



# UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

## ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES

**TEMA:**

**“Diseño y Construcción de un Banco para Pruebas de  
Caracterización de los Principales Parámetros de  
Generadores Eléctricos para el A.E.I.R.N.N.R. de la  
Universidad Nacional de Loja”**

TESIS DE GRADO PREVIA A LA  
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO EN ELECTROMECAÁNICA

**AUTORES:**

FABIÁN GEOVANNY CALLE CHAMBA  
GONZALO JAVIER FLORES PALADINES

**DIRECTOR:**

ING. HÉCTOR OSWALDO SALCEDO LÓPEZ

Loja - Ecuador

2010

## CERTIFICACIÓN

Ing. Héctor Oswaldo Salcedo López

**DOCENTE DEL ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA**

### **CERTIFICA:**

Haber asesorado y revisado durante todo el desarrollo, la Tesis titulada: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO PARA PRUEBAS DE CARACTERIZACIÓN DE LOS PRINCIPALES PARÁMETROS DE GENERADORES ELÉCTRICOS PARA EL A.E.I.R.N.N.R DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA”**, elaborada por los egresados: **Fabián Geovanny Calle Chamba y Gonzalo Javier Flores Paladines**, previo a la obtención del grado de Ingenieros en Electromecánica.

En tal virtud cumple los requisitos que exigen las normas de graduación de esta Institución, por lo expuesto autorizo su presentación y defensa.

Loja, Marzo del 2010

-----  
Ing. Héctor Oswaldo Salcedo López  
**DIRECTOR DE TESIS**

## AUTORÍA

Todas las ideas, opiniones y recomendaciones vertidas en la presente tesis de ingeniería, son de absoluta responsabilidad de sus autores.

.....  
**Fabián Geovanny Calle Chamba**

.....  
**Gonzalo Javier Flores Paladines**

**PENSAMIENTO**

“Lo que hace sabio al  
hombre no es saber mucho,  
si no saber lo que le es útil”

<THOMAS FULLER>

## **DEDICATORIA**

A Dios por darme la vida, la inteligencia para poder desarrollar este trabajo de tesis donde él fue mi guía e iluminación para cumplir este anhelado proyecto.

Dedico este trabajo con mucho cariño a mis padres que por su incondicional, esfuerzo y sacrificio me apoyaron durante mi formación profesional. A mis queridos hermanos, cuñados y sobrinos los cuales me inspiraron para poder concluir satisfactoriamente esta nueva meta en mi vida.

**Fabián Geovanny Calle Chamba**

Con mucho amor les dedico este trabajo a mis padres quienes fueron los actores principales para llegar a esta meta trazada quienes me supieron brindar su apoyo y por el esfuerzo incondicional durante mi formación académica, a mis hermanos en fin a todas aquellas personas que de una u otra manera contribuyeron para la culminación de mi trabajo.

**Gonzalo Javier Flores Paladines**

## AGRADECIMIENTO

Nuestros sinceros agradecimientos a la Universidad Nacional de Loja, al Área de Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables y a todas aquellas personas que nos brindaron su apoyo y su colaboración desinteresadamente para la ejecución del presente trabajo.

Además nuestra gratitud a los docentes de la carrera de Electromecánica quienes impartieron sus conocimientos para nuestra formación profesional, al Ing. Oswaldo Salcedo Director de Tesis por ser guía y acertada dirección en el desarrollo la realización de este trabajo.

Al Ing. Norman Jiménez León director de la carrera y al Ing. Diógenes Bustán Jaramillo técnico responsable del taller mecánico de la carrera de Electromecánica por brindarnos su apoyo profesional, a nuestros familiares y a todas las personas que de alguna manera colaboraron para la culminación de este proyecto.

**Los Autores**

## RESUMEN

El presente proyecto describe el diseño y construcción de un banco de pruebas de generadores eléctricos trifásicos, como un apoyo al pensum académico de la carrera de Ingeniería en Electromecánica, especialmente a la unidad de máquinas Eléctricas II. La mayoría de centrales de generación eléctrica emplean este tipo de generadores es por eso que el proyecto se enfocó en este tipo de generadores. Nuestro proyecto aborda la generación de energía eléctrica, utilizando como primotor a un motor de inducción trifásico controlado por un variador de frecuencia.

Se recopiló información detallada para la realización de la investigación, a continuación se estableció el diseño adecuado en base a cálculos matemáticos basándonos de las sugerencias de profesionales de este campo.

Diseñado el sistema, se realizó la construcción del banco, montaje y funcionamiento del mismo, así como esquemas, dibujos y programación de las prácticas finalmente se presenta la valoración técnico-económica y ambiental, además manual de operación y mantenimiento del prototipo automatizado.

## SUMMARY

The present project describes the design and construction of a bank of generators synchronous of rotor of salient poles, as a support to the academic pensum of the career of Engineering in Electromechanical, especially to the unit of Electric machines II. Most of central of electric generation uses this type of generators it is for that reason that the project was focused in this type of generators. Our project approaches the electric power generation, using as primotor to a motor of induction trifásico controlled by a variador of frequency.

You gathers detailed information for the realization of the investigation, next the appropriate design settled down based on mathematical calculations basing us of the suggestions of professionals of this field.

Designed the system, was carried out the construction of the bank, assembly and operation of the same one, as well as outlines, drawings and programming of the practices finally shows up the technician-economic and environmental valuation, also operation manual and maintenance of the automated prototype.

## ÍNDICE GENERAL

<b>PORTADA</b> .....	<b>I</b>
<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	<b>II</b>
<b>DECLARACIÓN DE AUTORÍA</b> .....	<b>III</b>
<b>PENSAMIENTO</b> .....	<b>IV</b>
<b>DEDICATORIA</b> .....	<b>V</b>
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	<b>VI</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>VII</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>VIII</b>
<b>ÍNDICE</b>	
<b>GENERAL</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>IXX</b>
<b>SIMBOLOGÍA</b> .....	<b>XX</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
Planteamiento de la Problemática.....	2
Enunciado Problemático.....	3
Problema General de Investigación.....	3
Problemas Específicos.....	3
Objetivos de la Investigación.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivos Específicos.....	3
Planteamiento de la Hipótesis.....	4
Hipótesis general.....	4
Hipótesis Específicas.....	4
 <b>CAPITULO I: REVISIÓN DE LITERATURA</b>	
1.1 <b>CIRCUITOS MAGNÉTICOS Y CONVERSIÓN DE ENERGÍA           ELECTROMECAÁNICA</b> .....	<b>5</b>
1.1.1    Introducción a los circuitos magnéticos.....	5
1.1.2    La ley de Ohm para los circuitos magnéticos.....	5
1.1.3    Analogías entre circuitos eléctricos y circuitos magnéticos.....	6
1.1.3.1    Intensidad de campo .....	7

1.1.4	Propiedades de materiales magnéticos.....	7
1.1.4.1	Curva de magnetización.....	9
1.1.5	Dispersión de flujo.....	9
1.1.6	Inductancia.....	11
1.1.7	Principio de la conversión de energía electromecánica.....	12
1.1.8	Excitación con corriente continua y alterna.....	13
1.2	MÁQUINAS ELÉCTRICAS.....	14
1.2.1	Introducción.....	14
1.2.1.1	Clasificación de Máquinas eléctricas.....	15
1.2.2	Motores eléctricos.....	15
1.2.2.1	Motores asíncronos.....	16
1.2.2.1.1	Principio de funcionamiento.....	17
1.2.2.1.2	Análisis del circuito equivalente.....	18
1.2.2.1.3	Control de velocidad de los motores de inducción.....	20
1.2.2.2	Motores síncronos.....	21
1.2.2.2.1	Aplicaciones.....	21
1.2.2.2.2	Ventajas y desventajas.....	22
1.2.3	Generadores eléctricos.....	22
1.2.3.1	Generadores síncronos.....	23
1.2.3.2	Transformadores eléctricos.....	24
1.2.3.3	Características.....	24
1.2.3.4	Transformadores de tensión.....	25
1.2.3.5	Transformadores de corriente.....	25
1.2.3.5.1	Características particulares de los T/C.....	26
1.3	DISPOSITIVOS DE PROTECCION, REGULACION, CONTROL Y DE MEDIDA.....	28
1.3.1	Interruptor magnético.....	28
1.3.2	Interruptor manual.....	28
1.3.3	Interruptor termomagnético.....	28
1.3.3.1	Principio de funcionamiento.....	29
1.3.4	Potenciómetro (Dimer).....	29
1.3.5	Variador de frecuencia (SINAMICS G110).....	30
1.3.6	Central de medida (REVALCO 2RAN96C485).....	32

1.3.7	Amperímetro.....	33
1.3.8	Voltímetro.....	34
1.4	CONCEPTOS GENERALES PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN GENERADOR SÍNCRONO.....	35
1.4.1	Generalidades de un generador síncrono.....	35
1.4.1.1	Principio de funcionamiento.....	35
1.4.2	Partes constitutivas.....	36
1.4.2.1	Rotor.....	36
1.4.2.1.1	Rotor de polos salientes.....	37
1.4.2.1.1.1	Campo Magnético del Rotor.....	39
1.4.2.1.1.2	Accesorios eléctricos auxiliares del rotor de polos salientes.....	39
1.4.2.1.1.2.1	Pérdidas mecánicas y eléctricas en las escobillas.....	40
1.4.2.2	Carcasa.....	41
1.4.2.3	Estator.....	42
1.4.2.3.1	Núcleo magnético del estator.....	42
1.4.3	Excitación de generadores síncronos.....	43
1.4.3.1	Efectos de la reacción de armadura.....	44
1.4.4	Devanados .....	45
1.4.4.1	Bobinado concéntrico trifásicos.....	45
1.4.4.2	Fuerza magnetomotriz en el devanado.....	47
1.4.4.3	Campo magnético resultante.....	49
1.4.5	Torque electromagnético.....	51
1.4.6	Voltaje generado.....	52
1.4.7	Relación entre los valores nominales y las dimensiones físicas de una máquina síncrona.....	54
1.4.8	Factores que afectan el tamaño de las máquinas.....	57
1.4.8.1	Separación de diámetro y longitud en función de la velocidad periférica.....	57
1.4.9	Calentamiento y sistemas de enfriamiento en las máquinas síncronas.....	58
1.5	MÁQUINA SÍNCRONA EN RÉGIMEN ESTABLE.....	59
1.5.1	Círculo equivalente de una máquina síncrona.....	61
1.5.1.1	Inductancias de una máquina síncrona.....	61
1.5.1.2	Reactancia síncrona de la máquina de rotor de polos salientes.....	62

1.5.1.3	Diagrama fasoriales de maquinas de polos salientes.....	62
1.5.2	Características internas de la máquina síncrona.....	65
1.5.2.1	Característica de circuito abierto.....	65
1.5.2.2	Característica de corto circuito.....	65
1.5.2.3	Determinación de la reactancia síncrona.....	66
1.5.2.4	Relación de corto circuito.....	67
1.5.2.5	Características bajo carga de la máquina síncrona.....	67
1.5.3	Característica ángulo–potencia de la máquina síncrona de polos salientes.....	68
1.5.4	Sincronización del generador con el sistema de potencia .....	68
1.5.4.1	Sincronización de generadores por el método de las lámparas apagadas .....	69
1.5.5	Pérdidas y eficiencia .....	69
1.5.5.1	Eficiencia del generador.....	70

