eléctricas con un Grupo Motor- Generador AC-AC Trifásico de 5 [kW], para realizar prácticas demostrativas.

2.1.2 Método de estudio.

Se realizó un estudio analítico y descriptivo con el objetivo de establecer la necesidad de implementar el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con el Montaje de un Motor-Generador AC-AC Trifásico de 5 [kW] para realizar prácticas demostrativas.

Para recabar la información necesaria se utilizó un cuestionario para los estudiantes de séptimo y octavo semestre de la Universidad Técnica de Cotopaxi, y una entrevista para los Ingenieros Eléctricos de la Carrera de Ingeniería Eléctrica

2.1.3 Técnicas e instrumentos.

Como instrumento de investigación se utilizó un cuestionario de 8 preguntas, en el que constan interrogantes sobre la necesidad y la importancia de implementar el Laboratorio de Máquinas Eléctricas con un grupo Motor-Generador AC-AC Trifásico de 5[kW] y va direccionado a los estudiantes de séptimo y octavo semestre de la carrera de Ing. Eléctrica.

Además cuenta con una entrevista realizada a seis Ingenieros Eléctricos de la Universidad Técnica de Cotopaxi. La entrevista consta de 3 preguntas, su contenido tiene similitud con el cuestionario realizado a los estudiantes de la Carrera de Ing. Eléctrica.

2.1.4 Resultados y análisis de la entrevista realizada a los docentes de la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi

El objetivo principal de esta entrevista es verificar la factibilidad del proyecto con el tema “Implementación y Montaje de un Motor – Generador AC - AC Trifásico de 5 [kW], en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Técnica de Cotopaxi con la elaboración de un manual de operación, para realizar prácticas demostrativas”.

Tabla 1.2 Entrevista

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI	
Entrevistado: Ing. Vicente Quispe	
Entrevistadores: Cisneros Calvopiña Oswaldo Gustavo Yugsi Lanchimba Edwin Patricio	
Fecha: 30 de Noviembre del 2012	
PREGUNTAS	INTERPRETACIÓN
<p>¿Por qué considera necesario la implementación del Laboratorio de Máquinas Eléctricas, con el Montaje de un Grupo Motor – Generador AC- AC Trifásico?</p> <p>¿Considera que el Montaje de un Grupo Motor - Generador AC- AC Trifásico, permitirá realizar prácticas demostrativas de Máquinas Eléctricas y S.E.P.</p> <p>¿Beneficiara el Montaje de un Grupo Motor – Generador AC- AC Trifásico, en la formación académica Teórico – práctico de los estudiantes de la Carrera de Ing. Eléctrica?</p>	<p>Es necesario la implementación del laboratorio con este tipo de equipos, ya que permitirá realizar todo tipo de prácticas referente a Máquinas Eléctricas y de esta manera fortalecer y complementar los conocimientos de los estudiantes con lo teórico – práctico.</p>

Tabla 1.3 Entrevista

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI	
<p>Entrevistado: Ing. Javier Proaño,</p> <p>Entrevistadores: Cisneros Calvopiña Oswaldo Gustavo Yugsi Lanchimba Edwin Patricio</p> <p>Fecha: 30 de Noviembre del 2012</p>	
PREGUNTAS	INTERPRETACIÓN
<p>1. ¿Por qué considera necesario la implementación del Laboratorio de Máquinas Eléctricas, con el Montaje de un Grupo Motor – Generador AC- AC Trifásico?</p> <p>2. ¿Considera que el Montaje de un Grupo Motor - Generador AC- AC Trifásico, permitirá realizar prácticas demostrativas de Máquinas Eléctricas y S.E.P.</p> <p>3. ¿Beneficiara el Montaje de un Grupo Motor – Generador AC- AC Trifásico, en la formación académica Teórico –práctico de los estudiantes de la Carrera de Ing. Eléctrica?</p>	<p>Es de vital importancia contar con un modulo de pruebas ya que es una herramienta la cual nos va a permitir comprender los conceptos de mejor manera y así poder comprobar a pequeña escala los fenómenos que sucede con los generadores y motores.</p>

Tabla 1.4 Entrevista

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI	
Entrevistado: Ing. Pablo Mena	
Entrevistadores: Cisneros Calvopiña Oswaldo Gustavo Yugsi Lanchimba Edwin Patricio	
Fecha: 30 de Noviembre del 2012	
PREGUNTAS	INTERPRETACIÓN
<p>1. ¿Por qué considera necesario la implementación del Laboratorio de Máquinas Eléctricas, con el Montaje de un Grupo Motor – Generador AC- AC Trifásico?</p> <p>2. ¿Considera que el Montaje de un Grupo Motor - Generador AC- AC Trifásico, permitirá realizar prácticas demostrativas de Máquinas Eléctricas y S.E.P.</p> <p>3. ¿Beneficiara el Montaje de un Grupo Motor – Generador AC- AC Trifásico, en la formación académica Teórico –práctico de los estudiantes de la Carrera de Ing. Eléctrica?</p>	<p>Con la implementación del banco de pruebas y bajo la supervisión del catedrático se puede llevar a la par lo teórico con lo práctico de las asignaturas que son técnicas y con esto complementar lo recibido en las aulas y así ayudar al desarrollo de los futuros profesionales.</p>

Tabla 1.5 Entrevista

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI	
Entrevistado: Ing. Ernesto Abril	
Entrevistadores: Cisneros Calvopiña Oswaldo Gustavo Yugsi Lanchimba Edwin Patricio	
Fecha: 30 de Noviembre del 2012	
PREGUNTAS	INTERPRETACIÓN
<p>1. ¿Por qué considera necesario la implementación del Laboratorio de Máquinas Eléctricas, con el Montaje de un Grupo Motor – Generador AC- AC Trifásico?</p> <p>2. ¿Considera que el Montaje de un Grupo Motor - Generador AC- AC Trifásico, permitirá realizar prácticas demostrativas de Máquinas Eléctricas y S.E.P.</p> <p>3. ¿Beneficiara el Montaje de un Grupo Motor – Generador AC- AC Trifásico, en la formación académica Teórico –práctico de los estudiantes de la Carrera de Ing. Eléctrica?</p>	<p>El Montaje del Grupo Motor - Generador AC- AC Trifásico, será de gran utilidad en el laboratorio, ya que el mismo dispondrá de los equipos y instrumentos necesarios para realizar prácticas propuestas por los docentes y así mejorar los conocimientos destrezas y habilidades de cada estudiante los cuales tendrán la capacidad de solucionar problemas y aportar con el crecimiento de las empresas.</p>

Tabla 1.6 Entrevista

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI	
Entrevistado: Ing. Marcelo Barrera	
Entrevistadores: Cisneros Calvopiña Oswaldo Gustavo Yugsi Lanchimba Edwin Patricio	
Fecha: 30 de Noviembre del 2012	
PREGUNTAS	INTERPRETACIÓN
<p>1. ¿Por qué considera necesario la implementación del Laboratorio de Máquinas Eléctricas, con el Montaje de un Grupo Motor – Generador AC- AC Trifásico?</p> <p>2. ¿Considera que el Montaje de un Grupo Motor - Generador AC- AC Trifásico, permitirá realizar prácticas demostrativas de Máquinas Eléctricas y S.E.P.</p> <p>3. ¿Beneficiara el Montaje de un Grupo Motor – Generador AC- AC Trifásico, en la formación académica Teórico –práctico de los estudiantes de la Carrera de Ing. Eléctrica?</p>	<p>Al no poseer el laboratorio este tipo de banco de pruebas, se considera necesaria la implementación del Grupo Motor – Generador AC- AC Trifásico ya que con la puesta en marcha del modulo nos permitirá reforzar la comprensión del principio de funcionamiento de las máquinas eléctricas mediante el uso de las guías de laboratorio.</p>

Tabla 1.7 Entrevista

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI	
Entrevistado: Ing. Miguel Lucio	
Entrevistadores: Cisneros Calvopiña Oswaldo Gustavo Yugsi Lanchimba Edwin Patricio	
Fecha: 30 de Noviembre del 2012	
PREGUNTAS	INTERPRETACIÓN
<p>1. ¿Por qué considera necesario la implementación del Laboratorio de Máquinas Eléctricas, con el Montaje de un Grupo Motor – Generador AC- AC Trifásico?</p> <p>2. ¿Considera que el Montaje de un Grupo Motor - Generador AC- AC Trifásico, permitirá realizar prácticas demostrativas de Máquinas Eléctricas y S.E.P.</p> <p>3. ¿Beneficiara el Montaje de un Grupo Motor – Generador AC- AC Trifásico, en la formación académica Teórico –práctico de los estudiantes de la Carrera de Ing. Eléctrica?</p>	<p>El banco de pruebas será un complemento para la carrera de Ingeniería Eléctrica en la formación integral de los estudiantes, este banco de pruebas servirá como un apoyo para el conocimiento adquirido en asignaturas tales como Máquinas Eléctricas, Centrales de Generación, Operación de SEP entre otras.</p>

2.1.5 Resultados y análisis de la encuesta.

2.1.5.1 Pregunta N°1 ¿Conoce Ud. si el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Técnica de Cotopaxi cuenta con un Grupo Motor – Generador AC-AC Trifásico?

Tabla 1.8 Resultado de la pregunta N°1

ITEM	ALTERNATIVAS	FRECUENCIA	(%)
1	SI	4	2
2	NO	44	98
TOTAL		48	100

FUENTE: 7mo y 8vo Ing. Eléctrica U.T.C

ELABORADO POR: Los postulantes

Gráfico 2.1



FUENTE: 7mo y 8vo Ing. Eléctrica U.T.C

ELABORADO POR: Los postulantes

Interpretación

Como se puede observar en el gráfico 2.1 del 100% de los estudiantes encuestados, en su gran mayoría representada por 47 estudiantes que equivalen al 98% desconocen que en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas exista un Grupo Motor – Generador AC-AC Trifásico.

Por los datos que se obtuvieron consideramos que es necesario implementar el Laboratorio de Máquinas Eléctricas con un Motor – Generador AC – AC Trifásico el cual permitirá desarrollar prácticas demostrativas a los estudiantes de la U.T.C.

2.1.5.2 Pregunta N°2 ¿Cree Ud. que es necesario realizar prácticas demostrativas con aplicaciones de un Sistema Eléctrico de Potencia?

Tabla 1.9 Resultado de la pregunta N°2

ITEM	ALTERNATIVAS	FRECUENCIA	(%)
1	SI	48	100
2	NO	0	
TOTAL		48	100

FUENTE: 7mo y 8vo Ing. Eléctrica U.T.C

ELABORADO POR: Los postulantes

Gráfico 2.2



FUENTE: 7mo y 8vo Ing. Eléctrica U.T.C

ELABORADO POR: Los postulantes

Interpretación

Como se puede observar en el gráfico 2.2 del 100% de los estudiantes encuestados, representada por 48 estudiantes de séptimo y octavo ciclo de la carrera de Ingeniería Eléctrica que equivalen al 100%, manifiestan que si se debería realizar prácticas demostrativas con aplicaciones de Sistema Eléctricos de Potencia.

De acuerdo a los datos expuestos podemos confirmar que es de gran necesidad la Implementación y Montaje de un Motor – Generador AC – AC Trifásico de 5 [kW] en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas, para la realización de prácticas demostrativas y así complementar los conocimientos adquiridos en clase.

2.1.5.3 Pregunta N°3 ¿Los alumnos de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, realizan prácticas demostrativas de laboratorio con sincronismo a una barra infinita?

Tabla 1.10 Resultado de la pregunta N°3

ITEM	ALTERNATIVAS	FRECUENCIA	(%)
1	SI	5	10
2	NO	43	90
TOTAL		48	100

FUENTE: 7mo y 8vo Ing. Eléctrica U.T.C

ELABORADO POR: Los postulantes

Gráfico 2.3



FUENTE: 7mo y 8vo Ing. Eléctrica U.T.C

ELABORADO POR: Los Postulantes

Interpretación

Como se puede observar en el gráfico 2.3 del 100% de los estudiantes encuestados, en su gran mayoría representada por 43 estudiantes de séptimo y octavo ciclo de la carrera de Ingeniería Eléctrica que equivalen al 90%, manifiestan que no realizan prácticas demostrativas de laboratorio con sincronismo a la barra infinita.

Los resultados permiten determinar que es necesaria la implementación de horas de prácticas académicas, para poder surtir con conocimientos y comprobar los parámetros para el sincronismo a la barra infinita.

2.1.5.4 Pregunta N°4 ¿Esta Ud. de Acuerdo que se implemente en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas un Grupo Motor – Generador AC-AC Trifásico de 5 [kW], para realizar prácticas demostrativas?

Tabla 1.11 Resultado de la pregunta N°4

ITEM	ALTERNATIVAS	FRECUENCIA	(%)
1	SI	48	100
2	NO	0	0
TOTAL		48	100

FUENTE: 7mo y 8vo Ing. Eléctrica U.T.C

ELABORADO POR: Los postulantes

Gráfico 2.4



FUENTE: 7mo y 8vo Ing. Eléctrica U.T.C

ELABORADO POR: Los postulantes

Interpretación

Como se puede observar en el gráfico 2.4 del 100% de los estudiantes encuestados, representada por 48 estudiantes de séptimo y octavo ciclo de la carrera de Ingeniería Eléctrica que equivalen al 100%, están de acuerdo con la implementación del Laboratorio con un grupo Motor – Generador de 5[kW].

Al adquirir nuevos equipos y elementos para incorporar y fortalecer el laboratorio se está dando un gran paso ya que los docentes y estudiantes pueden interactuar físicamente manipulando cada uno de los elementos del banco de pruebas.

2.1.5.5 Pregunta N°5 ¿Cree Ud. que el uso de equipos e instrumentos de medición con tecnología de punta, permitirá una toma de datos exactos en las prácticas demostrativas?

Tabla 1.12 Resultado de la pregunta N°5

ITEM	ALTERNATIVAS	FRECUENCIA	(%)
1	SI	46	96
2	NO	2	4
TOTAL		48	100

FUENTE: 7mo y 8vo Ing. Eléctrica U.T.C

ELABORADO POR: Los postulantes

Gráfico 2.5



FUENTE: 7mo y 8vo Ing. Eléctrica U.T.C

ELABORADO POR: Los postulantes

Interpretación

Como se puede observar en el gráfico 2.5 del 100% de los estudiantes encuestados, en su gran mayoría representada por 46 estudiantes de séptimo y octavo ciclo de la carrera de Ingeniería Eléctrica que equivalen al 96%, manifiestan que el uso de equipos e instrumentos de medición con tecnología de punta, permitirá una toma de datos exactos en las prácticas demostrativas.

De acuerdo a los datos expuestos podemos aprovechar los equipos e instrumentos de medición con los que contará el banco de pruebas.

2.1.5.6 Pregunta N°6 ¿Cree Ud. que las Asignaturas de Operación de SEP, Máquinas Eléctricas, Centrales de Generación sean vistas de una manera más sencilla y comprensible en el momento de usar los conceptos en el laboratorio?