## **CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS**

2.1	EVALUACIÓN DEL OBJETO DE INVESTIGACIÓN.....	71
2.1.1	Características generales del equipo planteado.....	71
2.1.2	Propuesta alternativa.....	72
2.2	CÁLCULOS MATEMÁTICOS DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL BANCO.....	72
2.2.1	Determinación del número de vueltas y de la sección del cable para el rebobinado.....	73
2.2.2	Cálculos del rebobinado del generador.....	74
2.2.2.1	Número de ranuras por polo.....	74
2.2.2.2	Ángulo entre ranuras adyacentes.....	74
2.2.2.3	Número de ranuras /polo y por fase.....	74
2.2.2.4	Factor de distribución.....	75
2.2.2.5	Número de bobinas.....	75
2.2.2.6	Número de grupos del bobinado.....	75
2.2.2.7	Número de bobinas por grupo.....	75
2.2.2.8	Amplitud del grupo.....	75
2.2.2.9	Pasos de bobina.....	76

2.2.2.10	Paso fraccionario de la bobina.....	76
2.2.2.11	Principios de fase.....	76
2.2.2.12	Factor de paso.....	78
2.2.2.13	Factor del devanado.....	78
2.2.2.14	Número total de conductores activos por fase.....	78
2.2.2.15	Flujo magnético por polo.....	78
2.2.2.16	Potencia máxima entregada del generador.....	79
2.3	MÉTODO ADICIONAL PARA CALCULAR LA POTENCIA DEL GENERADOR EN FUNCION DE SUS DIMENSIONES.....	80
2.3.1	Cálculo de la carga eléctrica específica.....	80
2.3.2	Coefficiente de salida.....	80
2.3.3	Cálculo de potencia de salida.....	81
2.4	SELECCIÓN DEL PRIMOTOR.....	81
2.5	SELECCIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA.....	83
2.6	CÁLCULOS DEL PRIMOTOR PARA DETERMINAR LA POTENCIA QUE ENTREGA EN LA FLECHA.....	83
2.6.1	Intensidad de corriente por fase.....	83
2.6.2	Impedancia de entrada al estator.....	84
2.6.3	Prueba para determinar la resistencia efectiva por fase.....	84
2.6.4	Deslizamiento.....	84
2.6.5	Potencia de entrada al estator.....	85
2.6.6	Potencia transferida a través del entrehierro.....	85
2.6.7	Potencia mecánica.....	85
2.6.8	Pérdida de potencia en el rotor.....	85
2.6.9	Potencia de salida en la flecha.....	85
2.6.10	Velocidad angular mecánica sincrónica.....	85
2.6.11	Velocidad angular mecánica del rotor.....	86
2.6.12	Par de salida en la flecha.....	86
2.6.13	Eficiencia del primotor.....	86
2.7	DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL GENERADOR.....	87
2.7.1	Perdidas en el devanado de armadura.....	87
2.7.1.1	Prueba para determinar la resistencia efectiva por fase.....	87
2.7.2	Pérdidas por fricción en los rodamientos.....	88

2.7.3	Velocidad periférica del colector.....	88
2.7.4	Pérdidas por fricción entre los rodamientos y anillos colectores.....	88
2.7.5	Pérdidas mecánicas totales.....	88
2.7.6	Determinación de la corriente de excitación.....	89
2.7.7	Potencia de excitación .....	89
2.7.8	Pérdidas en el núcleo del generador.....	89
2.7.9	Pérdidas totales de potencia.....	90
2.7.10	Potencia de entrada del generador.....	90
2.7.11	Eficiencia del generador.....	90
2.8	<b>PRUEBAS REALIZADAS AL GENERADOR .....</b>	<b>91</b>
2.8.1	Prueba de vacío.....	91
2.8.2	Prueba de corto circuito.....	91
2.8.3	Determinación de la reactancia síncrona saturada y no saturada del generador.....	92
2.8.4	Comportamiento del generador con carga resistiva.....	93
2.8.5	Comportamiento del generador con carga capacitiva.....	94
2.8.6	Comportamiento del generador con carga inductiva.....	94
2.8.7	Determinación de la curva de corriente de excitación en función de la corriente de armadura o de la potencia suministrada .....	95
2.9	<b>CÁLCULO DEL EJE DE CUADRATURA Y EJE DIRECTO DEL GENERADOR A UNA CARGA DETERMINADA.....</b>	<b>97</b>
2.9.1	Determinación del factor de potencia.....	97
2.9.2	Determinación de la reactancia del eje directo y la del eje de cuadratura.....	98
2.9.3	Determinación del ángulo de voltaje de fase con respecto a la corriente del eje de cuadratura.....	98
2.9.4	Voltaje de armadura.....	99
2.9.5	Corriente del eje directo.....	99
2.9.6	Corriente en el eje de cuadratura.....	99
2.9.7	Voltaje en el eje directo.....	99
2.9.8	Voltaje a cargas desbalanceadas.....	100
2.9.9	Regulación de voltaje.....	100

<b>CAPITULO III: SIMULACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO MEDIANTE MATLAB Y ELEBORACIÓN DE GUÍAS PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO.....</b>	<b>101</b>
3.1 Resultados de la simulación de prácticas.....	101
3.1.1 Prueba de vacio.....	101
3.1.2 Prueba de cortocircuito.....	102
3.1.3 Comportamiento del generador con carga resistiva en régimen aislado.....	103
3.1.4 Comportamiento del generador con carga inductiva.....	104
3.1.5 Comportamiento del generador con carga capacitiva.....	105
3.1.6 Determinación de la curva de corriente de excitación en función de la corriente de armadura o de la potencia suministrada.....	107
3.1.7 Sincronización del generador con el sistema de potencia.....	111
3.2 Elaboración de guías de laboratorio.....	113
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS.....</b>	<b>129</b>
4.1 Discusión.....	135
4.2 Valoración técnico - económica y ambiental.....	136
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>141</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>142</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>142</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>145</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1.1 Circuito magnético elemental.....	5
Figura 1.2 Circuito magnético y circuito equivalente.....	6
Figura 1.3 Curva de histéresis.....	8
Figura 1.4 Curvas de magnetización.....	9
Figura 1.5 Efecto marginal y de dispersión de los entrehierros.....	10
Figura 1.6 Flujo mutuo y de dispersión en un sistema trifásico producido por la corriente en la bobina 1.....	10
Figura 1.7 Máquina Eléctrica.....	14
Figura 1.8 Clasificación general de las máquinas eléctricas.....	15
Figura 1.9 Despiece de un motor eléctrico.....	16
Figura 1.10 Motor asíncrono con rotor bobinado Circuito equivalente de un T/C.....	17
Figura 1.11 Circuito equivalente de un motor asíncrono.....	18
Figura 1.12 Motor síncrono.....	21
Figura 1.13 Regla de la mano derecha (motores), Regla de la mano izquierda (generadores).....	23
Figura 1.14 Conexión de los transformadores.....	25
Figura 1.15 Circuito equivalente de un T/C.....	26
Figura 1.16 Relación de transformación de un T/C.....	27
Figura 1.17 Variador de frecuencia.....	30
Figura 1.18 Conexión y comunicación del central de medida.....	33
Figura 1.19 Diagrama los tipos de energía que actúan en un generador síncrono.....	35
Figura 1.20 Rotor de polos salientes.....	36
Figura 1.21 Estator de un generador síncrono.....	42
Figura 1.22 Núcleo magnético de una máquina síncrona.....	42
Figura 1.23 Esquema de excitación de una máquina sincrónica.....	43
Figura 1.24 Bobinado por polos.....	45
Figura 1.25 Fuerzas magneto motrices.....	48
Figura 1.26 Onda de f.m.m resultante por fase.....	49
Figura 1.27 Onda de f.m.m resultante.....	49
Figura 1.28 Relación de $\Phi$ , B, y f.m.m.....	50

Figura 1.29 Diagrama fasorial $\Phi$ , B, y f.m.m.....	50
Figura 1.30 Torque electromagnético.....	51
Figura 1.31 Torque electromagnético de una máquina síncrona como motor y como generador.....	51
Figura 1.32 Generador síncrono de dos polos.....	52
Figura 1.33 Distribución espacial de la densidad flujo.....	52
Figura 1.34 Máquina de elemental de corriente alterna.....	53
Figura 1.35 Dimensiones principales en máquinas rotatorias.....	54
Figura 1.36 Inducción de voltajes de una máquina trifásica.....	59
Figura 1.37 Desfasamiento de tensiones de una máquina trifásica.....	60
Figura 1.38 Desfase del voltaje en vacío con respecto al flujo de campo.....	60
Figura 1.39 Circuito equivalente de una máquina síncrona.....	61
Figura 1.40 Diagrama esquemático de una máquina síncrona trifásico bipolar.....	61
Figura 1.41 Diagrama fasorial del circuito equivalente.....	62
Figura 1.42 Fuerzas magneto motrices de una máquina de polos salientes.....	63
Figura 1.43 Diagrama fasorial de una máquina síncrona.....	64
Figura 1.44 Diagrama fasorial de máquina de polos salientes.....	64
Figura 1.45 Característica de circuito abierto.....	65
Figura 1.46 Característica de cortocircuito.....	66
Figura 1.47 Determinación de la reactancia síncrona.....	66
Figura 1.48 Diagrama de la máquina síncrona a bajo carga.....	67
Figura 1.49 Sincronización por el método de las lámparas apagadas.....	69
Figura 1.50 Dimensiones de la ranura del generador.....	73
Figura 1.51 Esquema del bobinado del generador.....	77
Figura 1.52 Dimensiones principales en las maquinas rotatorias.....	80
Figura 1.53 Balance potencia- rendimiento de un generador síncrono.....	87
Figura 1.54 Curva de la prueba de vacío.....	91
Figura 1.55 Curva de la prueba de cortocircuito.....	92
Figura 1.56 Determinación de la reactancia síncrona saturada y no saturada.....	92
Figura 1.57 Curva de la prueba de comportamiento con cargas resistivas.....	93
Figura 1.58 Curva de la prueba de comportamiento con cargas capacitivas.....	94
Figura 1.59 Curva de la prueba de comportamiento con cargas inductivas.....	95

Figura 1.60 Curva de regulación de voltaje para diferentes factores de potencia.....	96
Figura 1.61 Ángulo de desfase entre la corriente y tensión.....	97
Figura 1.62 Curva para determinar la reactancia de cuadratura.....	98
Figura 1.63 Diagrama vectorial del generador síncrono.....	101
Figura 1.64 Diagrama de simulación de la prueba de vacío mediante Simulink.....	101
Figura 1.65 Voltajes Generados en la prueba de Vacío.....	101
Figura 1.66 Diagrama de simulación de la prueba de corto circuito mediante Simulink.....	102
Figura 1.67 Intensidades de armadura en la prueba de cortocircuito.....	102
Figura 1.68 Diagrama de simulación de la prueba con carga resistiva mediante Simulink.....	103
Figura 1.69 Intensidades de fase y voltajes de línea del generador a una carga de 180W.....	103
Figura 1.70 Diagrama de simulación de la prueba de comportamiento del generador con carga inductiva mediante Simulink.....	104
Figura 1.71 Corriente de excitación con carga inductiva.....	104
Figura 1.72 Caída de voltaje con carga inductiva.....	105
Figura 1.73 Diagrama de simulación de la prueba de corriente de excitación en función de la corriente de armadura mediante Simulink.....	105
Figura 1.74 Corriente de excitación con carga capacitiva.....	106
Figura 1.75 Aumento de voltaje debido a la carga capacitiva.....	106
Figura 1.76 Diagrama de simulación de la prueba de corriente de excitación en función de la corriente de armadura mediante Simulink.....	107
Figura 1.77 Variación de la corriente de excitación para mantener el voltaje nominal con carga resistiva.....	108
Figura 1.78 Corriente de armadura para una carga de 450W.....	108
Figura 1.79 Regulación de voltaje para una carga de 450W.....	108
Figura 1.80 Variación de la corriente de excitación para mantener el voltaje nominal con carga inductiva de 640VAR.....	108
Figura 1.81 Corriente de armadura para una carga inductiva de 640VAR.....	109
Figura 1.82 Regulación de voltaje para una carga inductiva de 640 VAR.....	109