Tabla 1.13 Resultado de la pregunta N°6

ITEM	ALTERNATIVAS	FRECUENCIA	(%)
1	SI	48	100
2	NO	0	0
TOTAL		48	100

FUENTE: 7mo y 8vo Ing. Eléctrica U.T.C

ELABORADO POR: Los postulantes

Gráfico 2.6



FUENTE: 7mo y 8vo Ing. Eléctrica U.T.C

ELABORADO POR: Los Postulantes

Interpretación

Como se puede observar en el gráfico 2.6 del 100% de los estudiantes encuestados, representada por 48 estudiantes de séptimo y octavo ciclo de la carrera de Ingeniería Eléctrica que equivalen al 100%, manifiestan que las asignaturas de Operación de SEP, Máquinas Eléctricas, Centrales de Generación deben ser analizadas de una manera más sencilla y comprensible en el momento de usar los conceptos en el laboratorio.

Los estudiantes van a tener la oportunidad de manipular todos los equipos que se encuentran en el banco de pruebas y así despejar todas las dudas que ellos tengan.

2.1.5.7 Pregunta N°7 ¿Cree Ud. que mediante el uso de guías de laboratorio permitirá desarrollar las prácticas de una forma más fácil?

Tabla 1.14 Resultado de la pregunta N°7

ITEM	ALTERNATIVAS	FRECUENCIA	(%)
1	SI	44	92
2	NO	4	8
TOTAL		48	100

FUENTE: 7mo y 8vo Ing. Eléctrica U.T.C

ELABORADO POR: Los postulantes

Gráfico 2.7



FUENTE: 7mo y 8vo Ing. Eléctrica U.T.C

ELABORADO POR: Los postulantes

Interpretación

Como se puede observar en el gráfico 2.7 del 100% de los estudiantes encuestados, en su gran mayoría representada por 46 estudiantes de séptimo y octavo ciclo de la carrera de Ingeniería Eléctrica que equivalen al 92%, manifiestan que el uso de guías de laboratorio permitirá desarrollar las prácticas de una forma más fácil y sencilla.

Los resultados permiten determinar que es necesario la elaboración de guías de laboratorio para realizar prácticas demostrativas en el grupo Motor –Generador AC – AC Trifásico de 5 [kW].

2.1.5.8 Pregunta N°8 ¿Considera Ud. importante para su desarrollo profesional el haber tenido la oportunidad de experimentar con equipos y máquinas de características similares a las que podemos encontrar en el entorno industrial?

Tabla 1.15 Resultado de la pregunta N°8

ITEM	ALTERNATIVAS	FRECUENCIA	(%)
1	SI	48	100
2	NO	0	0
TOTAL		48	100

FUENTE: 7mo y 8vo Ing. Eléctrica U.T.C

ELABORADO POR: Los postulantes

Gráfico 2.8



FUENTE: 7mo y 8vo Ing. Eléctrica U.T.C

ELABORADO POR: Los postulantes

Interpretación

Como se puede observar en el gráfico 2.8 del 100% de los estudiantes encuestados, representada por 48 estudiantes de séptimo y octavo ciclo de la carrera de Ingeniería Eléctrica que equivalen al 100%, manifiestan que se debe experimentar prácticas con este tipo de equipo para en un futuro aplicar en la industria.

Los resultados permiten determinar que es necesario y de gran utilidad familiarizarse con este tipo de módulos didácticos para que posteriormente este conocimiento se ponga en práctica en equipos de tipo industrial.



VALIDACIÓN

Quien suscribe, Vicente Javier Quispe Toapanta, con Título de Ingeniero Eléctrico, a través de la presente, manifiesto que he validado el Funcionamiento del Banco de Pruebas, implementado y montado por los postulantes a Ingenieros Eléctricos; Yugsi Lanchimba Edwin Patricio con C.I. 040158904 – 9 y Cisneros Calvopiña Oswaldo Gustavo con C.I. 050266279 – 4, alumnos regulares de la Unidad Académica de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas Carrera Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, cuyo Trabajo de Grado es la “IMPLEMENTACIÓN Y MONTAJE DE UN MOTOR – GENERADOR AC - AC TRIFÁSICO DE 5 kW, EN EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI, CON LA ELABORACIÓN DE UN MANUAL DE OPERACIÓN PARA REALIZAR PRÁCTICAS DEMOSTRATIVAS”.

Trabajo de investigación que permitirá cubrir contenidos de acuerdo a cada cátedra de la especialidad de Ingeniería Eléctrica.

En la cátedra de Centrales de Generación con código IELE_604 período septiembre 2012 – febrero 2013 el Grupo Motor – Generador de 5kW permitirá complementar los contenidos que el docente crea pertinente, en el siguiente cuadro se detallan algunas prácticas en las cuales se utilizará el banco de pruebas como herramienta principal.

El docente mencionado señalo con un (✓) en cada tema que creé conveniente que esta tesis ayudará a complementar la teoría con la práctica.

CENTRALES DE GENERACIÓN

CONTENIDOS		
No	UNIDAD 1: ASPECTOS GENERALES	
1	Conceptos de barra infinita	
2	Factores de centrales eléctricas	
3	Control de voltaje y frecuencia aplicado al S.N.I	
4	Principios central Hidráulica	
5	Partes y componentes	

Revisado el mismo, estimo que puede ser presentado al tribunal que ha de juzgarlo, y para que conste a efecto de lo establecido, autorizo la presentación de esta tesis en la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Ing. Elect. Vicente Quispe



VALIDACIÓN

Quien suscribe, Ernesto Manuel Abril Garcés, con Título de Ingeniero Eléctrico, a través de la presente, manifiesto que he validado el Funcionamiento del Banco de Pruebas implementado y montado por los postulantes a Ingenieros Eléctricos Yugsi Lanchimba Edwin Patricio con C.I. 040158904 – 9 y Cisneros Calvopiña Oswaldo Gustavo con C.I. 050266279 – 4, alumnos regulares de la Unidad Académica de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas Carrera Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, cuyo Trabajo de Grado es la “IMPLEMENTACIÓN Y MONTAJE DE UN MOTOR – GENERADOR AC - AC TRIFÁSICO DE 5 kW, EN EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI, CON LA ELABORACIÓN DE UN MANUAL DE OPERACIÓN PARA REALIZAR PRÁCTICAS DEMOSTRATIVAS”.

Trabajo de investigación que permitirá cubrir contenidos de acuerdo a cada cátedra de la especialidad de Ingeniería Eléctrica.

En la cátedra de Máquinas Eléctrica I con código IELE 404 período septiembre 2012 – febrero 2013 el Grupo Motor – Generador de 5kW permitirá complementar los contenidos que el docente crea pertinente, en el siguiente cuadro se detallan algunas prácticas en las cuales se utilizará el banco de pruebas como herramienta principal.

El docente mencionado señalo con un (✓) en cada tema que creé conveniente que esta tesis ayudará a complementar la teoría con la práctica.

MÁQUINAS ELÉCTRICAS I

CONTENIDOS		
No	UNIDAD 1: ASPECTOS GENERALES	
1	Conversión de energía convencional	
2	Balance de energía	
3	Fuerza y par con excitación simple	
4	Fuerza y par con excitación múltiple	
5	Fuerza y par con imanes permanentes	
6	Ecuaciones dinámicas	
7	Máquinas rotativas ideales	
8	Fmm de devanado distribuido	
9	Campos magnéticos en máquinas de corriente alterna	
10	Voltaje generado	
11	Par en máquinas de polos no salientes	

Revisado el mismo, estimo que puede ser presentado al tribunal que ha de juzgarlo, y para que conste a efecto de lo establecido, autorizo la presentación de esta tesis en la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Ing. Elect. Ernesto Abril Garcés



VALIDACIÓN

Quien suscribe, Alvaro Santiago Mullo Quevedo, con Título de Ingeniero Electromecánico, a través de la presente, manifiesto que he validado el Funcionamiento del Banco de Pruebas implementado y montado por los postulantes a Ingenieros Eléctricos Yugsi Lanchimba Edwin Patricio con C.I. 040158904 – 9 y Cisneros Calvopiña Oswaldo Gustavo con C.I. 050266279 – 4, alumnos regulares de la Unidad Académica de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas Carrera Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, cuyo Trabajo de Grado es la “IMPLEMENTACIÓN Y MONTAJE DE UN MOTOR – GENERADOR AC - AC TRIFÁSICO DE 5 kW, EN EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI, CON LA ELABORACIÓN DE UN MANUAL DE OPERACIÓN PARA REALIZAR PRÁCTICAS DEMOSTRATIVAS”.

Trabajo de investigación que permitirá cubrir contenidos de acuerdo a cada cátedra de la especialidad de Ingeniería Eléctrica.

En la cátedra de Máquinas eléctricas II con código IELE_504 período septiembre 2012 – febrero 2013 el Grupo Motor – Generador de 5kW permitirá complementar los contenidos que el docente crea pertinente, en el siguiente cuadro se detallan algunos contenidos en los cuales se utilizará el banco de pruebas como herramienta principal para realizar prácticas..

El docente mencionado señalo con un (✓) en cada tema que creé conveniente que esta tesis ayudará a complementar la teoría con la práctica.

MÁQUINAS ELÉCTRICAS II

CONTENIDOS		
No	UNIDAD 1: MÁQUINAS DE INDUCCIÓN POLIFÁSICA	
1	Generalidades de la máquina de inducción	
2	Operación de la máquina de inducción	
3	Circuitos Equivalentes de una máquina de inducción	
4	Análisis de potencia en el circuito de inducción	
5	Potencia al Eje	
6	Pruebas en las máquinas de Inducción	
7	Resistencia del rotor	
	UNIDAD 2: MÁQUINAS SINCRÓNICAS	
8	Máquinas Sincrónicas Generalidades	
9	Generador sincrónico	
10	Motores sincrónicos	
11	Análisis de los parámetros de la máquina sincrónica	
12	Pruebas en las máquinas sincrónicas	
13	Cálculo de la reactancia saturada	
14	Curvas “V” de los motores	
15	Potencia aparente	
16	Generadores interconectados	
17	Reparto de carga entre generadores	
18	Cálculo de la Fuerza Electromotriz Inducida	

Revisado el mismo, estimo que puede ser presentado al tribunal que ha de juzgarlo, y para que conste a efecto de lo establecido, autorizo la presentación de esta tesis en la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Ing. Alvaro Mullo



VALIDACIÓN

Quien suscribe, Xavier Alfonso Proaño Maldonado, con Título de Ingeniero Eléctrico, a través de la presente, manifiesto que he validado el Funcionamiento del Banco de Pruebas implementado y montado por los postulantes a Ingenieros Eléctricos Yugsi Lanchimba Edwin Patricio con C.I. 040158904 – 9 y Cisneros Calvopiña Oswaldo Gustavo con C.I. 050266279 – 4, alumnos regulares de la Unidad Académica de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas Carrera Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, cuyo Trabajo de Grado es la “IMPLEMENTACIÓN Y MONTAJE DE UN MOTOR – GENERADOR AC - AC TRIFÁSICO DE 5 kW, EN EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI, CON LA ELABORACIÓN DE UN MANUAL DE OPERACIÓN PARA REALIZAR PRÁCTICAS DEMOSTRATIVAS”.

Trabajo de investigación que permitirá cubrir contenidos de acuerdo a cada cátedra de la especialidad de Ingeniería Eléctrica.

En la cátedra de Operación de SEP con código IELE_804 período septiembre 2012 – febrero 2013 el Grupo Motor – Generador de 5kW permitirá complementar los contenidos que el docente crea pertinente, en el siguiente cuadro se detallan algunos contenidos en los cuales se utilizará el banco de pruebas como herramienta principal para realizar prácticas..

El docente mencionado señalo con un (✓) en cada tema que creé conveniente que esta tesis ayudará a complementar la teoría con la práctica.

OPERACIÓN DE SEP

CONTENIDOS		
No	UNIDAD 1: ASPECTOS GENERALES	
1	Regulación terciaria de frecuencia	
2	Modelo matemático del generador	
3	Velocidad de caída de la frecuencia	
4	Estimación del estado de las mediciones	
5	Criterio para la determinación de errores en la medición	
6	Obtención de los coeficientes de pérdidas mediante la aplicación de flujos de potencia alterna	
7	Obtención de los coeficientes de pérdidas mediante la aplicación de flujos de potencia con el método de “Corriente Continua”	
8	Control de potencia – frecuencia	
9	Amortiguamiento de la carga	
10	Regulación primaria y secundaria de frecuencia	
11	Control potencia - frecuencia áreas múltiples	

Revisado el mismo, estimo que puede ser presentado al tribunal que ha de juzgarlo, y para que conste a efecto de lo establecido, autorizo la presentación de esta tesis en la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Ing. Elect. Xavier Proaño



VALIDACIÓN

Quien suscribe, Jaime Marcelo Barrera Flores, con Título de Ingeniero Eléctrico, a través de la presente, manifiesto que he validado el Funcionamiento del Banco de Pruebas implementado y montado por los postulantes a Ingenieros Eléctricos Yugsi Lanchimba Edwin Patricio con C.I. 040158904 – 9 y Cisneros Calvopiña Oswaldo Gustavo con C.I. 050266279 – 4, alumnos regulares de la Unidad Académica de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas Carrera Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, cuyo Trabajo de Grado es la “IMPLEMENTACIÓN Y MONTAJE DE UN MOTOR – GENERADOR AC - AC TRIFÁSICO DE 5 kW, EN EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI, CON LA ELABORACIÓN DE UN MANUAL DE OPERACIÓN PARA REALIZAR PRÁCTICAS DEMOSTRATIVAS”.

Trabajo de investigación que permitirá cubrir contenidos de acuerdo a cada cátedra de la especialidad de Ingeniería Eléctrica.

En la cátedra de Introducción al SEP con código IELE_704 período septiembre 2012 – febrero 2013 el Grupo Motor – Generador de 5kW permitirá complementar los contenidos que el docente crea pertinente, en el siguiente cuadro se detallan algunos contenidos en los cuales se utilizará el banco de pruebas como herramienta principal para realizar prácticas.

El docente mencionado señalo con un (✓) en cada tema que creé conveniente que esta tesis ayudará a complementar la teoría con la práctica.

INTRODUCCIÓN AL SEP

CONTENIDOS		
No	UNIDAD 1: ANÁLISIS VARIACIONAL DE SEP	
1	Generadores Sincrónicos	
2	Transformadores con tap's	
3	Sistemas de Potencia	
4	Flujos de Potencia en SEP	
	UNIDAD 2: ESTABILIDAD DE SEP	
5	Conceptos Básicos	
6	Inercia	
7	Ecuación de Oscilación	
8	Método Paso a Paso para la solución de la Ecuación de Oscilación de SEP	
9	Criterio de Igualdad de áreas	
10	Severidad de fallas	
	UNIDAD 3: ESTABILIDAD SEP POR VOLTAJE	
11	Sistema multimáquina	
12	Regulador de voltaje (Modelo Matemático)	
13	Regulador de Velocidad (Modelo Matemático)	
14	Carga	
15	Análisis de estabilidad de voltaje	

Revisado el mismo, estimo que puede ser presentado al tribunal que ha de juzgarlo, y para que conste a efecto de lo establecido, autorizo la presentación de esta tesis en la Universidad Técnica de Cotopaxi.