Figura 1.83 Variación de la corriente de excitación para mantener el voltaje nominal con carga capacitiva.....	109
Figura 1.84 Corriente de armadura con carga capacitiva.....	110
Figura 1.85 Regulación de voltaje para una carga capacitiva.....	110
Figura 1.86 Diagrama de simulación de la prueba de sincronismo.....	111
Figura 1.87 Potencia activa y reactiva del generador mediante el sincronismo.....	111
Figura 1.88 Frecuencia e intensidad de campo durante el sincronismo.....	112
Figura 1.89 Voltajes nominales (sistema y generador) durante el sincronismo.....	112
Figura 1.90 Intensidades (sistema y armadura) durante el sincronismo.....	112

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1.1 Analogía de circuitos eléctricos y magnéticos.....	6
Tabla 1.2 Ecuación de transferencia de energía.....	12
Tabla 1.3 Sistema de conversión electromecánico.....	12
Tabla 1.4 Características de disparo de interruptores termomagnéticos.....	29
Tabla 1.4 Diagrama de flujo para puesta en servicio rápida del variador de frecuencia.....	32
Tabla 1.6 Inducciones que se usan en la construcción de rotores de polos salientes.....	38
Tabla 1.7 Tabla de selección de motores WEG.....	82
Tabla 1.8 Tabla de selección de variador de frecuencia SIEMENS.....	83
Tabla.1.9 Datos obtenidos en la prueba para determinar las pérdidas en el núcleo.....	90
Tabla 1.10 Datos obtenidos de la prueba de vacío.....	91
Tabla 1.11 Datos obtenidos de la prueba de corto circuito.....	91
Tabla 1.12 Datos obtenidos de la prueba con carga resistiva.....	93
Tabla 1.13 Datos obtenidos de la prueba con carga capacitiva.....	94
Tabla 1.14 Datos obtenidos de la prueba con carga inductiva.....	94
Tabla 1.15 Datos obtenidos de la prueba con carga (R, L, C) a diferentes potencias.....	95

## SIMBOLOGÍA

$F$  = Fuerza magnetomotriz

$N$  = Número de vueltas del bobinado

$I_{ex}$  = Corriente de excitación

$\Phi$  = Flujo magnético

$R$  = Reluctancia del circuito

$H$  = Intensidad del campo magnético producido por la corriente de excitación

$l$  = Longitud de la trayectoria magnética

$\mu$  = Permeabilidad magnética del material

$B$  = Densidad del flujo magnético resultante

$\mu_0$  = permeabilidad relativa del aire

$\lambda$  = Dispersión de flujo

$X_l$  = Reactancia Inductiva

$f$  = Frecuencia

$L_i$  = Inductancia

$p'$  = Números de polos

$P$  = Número de pares de polos.

$R_1$  = Resistencia efectiva del estator

$X_1$  = Reactancia de dispersión del estator

$P_{ent.}$  = Potencia de entrada del estator

$P_{ent.hierro}$  = Potencia en el entrehierro.

$P_{flecha}$  = Potencia de salida en la flecha

$\eta$  = Eficiencia

$n_{ph}$  = Número de fases del estator.

$I_1^{\wedge}$  = Corriente del estator en desfase.

$R_f$  = Resistencia por fase presentada al estator por la reactancia magnetizadora y el rotor

$X_f$  = Reactancia por fase presentada al estator por la reactancia magnetizadora y el rotor

$Z_f$  = Impedancia por fase presentada al estator por la reactancia magnetizadora y el rotor.

$V_1^{\wedge}$  = Voltaje terminal de línea a neutro en el estator en desfase.

$Z_{ent}$  = Impedancia de entrada.  
 $Kb_m$  = Factor de devanado del motor  
 $U$  = Tensión del primario o secundario  
 $I$  = Intensidad del primario o secundario  
 $m$  = Relación de transformación  
 $Y_o$  = Admitancia de excitación  
 $Z_L$  = Impedancia de carga  
 $Z_{eq}$  = Impedancia equivalente referida al secundario  
 $n$  = Número de revoluciones por minuto  
 $B_n$  = Densidad de flujo magnético.  
 $A_p$  = Área del polo.  
 $a_p$  = Ancho del polo.  
 $L_p$  = Longitud axial del polo.  
 $B_{pico}$  = Densidad de flujo magnético.  
 $\Phi_e$  = Flujo total por polo.  
 $L$  = Longitud del Rotor.  
 $r$  = Radio del Rotor.  
 $V_r$  = Velocidad periférica del rotor (m/s)  
 $A_c$  = Área de contacto de las escobillas (cm<sup>2</sup>)  
 $a_c$  = Ancho de contacto de la escobilla  
 $l_c$  = Longitud de contacto de la escobilla  
 $D_f$  = Diámetro del eje del motor  
 $K$  = Número de escobillas  
 $W_r$  = Peso del rotor  
 $P_e$  = Potencia de excitación.  
 $P$  = Potencia nominal del generador.  
 $I_e$  = Corriente de excitación.  
 $V_e$  = Voltaje de excitación  
 $N_r$  = Número de ranuras por polo y por fase  
 $k$  = Número de ranuras  
 $N_B$  = Número de bobinas del bobinado  
 $q$  = Número de fases

$G$  = Número de grupos por bobinado  
 $U_b$  = Número de bobinas por grupo  
 $x$  = Amplitud del grupo  
 $\gamma$  = Paso de principios del bobinado  
 $K_d$  = Factor de distribución  
 $K_p$  = Factor de paso  
 $P_{br}$  = Paso de bobina en ranuras  
 $N_{polo}$  = Numero de ranuras por polo  
 $K_b$  = Factor de devanado  
 $g$  = Longitud del entrehierro  
 $N_f$  = Número total de vueltas en serie en el devanado de campo  
 $W_m$  = Velocidad mecánica del rotor  
 $E_f$  = Voltaje inducido  
 $C_m$  = Carga magnética total  
 $C_e$  = Carga eléctrica total  
 $I_c$  = Corriente eléctrica por conductor  
 $N_c$  = Número total de conductores en la armadura.  
 $B_m$  = Carga magnética específica  
 $Q$  = Carga eléctrica específica  
 $D$  = Diámetro del estator  
 $P_c$  = Potencia aparente  
 $V_f$  = Voltaje inducido por fase  
 $I_f$  = Corriente de fase  
 $N_s$  = Velocidad síncrona del generador en r.p.s.  
 $N_c$  = Número total de conductores de la armadura  
 $\Delta t$  = Elevación de temperatura  
 $c$  = Coeficiente de enfriamiento  
 $S_d$  = Superficie de disipación  
 $\tau$  = Pérdidas a ser disipadas  
 $V_a$  = Velocidad periférica del rotor  
 $R_1$  = Resistencia del devanado a temperatura inicial  
 $R_2$  = Resistencia del devanado a temperatura final

$T_1$  = Temperatura inicial del devanado  
 $T_2$  = Temperatura final del devanado  
 $E_{a, b, c}$  = Voltajes instantáneos para cada fase  
 $E_m$  = Voltaje máximo instantáneo  
 $I_m$  = Corriente máxima  
 $r_a$  = Resistencia del arrollamiento de la armadura por fases  
 $X_s$  = Reactancia síncrona  
 $E_i$  = Voltaje interno de la máquina síncrona  
 $E_t$  = Voltaje en los terminales de la máquina síncrona  
 $I_a$  = Corriente de armadura en una de las fases  
 $Z_s$  = Impedancia de la máquina síncrona por fase  
 $E_f$  = Voltaje de armadura  
 $I_d$  = Corriente en el eje directo  
 $I_q$  = Corriente en el eje de cuadratura  
 $\varphi$  = Angulo de factor de potencia  
 $V_d$  = Voltaje en el eje directo  
 $E_a$  = Voltaje a plena carga  
 Reg. = Regulación de voltaje  
 $I_{cc}$  = Corriente de cortocircuito  
 $P_{arm}$  = Potencia de armadura  
 $P_{fr}$  = Pérdida de fricción en el rodamiento  
 $V$  = Velocidad periférica del rotor  
 $P_{fr.c}$  = Pérdidas por fricción entre los rodamientos y anillos colectores.  
 $P_{mect}$  = Pérdidas mecánicas totales  
 $V_o$  = Voltaje generado en vacío por el generador  
 $P$  = Potencia  
 $Z_{sat}$  = Impedancia síncrona Saturada  
 $Z_{s \text{ no sat}}$  = Impedancia síncrona no saturada  
 $R_{cd}$  = Resistencia efectiva por fase  
 $X_{l \text{ sat}}$  = Reactancia síncrona saturada  
 $X_{l \text{ no sat}}$  = Reactancia síncrona no saturada  
 $L_{sat}$  = Inductancia síncrona saturada

$L$  no sat = Inductancia síncrona no saturada

$X_d$  = Reactancia en el eje directo por fase

$X_q$  = Reactancia en el eje de cuadratura

$I_{cc}$  no sat = Intensidad de cortocircuito no saturada

## INTRODUCCIÓN

En la naturaleza se encuentra la energía bajo la forma de energía potencial o cinética, como las energías que se liberan de un combustible o la energía liberada de una reacción nuclear, o bien la energía acumulada de una presa hidráulica, o también la energía de un ahorro de agua o un ahorro de vapor, formas que rara vez encuentran una utilización directa, esto hace necesario que se transforme una forma de energía en otra con el objeto de obtener una utilización más racional y conveniente. Los elementos físicos en los cuales se realizan la transformación de una forma a otra toman el nombre de “Máquinas”. Las características particulares de las máquinas eléctricas es la presencia de una entrada y una salida, la entrada está constituida por las partes a través de las cuales la máquina recibe la energía del exterior bajo una forma y la salida esta constituida por dos partes a través de las cuales la energía se entrega bajo una forma distinta. La entrada y la salida permiten a la máquina intercambiar energía con el sistema externo y de esto hacia la máquina, Las partes activas de una máquina pueden ser estáticas o tener un determinado movimiento. Las máquinas que no tienen partes en movimientos son llamadas “estáticas” en tanto las otras son “dinámicas” y puede ser giratorio o alternativo o sea el tipo de movimiento. La falta de un banco de pruebas de generadores eléctricos que permita a los estudiantes de la carrera de ingeniería electromecánica reforzar sus conocimientos en lo que se refiere a la unidad de máquinas eléctricas, nos motivo a plantear este tema de investigación donde los estudiantes podran conocer el principio de funcionamiento de generadores síncronos y realizar prácticas de laboratorio que se le hacen a este tipo de máquinas. Con las prácticas realizadas los estudiantes podran conocer el comportamiento del generador cuando este se encuentre con o sin excitación y cuando trabaje en regimen aislado a diferentes factores de potencia, además se podrá conocer el comportamiento del generador cuando este se encuentre sincronizado con la red. Como parte de este proyecto tambien se realizó la simulacion de las practicas mediante software, donde se utilizó Matlab-Simulink, se eligió este programa por su versatilidad, dinamismo y realismo al momento de simulación. Este banco se lo construyó para que los estudiantes realicen las diferentes prácticas de una forma manual antes que automática, ya que de esta forma el estudiante se relacionará de una manera directa con el campo profesional.