Ing. Elect. Marcelo Barrera

2.2 COMPROBACIÓN DE LA HIPÓTESIS

2.2.1 Planteamiento de la Hipótesis

Para realizar el presente trabajo de investigación se planteó las siguientes hipótesis:

a) *Modelo Lógico*

La implementación y el montaje de un Motor – Generador AC - AC Trifásico de 5 [kW], en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Técnica de Cotopaxi, ayudará a los docentes de la carrera de Ingeniería Eléctrica a complementar los conocimientos teóricos de los estudiantes en el área de especialización.

ho= La implementación y el montaje de un Motor – Generador AC - AC Trifásico de 5 [kW], en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Técnica de Cotopaxi, **NO** ayudará a los docentes de la carrera de Ingeniería Eléctrica a complementar los conocimientos teóricos de los estudiantes en el área de especialización.

ha= La implementación y el montaje de un Motor – Generador AC - AC Trifásico de 5 [kW], en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Técnica de Cotopaxi, **SI** ayudará a los docentes de la carrera de Ingeniería Eléctrica a complementar los conocimientos teóricos de los estudiantes en el área de especialización.

b) *Modelo Matemático*

Hipótesis nula ho= Respuestas observadas = Respuestas Esperadas

Hipótesis alternativa ha= Respuestas observadas \neq Respuestas esperadas.

2.2.2. Nivel de significación

La probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando es falsa es de 5%, es decir, el nivel de confianza es del 95%.

2.2.3 Argumentación

2.2.3.1 Estadístico de prueba

Para la verificación de la hipótesis se toma la fórmula del Chi-cuadrado, se utilizó la encuesta como técnica de investigación, escogiendo seis preguntas como se muestra en la tabla 1.16.

Tabla 1.16 Datos de la encuesta observada

Items	N° Pregunta	SI (fo)	NO (fo)	TOTAL
1	2	48	0	48
2	4	48	0	48
3	5	46	2	48
4	6	48	0	48
5	7	44	4	48
6	8	48	0	48
TOTAL		282	6	288

FUENTE: Encuestas

ELABORADO POR: Los postulantes

Aplicamos la fórmula de la frecuencia esperada

$$fe = \frac{tf * tc}{tg} \quad \text{Ecuación (74)}$$

DÓNDE:

fe= frecuencia esperada

tf= total filas

tc= total columnas

tg= total general

De las seis preguntas se obtuvo el cálculo de la frecuencia esperada y se detalla en la tabla 1.17.

Tabla 1.17 Resultados de la frecuencia esperada

Items	N° Pregunta	SI (fe)	NO (fe)	Total
1	2	47	1	48
2	4	47	1	48
3	5	47	1	48
4	6	47	1	48
5	7	47	1	48
6	8	47	1	48

FUENTE: Encuestas

ELABORADO POR: Los postulantes

Aplicamos la fórmula de Chi-cuadrado

$$Xc = \frac{(fo - fe)^2}{fe} \quad \text{Ecuación (75)}$$

DÓNDE:

Xc= Valor a calcularse de Chi-cuadrado

fo = frecuencia observada

fe = frecuencia esperada

2.2.3.2 Resolución de la fórmula

Tabla 1.18 Cálculo del Chi-cuadrado

$X_c = \frac{(fo - fe)^2}{fe}$		<i>fo</i>	<i>fe</i>	<i>(fo - fe)</i>	<i>(fo - fe)²</i>	$\frac{(fo - fe)^2}{fe}$
Pregunta 2	SI	48	47	1	1	0,021
Pregunta 2	NO	0	1	-1	1	1
Pregunta 4	SI	48	47	1	1	0,021
Pregunta 4	NO	0	1	-1	1	1
Pregunta 5	SI	46	47	-1	1	0,021
Pregunta 5	NO	2	1	1	1	1
Pregunta 6	SI	48	47	1	1	0,021
Pregunta 6	NO	0	1	-1	1	1
Pregunta 7	SI	44	47	-3	9	0,021
Pregunta 7	NO	4	1	3	9	9
Pregunta 8	SI	48	47	1	1	0,021
Pregunta 8	NO	0	1	-1	1	1
						<i>Xc: 13,105</i>

FUENTE: Encuestas

ELABORADO POR: Los postulantes

2.2.3.3 Regla de decisión

Si $X_{2c} > X_{2t}$ rechazo H_0 y acepto H_1

Grados de libertad

Aplicamos la fórmula para el calcular el grado de Libertad

$$gl = (nr - 1) (nc - 1)$$

Ecuación (76)

DÓNDE:

gl= grado de libertad

nr = Número de filas

nc =Número de columnas

$$gl = (6 - 1) (2 - 1)$$

$$gl = 5$$

Con un nivel de significación de 5% y 5 grado de libertad $X^2_p = 11,070$

Tabla 1.19 Distribución Chi-cuadrado

ν	$X^2_{0,005}$	$X^2_{0,01}$	$X^2_{0,025}$	$X^2_{0,05}$	$X^2_{0,95}$	$X^2_{0,975}$	$X^2_{0,99}$	$X^2_{0,995}$
1	0,00003935	0,000157	0,000982	0,00393	3,841	5,024	6,635	7,879
2	0,010	0,020	0,051	0,103	5,991	7,378	9,210	10,597
3	0,072	0,115	0,216	0,352	7,815	9,348	11,345	12,838
4	0,207	0,297	0,484	0,711	9,488	11,143	13,277	14,860
5	0,412	0,554	0,831	1,145	11,070	12,832	15,086	16,750
6	0,676	0,872	1,237	1,635	12,592	14,449	16,812	18,548
7	0,989	1,239	1,690	2,167	14,067	16,013	18,475	20,278
8	1,344	1,647	2,180	2,733	15,507	17,535	20,090	21,955
9	1,735	2,088	2,700	3,325	16,919	19,023	21,666	23,589
10	2,156	2,558	3,247	3,940	18,307	20,483	23,209	25,188
11	2,603	3,053	3,816	4,575	19,675	21,920	24,725	26,757
12	3,074	3,571	4,404	5,226	21,026	23,337	26,217	28,300
13	3,565	4,107	5,009	5,892	22,362	24,736	27,688	29,819
14	4,075	4,660	5,629	6,571	23,685	26,119	29,141	31,319
15	4,601	5,229	6,262	7,261	24,996	27,488	30,578	32,801
16	5,142	5,812	6,908	7,962	26,296	28,845	32,000	34,267
17	5,697	6,408	7,564	8,672	27,587	30,191	33,409	35,718
18	6,265	7,015	8,231	9,390	28,869	31,526	34,805	37,156
19	6,844	7,633	8,907	10,117	30,144	32,852	36,191	38,582
20	7,434	8,260	9,591	10,851	31,410	34,170	37,566	39,997
21	8,034	8,897	10,283	11,591	32,671	35,479	38,932	41,401
22	8,643	9,542	10,982	12,338	33,924	36,781	40,289	42,796
23	9,260	10,196	11,689	13,091	35,172	38,076	41,638	44,181
24	9,886	10,856	12,401	13,848	36,415	39,364	42,980	45,558
25	10,520	11,524	13,120	14,611	37,652	40,646	44,314	46,928
26	11,160	12,198	13,844	15,379	38,885	41,923	45,642	48,290
27	11,808	12,878	14,573	16,151	40,113	43,195	46,963	49,645
28	12,461	13,565	15,308	16,928	41,337	44,461	48,278	50,994

Fuente: Catherine M. Thompson, Table of Percentage points of the χ^2 distribution, vol.32

2.3 Decisión

El valor de $X^2_c = 13,105 > X^2_p = 11,070$ y de conformidad a lo establecido en la regla de decisión, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, es decir, La implementación y el montaje de un Motor – Generador AC - AC Trifásico de 5 [kW], en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Técnica de Cotopaxi, **SI** ayudará a los docentes de la carrera de Ingeniería Eléctrica a complementar los conocimientos teóricos de los estudiantes en el área de especialización.

De tal forma la hipótesis planteada es viable, ya que ha permitido ser la guía de trabajo investigativo, llegando a ser comprobada satisfactoriamente por medio del Método de Chi-cuadrado y las validaciones de los docentes de la carrera de Ingeniería Eléctrica.

CAPÍTULO III

3.1 PROPUESTA

3.2 DESARROLLO DE LA PROPUESTA

3.2.1 Tema:

Implementación y Montaje de un Motor – Generador AC - AC Trifásico de 5 kW, en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con la elaboración de un manual de operación, para realizar prácticas demostrativas.

3.2.2 Presentación

En el presente capítulo se realizará la descripción del banco de pruebas del grupo Motor – Generador AC - AC Trifásico de 5 [kW], con el cual se podrán reproducir a pequeña escala todos los eventos y fenómenos eléctricos que se presentan al trabajar con la MÁQUINA SINCRÓNICA.

La posibilidad de realizar prácticas demostrativas en modelos a escala de los eventos y aplicaciones que tiene la corriente eléctrica, constituyen experiencias de gran importancia en el desarrollo pre-profesional de los estudiantes de Ingeniería Eléctrica.

Generar energía eléctrica utilizando cualquier medio o energía primaria y posteriormente entregarla a la red pública, implica poner en práctica muchas consideraciones específicas e inherentes al estudio profundo de las máquinas eléctricas, ya que sin cumplir estos parámetros es imposible literalmente acoplarse a la red.

Con la realización de este proyecto de tesis los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi, tendrán la posibilidad de asociar los conocimientos teóricos con prácticas de laboratorio, fortaleciendo así su formación y entendimiento de los conceptos fundamentales que en su vida profesional deberán en algún momento poner en práctica.

3.2.3 Justificación de la propuesta

La implementación y equipamiento del Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con el grupo Motor – Generador AC - AC Trifásico de 5 [kW], para realizar prácticas demostrativas, es la justificación más importante del presente proyecto, siendo los principales beneficiados los estudiantes y docentes de la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

Por tal razón es indispensable implementar el Laboratorio de Máquinas Eléctricas con estos equipos, elaboración de los documentos de ingeniería, trabajos preparatorios y prácticas de laboratorio, orientadas a darle al estudiante la oportunidad de aprender de manera directa la ciencia de la electricidad en la cúspide de sus aplicaciones.

En nuestro caso en particular, el poder contar con un banco de pruebas de laboratorio, el cual reproduzca a pequeña escala la sincronización de un generador eléctrico con la barra infinita, tomando en cuenta todos los detalles técnicos que se requieren incluyendo: el procedimiento para la entrega de energía activa a la red

eléctrica, la manipulación de la potencia reactiva del generador y la obtención de los parámetros propios de esta máquina sincrónica.

Todos estos procesos serán ejecutados, mostrando además los resultados en medidores digitales o analógicos adecuados para la comprensión del fenómeno eléctrico.

3.2.4 Objetivos

3.2.4.1 Objetivo general

- ✓ Diseñar, ensamblar y poner en marcha un módulo de laboratorio, equipado con todos los instrumentos de medición análoga y digital, para realizar prácticas demostrativas a pequeña escala, como el accionamiento y la conexión de un generador sincrónico en paralelo con la barra infinita (empresa eléctrica de distribución), tal que una vez sincronizado, se logre entregar potencia activa y reactiva a la red de distribución.

3.2.4.2 Objetivos específicos

- ✓ Diseñar el banco de pruebas de laboratorio de conformidad con los requerimientos de la cátedra de Máquinas Eléctricas y Sistemas Eléctricos de Potencia, siguiendo además la normalización eléctrica que aplique para el conexionado de los circuitos de fuerza y control.
- ✓ Elaborar la documentación necesaria para describir y sustentar el diseño del banco de pruebas y los circuitos implementados, tal que sirva de base para futuras implementaciones y/o construcción de

tableros de fuerza– control para pico o micro centrales de generación eléctrica.

- ✓ Emitir las Hojas Guía para realizar las Prácticas de Laboratorio que permitan la correcta y segura utilización del banco .de pruebas

3.2.5 Alcance

Con la implementación del módulo materia de la presente tesis, el estudiante de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, que elabore adecuadamente su trabajo preparatorio podrá con la asistencia del catedrático, ejecutar de manera correcta y segura las prácticas de laboratorio sugeridas; en estas condiciones será capaz de:

- ✓ Entender los parámetros de funcionamiento de la máquina sincrónica.
- ✓ Conocer a la máquina sincrónica como generador eléctrico y su respuesta ante los diferentes tipos de carga
- ✓ Visualizar y entender el grupo máquina impulsora (energía primaria) - acoplamiento mecánico – generador sincrónico.
- ✓ Conocer, entender sus funciones, identificar y manipular adecuadamente los instrumentos de medición que forman parte del módulo.
- ✓ Conocer, entender sus funciones, identificar y manipular adecuadamente los elementos de fuerza y control que conforman el circuito del banco de pruebas.
- ✓ Entender el proceso de sincronización y las variables que limitan su ejecución.

- ✓ Interpretar la información que muestra el sincronoscopio digital y el sincronoscopio de focos instalados en el banco de pruebas.
- ✓ Sincronizar el generador con la barra infinita.
- ✓ Manipular y modificar la cantidad de potencia activa y reactiva entregada o recibida de la red pública.

3.2.6 Desarrollo técnico de la propuesta

Antes de proseguir con el desarrollo técnico de la propuesta, es necesario entender que todo experimento puede ser repetido a cualquier escala, sin que esto afecte sus resultados mayormente, siempre y cuando las pérdidas o interferencias que pudieren contaminar al mismo sean mínimas o imperceptibles.

Con esta certeza, para reproducir el accionamiento y conexión de un generador sincrónico a la barra infinita usaremos un conjunto cuya potencia es 5000 [W], esperamos generar voltaje alterno trifásico de 220 [V] usando un generador sincrónico de 2 polos y 3600 rpm.

Para impulsar el generador usaremos un motor de inducción tipo jaula de ardilla acoplado directamente al eje del generador a través de un matrimonio flexible, debidamente soportado en un skid metálico montado sobre bases de polímero para reducir las vibraciones.

Todo el conjunto se monta sobre una plataforma metálica montada sobre ruedas de caucho suave con dispositivos de frenado para asegurar al piso la unidad. En esta plataforma metálica se extiende un panel posterior donde están montados los equipos de fuerza, control y medición análoga- digital de parámetros eléctricos a visualizar y comandar durante la experimentación.

El sistema en su totalidad tiene operación manual, el modo automático para la sincronización fue desestimado por cuanto es necesario que el estudiante ajuste los parámetros del conjunto motor- generador, establezca las condiciones de sincronización e identifique el momento justo en el cual se deben poner en paralelo el banco de pruebas con la barra infinita.