## **PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA**

Al diseñar y construir un banco de pruebas de generadores eléctricos, para el Área de la Energía las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables de la Universidad Nacional de Loja se va a contribuir en el fortalecimiento de los conocimientos adquiridos por los estudiantes en las diferentes unidades de la carrera de Ingeniería en Electromecánica como: Máquinas Eléctricas I y II, Herramientas CAD II, y Circuitos II. Con este proyecto se logrará optimizar los conocimientos teóricos que posee el estudiante en las unidades anteriormente mencionadas y a su vez se logrará también insertarlos de alguna forma en el campo laboral práctico que como ingeniero electromecánico debe afrontar en el futuro.

En la Universidad Nacional de Loja, existen falencias en los laboratorios, del Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables, especialmente en las unidades mencionadas anteriormente. Frente a esto los principales directivos del A.E.I.R.N.N.R. con apoyo de la administración central de la Universidad han puesto en marcha la creación de un nuevo edificio de laboratorios, ya que se generarían nuevos proyectos de tesis con lo cual se favorecería de alguna manera a los estudiantes de las diferentes carreras de esta área.

## **ENUNCIADO DE LA PROBLEMÁTICA**

“Diseño y construcción de un banco para pruebas de caracterización de los principales parámetros de generadores eléctricos para el AEIRNNR de la Universidad Nacional de Loja.”

## **PROBLEMA GENERAL DE LA INVESTIGACION**

La falta de un banco de generadores eléctricos, que permita a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica realizar prácticas de laboratorio.

## **PROBLEMAS ESPECÍFICOS**

- ☞ Limitado conocimiento en lo concerniente a generadores eléctricos, por parte de los estudiantes carrera de Ingeniería Electromecánica del A.E.I.R.N.N.R.
- ☞ En el A.E.I.R.N.N.R. no existe un banco de generadores eléctricos, que permita a los estudiantes reforzar sus conocimientos teóricos-prácticos.

- ☞ La falta de prácticas de laboratorio, que permitan fortalecer los conocimientos teórico-prácticos de los estudiantes de la carrera, en lo referente a generadores eléctricos.
- ☞ La falta de claridad en el desarrollo de las prácticas de laboratorio realizadas en algunas unidades de la carrera

## **OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION**

### **Objetivo General**

- ☞ Diseñar y construir un banco de pruebas, con sus respectivas guías de laboratorio las mismas que permitan a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica realizar prácticas con generadores eléctricos.

### **Objetivos Específicos**

- ☞ Conocer la constitución y el funcionamiento de los generadores eléctricos más utilizados.
- ☞ Diseñar y construir un banco de pruebas de generación de energía eléctrica para el A.E.I.R.N.N.R de la Universidad Nacional de Loja.
- ☞ Demostrar a través de prácticas de laboratorio la validez y confiabilidad del banco de generación.
- ☞ Simular mediante el software de Matlab las prácticas de laboratorio del generador.

## **PLANTEAMIENTO DE LA HIPÓTESIS**

### **Hipótesis General**

- ☞ Con el diseño y construcción de un banco de pruebas con sus respectivas guías de laboratorio, los estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica lograrán realizar prácticas con generadores eléctricos.

### **Hipótesis específica**

- ☞ Al caracterizar conocer la constitución y funcionamiento de los generadores eléctricos se logrará determinar cuáles son los generadores más utilizados.

- ☞ Con el diseño y construcción de este banco de pruebas, se conseguirá que los estudiantes de la carrera realicen prácticas de laboratorio con generadores eléctricos.
- ☞ La experimentación del banco a construirse posibilitara demostrar su validez, confiabilidad y seguridad.
- ☞ Al simular mediante software las prácticas con generadores eléctricos se logrará dar mayor claridad al desarrollo a las mismas.

## CAPÍTULO I: REVISIÓN DE LITERATURA

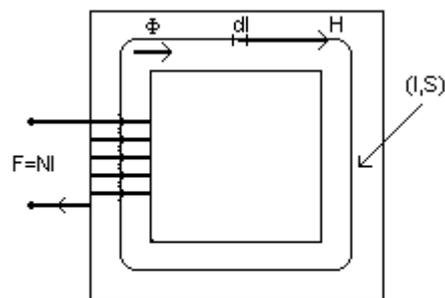
### 1.1 CIRCUITOS MAGNÉTICOS Y CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELECTROMECAÁNICA

#### 1.1.1 Introducción a los circuitos magnéticos

Un circuito magnético es una estructura compuesta en su mayoría de materiales magnéticos de alta permeabilidad. El material de alta permeabilidad produce flujo magnético que se limita a los patrones definidos por la estructura del núcleo, de la misma forma que las corrientes se limitan a la estructura de un circuito eléctrico. El núcleo está formado por una sección transversal uniforme y se excita por medio de un devanado de  $N$  vueltas que posee una corriente  $I$  amperes, este devanado produce un campo magnético en el núcleo.

#### 1.1.2 La ley de Ohm para los circuitos magnéticos

En un circuito eléctrico, el voltaje o fuerza electromotriz genera un flujo de corriente. En forma similar en un circuito magnético, quien genera un flujo magnético, es una fuerza denominada **fuerza magnetomotriz**. El campo magnético creado por la bobina es directamente proporcional a la corriente y al número de espiras o vueltas que se encuentran alrededor del núcleo (Fig.1.1).



*Fig. 1.1 Circuito magnético elemental*

$$F = NI = [\text{Amp} - \text{vuel}]$$

Ecuación 1.1

Donde:

$F \rightarrow$  Fuerza magnetomotriz

$N \rightarrow$  Número de vueltas del bobinado

$I \rightarrow$  Corriente de excitación

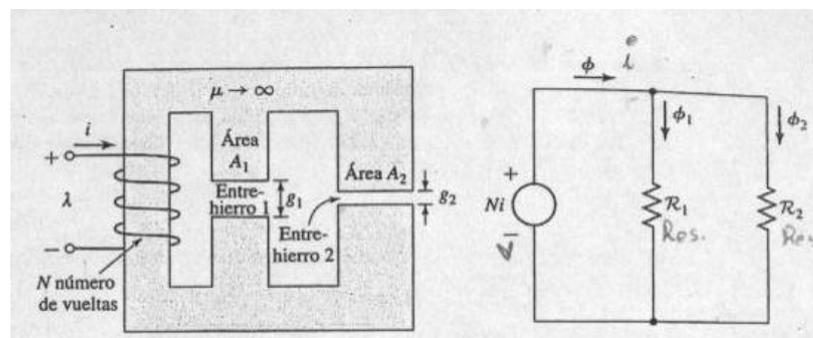
Esta ecuación indica claramente que un incremento en la cantidad de vueltas o en la corriente que pasa por el alambre producirá una mayor “fuerza” en el sistema para establecer líneas de flujo a través del núcleo.

### 1.1.3 Analogías entre circuitos eléctricos y circuitos magnéticos

*Tabla. 1.1 Analogía de circuitos eléctricos y magnéticos*

CIRCUITO ELECTRICICO		CIRCUITO MAGNETICO
voltaje ( $V$ )	$\longleftrightarrow$	Fuerza Magnetomotriz ( $F$ )
Corriente ( $I$ )	$\longleftrightarrow$	Flujo ( $\phi$ )
Resistencia ( $R$ )	$\longleftrightarrow$	Reluctancia ( $\mathcal{R}$ )
Conductancia ( $g$ )	$\longleftrightarrow$	Permanencia ( $P$ )
Conductividad ( $\sigma$ )	$\longleftrightarrow$	Permeabilidad ( $\mu_0$ ) *

FUENTE: Ing. Agustín Gutiérrez, Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas, **Pg.16**



*Fig. 1.2 Circuito magnético y circuito equivalente.*

En un circuito eléctrico, el voltaje aplicado causa el flujo de una corriente. De modo semejante, en un circuito magnético la fuerza magnetomotriz aplicada causa la producción de un flujo magnético  $\Phi$ . La relación entre voltaje y resistencia en un circuito eléctrico es la ley de ohm, de manera semejante, la relación entre fuerza magnetomotriz y reluctancia es:

$$\phi = F/R = [\text{Wb}]$$

Ecuación 1.2

Donde:

$F$  → Fuerza magnetomotriz

$\Phi$  → Flujo magnético

$R$  → Reluctancia del circuito

Las reluctancias en un circuito magnético obedecen las mismas reglas a que obedecen en un circuito eléctrico.

### 1.1.3.1 Intensidad de campo

La fuerza magnetomotriz por unidad de longitud se denomina *fuerza magnetizadora* y se expresa a través de la siguiente ecuación:

La sustitución para la fuerza electromotriz dará como resultado:

$$H = NI/l = \left[ \text{Amp} - \text{vuelts} / \text{m} \right] \quad \text{Ecuación 1.3}$$

Donde:

$H$  → Intensidad del campo magnético producido por la corriente de excitación

$l$  → Longitud de la trayectoria magnética.

Puede decirse que la intensidad de campo magnético  $H$  es una medida del "esfuerzo" que hace una corriente para crear un campo magnético. La intensidad del flujo magnético producido depende del material del cual esté hecho el núcleo. La relación entre la intensidad de campo magnético  $H$  y la densidad del flujo magnético resultante dentro de un material, está dada por la ecuación:

$$B = \mu H = \left[ \text{Wb} / \text{m}^2 \right] \quad \text{Ecuación 1.4}$$

Donde:

$H$  → Intensidad de campo magnético

$\mu$  → Permeabilidad magnética del material

$B$  → Densidad del flujo magnético resultante

### 1.1.4 Propiedades de materiales magnéticos

A través del uso de estos materiales es posible obtener altas densidades de flujo magnético con relativamente bajos niveles de fuerzas magnetizantes. Ya que las fuerzas magnéticas y la densidad de energía aumentan con los incrementos de la densidad de

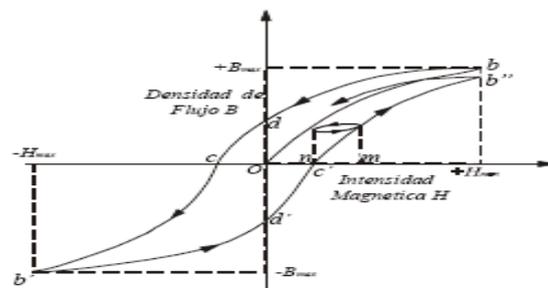
flujo, este efecto desempeña una parte importante en el funcionamiento de los dispositivos de conversión de energía.

Los materiales ferromagnéticos, compuestos generalmente por hierro y aleaciones de hierro con cobalto, tungsteno, níquel, aluminio y otros metales son los más utilizados. Estos materiales presentan algunas propiedades.

- Llegan a magnetizarse fuertemente en la misma dirección del campo magnético donde están colocados.
- La densidad de flujo en los materiales ferro magnéticos varía en forma no lineal con la intensidad magnética, con excepción de pequeños rangos donde la variación es lineal.
- Los materiales ferro magnéticos presentan saturación, histéresis y retentividad

1. **Saturación:** B varía linealmente con H para valores pequeños de H, si H tiende a incrementarse la variación de B gradualmente decrecerá. Para valores grandes de H la curva caerá es decir aunque H crezca rápidamente B prácticamente se mantendrá sin incrementarse. Esta característica es conocida como saturación.

2. **Histéresis:** Supongamos un medio lleno de material ferro magnético sujeto a una magnetización cíclica. Supondremos que el material está en un estado neutro esto es que no está magnetizado. La corriente en el embobinado es cero y ésta condición es representada por el punto o. Aumentamos la intensidad magnética H al incrementar la corriente en el embobinado de excitación, la densidad de flujo B se encuentra a lo largo de la curva “ob”, entonces para:  $H_{max} \rightarrow B_{max}$

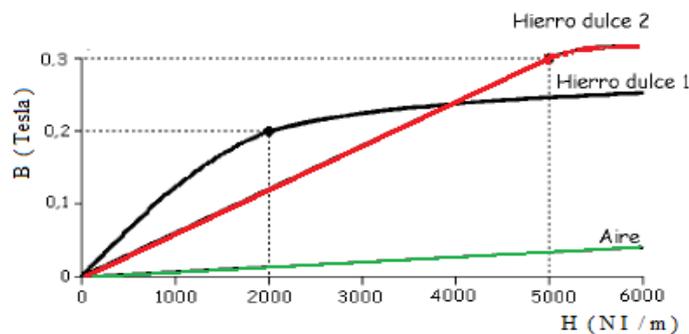


*Fig. 1.3 Curva de histéresis.*

Luego disminuimos gradualmente la corriente magnetizante ( $H$ ), la densidad de flujo a lo largo de la curva es diferente, vemos que para un valor específico de  $H$  el valor de  $B$  es grande, cuando  $H$  se disminuye que cuando se incrementa. Se dice entonces que el flujo se retrasa con respecto a la intensidad magnética. Esta característica de los materiales ferro magnéticos es conocida como HISTÉRESIS.

#### 1.1.4.1 Curva de magnetización

Es una curva que se utiliza para indicar cuanta densidad de flujo  $B$  se obtiene al aumentar la intensidad del campo  $H$ .



*Fig. 1.4 Curvas de magnetización.*

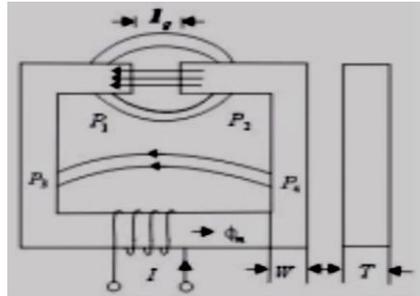
En este gráfico se aprecian las curvas de magnetización del aire y de dos tipos de hierro en las cuales se observa que la del aire es una recta y las correspondientes a los hierros no lo son. Esta diferencia se debe a que la relación entre la densidad de flujo  $B$  y la intensidad de campo  $H$  está dada por la siguiente fórmula.

Dado que para el aire  $\mu_r = 1$  y  $\mu_0$  es una constante igual a  $4\pi \times 10^{-7}$ , esto origina que la ecuación anterior se transforma en la ecuación de la recta, o sea  $B = \mu_0 H$ . Pero los otros materiales tienen una permeabilidad relativa diferente a uno, y tampoco es constante ya que varía en un rango de valores dependiendo del estado de magnetización del material los que las hace diferente a la del aire.

#### 1.1.5 Dispersión de flujo

Al tener la gran reluctancia del entrehierro, la diferencia de potencial magnético entre los puntos  $P_2$  y  $P_1$  puede ser lo suficientemente grande (aún si el flujo magnético  $\phi$  es pequeño) para que se esparzan las líneas de flujo que están cruzándolo, esto es llamado

efecto marginal. El salto de flujo de  $P_4$  a  $P_3$  recibe el nombre de flujo de dispersión. El efecto marginal hace que la “ $B$ ” en el entrehierro sea menor que la “ $B$ ” en la porción ferro magnética del núcleo, porque el área efectiva de la sección transversal del entrehierro es más grande que el área de la sección transversal de la porción ferro magnética del núcleo.



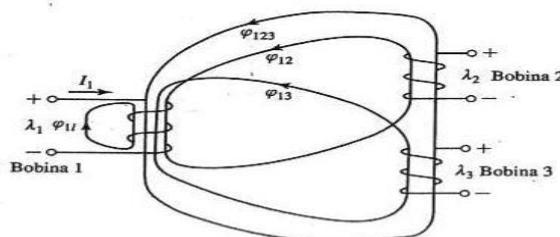
**Fig. 1.5** Efecto marginal y de dispersión de los entrehierros

En el caso de un transformador, un componente consiste en el flujo que vincula ambos devanados (flujo mutuo) y el otro componente consiste en el flujo de que vincula únicamente el devanado que crea el flujo (*Flujo de dispersión  $\lambda$* ).

$$\lambda = N\Phi = [\text{Wb}]$$

Ecuación 1.5

En máquinas eléctricas trifásicas se forman diferentes componentes de flujo creados por la corriente en cada devanado que los constituyen.



**Fig. 1.6** Flujo mutuo y de dispersión en un sistema trifásico producido por la corriente en la bobina 1

En este caso  $\Phi_{123}$  representa claramente el flujo mutuo que vincula los tres devanados,  $\Phi_{11}$  representa el flujo de dispersión ya que vincula únicamente al devanado 1. Sin embargo,  $\Phi_{12}$  Representa el flujo mutuo con respecto al devanado 2 a pesar de

representar el flujo de dispersión con respecto al devanado 3, mientras que  $\Phi_{13}$  representa el flujo mutuo en lo que respecta al devanado 3 y el flujo de dispersión con respecto al devanado 2.

### 1.1.6 Inductancia

La inductancia de un circuito se basa en inducir una fuerza electromotriz en el mismo circuito, debido a un cambio de corriente en el mismo, se llama autoinducción. El factor por el cual la razón del cambio de la corriente se multiplica para determinar el valor de la fuerza electromotriz inducida, se llama coeficiente de auto inducción o inductancia. A causa de la inductancia debida a los motores principalmente y a otras cargas, la corriente se retrasa respecto al voltaje, requiriéndose por lo tanto, más corriente para producir una cierta cantidad de potencia. Esto causa un factor de potencia atrasado, a causa de la inductancia en los circuitos suministradores, la corriente se retrasa. Este efecto se expresa como reactancia inductiva y para condiciones dadas se mide en ohm. Es la propiedad de un circuito eléctrico, o de dos circuitos vecinos, que determina la fuerza electromotriz inducida en uno de los circuitos por un cambio en la corriente que fluye en cualquiera de ellos. El efecto en el propio circuito se llama auto inductancia y el efecto en el circuito vecino se llama inductancia mutua, que es el coeficiente del flujo de inducción magnética que la corriente de un circuito determinado, induce en otro circuito, dividido entre la intensidad corriente en el primer circuito. La inductancia de las bobinas con nucleó de aire es constante, pero si intervienen materiales ferros magnéticos, la inductancia varía con la corriente, puesto que la permeabilidad es función de la corriente. La unidad de la inductancia es el Henry, teniendo la ecuación de la reactancia inductiva.

$$Xl = 2\pi fLi = [\Omega] \qquad \text{Ecuación 1.6}$$

Donde:

Xl = Reactancia de la bobina

F = Frecuencia

Li = Inductancia

### 1.1.7 Principios de la conversión de energía electromecánica

Existen diversos métodos para calcular la fuerza y el torque desarrollado en un dispositivo de conversión de energía. Los métodos usados aquí se basan en los principios de conservación de energía, el cual establece que la energía no puede ser creada ni destruida; ella puede ser cambiada únicamente de una forma a otra. Un sistema de conversión electromecánico tiene tres partes esenciales:

- Un sistema eléctrico
- Un sistema mecánico
- Un acoplamiento de campo

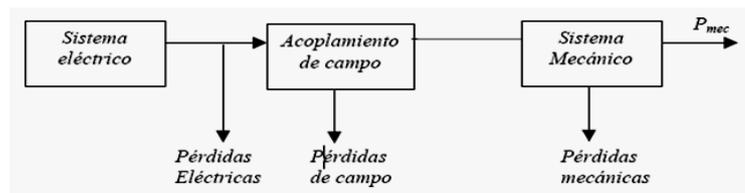
**Tabla. 1.2** Ecuación de transferencia de energía

$$\begin{array}{|c|} \hline \text{Energía} \\ \text{eléctrica} \\ \text{de} \\ \text{entrada} \\ \text{desde la} \\ \text{fuente} \\ \hline \end{array} = \begin{array}{|c|} \hline \text{Energía} \\ \text{mecánica} \\ \text{de salida} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{Incremento} \\ \text{de energía} \\ \text{almacenada} \\ \text{en el campo} \\ \text{de} \\ \text{acoplamiento} \\ \hline \end{array} + \begin{array}{|c|} \hline \text{Energía} \\ \text{de} \\ \text{pérdidas} \\ \hline \end{array}$$

**FUENTE:** Ing. Agustín Gutiérrez, Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas, **Pg.200**

La energía de pérdida eléctrica es la energía disipada por las corrientes que fluyen por los arrollamientos del convertidor de energía. Esta pérdida es conocida como las pérdidas  $i^2R$  en la resistencia (R) de los arrollamientos. Las pérdidas en el campo son las pérdidas disipadas en el núcleo cuando el campo magnético cambia en el núcleo magnético. Las pérdidas mecánicas son las pérdidas disipadas por fricción y ventilación en el movimiento de las partes mecánicas componentes. Todas estas pérdidas son convertidas en calor.

**Tabla. 1.3** Sistema de conversión electromecánico



**FUENTE:** Ing. Agustín Gutiérrez, Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas, **Pg.201**

### 1.1.8 Excitación con corriente continua y alterna

- Cuando la bobina con núcleo de hierro se excita con corriente continua la única pérdida que se presenta es la que se produce en la resistencia propia de la bobina. Se ha de notar que el núcleo no sufre calentamiento alguno.
- Cuando la bobina del núcleo se excita con corriente alterna, ésta (el núcleo) si sufrirá un calentamiento y por consiguiente se producirá unas nuevas pérdidas llamadas “Pérdidas en el núcleo” que son debidas a la variación del campo magnético (y flujo magnético), estas pérdidas se dan tanto por histéresis tanto como por corrientes parasitas.