3.2.7 Selección de los elementos para el montaje del Grupo Motor - Generador.

Tabla 1.20 Elementos utilizados para el montaje del banco de pruebas

ITEM	CANTIDAD	UNIDAD	DESCRIPCIÓN
1	1	u	Generador sincrónico trifásico de 5000W, 3600 rpm, 240 V, 60 Hz
2	1	u	Motor trifásico de 5hp, 3540 rpm, 240 V, 60 Hz
3	1	u	Matrimonio flexible de 3 pulgadas
4	1	u	Skid para montaje de grupo Motor - Generador
5	1	u	Banco de pruebas metálico, con doble fondo de tool galvanizado
6	1	u	Juego de bases para motor
7	1	glb	Kit de pernos y tuercas galvanizados para fijación
8	1	glb	Kit de ruedas poliméricas con seguro anti deslizante
9	1	u	Variador de Frecuencia de 3000 VA
10	1	u	Contactador de Línea para el VFD de 32 Amperios
11	3	u	Portafusibles de 10 x 32 mm
12	3	u	Fusibles rápidos de 10 x 32 mm
13	1	u	Selector 2 posiciones para energización del VFD
14	1	u	Pulsador Doble Start-Stop para arranque del VFD
15	1	u	Potenciómetro de 10 k Ω para regular la velocidad del VFD
16	1	u	Relé auxiliar de 14 pines para accionamiento del VFD
17	1	u	Tarjeta de Rectificación y Control de Voltaje DC
18	1	u	Transformador Multitap para alimentación de la tarjeta

19	1	u	Breaker de 2 polos 6 Amperios para protección de la tarjeta
20	1	u	Voltímetro DC hasta 60 Voltios
21	1	u	Amperímetro DC hasta 500 mA
22	1	glb	Resistencias Shunt para acondicionamiento corriente DC
23	1	u	Juego de Barras para Alimentación desde la Empresa Eléctrica
24	1	u	Juego de Barras para Alimentación desde el Generador Síncrono
25	1	u	Contactador de Acoplamiento para la sincronización
26	1	u	Transformador de Aislamiento para los circuitos de control
27	2	u	Breaker de 3 polos para señales de voltaje a medidores digitales
28	2	u	Breaker de 3 polos para protección de Empresa Eléctrica y Generador
29	2	u	Medidores Digitales de parámetros eléctricos
30	1	u	Sincronoscopio digital con contacto de sincronización
31	6	u	Transformadores de Corriente de 30 a 5 Amperios
32	3	u	Luz piloto para sincronoscopio de focos
33	1	u	Switch principal de energización del Equipo
34	1	u	Extensión con tomacorriente industrial
35	1	glb	Juego de conectores, bananas y horquillas
36	1	glb	Fusibles y Portafusibles con indicador para protección de señales

Fuente: Grupo de Investigación

3.2.8 Ubicación de los elementos y accesorios en el banco de pruebas

El Banco de Trabajo del Grupo Motor – Generador, ha sido constituido por las siguientes partes, cuyas imágenes se pueden ver a continuación:

1. Estructura portante, con doble fondo didáctico y ruedas poliméricas con bloqueo.

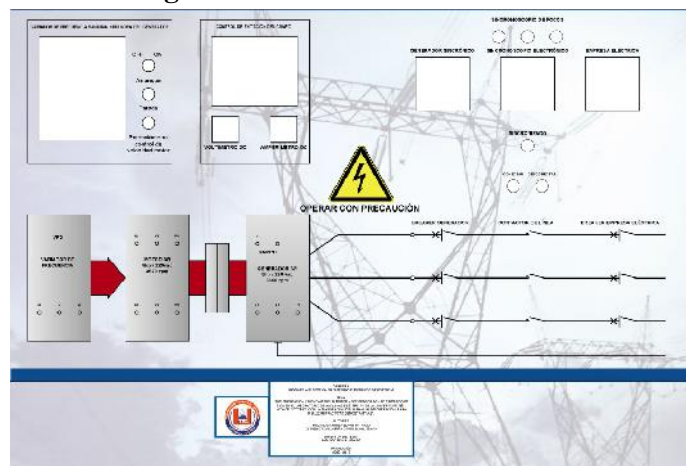
Figura 1.39 Estructura del banco de pruebas.



Fuente: Grupo de Investigación

2. Delineado mímico del tablero (120 x100 cm), ubicado en la parte frontal del banco de pruebas.

Figura 1.40 Delineado mímico del tablero



Fuente: Grupo de Investigación

3. Generador sincrónico de 3000 [W], 3600 rpm con anillos rozantes

Figura 1.41 Generador Sincrónico



Fuente: Grupo de Investigación

4. Motor asincrónico, tipo jaula de ardilla de 3000 [W], 3540 rpm

Figura 1.42 Motor Sincrónico



Fuente: Grupo de Investigación

5. Grupo Motor – Generador acoplado a un matrimonio flexible, montado sobre Skid metálico y bases de caucho

Figura 1.43 Grupo Motor - Generador



Fuente: Grupo de Investigación

6. Variador de Frecuencia de 3000 VA, 220 Vac con sus sistemas de accionamiento.

Figura 1.44 Variador de frecuencia



Fuente: Grupo de Investigación

7. Tarjeta – Fuente de Voltaje Continuo VDC con sus sistemas de regulación.

Figura 1.45 Tarjeta - Fuente de Voltaje Continuo VDC



Fuente: Grupo de Investigación

8. Voltímetro y Amperímetro DC analógicos para visualización.

Figura 1.46 Voltímetro y Amperímetro DC



Fuente: Grupo de Investigación

9. Central de Medida Digital de Parámetros Eléctricos lado de la Red.

Figura 1.47 Central de Medida Digital (red)



Fuente: Grupo de Investigación

10. Central de Medida Digital de Parámetros Eléctricos lado del Generador

Figura 1.48 Central de Medida Digital (generador)



Fuente: Grupo de Investigación

11. Sincronoscopio de focos tipo NEON de 220 [VAC]

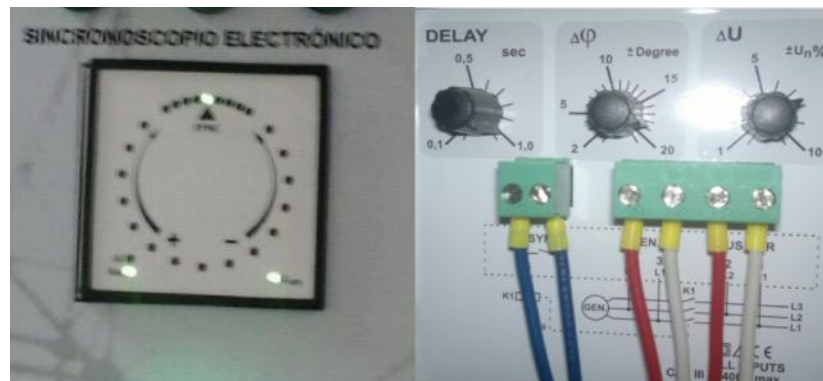
Figura 1.49 Sincronoscopio de focos



Fuente: Grupo de Investigación

12. Sincronoscopio Electrónico con contacto de sincronización y regulación de umbrales.

Figura 1.50 Sincronoscopio Electrónico



Fuente: Grupo de Investigación

13. Pulsadores y luz piloto para sincronizar y des-sincronizar el equipo

Figura 1.51 Pulsadores y luz piloto



Fuente: Grupo de Investigación

14. Transformadores de Corriente (30/5A), para alimentación de Red y Generador

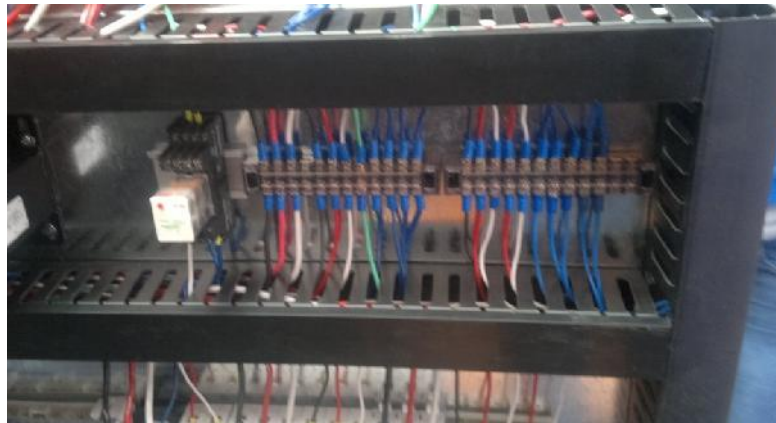
Figura 1.52 Transformadores de corriente



Fuente: Grupo de Investigación

15. Back plane, Canaletas, Riel DIN y elementos de cableado del circuito de control

Figura 1.53 Cableado del circuito de control



Fuente: **Grupo de Investigación**

3.2.9 Descripción del diseño del módulo didáctico del Grupo Motor – Generador

El diseño del módulo didáctico parte del concepto de seguridad en la operación y confiabilidad del equipo, se lo diseño para que requiera el mínimo posible de mantenimientos, por cuanto se trata de un equipo experimental a ser utilizado y mantenido por personal no especializado.

El diseño mecánico comprende únicamente la fabricación de un skid metálico que sirve de base para el grupo motor- generador, los cuales se encuentran girando a la misma velocidad acoplados por un matrimonio flexible.

La máquina impulsora, aquella que simule la fuente primaria que accionará el generador, es un motor de inducción tipo jaula de ardilla de 3000 [W], cuyas características nominales son: voltaje 220 [V] trifásico, 3540 rpm a 60 Hz.

Para lograr que el motor llegue a las 3600 rpm o más, se utilizó como accionamiento un Variador de Frecuencia, el cual posee una entrada analógica que puede recibir como frecuencia de referencia el valor del voltaje variable producido por un potenciómetro conectado entre tres de sus bornes de control.

El arranque y parada del variador igualmente se comanda usando un contacto totalmente abierto de un relé auxiliar que funciona mediante un control memorizado básico con pulsadores de arranque y parada.

El variador se alimenta de la red de la empresa distribuidora a través de un juego de fusibles súper rápidos en serie con un contactor de línea.

El generador sincrónico es una máquina de dos polos, la resistencia del bobinado de campo, alimentado mediante escobillas sobre anillos rozantes es de 100 [ohm] aproximadamente. El voltaje máximo de operación del campo es 48 [VDC] y la corriente máxima del devanado de campo es 500 [mA].

Se instalaron medidores analógicos para las magnitudes DC del campo del generador y medidores digitales full equipados para las magnitudes AC. Las lecturas se tomarán de la entrada principal del tablero de experimentación y a la salida del generador sincrónico, ubicando los transformadores de corriente para que la convención de signos sea la siguiente:

➤ ***Medidor empresa eléctrica:***

Potencia Activa Positiva [W] = Potencia Consumida por el tablero de pruebas

Potencia Reactiva Positiva [VAR] = Carga del módulo de pruebas inductiva

Potencia Reactiva Negativa [-VAR] = Carga del módulo de pruebas capacitiva

➤ **Medidor generador sincrónico:**

Potencia Activa Positiva [W]= Potencia Entregada por el Generador

Potencia Activa Negativa [W]= Potencia Consumida por el Generador

Potencia Reactiva Positiva [VAR] = El Generador entrega reactivos (Como Capacitor)

Potencia Reactiva Negativa [-VAR] = El Generador consume reactivos (Como Inductor)

Para alimentar con DC al rotor del generador, se ha construido una tarjeta rectificadora con salida controlada de 45 [V] máximo y 1,5 [A] nominales, que cuenta con un potenciómetro para variar el voltaje aplicado.

Al proceso de sincronización nos asiste un sincronoscopio de focos y un relé de sincronismo con un display de leds que ayudan al estudiante a alcanzar la velocidad de sincronismo pues muestra si el generador está girando rápido o lento con respecto a la barra infinita.

Todo el banco de pruebas se energiza a través de un enchufe industrial tipo IEC trifásico conectado a un cable tetrapolar tipo sucre calibre 4 x 10 AWG el cual llega hasta el interruptor principal del sistema.

3.2.10 Operación del grupo Motor - Generador (Sincronización con la barra infinita)

El grupo motor – generador accionado con el Variador de Frecuencia, llega a la velocidad de 3580 rpm con una rampa de 10 segundos luego de activar el contactor de línea del variador y oprimir el pulsador de marcha. Esta velocidad corresponde a una frecuencia generada de 59.5 [Hz] y es el mínimo de la regulación del potenciómetro que controla la velocidad.

El variador está programado para operar al motor entre 3580 y 3900 rpm, es decir, 59.5 [Hz] y 63 [Hz], dependiendo de la regulación que se le aplique al potenciómetro del mismo.

Una vez que gira el generador, se debe controlar el voltaje DC del rotor, variando igualmente el voltaje de la tarjeta- fuente de DC, utilizando en este caso el potenciómetro propio de esta tarjeta.

Al variar el voltaje sobre el rotor, la corriente que consume el mismo igualmente varía y se pueden leer ambos datos en los medidores analógicos.

El voltaje de generación depende directamente del voltaje que se aplique al rotor y también responde a la velocidad de giro del grupo.

Una vez alcanzada la velocidad sincrónica y regulando el voltaje tal que sea muy semejante al voltaje de red, procedemos a revisar que el sincronoscopio de focos, un foco por cada línea, parpadee al unísono, es decir, los tres focos se enciendan y apaguen a la vez. Esta condición indica que la secuencia de fases es la misma tanto en el generador como en la barra infinita y se puede proceder a sincronizar.

En caso de que un solo foco parpadee y este parpadeo pase de foco a foco, esto significa que el generador tiene invertidas dos fases con respecto a la barra infinita, debiéndose apagar el banco de pruebas e invertir dos fases en la alimentación.

Una vez establecidas las condiciones de MAGNITUD, FASE, FRECUENCIA y SECUENCIA en similitud a la barra infinita, pasamos a pulsar el botón CONECTAR, el cual se encuentra en serie con el relé del Sincronoscopio Digital y manda a cerrar el contactor de acoplamiento entre generador y barra infinita.

Utilizando los potenciómetros del Variador de Frecuencia y de la Tarjeta de DC se puede llevar a la máquina sincrónica a trabajar en los 4 cuadrantes sin restricciones.

En las diferentes pantallas de los medidores digitales de parámetros AC con los que cuenta el banco de pruebas, se puede observar todas las variables eléctricas que caracterizan el sistema en unidades de VATIOS y en el display del variador se puede ver en números enteros el porcentaje de carga instantánea con respecto a la potencia nominal del mismo.

*3.2.11 Manual de Operación del Banco de Trabajo del Módulo Motor –
Generador Sincrónico*

AVISO DE SEGURIDAD



ADVERTENCIA:

Antes de la instalación, puesta en servicio y manipulación del Sistema, es necesario leer cuidadosamente todas las instrucciones de seguridad y las notas de advertencias, incluyendo todos los rótulos de advertencia fijados a los equipos.

Hay que asegurarse de que los rótulos de advertencia se mantengan legibles y sustituir los rótulos perdidos o dañados.

Definiciones y Advertencias

PELIGRO:

Significa que se producirá la muerte, lesiones graves o daños materiales considerables si no se toman las precauciones adecuadas.



ADVERTENCIA:

Significa que puede producirse la muerte, lesiones graves o daños materiales considerables si no se toman las precauciones adecuadas.



Personal Calificado

Para los fines de estas Instrucciones de uso y de la ejecución de Prácticas de Laboratorio en el Banco de Pruebas, una "***persona calificada***" es alguien que está familiarizado con los equipos, utilización, puesta en servicio y operación del equipo, que además conoce los peligros implicados.

Dicha persona deberá tener las siguientes calificaciones:

1. Formado y autorizado a poner en operación el Banco de Pruebas, variadores de frecuencia, motores asíncronos, leer voltímetros,

amperímetros digitales o analógicos, navegar en pantallas de resultados, interpretar señales, activar y desactivar sistemas eléctricos.

2. Formado y capacitado en el uso adecuado de equipos de protección de acuerdo con los procedimientos de seguridad establecidos.

Limitaciones de Operación

Se tomarán además en cuenta sucesos o eventos que por experiencia sabemos que producen fallas en el sistema, por ejemplo:

- ✘ No se puede cargar el generador con cualquier carga eléctrica, deben usarse aquellas que han sido suministradas con la unidad; estas cargas han sido diseñadas en función de la capacidad y tolerancia del generador sincrónico.
- ✘ No se puede poner en paralelo entre unidades o entre la unidad y la barra infinita sin antes comprobar que la secuencia de fases entre ambas fuentes sean similares. Para esto se utilizará un secuencímetro o se podrá confirmar si el sincronoscopio de focos parpadea al unisonó como condición positiva de operación.
- ✘ No se puede trabajar como motor sincrónico al sistema por más de 5 segundos, pues se corre el riesgo de entrar en la zona de inestabilidad, la cual causa sobretensiones peligrosas en los elementos del Banco de Pruebas.