## 1.2 MÁQUINAS ELÉCTRICAS

### 1.2.1 Introducción

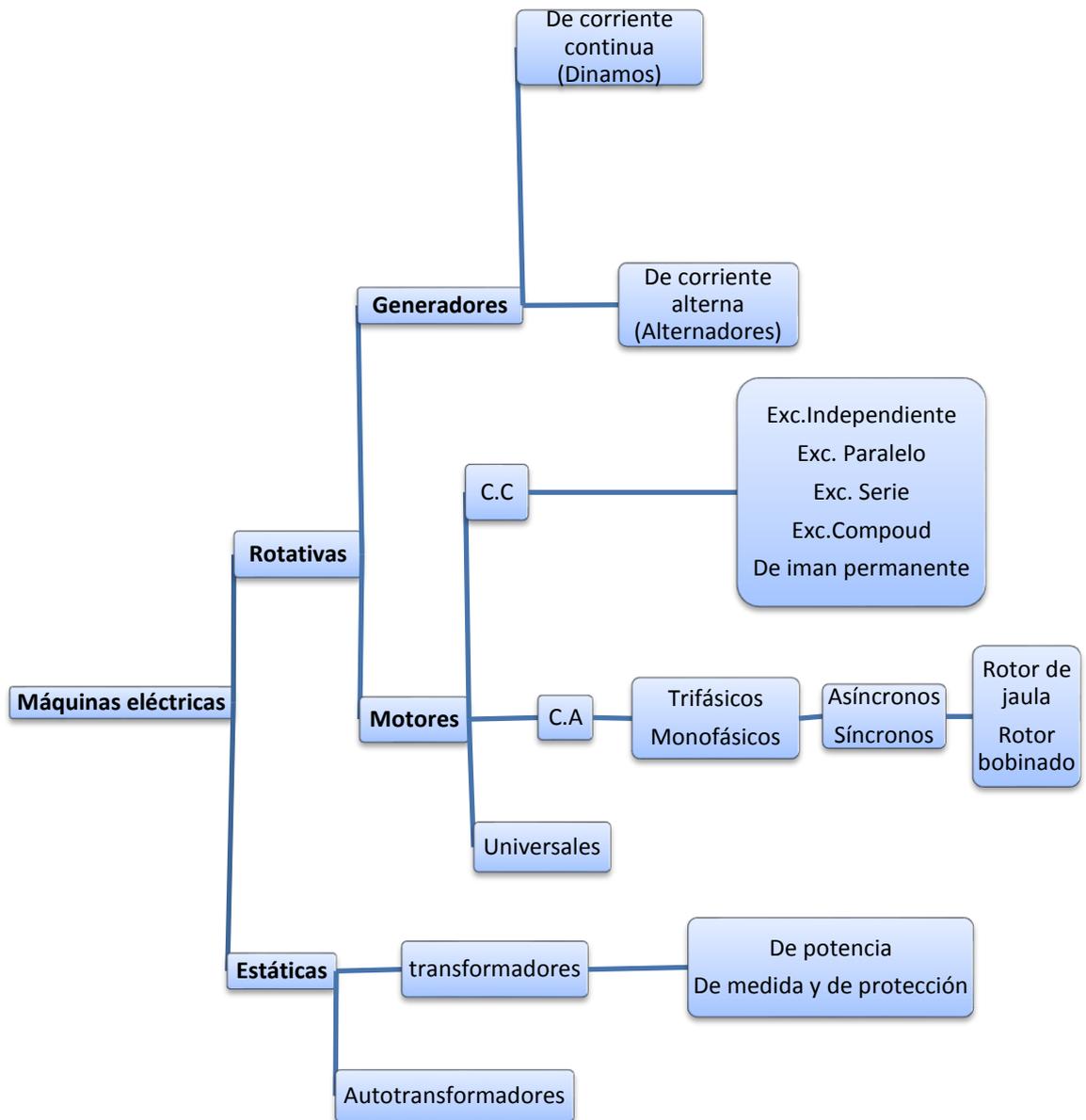
La conversión de energía electromagnética toma lugar cuando se producen cambios en la dispersión de flujo  $\lambda$  debida al movimiento mecánico. En las máquinas de rotación, los voltajes se generan en los devanados o en los grupos de bobinas al girar estos devanados de manera mecánica a través de un campo magnético, al girar mecánicamente un campo magnético por el devanado o al diseñar el circuito magnético de manera que la reluctancia varíe con la rotación del rotor.

En las máquinas de corriente alterna, como son las máquinas de inducción o síncronas, el devanado de armadura o inducido se encuentra en la porción estacionaria del motor conocido como estator, en cuyo caso a estos devanados también se les denominará devanados estatóricos.



*Fig. 1.7 Máquina Eléctrica*

### 1.2.1.1 Clasificación de máquinas eléctricas



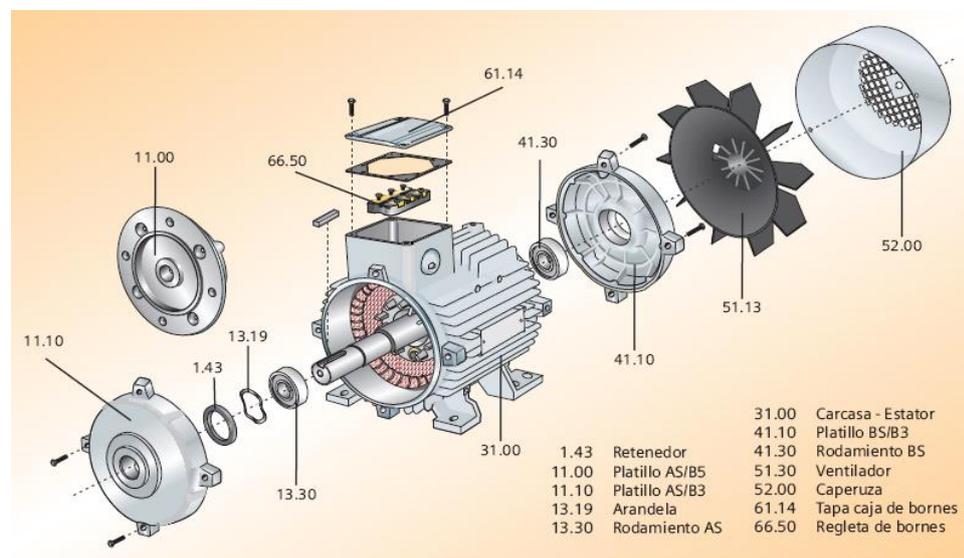
*Fig. 1.8 Clasificación general de las máquinas eléctricas*

### 1.2.2 Motores eléctricos

Un motor eléctrico es esencialmente una máquina que convierte energía eléctrica en movimiento o trabajo mecánico, a través de medios electromagnéticos. En magnetismo se conoce la existencia de dos polos: polo norte (N) y polo sur (S), que son las regiones

donde se concentran las líneas de fuerza de un imán. Un motor para funcionar se vale de las fuerzas de atracción y repulsión que existen entre los polos. De acuerdo con esto, todo motor tiene que estar formado con polos alternados entre el estator y el rotor, ya que los polos magnéticos iguales se repelen, y polos magnéticos diferentes se atraen, produciendo así el movimiento de rotación.

Dentro de las características fundamentales de los motores eléctricos, éstos se hallan formados por varios elementos, sin embargo, las partes principales son: el estator, la carcasa, la base, el rotor, la caja de conexiones, las tapas y los cojinetes.



*Fig. 1.9 Despiece de un motor eléctrico*

### 1.2.2.1 Motores Asíncronos

Los motores asíncronos o motores de inducción son las máquinas de impulsión eléctrica más utilizadas pues son sencillos, seguros y baratos. Los motores asíncronos se clasifican según el tipo de rotor en motores de: Rotor en jaula de ardilla (o motores con inducción en corto circuito) y motores de rotor bobinado y anillos rozantes, la máquina asíncrona trifásica representa un transformador en el caso que esté con rotor fijo.

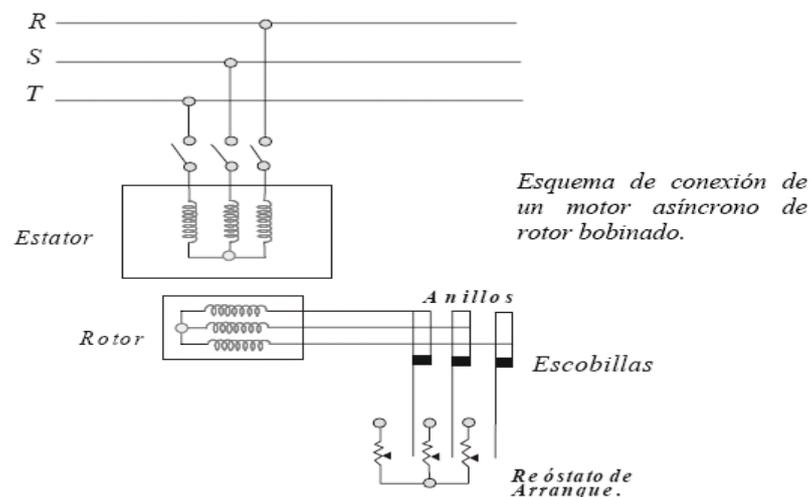
Se distingue del transformador normal sólo por la existencia de un devanado repartido en el estator y en el rotor y la existencia de un entrehierro (espacio de aire).

“La máquina asíncrona está sometida al principio de reciprocidad y puede funcionar en régimen de motor y en régimen de generador”. El estator de la máquina asíncrona trifásica es análogo al de una máquina síncrona trifásica y en él se coloca un devanado trifásico semejante, que se conecta a la red trifásica de corriente alterna.

Por su construcción del devanado rotórico tenemos dos tipos:

- **Con colector**
- **Sin colector**

La máquina asíncrona sin colector es la principal (la que más se usa) el rotor de la máquina asíncrona representa un cuerpo cilíndrico compuesto de chapas de acero al silicio con ranuras para instalar el devanado.



**Fig. 1.10** Motor asíncrono con rotor bobinado (esquema).

### 1.2.2.1.1 Principio de funcionamiento

El funcionamiento de una máquina asíncrona se basa en el principio de la interacción electromagnética entre el campo magnético giratorio, creado por un sistema de corrientes trifásicas suministrada desde la red al devanado del estator y las corrientes que se inducen en el devanado del rotor cuando el campo giratorio cruza sus hilos conductores. Así pues el trabajo de la máquina asíncrona por su esencia física es semejante al funcionamiento de un transformador considerando el estator como

devanado primario y el rotor como devanado secundario que en el caso general puede girar a una velocidad del campo giratorio " $\omega_m$ ".

Cuando el campo giratorio tiene carácter sinusoidal su velocidad de rotación es:

$$\omega_s = 120f/P = [\text{rpm}] \quad \text{Ecuación 1.6}$$

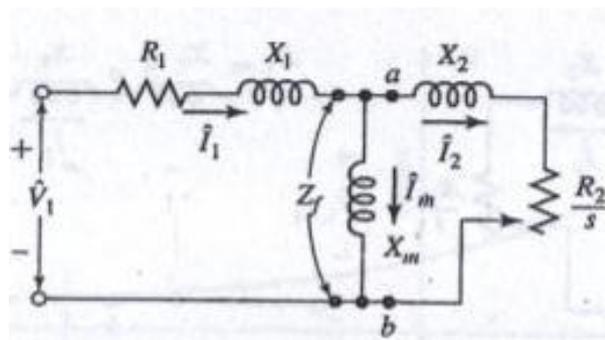
$P$  = Número de pares de polos.

$p$  = Números de polos

La interacción electromagnética entre ambas partes de la máquina asíncrona (sin colector) sólo es posible cuando las velocidades del campo giratorio ( $\omega_s$ ) del rotor ( $\omega_m$ ) son distintas es decir a condición de que ( $\omega_s \neq \omega_m$ ) puesto que si ( $\omega_s = \omega_m$ ) el campo sería inmóvil con respecto al rotor y en el devanado del rotor no se inducirá corriente alguna, de acuerdo a la relación entre las velocidades  $\omega_s$  y  $\omega_m$  la máquina asíncrona puede funcionar como:

- Régimen de motor
- Régimen de generador
- Régimen de freno electromagnético

#### 1.2.2.1.2 Análisis del circuito equivalente



*Fig. 1.11 Circuito equivalente de un motor asíncrono*

En las máquinas de inducción polifásicas, las ondas de flujo y la fuerza magnetomotriz puede transformarse con facilidad en un circuito equivalente de estado estable,

considerando que las máquinas trifásicas están conectadas Y, de modo que las corrientes sean valores lineales y los voltajes siempre sean valores de línea neutro.

En primer se lugar considera las condiciones en el estator. El voltaje en el terminal del estator difiere de las fuerzas contra electromotrices por caída de voltaje en la impedancia de dispersión del estator.

$$Z_1 = R_1 + jX_1 = [\Omega] \quad \text{Ecuación 1.7}$$

Donde  $R_1$  es la resistencia efectiva del estator y  $X_1$  Reactancia de dispersión del estator. El circuito equivalente puede utilizarse para determinar una amplia variedad de características del desempeño de máquinas de inducción en condiciones de estado estable. Esta incluye variaciones de corriente, velocidad y pérdidas a medida que cambian tanto los requerimientos de carga – par torsión, como también el par de arranque y el par máximo. El par de salida de la flecha para el trabajo útil de la máquina es:

$$T_{flecha} = P_{flecha} / P_{(ent.)} = [\text{N m}] \quad \text{Ecuación 1.8}$$

$$P_{flecha} = P_{mec} - P_{rotor} = [\text{Watt}] \quad \text{Ecuación 1.9}$$

$$P_{mec} = (1 - s)P_{ent.hierro} = [\text{Watt}] \quad \text{Ecuación 1.10}$$

$$P_{ent.hierro} = n_{ph} I_1^2 R_f = [\text{Watt}] \quad \text{Ecuación 1.11}$$

$$P_{rotor} = sP_{ent.hierro} = [\text{Watt}] \quad \text{Ecuación 1.12}$$

$$P_{ent.} = n_{ph} [V_1 \wedge I_1 \wedge *] = [\text{Watt}] \quad \text{Ecuación 1.13}$$

$$I_1 \wedge = V_1 / Z_{ent} = [\text{Amp}] \quad \text{Ecuación 1.14}$$

$$Z_f = Z_{ent} - (R_1 + jX_1) = (R_f + jX_f) = [\Omega] \quad \text{Ecuación 1.15}$$

Donde:

$P_{ent.}$  → Potencia de entrada del estator.

$P_{ent.hierro}$  → Potencia en el entrehierro.

$P_{flecha}$  → Potencia de salida en la flecha.

$n_{ph}$  → Número de fases del estator.

$I_1^{\wedge}$  → Corriente del estator en desfase.

$R_f$  → Resistencia por fase presentada al estator por la reactancia magnetizadora y el rotor

$X_f$  → Reactancia por fase presentada al estator por la reactancia magnetizadora y el rotor

$Z_f$  → Impedancia por fase presentada al estator por la reactancia magnetizadora y el rotor.

$V_1^{\wedge}$  → Voltaje terminal de línea a neutro en el estator en desfase.

$Z_{ent}$  → Impedancia de entrada.

### 1.2.2.1.3 Control de velocidad de los motores de inducción

Un motor de inducción es esencialmente un motor de velocidad constante cuando está conectado a una fuente de potencia de voltaje y frecuencia constante. La velocidad de operación es muy cercana a la velocidad síncrona. Si el torque de carga se incrementa la velocidad cae en pequeña cantidad. Esta es la razón por la cual se le usa frecuentemente en sistemas de trabajo de velocidad constante. Muchas aplicaciones industriales, sin embargo requieren diversas velocidades ó un rango continuo ajustable de velocidades.

Por ésta razón la velocidad del motor puede ser variada cambiando la frecuencia de la fuente. La aplicación de este método de control de velocidad requiere un variador de frecuencia, estos equipos rectifican a corriente directa la corriente de alimentación de corriente alterna, pero esta corriente es invertida nuevamente a corriente alterna a frecuencias variables, generalmente entre 10 y 120Hz, que es la que da el motor conectado su velocidad variable. Sabemos que el voltaje eficaz por fase, para un arrollamiento distribuido por fase es:

$$E = 4,44 f N \Phi_m K b_m = [\text{Volts}] \quad \text{Ecuación 1.16}$$

Donde:

$N$  → Número de vueltas por fase

$K b_m$  → Factor de devanado del motor

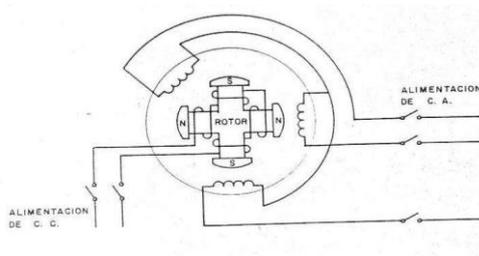
$\Phi_m$  → Flujo magnético del motor

El flujo del motor es:

$$\Phi_m = E / f \rho = [\text{Wb}] \quad \text{Ecuación 1.17}$$

Para evitar alta saturación en el sistema magnético, el voltaje terminal del motor podría ser variado en proporción a la frecuencia. Este tipo de control es conocido como constante voltios por hertz.

### 1.2.2.2 Motores síncronos



**Fig. 1.12** Motor síncrono

Un motor síncrono tiene el mismo aspecto constructivo de un generador síncrono y de hecho un generador síncrono podría trabajar como motor síncrono alimentándolo con corriente alterna y excitándolo con corriente directa, en el caso de un motor síncrono la estructura del campo (rotor) se alimenta con corriente continua en forma semejante a la del generador, mientras que en el devanado del estator se conectan a una alimentación de corriente alterna, o sea que se requiere de dos fuentes de alimentación de corriente alterna y corriente directa.

La corriente directa para la excitación del rotor se puede tomar de una fuente independiente que puede ser a base de generador de corriente continua, o bien en el caso de motores que operan con altas velocidad de excitatrices acopladas directamente al eje del rotor. Los motores síncronos se puede decir que por lo general se construyen de polos salientes que se conectan para dar una polaridad alterna. El número de polos del rotor debe corresponder a los del estator

#### 1.2.2.2.1 Aplicaciones

- En las centrales eléctricas y en las subestaciones en paralelo a las barras del sistema para mejorar el factor de potencia.

- En las industrias que tienen un elevado número de motores de inducción, es posible usarlos como una de las alternativas para mejorar el factor de potencia.
- Al final de algunas líneas de transmisión para controlar el voltaje mediante el procedimiento de variar su excitación.
- Como elemento de accionamiento de grandes cargas como por ejemplo molinos de cemento, molinos textiles, molinos de hule y en la industria minera.

#### 1.2.2.2.2 Ventajas y desventajas

##### 1.) Ventajas

- El factor de potencia se puede variar como sea requerido.
- Puede dar velocidad constante de condiciones de vacío a condiciones de plena carga.
- La potencia varía linealmente con el voltaje.

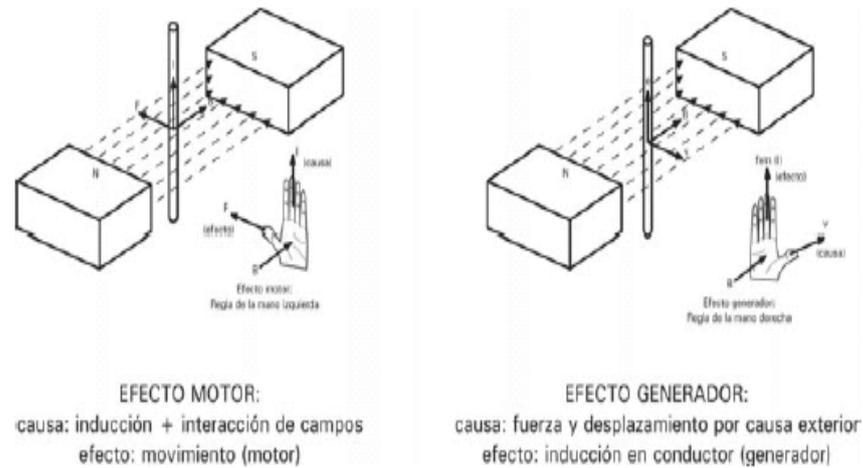
##### 2.) Desventajas

- No puede ser usado para aplicaciones en donde se requiera velocidad variable ya que no tiene posibilidades de ajustar su velocidad.
- Requiere de una excitación de CC que se debe de proveer en algunos casos de una fuente externa.
- No puede arrancar bajo carga ya que su par de arranque es cero.
- Puede salir de sincronismo y parar cuando se sobrecarga.
- Requiere de anillos colectores y escobillas.
- Tienen la tendencia a oscilar.

#### 1.2.3 Generadores eléctricos.

Los generadores eléctricos son máquinas que transforman en energía eléctrica en otras formas de energía, los de mayor importancia son los generadores giratorios en los cuales se utiliza la energía mecánica de los motores térmicos o hidráulicos que le dan y mantienen un movimiento giratorio. Las características eléctricas principales que caracterizan a un generador son: El voltaje generado en los terminales y la corriente que se puede entregar, esta puede ser alterna o continua. Los generadores de corriente

alterna pueden ser monofásicos o trifásicos aun cuando en la práctica los generadores trifásicos son los más utilizados por razones técnicas y económicas de acuerdo a la estructura de los sistemas eléctricos, estos también pueden ser síncronos o asíncronos, siendo los más utilizados los generadores síncronos.



*Fig.1.13 Regla de la mano derecha (motores), Regla de la mano izquierda (generadores)*

### 1.2.3.1 Generadores síncronos

Los generadores síncronos operan bajo la base de la ley de Faraday, es decir, si el flujo cambiante en el tiempo (proporcionado por el rotor) eslabona una bobina, se induce un voltaje.

La energía eléctrica se obtiene principalmente de generadores síncronos, los generadores síncronos pueden también funcionar como motor síncrono, la denominación de generadores síncronos son que al funcionar el rotor de la máquina girara a la misma velocidad que el campo giratorio del estator o sea en sincronismo.

En la generación de energía eléctrica se suelen montarse varios generadores en paralelo para alimentar la red de suministro de energía. La cantidad de energía generada puede adaptarse a la demanda haciendo que en cada instante solo funcione el número de generadores necesarios y cuando aumenta la demanda de energía se pone en funcionamiento mas generadores entrando en sincronismo con la red.

Para la conexión adicional en paralelo de un nuevo generador solo puede realizar una vez que:

- La tensión en bornes y la tensión de la red coincidan
- La frecuencia del generador y la frecuencia de la red sean iguales
- Se tenga el mismo orden de sucesión de fases
- Se tenga el mismo desfase que en la red.

#### **1.2.4 Transformadores eléctricos**

Un transformador se compone de dos o más devanados acoplados por medio de un flujo magnético mutuo. El principal, se conecta a una fuente de voltaje alterna, se produce un flujo alterno cuya amplitud dependerá del voltaje aplicado y el número de vueltas. La parte fundamental en el funcionamiento del transformador requiere únicamente de la existencia del flujo mutuo con variación temporal compartido por ambos, este hecho puede ocurrir en dos devanados acoplados en aire, debido a que el flujo se mantiene dentro de un patrón definido de alta permeabilidad que une ambos devanados. Este transformador comúnmente se lo denomina transformador con núcleo de hierro.

Para reducir las pérdidas de Eddy en el núcleo al igual que en los motores y generadores, el circuito magnético generalmente está compuesto de una pila de láminas delgadas.

##### **1.2.4.1 Características**

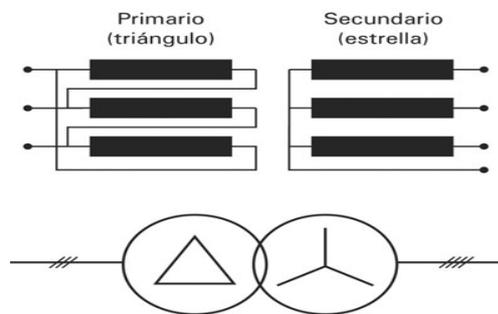
- Es una máquina estática de corriente alterna que se basa en la producción de f.e.m. por variación de flujo (es decir, sin movimiento relativo de inductor e inducido).
- Tiene por objeto convertir una potencia eléctrica cambiando sus parámetros tensión – intensidad
- La tensión de salida está desfasada 180° respecto a la de entrada,
- Consta de un arrollamiento de entrada, llamado primario, un arrollamiento de salida, llamado secundario, y un circuito magnético que los une constituido por el núcleo

### 1.2.4.2 Transformadores de tensión.

Usados en todo el sistema de distribución de energía. Estos transformadores están distribuidos a lo largo de toda la red eléctrica.