Modo de Operación MANUAL

SECUENCIA LÓGICA SUGERIDA EN OPERACIÓN NORMAL para llevar a cabo las prácticas de laboratorio descritas en el Capítulo II:

1. El Asistente de Laboratorio antes de operar a posición **ON** el interruptor principal del tablero deberá confirmar:
 - ✓ Selector del Variador de Frecuencia en Posición **OFF**.
 - ✓ Potenciómetro del Variador de Frecuencia en Mínima Posición.
 - ✓ Potenciómetro de la Tarjeta de DC en Mínima Posición.
 - ✓ Conexiones del Motor Asíncrono realizadas.
2. Una vez confirmadas estas condiciones, operar el interruptor principal a posición **ON**.
3. Confirmar que ambas pantallas de los Medidores Digitales Revalco se encuentren encendidas y mostrando datos.
4. El medidor del lado de la Empresa Eléctrica debe estar marcando Voltaje aprox 220 Vac, 60 Hz, corriente en cada línea, potencia total en watts y el factor de potencia instantáneo.
5. Operar el switch de dos posiciones del Variador de Frecuencia a posición **ON**.
6. Confirmar que en la pantalla del Variador se encuentre la palabra **RDY** (Ready)
7. Continuar en orden la operación del Banco de Pruebas dependiendo de la Práctica de Laboratorio elegida.

8. Luego de concluida la Práctica de Laboratorio se deben seguir los siguientes pasos:

- ✎ Presionar el Botón **DESCONECTAR**, para liberar del sincronismo al generador.
- ✎ Presionar el Botón **STOP** del Variador de Frecuencia, esperar que se detenga el grupo Motor – Generador.
- ✎ Operar a posición **OFF** el switch dos posiciones del Variador de Frecuencia.
- ✎ Potenciómetro del Variador a Mínima Posición.
- ✎ Potenciómetro de la tarjeta de DC a mínima posición y por último operar el Interruptor Principal del Banco de Pruebas a Posición **OFF**.

Tabla 1.21 Solución de Problemas del Banco de Pruebas

PROBLEMA	CAUSA	SOLUCIÓN
El Banco de Pruebas no enciende, ninguna pantalla se prende	Falla de energía eléctrica, total o falla de voltaje,	Revisar con multimetro la existencia de las tres fases en el tomacorriente del laboratorio, revisar que el Breaker de 3 polos 63 amperios se encuentre conectado.
El variador de frecuencia (VFD) no arranca, en la pantalla no aparece RDY	Falla o Falta de una Línea en el Variador de Frecuencia	Revisar que el contactor del VFD se accione al girar el selector a posición ON, revisar los fusibles de 10x32mm del Portafusibles Legrand.

<p>El Generador Sincrónico no tiene voltaje</p>	<p>Falta de alimentación de voltaje DC al rotor del Generador</p>	<p>Operar el potenciómetro de la tarjeta de DC para inyectar voltaje y corriente al rotor del generador. Revisar que los indicadores de Voltaje y Corriente DC entreguen lecturas al manipular el potenciómetro.</p>
<p>El Variador de Frecuencia se dispara por OLF</p>	<p>Sobrecarga al Variador de Frecuencia</p>	<p>Resetear el VFD apagando y prendiendo con el Switch ON-OFF, luego controlar que la carga no supere el 100% de la nominal mostrada en la pantalla del VFD.</p>
<p>El sistema oscila, el VFD cae en fallo continuamente</p>	<p>El sistema está trabajando como motor sincrónico</p>	<p>Operar el Sistema con un mínimo de 15% en la Carga que muestra la pantalla del Variador de Frecuencia. El porcentaje sugerido es el 40% para obtener resultados estables en las prácticas de laboratorio.</p>
<p>El sistema mecánico tiene un ruido muy fuerte al girar y el matrimonio caliente</p>	<p>Desalineación entre motor y generador sincrónico</p>	<p>Volver a alinear el Grupo Motor – Generador Sincrónico por parte de personal especializado.</p>

3.2.12 Conclusiones

- ✓ La utilización del Banco de Trabajo Grupo Motor – Generador Sincrónico es una suprema ventaja para el estudiante de Ingeniería Eléctrica que ha tenido la buena fortuna de conocer, visualizar y manipular a un generador sincrónico en miniatura, el cual es capaz de alimentar cargas eléctricas de todo tipo (lineales o no lineales dentro del rango de su potencia nominal) e inclusive es capaz de sincronizarse entregando o recibiendo potencia activa y reactiva desde o hacia la barra infinita.
- ✓ Es posible ofrecer al estudiante a través de la implementación de la presente tesis, una herramienta para educarse, cuyos instrumentos analógicos o digitales de última tecnología, permiten visualizar en unidades de vatio y en tiempo real el comportamiento eléctrico del sistema, preparándose de esta manera hacia la operación de los nuevos equipos que poseen actualmente las centrales de generación eléctrica.
- ✓ El módulo de laboratorio implementado, puede acoplarse sin ningún problema a otros módulos de similares características para lograr simulaciones y prácticas demostrativas conjuntas, con el objetivo de incrementar el conocimiento del estudiante y su capacidad de manipulación segura de este tipo de máquinas que ya cuentan con modernos dispositivos de medición y control.
- ✓ El tipo de Analizador Digital de Parámetros Eléctricos REVALCO posee lecturas True RMS, lo cual permitirá a futuro planificar la realización de prácticas de laboratorio con cargas no lineales, donde se podrá observar y cuantificar las perturbaciones que esta carga genera en la Red.

- ✓ La forma constructiva totalmente abierta y didáctica, fácil de entender y operar, presenta un entorno amigable hacia el estudiante, minimizando la posibilidad de errores y daño al equipo implementado.
- ✓ Se concluye además que con buena voluntad y con deseo de profundizar el conocimiento en las diferentes ramas de la Ingeniería Eléctrica, es posible desarrollar localmente equipos de laboratorio de excelentes prestaciones, simples y seguros en su operación, para colaborar con la educación y la excelencia académica que busca nuestra querida Universidad Técnica de Cotopaxi.

3.2.13 Recomendaciones.

- ✓ Antes de operar el módulo de laboratorio se recomienda leer detenidamente el manual del usuario, el cual determina los riesgos y precauciones básicas a considerar durante su manejo, para evitar lesiones, electrificaciones o daños irreversibles al equipo.
- ✓ El asistente de laboratorio deberá evaluar a través de un cuestionario verbal si el estudiante está en óptimas condiciones de reproducir y entender los fenómenos que visualizará en el equipo, verificando además la correcta realización de su Trabajo Preparatorio.
- ✓ El asistente de laboratorio deberá confirmar periódicamente que la secuencia de fases entre la red y el generador sean siempre coincidentes, más aún si el equipo fuera trasladado o si fueran modificadas las condiciones de alimentación eléctrica del laboratorio.
- ✓ No se recomienda mantener el generador en la condición de motor sincrónico, es decir, sincronizado y recibiendo potencia activa desde la red, por más de 5 segundos. La razón es que el variador de frecuencia no

es del tipo regenerativo y cualquier sobretensión en sus bornes de salida puede provocar una condición de inestabilidad que lleva al equipo a una peligrosa oscilación que produce sobretensiones que pueden ser destructivas.

- ✓ Debido al deslizamiento que posee el motor de inducción, es recomendable manipular el potenciómetro del variador de frecuencia muy suavemente, esperando la reacción total del sistema, pues caso contrario podemos entrar en oscilaciones peligrosas.

- ✓ Es muy recomendable el análisis de todas las posibilidades que ofrece el banco de pruebas, no solamente accionando el generador sincrónico, sino trabajando como un banco de pruebas trifásico con medidor True RMS en el lado de la Empresa Eléctrica.

BIBLIOGRAFÍA

Bibliografía Consultada

- **ALBER José Manuel.**, Máquinas Eléctricas Rotativas; Universidad Simón Bolívar, Editorial Equinoccio.
- **BROCKERING Walter.**, Los Sistemas Eléctricos de Potencia; 3ra Edición Pearson; 5ta edición Mc Graw-Hill, 2008.
- **FITZGERALD A. E.**, Teoría y Análisis de las Máquinas Eléctricas; 3ra Edición México Mc Graw – Hill, México 2004.
- **GRAINGER, John.**, Análisis de Sistemas de Potencia, 2001.
- **KOSOW Irving.**, Máquinas Eléctricas y Transformadores; 5ta Edición Editorial Reverte. S.A., 2003
- **MATCH L.**, Máquinas Electromagnéticas y Electromecánicas, 1ra Edición en Español, de la 1ra Edición en Inglés – México, 2006.
- **MORA, Fraile Jesús**, Máquinas Eléctricas; 5ta edición Mc Graw-Hill, 2003.
- **RAMÍREZ Samuel**, Control y Protección de Sistemas Eléctricos de Potencia; 1era Edición Universidad Nacional de Colombia – Manizales, 2009.
- **STEVENSON D Williams.**, Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia 2da edición Mc Graw-Hill
- **SIEMENS.**, Manual de Mantenimiento e Instalación de Motores Eléctricos y Generadores Eléctricos.
- **SUMELEC.**, Catálogo de Equipos de control y Automatización Industrial 2001 -2012.
- **TAPIA Luis.**, Máquinas Eléctricas, Ecuador, 2001
- **TUTORIAL IEEE** de Protección de Generadores Síncronos, The Power Engineering Education Committee. Power System Relaying Committee.
- **WILDI Theodore.**, Máquinas Eléctricas y Sistemas de Potencia 6ta Edición Pearson.

Litografía.

- <http://www.schneider-electric.com.ar/documents/local/brochure-altivar-312.pdf>
- http://www.revalcocdn.it/cataloghi_ita_gb/Analogici_ITA_GB_2013/Analogici_ITA_GB.html (página 33)
- http://www.revalcocdn.it/cataloghi_ita_gb/Multifunzione_ITA_GB_2013/Multifunzione_ITA_GB.html (página 26)
- http://www.siemens.com.co/SiemensDotNetClient_Andina/Medias/PDFS/608_20080616193422.pdf
- <http://www.es.scribd.com/doc/47612772/MOTOR-DE-INDUCCIÓN>
- http://www.frba.utn.edu.ar/html/Electrica/archivos/Apuntes_EyM/Capitulo_9_Maquina_Sincronica.pdf

ANEXO N°1 CUESTIONARIO DE ENCUESTA



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI CARRERA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS ESPECIALIZACIÓN: INGENIERÍA ELÉCTRICA ENCUESTA

La presente encuesta está dirigida a los alumnos de séptimo y octavo ciclo de la carrera de Ingeniería Eléctrica con la finalidad de obtener información que ayude al desarrollo de este proyecto.

OBJETIVO:

- Obtener información de la situación académica, referente a la realización de prácticas de laboratorio en sistemas eléctricos de potencia.

INSTRUCCIONES:

- ✚ Lea detenidamente cada pregunta
- ✚ No escriba su nombre.
- ✚ Marque con una (X) la respuesta que a su criterio crea conveniente.

PREGUNTAS:

1. ¿Conoce Ud. si el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Técnica de Cotopaxi cuenta con un Grupo Motor – Generador AC-AC trifásico?

SI

NO

2. ¿Cree Ud. que es necesario realizar prácticas demostrativas con aplicaciones de Sistemas Eléctricos de Potencia?

SI

NO

3. ¿Los alumnos de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, realizan prácticas demostrativas de laboratorio con sincronismo a una barra infinita?

SI

NO

4. ¿Esta Ud. de Acuerdo que se implemente en el laboratorio de Máquinas Eléctricas un Grupo Motor – Generador AC-AC trifásico de 5 [kW], para realizar prácticas demostrativas?

SI

NO

5. ¿Cree Ud. que el uso de equipos e instrumentos de medición con tecnología de punta, permitirá una toma de datos exacta en las prácticas demostrativas?

SI

NO

6. Cree Ud. que las Asignaturas de SEP, sean vistas de una manera más sencilla y comprensible en el momento de usar los conceptos en el laboratorio?

SI

NO

7. Cree Ud. que mediante el uso de guías de laboratorio permitirá desarrollar las prácticas de una formas más fácil?

SI

NO

8. Considera Ud. importante para su desarrollo profesional el haber tenido la oportunidad de experimentar con equipos y máquinas de características similares a las que podemos encontrar en el entorno industrial?

SI

NO

ANEXO N°2 ENTREVISTA



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI CARRERA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS ESPECIALIZACIÓN: INGENIERÍA ELÉCTRICA ENTREVISTA

La presente entrevista está dirigida a los Ingenieros Eléctricos de la Universidad Técnica de Cotopaxi con la finalidad de obtener información que ayude al desarrollo del trabajo investigativo.

OBJETIVO:

- Determinar la necesidad de la implementación de un Banco de pruebas en el laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Universidad Técnica de Cotopaxi, para que los estudiantes de la carrera de Ingeniería Eléctrica puedan realizar prácticas demostrativas.
1. ¿Por qué considera necesario la implementación del Laboratorio de Máquinas Eléctricas, con el Montaje de un Grupo Motor – Generador AC- AC Trifásico?
 2. ¿Considera que el Montaje de un Grupo Motor - Generador AC- AC Trifásico, permitirá realizar prácticas demostrativas de Máquinas Eléctricas y S.E.P.
 3. ¿Beneficiara el Montaje de un Grupo Motor – Generador AC- AC Trifásico, en la formación académica Teórico –práctico de los estudiantes de la Carrera de Ing. Eléctrica?

ANEXO N°3 - PRÁCTICA DE LABORATORIO

Parámetros eléctricos de la máquina de inducción.

1. OBJETIVOS:

- ✓ Realizar diferentes pruebas sobre la máquina sincrónica para efectos de determinar sus parámetros eléctricos.

- ✓ Determinar la reactancia sincrónica a partir de las características de vacío y cortocircuito.

2. EQUIPO:

Equipos Práctica N°1

CANT.	EQUIPO A UTILIZAR
1	Grupo máquina motriz – máquina sincrónica.
1	Medidor de velocidad
1	Voltímetro de corriente alterna.
1	Voltímetro de corriente directa.
1	Amperímetro de corriente alterna.
1	Amperímetro de corriente directa.
1	Autotransformador trifásico.
1	Frecuencímetro.

Fuente: Grupo de Investigación

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

- a) La característica de circuito abierto de un generador es la relación de la f.e.m desarrollada como función de la corriente de excitación cuando la máquina gira a la velocidad sincrónica, es decir:

$$E_f = V_1 = f(I_f).$$

Para encontrar la característica de circuito abierto el generador se impulsa a su velocidad nominal mediante la máquina motriz. Se conecta la excitación a su valor más bajo, aumentándola gradualmente (hasta que el voltaje de armadura sea aproximadamente el 125% del voltaje nominal) y se toman lecturas del voltaje de armadura, campo y de corriente de excitación en cada paso. A partir de estos se grafica la característica de circuito abierto.

- b) La característica de cortocircuito es la expresión de la corriente de armadura como una función de la corriente de excitación: $I_a = f(I_f)$.

Es esta prueba, los tres terminales de la armadura del generador, funcionando a su velocidad nominal, se cortocircuitan por medio de un instrumento medidor de corriente. Inicialmente la excitación debe conectarse a su valor más bajo aumentándose la corriente de campo cuidadosamente, paso a paso, hasta que la corriente de armadura alcance el valor máximo permisible (aproximadamente el valor nominal). Deben realizarse mediciones de la corriente de armadura, corriente de campo y voltaje de excitación en cada paso hasta una magnitud algo superior de la corriente nominal.

La reactancia sincrónica se obtiene de las dos pruebas anteriores, en las que los voltajes y la corriente de armadura son tomados para un mismo valor de la corriente de excitación.

$$X_s = \frac{V_t}{I_a^{(cc)}}$$

- c) Los efectos del entrehierro no uniforme de una máquina síncrona de polos salientes determinan dos reactancias una en un eje directo y otra en el eje en cuadratura. A su vez, cada una de ellas está formada por la suma de reactancias asociadas con la magnetización y dispersión en el hierro expresadas por las siguientes ecuaciones:

$$X_d = X + X_{dn}; \text{ Reactancia síncrona de eje directo.}$$

$$X_q = X + X_{qn}; \text{ Reactancia síncrona de eje en cuadratura.}$$

El método experimental para determinar X_d y X_q es la prueba de deslizamiento.

4. TRABAJO PREPARATORIO

1. Diseñar el circuito, con los instrumentos de medida necesarios de acuerdo al ítem *a*) de la fundamentación teórica, para realizar la prueba de circuito abierto en la máquina síncrona.
2. Diseñar el circuito, con los instrumentos de medida necesarios de acuerdo al ítem *b*) de la fundamentación teórica, para realizar la prueba de cortocircuito en la máquina síncrona.
3. Consultar acerca del significado del ángulo en la máquina síncrona.

5. PROCEDIMIENTO

- ✓ Realizar la prueba de circuito abierto en el generador de acuerdo a lo diseñado en el ítem 1 del trabajo preparatorio. Observar la influencia de la velocidad y la excitación sobre el voltaje generado y la frecuencia,

tomar los datos necesarios. Observar también la secuencia de fases cuando se cambia la polaridad de la excitación, al intervenir el sentido de giro de la máquina motriz y al cambiar ambos factores simultáneamente.

- ✓ Realizar la prueba de cortocircuito de acuerdo a lo diseñado en el ítem 2 del trabajo preparatorio. Y tomar los datos necesarios.

6. INFORME – ANÁLISIS Y RESULTADOS

- ✓ Presentar los datos de placa de la máquina objeto de estudio e interpretar su significado físico.
- ✓ Presentar y explicar cada uno de los circuitos implementados en la práctica.
- ✓ Tabular los datos obtenidos en los experimentos realizados.
- ✓ Graficar la curva de magnetización (curva de vacío) para el generador. Comentar y analizar su forma.
- ✓ Graficar la curva de cortocircuito del generador. Comentar y analizar su forma.
- ✓ Calcular la reactancia sincrónica con los datos obtenidos en la prueba de vacío y cortocircuito.
- ✓ Expresar todos los parámetros de la máquina sincrónica obtenidos en esta práctica en por unidad. Tomando como base la potencia y el voltaje nominal de la máquina.

7. CUESTIONARIO

- 1.** Describir las partes constitutivas principales de la máquina sincrónica y cuál es su clasificación. Indicar que factores determinan el tipo de construcción.
- 2.** Explicar la influencia del factor de potencia en el fenómeno de la reacción de armadura.
- 3.** Como influencia el grado de excitación en el factor de potencia ¿Qué aplicación encuentra?
- 4.** Consultar sobre los procedimientos requeridos para determinar las reactancias de eje directo y cuadratura en máquinas sincrónicas de polos salientes y para la prueba de secuencia “0” con la que se obtiene la reactancia de dispersión del estator.
- 5.** ¿Cuáles son las ventajas y desventajas de los rotores de polos salientes y cilíndricos en los generadores de grandes centrales?

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9. BIBLIOGRAFIA

ANEXO N°4 - PRÁCTICA DE LABORATORIO

Prueba en motores trifásicos de inducción.

1. OBJETIVO:

- ✓ Obtener los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción mediante las pruebas en vacío y a rotor bloqueado.

2. EQUIPO:

Equipos Práctica N°2

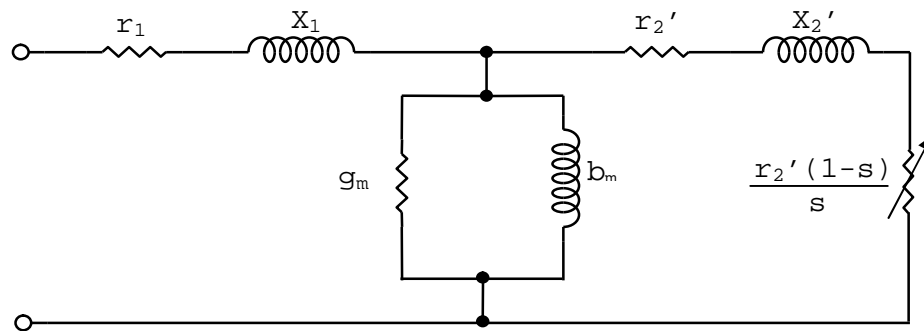
CANT.	EQUIPOS A UTILIZAR
1	Motor trifásico de inducción.
1	Analizador industrial (analógico o digital).
1	Autotransformador variable.
1	Medidor de velocidad.
1	Voltímetro de c.c.
3	Transformadores de corriente.

Fuente: Grupo de Investigación

3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA:

El circuito equivalente del motor trifásico de inducción puede deducirse en forma análoga al de un transformador. En la *figura a* se presenta el circuito equivalente de un motor trifásico de inducción.

Figura a Circuito equivalente del motor trifásico de inducción



Fuente: Grupo de Investigación

DÓNDE:

r_1 : resistencia efectiva del estator por fase.

r_2' : resistencia efectiva del rotor, por fase, referida al estator.

X_1 : reactancia de dispersión del estator, por fase.

X_2' : reactancia de dispersión del rotor, por fase, referida al estator.

g_m : conductancia de pérdidas del núcleo.

b_m : susceptancia magnetizante.

s : deslizamiento.

Los parámetros del motor de inducción pueden determinarse a partir de las pruebas de vacío y de rotor bloqueado.

PRUEBA DE VACIO.- en la prueba de vacío se aplica voltaje nominal al motor sin carga y se realiza las siguientes mediciones:

- | | |
|------------------------|----------------------------------|
| ✓ Voltaje del estator. | V_o (voltaje nominal por fase) |
| ✓ Corriente primaria. | I_o (por fase) |
| ✓ Potencia total. | P_o (trifásica) |

La potencia total P_0 es igual a las pérdidas del motor en vacío. Estas son las pérdidas en el cobre del arrollamiento del estator ($q_1 I_0^2 r_1$), las pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault (Eddy) debidas al flujo principal (P_{h+f}), las pérdidas por fricción y ventilación (P_{F+V}) y las pérdidas en el hierro debidas a la rotación y a la abertura de la ranuras ($P_{fe\ rot}$), esto es:

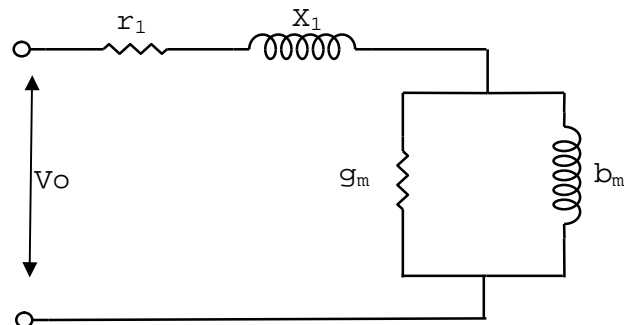
$$P_0 = q_1 \cdot I_0^2 \cdot r_1 + P_{h+f} + P_{F+V} + P_{fe\ rot}$$

DÓNDE:

q_1 : es el número de fases.

Si se considera que el deslizamiento en vacío es pequeño, la resistencia efectiva del rotor referida al estator, es muy alta, por lo que su combinación en paralelo con la rama de magnetización conduce al siguiente circuito equivalente.

Circuito equivalente en vacío.



Fuente: Grupo de Investigación

El valor de g_m se obtiene a partir de P_{h+f} . Puede separarse P_{h+f} de las otras pérdidas mediante la prueba de vacío acoplado. En esta prueba el motor es conducido por otra máquina a la velocidad sincrónica ($s=0$); y en este caso la corriente inducida en el rotor es exactamente igual a cero y las pérdidas P_{F+V} y $P_{fe\ rot}$ son proporcionadas por la máquinas que lo conduce.

Estas condiciones, la potencia de entrada del motor de inducción es igual a:

$$P'_o = n_1 \cdot I_o'^2 + P_{h+f}$$

DÓNDE

P_o e **I_o**: son la potencia de entrada y la corriente del estator cuando s=0

Una vez que se ha determinado el valor de r₁, por el método del voltímetro amperímetro, se pueden calcular las pérdidas P_{h+f}.

En forma aproximada:

$$\checkmark E_o = V_o - I_o \cdot Z_1$$

$$\checkmark Z_1 = \sqrt{X_1^2 + r_1^2}$$

$$\checkmark g_n = \frac{P_{h+f}}{q_1 E_o^2}$$

$$\checkmark Y_n = \frac{I_o}{E_o}$$

$$\checkmark B_n = \sqrt{Y_n^2 + g_n^2}$$

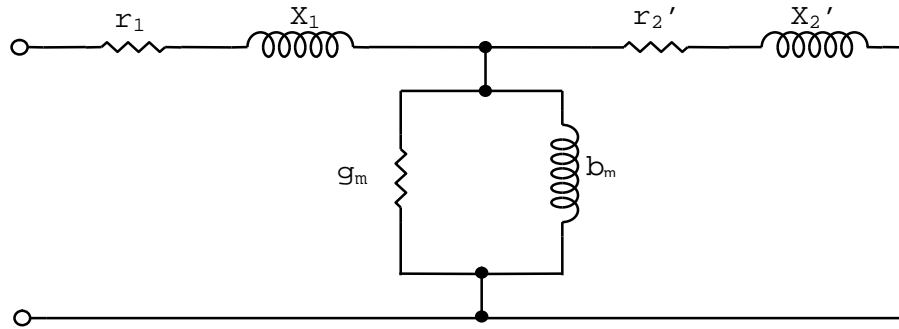
PRUEBA DE ROTOR BLOQUEADO.- En esta prueba se aplica un valor de voltaje que permita alcanzar la corriente nominal, estando el rotor bloqueado.

Se realizan las siguientes mediciones:

- | | |
|------------------------|--|
| ✓ Voltaje del estator. | V _{rb} (voltaje nominal por fase) |
| ✓ Corriente primaria. | I _{rb} (corriente nominal) |
| ✓ Potencia total. | P _{rb} (trifásica) |

En reposo el deslizamiento s es igual a la unidad y el circuito equivalente del motor esta dado por la **Figura b**:

Figura b: Circuito equivalente a rotor bloqueado.



Fuente: Grupo de Investigación

Puesto que la impedancia secundaria $r_2' + jX_2'$ es menor en comparación con la rama de magnetización, el flujo principal y las pérdidas en el hierro debidas a dicho flujo, son pequeñas.

Además, en reposo no hay pérdidas mecánicas ($P_{F+V} = 0$ y $P_{fe \text{ rot}} = 0$) en la máquina, por lo tanto, la potencia de entrada P_{rb} se consume principalmente en las pérdidas en el cobre en ambos arrollamientos.

En forma aproximada:

$$\begin{aligned} \checkmark R_{rb} &= \frac{P_{rb}}{q_1 I_{rb}^2} \\ \checkmark Z_{rb} &= \frac{V_{rb}}{\sqrt{3} I_{rb}} \\ \checkmark X_{rb} &= \sqrt{Z_{rb}^2 - R_{rb}^2} \\ \checkmark r_2' &\approx R_{rb} - r_1 \\ \checkmark X_{rb} &= X_1 + X_2' \\ \checkmark X_1 &= X_2' = \frac{X_{rb}}{2} \end{aligned}$$

Con el valor de X_1 se pueden determinar los parámetros g_m y b_m .

4. TRABAJO PREPARATORIO

- ✓ Diseñar los circuitos y determinar los procedimientos para realizar las pruebas de vacío, rotor bloqueado y resistencia del estator, necesarias para la determinación de las pérdidas y parámetros del circuito equivalente de un motor de inducción.

- ✓ Preparar una hoja para tomar los datos que se medirán en la práctica.

5. PROCEDIMIENTO

- ✓ Tomar datos de la placa y medir los valores de resistencia de los devanados.

- ✓ Armar los circuitos necesarios para realizar las pruebas de vacío y rotor bloqueado y tomar las lecturas requeridas.

- ✓ Tomar los datos necesarios para determinar la relación de transformación estator rotor.

6. INFORME – ANÁLISIS Y RESULTADOS

- ✓ Realizar un análisis preciso y corto de cada una de las pruebas realizadas, presentar los datos tabulados y los diagramas de los circuitos que se usaron con la explicación correspondiente.

- ✓ Determinar los parámetros del circuito equivalente del motor de inducción, presentar cálculos detallados junto a las explicaciones correspondientes.

- ✓ Presentar los datos de placa del motor de inducción utilizado para el experimento.

- ✓ Calcular el valor de la resistencia externa que hay que poner en el rotor para que el par de arranque sea igual al par máximo.

7. CONCLUSIONES

8. BIBLIOGRAFIA

ANEXO N°5 - PRÁCTICA DE LABORATORIO

Puesta en paralelo de un generador sincrónico con la barra infinita -curvas “V”, y operación en los cuatro cuadrantes

1. OBJETIVOS:

- ✓ Definir las condiciones que debe cumplir la máquina sincrónica para acoplarse a la barra infinita.
- ✓ Analizar el comportamiento del generador en paralelo con la barra infinita en función de la variación de la potencia activa de la máquina impulsora y de la variación de la corriente de campo.

2. EQUIPO:

Equipos Práctica N°3

CANT.	EQUIPO A UTILIZAR
1	Banco de Pruebas Motor- Generador Sincrónico

Fuente: Grupo de Investigación

3. INFORMACION TEÓRICA:

Para conectar en paralelo un generador con una barra infinita, se debe cumplir con las siguientes condiciones, tanto en la barra de la ELEPCO y el equipo motor generador de la U.T.C:

- ✎ Igual voltaje en sus terminales (Magnitud)
- ✎ Voltajes en fase entre ambas fuentes (Fase)
- ✎ Igual frecuencia de generación (Frecuencia)
- ✎ Igual secuencia de giro en las fases a conectarse (Secuencia)

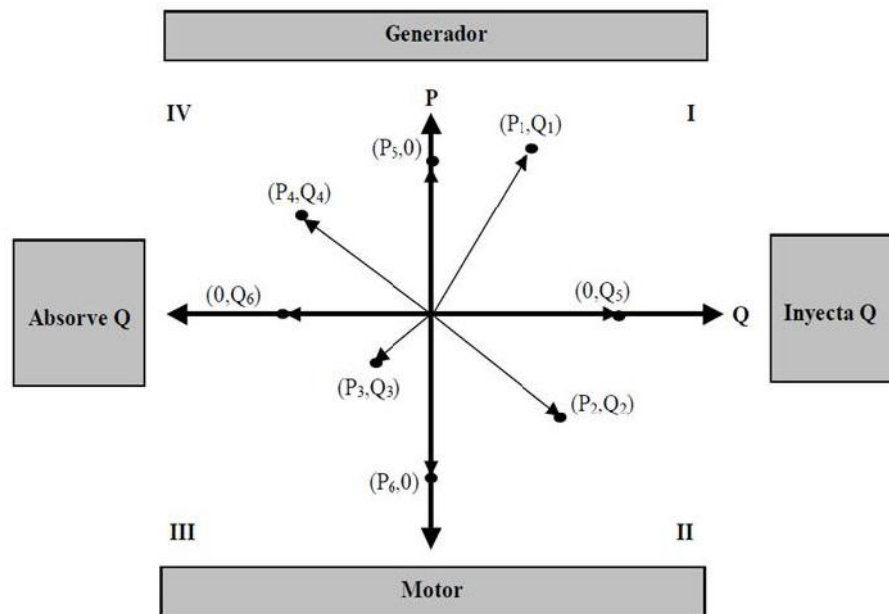
Una vez que el generador se acopla a la barra infinita, las condiciones de voltaje y frecuencia (velocidad de giro de la máquina) son gobernados por el sistema, quien impone estas condiciones en función de las características eléctricas de la línea de interconexión.

Aunque la máquina motriz sea acelerada o se incremente el par hacia nuestro generador, la velocidad de giro se mantiene constante, la variación se produce a nivel de la potencia activa entregada al sistema.

El voltaje a terminales del generador también permanece fijo, cuando manipulamos el voltaje DC aplicado al rotor, lo que conseguimos es entregar o recibir reactivos, es decir, nos comportamos como un capacitor (si entregamos reactivos, campo sobre excitado) o como un inductor (si consumimos reactivos, campo sub excitado).

De esta manera podemos gobernar a la máquina sincrónica en paralelo con la barra infinita en sus cuatro cuadrantes.

Figura c: Operación de una máquina sincrónica en los cuatro cuadrantes (P-Q)



Fuente: Grupo de Investigación

Los puntos señalados en el diagrama mostrado en la **Figura c** corresponden a las condiciones de operación de la máquina síncrona en los cuatro cuadrantes.

Condiciones de operación

PUNTO	OPERACIÓN
(P1,Q1)	Generador sobre-excitado o inductivo
(P2,Q2)	Motor sobre-excitado o capacitivo
(P3,Q3)	Motor sub-excitado o inductivo
(P4,Q4)	Generador sub-excitado o capacitivo
(0,Q5)	Condensador síncrono
(0,Q6)	Reactor síncrono
(P5,0)	Generador operando con f.p. unitario
(P6,0)	Motor operando con f.p. unitario

Fuente: Grupo de Investigación

4. TRABAJO PREPARATORIO:

- ✓ Consultar acerca de la sincronización de una máquina síncrona con la barra infinita y las protecciones básicas que requiere un generador eléctrico para entregar energía de manera segura al sistema eléctrico.
- ✓ Consultar acerca de la operación de la máquina síncrona en los cuatro cuadrantes.
- ✓ Consultar acerca de las curvas “V” de la máquina síncrona.

5. PROCEDIMIENTO

1. Energizar con voltaje trifásico el banco de pruebas
2. Accionar el interruptor principal del tablero
3. Verificar en los medidores digitales la existencia de las tres fases en la entrada de la Empresa Eléctrica

4. Comprobar el funcionamiento de la tarjeta de DC, girar su potenciómetro y verificar que el miliamperímetro funciona
5. Regresar el potenciómetro de la tarjeta de DC a cero
6. Regresar el potenciómetro del Variador de Frecuencia a mínima posición
7. Colocar en posición **ON** el selector del variador de frecuencia
8. Comprobar que en la pantalla del variador se encuentre la expresión **RDY** que significa Ready
9. Arranco el variador presionando el pulsador **ON** color verde
10. Verificamos el giro del motor, con una rampa larga de 10 segundos hasta estabilizar su velocidad
11. Verificamos en la pantalla del variador el valor de la Potencia Nominal del equipo en porcentaje (debe estar entre el 7% y 9% que representan las pérdidas mecánicas y eléctricas del sistema actuando como generador en isla)
12. Manipulamos suavemente el potenciómetro de la tarjeta de DC, subimos el voltaje lentamente y verificamos si efectivamente la máquina sincrónica está generando voltaje y de qué magnitud y frecuencia.
13. Llevamos el voltaje hasta 210 Vac (AJUSTE DE MAGNITUD)
14. Revisamos que acción nos sugiere realizar el sincronoscopio digital (AJUSTE DE FASE)

15. Aceleramos el variador de frecuencia suavemente hasta que la frecuencia generada sea 60 Hz (AJUSTE DE FRECUENCIA)
16. Ajustamos el voltaje al voltaje de red (AFINAMIENTO DE MAGNITUD)
17. Revisamos que el sincronoscopio de focos presente un parpadeo al unísono en las tres fases (AJUSTE DE SECUENCIA), en caso de observar que únicamente parpadea un foco de los tres, y el parpadeo pasa de uno a otro foco de manera secuencial, este fenómeno indica que ESTAMOS CON SECUENCIA INVERTIDA EN LA RED ELÉCTRICA Y DEBEMOS INTERCAMBIAR DOS FASES.
18. Una vez comprobados: MAGNITUD, FASE, FRECUENCIA y SECUENCIA, esperamos el momento justo y presionamos CONECTAR botón verde del sincronismo.
19. El generador se sincroniza con la empresa distribuidora y el foco verde se enciende indicando el cierre del contactor de acoplamiento.
20. Revisamos inmediatamente la potencia del Variador de Frecuencia y la llevamos suavemente al 30%.
21. Pulsamos seis veces la flecha hacia arriba de cada medidor digital hasta llegar a la pantalla TOTAL POWERS.
22. En esta pantalla podemos identificar en cuál de los 4 cuadrantes estamos trabajando con nuestra máquina sincrónica.
23. Manipulando suavemente los potenciómetros del Variador de Frecuencia y de la Tarjeta de Voltaje de Campo, podemos llevar a la máquina al cuadrante que nos indique el asistente de laboratorio.

24. Para obtener las curvas “V” del generador variamos la corriente de campo.

6. INFORME – ANÁLISIS Y RESULTADOS

- ✓ Presentar y explicar los datos obtenidos al manipular los parámetros velocidad de la máquina impulsora y voltaje DC de campo, una vez sincronizado con la Barra Infinita.

- ✓ En el gráfico de los 4 cuadrantes de la máquina sincrónica, con datos expresados en por unidad, ubicar los puntos de trabajo obtenidos en cada caso.

- ✓ Graficar las curvas “V” del generador.

- ✓ Analice y comente la curva anterior.

7. CONCLUSIONES

8. BIBLIOGRAFIA

ANEXO N°6
Magnitudes y Unidades Eléctricas

MAGNITUDES Y UNIDADES ELÉCTRICAS

MAGNITUD	UNIDAD	RELACIONES
Carga (q)	Culombio (C)	
Corriente (I)	Amperio (A)	C/s
Tensión (V)	Voltio (V)	J/C
Densidad de Corriente (J)	A/m ²	
Campo Eléctrico (E)	V/m	N/C
Resistividad (ρ)	Ω m	Vm/A
Conductividad (σ=1/ρ)	1/[Ω m]	Siemens/m (S/m)
Resistencia (R)	Ohmio (Ω)	V/A
Conductancia (G=1/R)	Siemens (S=Ω ⁻¹)	A/V
Inductancia (L)	Henrio (H)	Wb/A
Capacidad (C)	Faradio (F)	C/V
Inducción Magnética (B)	Tesla (T)	N/[Am]=Wb/m ²
Flujo Magnético (Φ)	Weber (Wb)	J/A=Nm/A
Campo Magnético (H)	A/m	A-v/m
Fuerza Magnetomotriz (F)	A	A-v
Reluctancia (R)	A/Wb	1/H
Permeabilidad (μ ₀)	4π 10 ⁻⁷ H/m	4π 10 ⁻⁷ Wb/[Am] (ó N/A ²)

MAGNITUD ELÉCTRICA	UNIDAD	APARATO DE MEDIDA
Tensión (U)	Voltio (V)	Voltímetro
Intensidad (I)	Amperio (A)	Amperímetro
Resistencia (R)	Ohmio (Ω)	Ohmímetro-Megómetro
Potencia activa (P)	Vatio (W)	Vatímetro
Potencia reactiva (Q)	Voltamperio reactivo (var)	Varímetro
Energía eléctrica (E)	Vatio hora (Wh)	Contador de energía
Frecuencia (f)	Hercio (Hz)	Frecuencímetro
Desfase (φ)	Cos φ	Fasímetro
Flujo magnético (Φ)	Weber (Wb)	Fluxómetro
Inductancia (L)	Henrio (H)	Henrímetro

ANEXO N°7

Datos Técnicos Nominales de los motores trifásicos

Velocidad 3600 rpm, 2 polos, 60 Hz															
Código	Tipo	Frame IEC Tamaño	Potencia		F.S.	Corriente nominal [A]			Eficiencia η %	Factor de potencia Cos ϕ	Velocidad nominal rpm	Torque nominal Nm	Torque de arranque Tarr / Tn	Corriente de arranque Iarr / In	Peso kg
			HP	kW		220V	380V	440V							
25000012863	1LA3 090-2YC80	90L	2,0	1,5	1,15	6,6	3,8	3,3	67,4	0,88	3438	4,14	3,4	6,4	20,4
25000012864	1LA3 090-2YA80	90L	3,0	2,2	1,15	9,0	5,2	4,5	76,8	0,85	3445	6,20	3,5	6,9	21,6
25000012663	1LA3 096-2YA80	90L	4,0	3,0	1,15	12,2	7,1	6,1	72,9	0,88	3440	8,28	3,1	6,0	23,3
25000012782	1LA3 112-2YA80	112M	5,0	3,7	1,15	15,2	8,7	7,6	70,0	0,92	3461	10,29	2,0	5,2	37,1
25000012783	1LA3 113-2YA80	112M	6,6	4,9	1,05	19	11	9,5	73,1	0,93	3420	13,75	2,6	6,8	41,5
25000012784	1LA3 114-2YA80	112M	7,5	5,6	1,15	21,8	12,6	10,9	72,4	0,93	3446	15,50	2,0	5,8	46,0
25000012387	1LA3 130-2YA80	132 M	10	7,5	1,15	28	16,2	14	75,2	0,93	3479	20,48	2,4	6	68,7
25000012388	1LA3 132-2YA80	132 M	15,0	11,2	1,15	41	23,67	20,5	78,7	0,91	3486	30,65	2,4	6,5	78,0
25000012378	1LA3 163-2YA80	160 L	20	14,9	1,15	53,6	30,9	26,8	82,1	0,89	3500	40,71	2	6	111,6
25000012375	1LA3 165-2YA80	160 L	25,0	18,7	1,15	63,6	36,7	31,8	85,5	0,90	3490	51,03	2,1	5,0	119,8
25000012377	1LA3 167-2YA80	160 L	30	22,4	1,15	77,2	44,57	38,6	84,6	0,9	3519	60,73	2	4,6	135,3
25000012727	1LA6 183-2YA80	180 MIL	35,0	26,1	1,15	87	50	43,5	89,5	0,88	3535	70,53	2,1	6,6	179,0
25000012728	1LA6 184-2YA80	180 MIL	40	29,8	1,05	104	60	52	88,6	0,85	3535	80,61	2,3	6,4	180
25000012664	1LA6 206-2YA80	200 L	50,0	37,3	1,15	130	75	65	87,6	0,86	3549	100,36	2,4	6,6	250,0
25000012665	1LA6 207-2YA80	200 L	60	44,8	1,15	154	90	77	89,7	0,85	3555	120,23	2,4	6,6	264,7
25000011175	1LA6 224-2YC80	225 SIM	75,0	56,0	1,15	188	108,5	94	92,8	0,84	3540	150,93	1,8	6,8	320,0

ANEXO N°8

Código de colores para los conductores unifilares

COLOR	TIPO CIRCUITO
Azul claro	Neutros de circuitos de potencia
Negro	Conductores activos de circuitos de potencia en c.a. y c.c.
Rojo	Circuitos de mando en corriente alterna
Azul	Circuitos de mando en corriente continua
Naranja	Circuitos de enclavamiento de mando alimentados desde una fuente externa de energía
Amarillo/verde	Conductores de protección (tierra)

ANEXO N°9

Temperaturas máximas admisibles del conductor en condiciones normales y de cortocircuito.

TIPOS DE AISLAMIENTO	MÁXIMA TEMPERATURA DEL CONDUCTOR EN CONDICIONES NORMALES EN °C	MÁXIMA TEMPERATURA DEL CONDUCTOR EN CONDICIONES DE CORTOCIRCUITO EN °C
Policloruro de vinilo (PVC)	70	160
Caucho	60	200
Polietileno reticulado (PR)	90	250
Compuesto de etileno propileno (EPR)	90	250
Caucho silicona (SIR)	180	350
Estos valores están basados en la hipótesis del comportamiento adiabático para un período no superior a 5 segundos.		

ANEXO N°10

Señalización, códigos de seguridad visual y auditiva de los PULSADORES según su función

COLOR	SIGNIFICADO	EXPLICACIÓN	EJEMPLOS
ROJO	Emergencia.	Actuación en caso de emergencia o en condiciones peligrosas (también puede utilizarse para la función de PARO pero no se recomienda cuando hay otros elementos de paro de emergencia en color rojo)	<ul style="list-style-type: none"> ✍ Parada de emergencia. ✍ Inicio de una función de emergencia.
AMARILLO	Anomalía	Actuación en caso de condiciones anormales.	<ul style="list-style-type: none"> ✍ Inicio de un proceso de retorno a la normalidad, sin que haya puesta en marcha. ✍ Intervención para interrumpir un proceso anormal.
VERDE	Normal	Actuación para iniciar las condiciones normales. Para función de arranque o marcha, es preferible utilizar los colores BLANCO, GRIS O NEGRO, con preferencia por el BLANCO.	<ul style="list-style-type: none"> ✍ Función de arranque o puesta en marcha ✍ Inicio de un ciclo normal de marcha.

AZUL	Obligatorio	Actuación en caso de acciones que requieren una acción obligada.	--Función de rearme.
BLANCO	---	<i>Sin función específica.</i> Los tres colores pueden utilizarse para ARRANQUE, o puesta en tensión utilizando preferiblemente el BLANCO. También pueden usarse los tres colores para el PARO (siempre que no sea de emergencia) preferiblemente usando el NEGRO. También se permiten los tres colores para funciones alternativas ON/OFF y para funciones de marcha retenida (mientras se pulsa). El verde también está permitido sólo para la función de arranque y el rojo también se permite sólo para la función de PARO siempre que no esté cerca de paros de emergencia.	ON/MARCHA=Blanco OFF/PARO=Negro Si se usan los mismos colores para el paro y marcha, se deberán identificar obligatoriamente mediante las marcas de la tabla siguiente. Si se utilizan colores distintos para el paro y marcha, las marcas siguientes son recomendables pero no obligatorias.
GRIS	---		
NEGRO	---		
<p>NOTAS: Prohibido usar el ROJO para la función de ARRANQUE. Para los pulsadores de REARME se debe utilizar cualquiera de los colores BLANCO, GRIS o NEGRO pero nunca debe utilizarse el VERDE. Cuando un pulsador de rearme también actúe como función de OFF deberá utilizarse preferiblemente el NEGRO.</p>			

ANEXO N°11

Tabla de colores según la función de los Indicadores Luminosos

COLOR	SIGNIFICADO	EXPLICACIÓN	ACCIÓN POR EL OPERADOR	EJEMPLOS
ROJO	Emergencia, peligro o alarma.	Advertencia de un posible peligro o de un estado que requiere una acción inmediata	Acción inmediata a realizar en condiciones peligrosas (p.e. el accionamiento del paro de emergencia)	Temperatura excesiva en condiciones peligrosas, Paro de una parte esencial del equipo debido a la actuación de alguna protección, Peligro debido a elementos accesibles bajo tensión o a partes en movimiento.
AMARILLO (AMBAR)	Anomalía.	Condiciones anormales o críticas amenazantes.	Control y/o intervención (p.e. mediante el restablecimiento de la función prevista)	Temperatura o presión ligeramente superior a la prevista Sobrecarga eléctrica o térmica (fallo térmico)
VERDE	Normal	Condiciones normales de funcionamiento	Acciones opcionales. (ninguna requerida)	Motor en marcha en condiciones normales

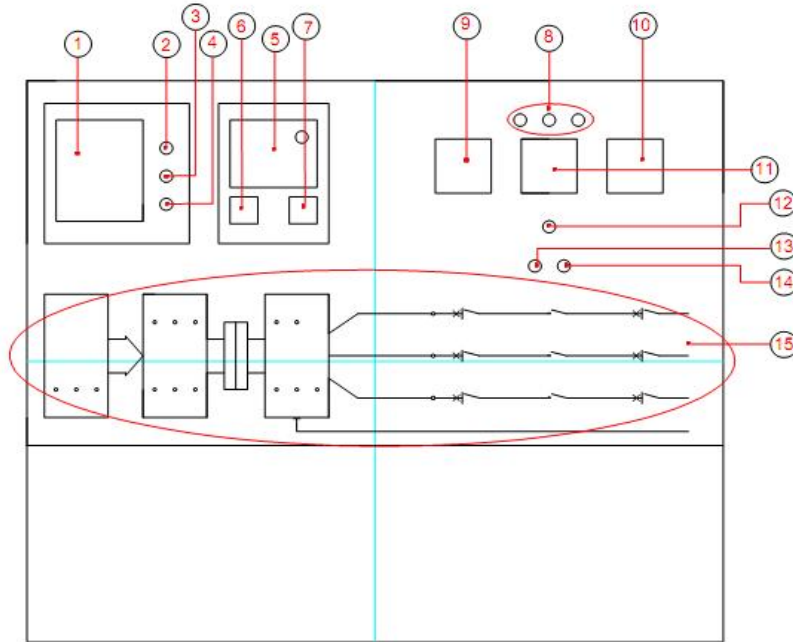
				Funcionamiento correcto del sistema Permiso para continuar con el siguiente proceso
AZUL	Obligatorio	Indicación de una condición que requiere la acción del operador	Acción obligada por el proceso (sin que haya condiciones anormales)	Orden de inicio de otro proceso. Orden de ejecución de alguna acción de cambio de secuencia o de parámetros.
BLANCO	Neutro	Condiciones no definidas, siempre que no se ajusten a ninguna de las anteriores.	Control o indicación.	Interruptor general conectado o sistema en tensión. Velocidad o sentido de rotación elegidos.

ANEXO N°12

Banco de Pruebas para realizar prácticas demostrativas a pequeña escala



ANEXO N°13 Elementos Constitutivos del Banco de Pruebas



- 1) VARIADOR DE FRECUENCIA [VFD]
- 2) ON - OFF [VFD]
- 3) STAR - STOP [VFD]
- 4) POTENCIOMETRO DEL VFD
- 5) TARJETA DE CONTROL DC (CAMPO)
- 6) VOLTIMETRO
- 7) AMPERIMETRO
- 8) SINCRONOSCOPIO DE FOCOS
- 9) MEDIDOR DIGITAL DEL GENERADOR
- 10) MEDIDOR DIGITAL DE LA RED ELECTRICA [ELEPCO]
- 11) RÉLE DE SINCRONISMO
- 12) LÚZ PILOTO
- 13) CONECTAR [SINCRONIZAR]
- 14) DESCONECTAR [DES - SINCRONIZAR]
- 15) MIMICO DEL BANCO DE PRUEBAS



IMPLEMENTACIÓN Y MONTAJE DE UN MOTOR - GENERADOR AC - AC TRIFÁSICO DE 5 kW, EN EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI, CON LA ELABORACIÓN DE UN MANUAL DE OPERACIÓN, PARA REALIZAR PRACTICAS DEMOSTRATIVAS

UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI

REALIZADO POR:
ING. EDWIN YUGSI
ING. GUSTAVO CISNEROS

ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DEL BANCO DE PRUEBAS

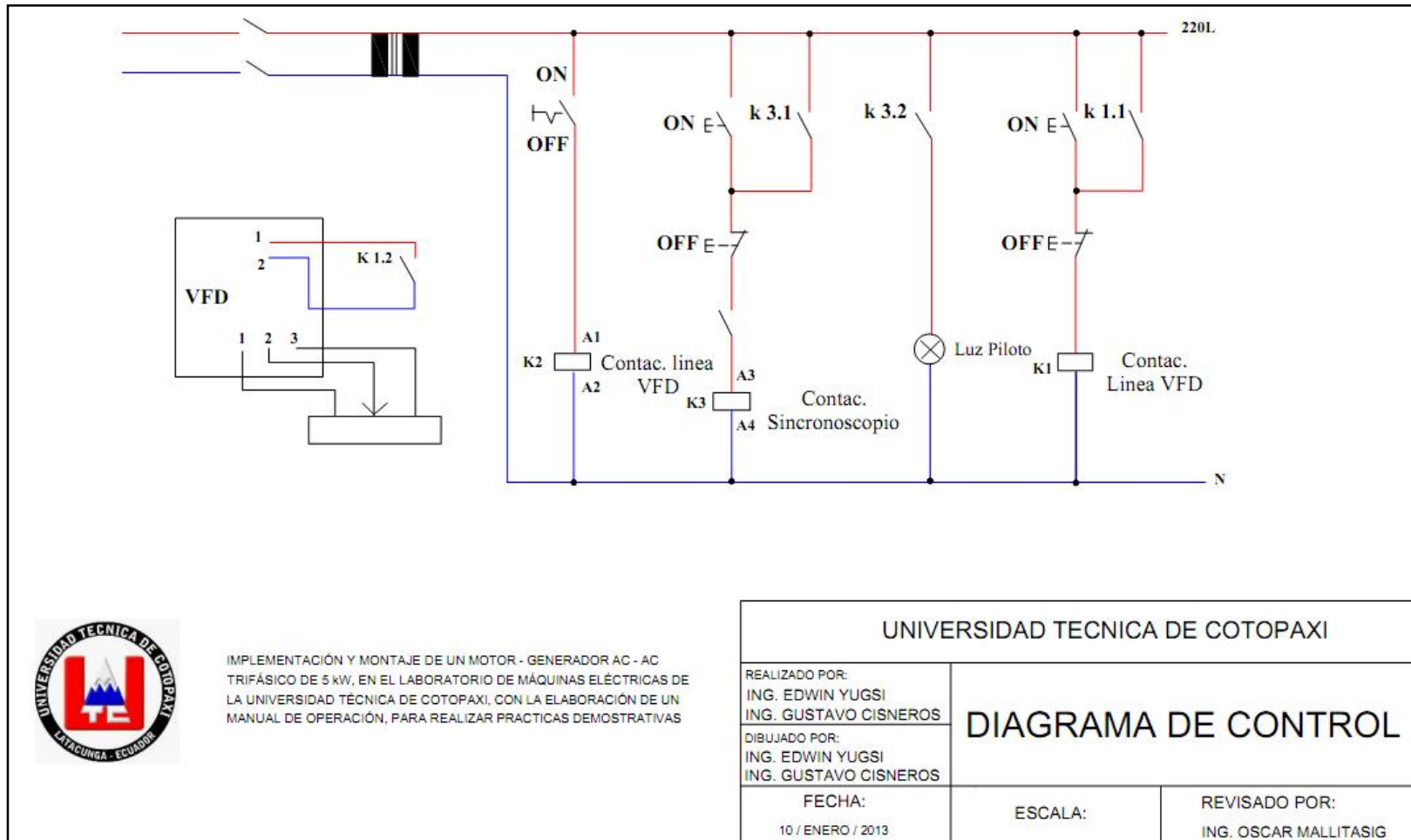
DIBUJADO POR:
ING. EDWIN YUGSI
ING. GUSTAVO CISNEROS

FECHA:
10 / ENERO / 2013

ESCALA:

REVISADO POR:
ING. OSCAR MALLITASIG

ANEXO N°14 Diagrama de Control del Banco de Pruebas



IMPLEMENTACIÓN Y MONTAJE DE UN MOTOR - GENERADOR AC - AC TRIFÁSICO DE 5 kW, EN EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI, CON LA ELABORACIÓN DE UN MANUAL DE OPERACIÓN, PARA REALIZAR PRÁCTICAS DEMOSTRATIVAS

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

REALIZADO POR:
ING. EDWIN YUGSI
ING. GUSTAVO CISNEROS
DIBUJADO POR:
ING. EDWIN YUGSI
ING. GUSTAVO CISNEROS

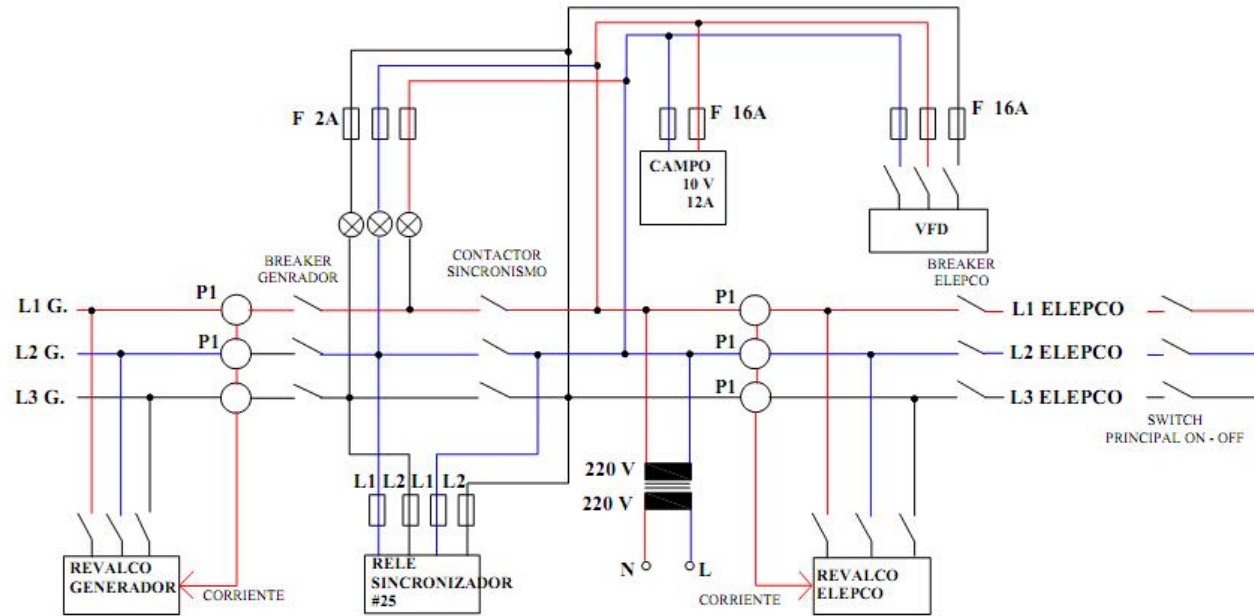
DIAGRAMA DE CONTROL

FECHA:
10 / ENERO / 2013

ESCALA:

REVISADO POR:
ING. OSCAR MALLITASIG

ANEXO N°15 Diagrama de Fuerza del Banco de Pruebas



IMPLEMENTACIÓN Y MONTAJE DE UN MOTOR - GENERADOR AC - AC TRIFÁSICO DE 5 kW, EN EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI, CON LA ELABORACIÓN DE UN MANUAL DE OPERACIÓN, PARA REALIZAR PRÁCTICAS DEMOSTRATIVAS

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

REALIZADO POR:
ING. EDWIN YUGSI
ING. GUSTAVO CISNEROS
DIBUJADO POR:
ING. EDWIN YUGSI
ING. GUSTAVO CISNEROS

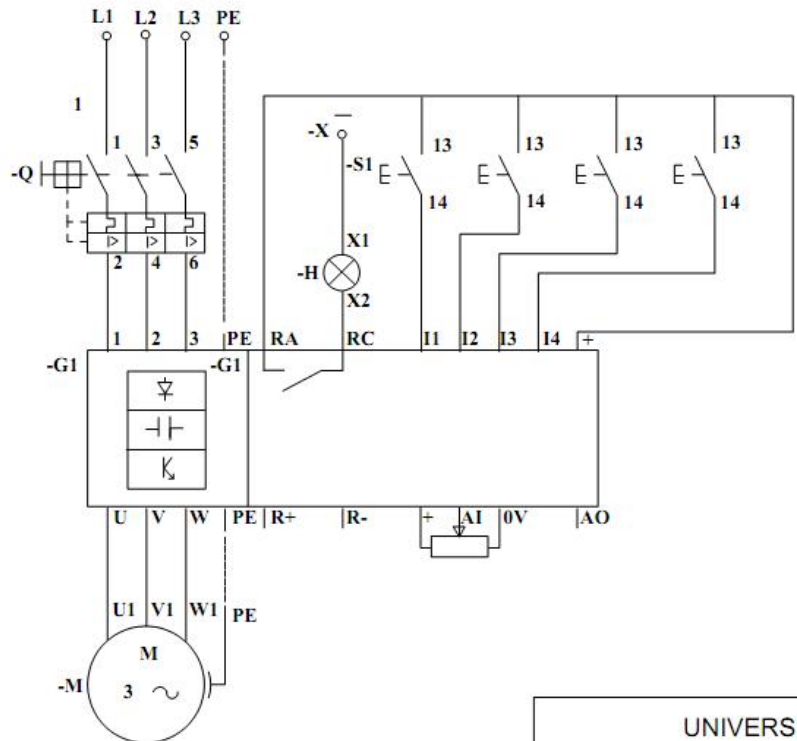
DIAGRAMA DE FUERZA

FECHA:
10 / ENERO / 2013

ESCALA:

REVISADO POR:
ING. OSCAR MALLITASIG

ANEXO N°16 Diagrama del Variador de Frecuencia (VFD)



IMPLEMENTACIÓN Y MONTAJE DE UN MOTOR - GENERADOR AC - AC TRIFÁSICO DE 5 kW, EN EL LABORATORIO DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI, CON LA ELABORACIÓN DE UN MANUAL DE OPERACIÓN, PARA REALIZAR PRÁCTICAS DEMOSTRATIVAS

UNIVERSIDAD TECNICA DE COTOPAXI		
REALIZADO POR: ING. EDWIN YUGSI ING. GUSTAVO CISNEROS	DIAGRAMA DEL VARIADOR DE FRECUENCIA VFD	
DIBUJADO POR: ING. EDWIN YUGSI ING. GUSTAVO CISNEROS		
FECHA: 10 / ENERO / 2013	ESCALA:	REVISADO POR: ING. OSCAR MALLITASIG