Los de las centrales generadoras elevan la tensión hasta los valores de distribución, 380 Kv, por ejemplo. Después, en la proximidad de los puntos de utilización, otros transformadores bajan la tensión, en pasos sucesivos, hasta los valores usuales de 400/230 V.

Los transformadores trifásicos suelen tener el primario en triángulo y el secundario en estrella, para poder conectar el neutro.



**Fig.1.14** Conexión de los transformadores

La ecuación fundamental de un transformador ideal es:

$$U_p I_p = U_s I_s \quad \text{Ecuación 1.18}$$

$$U_p / U_s = I_s / I_p = N_p / N_s \quad \text{Ecuación 1.19}$$

Donde:

U → Tensión del primario o secundario

I → Intensidad del primario o secundario

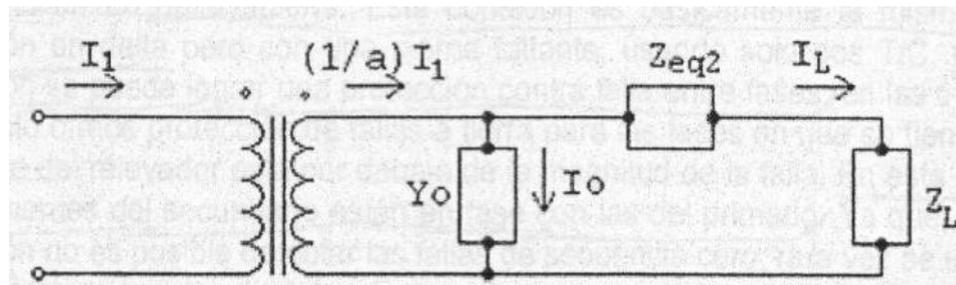
N → Número de espiras del primario o secundario

m → Relación de transformación.

### 1.2.4.3 Transformadores de corriente

Los transformadores de corriente se utilizan para tomar muestras de corrientes de la línea y reducirlas a un nivel seguro y medible, para las gamas normalizadas de instrumentos, aparatos de medida, u otros dispositivos de medida y control.

Los valores nominales de los transformadores de corriente se definen como relaciones de corriente primaria a corriente secundaria. Unas de las relaciones típicas de un transformador de corriente podrían ser: 600/5; 800/5; 1000/5



*Fig.1.15 Circuito equivalente de un T/C*

Donde:

$Y_0$  → Admittancia de excitación

$Z_L$  → Impedancia de carga

$Z_{eq}$  → Impedancia equivalente referida al secundario

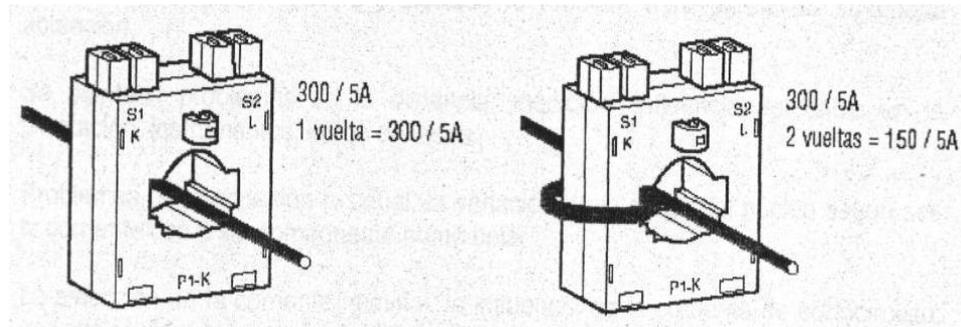
$I_0$  → Corriente de excitación

#### 1.2.4.3.1 Características particulares de los T/C

Los T/C se conectan en serie en el circuito, y deben ser capaces de soportar las sobre corrientes que se presentan, y que dependen del diseño de la instalación eléctrica. Entre las características eléctricas principales del T/C son:

- Tensión nominal, aislamiento
- Sobrecalentamiento permanente
- Sobre corriente térmica
- Resistencia electrodinámica.

Son interesantes ciertas características que están relacionadas con la forma constructiva o características de detalle del aparato. Puede ser necesario que el transformador tenga varias relaciones de transformación, esto puede lograrse por cambio de conexión en el primario, o por derivaciones adecuadas en el secundario, y la solución adoptada afecta la forma del arrollamiento y sus características de saturación.



**Fig.1.16** Relación de transformación de un T/C.

### **1.3 DISPOSITIVOS DE PROTECCION, REGULACION, CONTROL Y MEDIDA.**

#### **1.3.1 Interruptor magnético.**

Dispositivo de corte de la corriente en el que se apaga el arco por medio de un campo magnético.

#### **1.3.2 Interruptor manual**

Dispositivo de corte de la corriente eléctrica operado manualmente.

#### **1.3.3 Interruptor termo magnético**

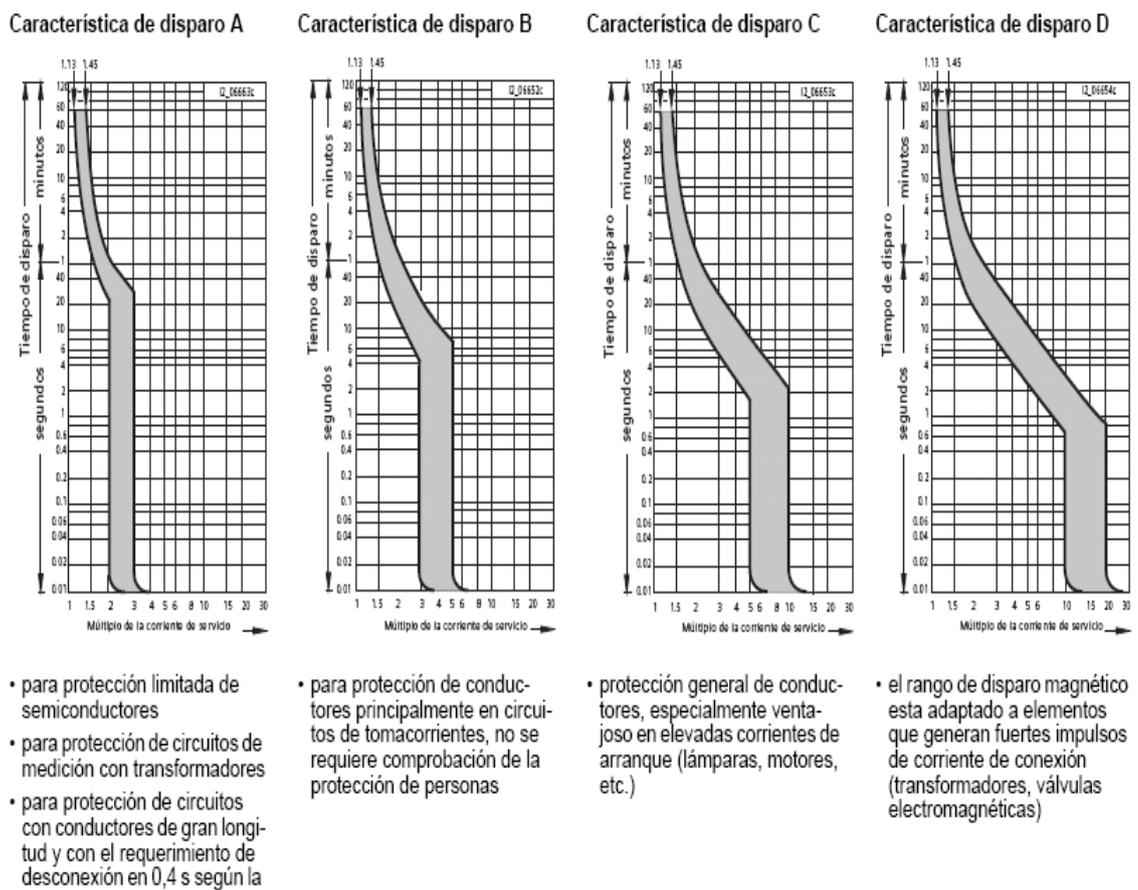
Los interruptores termo magnéticos se utilizan, en primer término, para proteger contra sobrecargas y cortocircuitos a los cables y conductores eléctricos. De esa manera asumen la protección de medios eléctricos contra calentamientos. Bajo determinadas condiciones los interruptores termo magnéticos también garantizan la protección contra descargas peligrosas por tensiones excesivas de contacto originadas por defectos de aislamiento. Por medio de los ajustes fijos de corrientes de diseño también se posibilita una protección restringida de motores eléctricos. Para cada caso de aplicación se dispone de distintas características de disparo. Para las aplicaciones en la industria y en instalaciones eléctricas se complementan los interruptores termo magnético con componentes adicionales de sencillo montaje acoplado, como por ejemplo: contactos auxiliares, contactos de señalización de fallas o alarma, bobinas de apertura, bobinas de mínima tensión, bloques diferenciales y accesorios de fácil montaje, como sistemas de barras colectoras y piezas de montaje.

Los interruptores termo magnéticos disponen de un disparador térmico (bimetal) con retardo, dependiente de la sobrecarga en función del tiempo, para sobre intensidades bajas; y un disparador electromagnético sin retardo para sobre intensidades mayores y de cortocircuito.

### 1.3.3.1 Principio de funcionamiento

Debido a la extrema velocidad de separación de los contactos en caso de fallas y a la rápida extinción en las cámaras apaga chispas, del arco voltaico generado, los interruptores termo magnéticos desconectan con seguridad, limitando fuertemente la intensidad de la corriente. Con ello se bajan, por lo general, los valores límites admisibles de  $I^2 = t$

**Tabla 1.4** Características de disparo de interruptores termomagnéticos



FUENTE: Manual de Siemens,

### 1.3.4 Potenciómetro

Son dispositivos que permiten reducir la intensidad de luz de lámparas incandescentes o halógenas con transformador o balastos electrónicos, el principio de funcionamiento, se basa en el control de potencia que se logra variando el ángulo de conducción de un triac, de 30° a 160°. Algunos Dimer pueden ser contralados remotamente a través de

controladores y protocolos especiales. En el caso de la iluminación para escenarios uno de los protocolos más utilizados es DMK, que es un protocolo de comunicaciones usado para controlar la iluminación de escenarios, o DMX512, el cual permite que la intensidad de las luces convencionales pueda ser sincronizada con las luces de efectos especiales, máquinas de humo, etc.

Las principales ventajas que ofrece este tipo de dispositivo son: Ahorro de luz y aumento de la vida útil de las lámparas.

### 1.3.5 Variador de frecuencia (SINAMICS G110)



*Fig.1.17 Variador de frecuencia.*

Los convertidores SINAMICS G110 son convertidores de frecuencia para regular la velocidad en motores trifásicos. Los diferentes modelos que se suministran cubren un margen de potencia de 120 W a 3,0 Kw en redes monofásicas. Los convertidores están controlados por microprocesador y utilizan tecnología IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) de última generación. Esto los hace fiables y versátiles. Un método especial de modulación por ancho de impulsos con frecuencia de pulsación seleccionable permite un funcionamiento silencioso del motor. Extensas funciones de seguridad ofrecen una protección excelente tanto del convertidor como del motor. Con sus ajustes por defecto realizados en fabrica, SINAMICS G110 es ideal para una gran gama de aplicaciones sencillas de control de motores V/f. Haciendo uso del gran número de parámetros de ajuste de que dispone, también puede utilizarse SINAMICS G110 en aplicaciones más avanzadas para control de accionamientos. Los valores de parámetros

para el SINAMICS G110 se pueden modificar con el panel BOP (Basic Operator Panel) o bien mediante la interface USS. SINAMICS G110 existe en dos variantes:

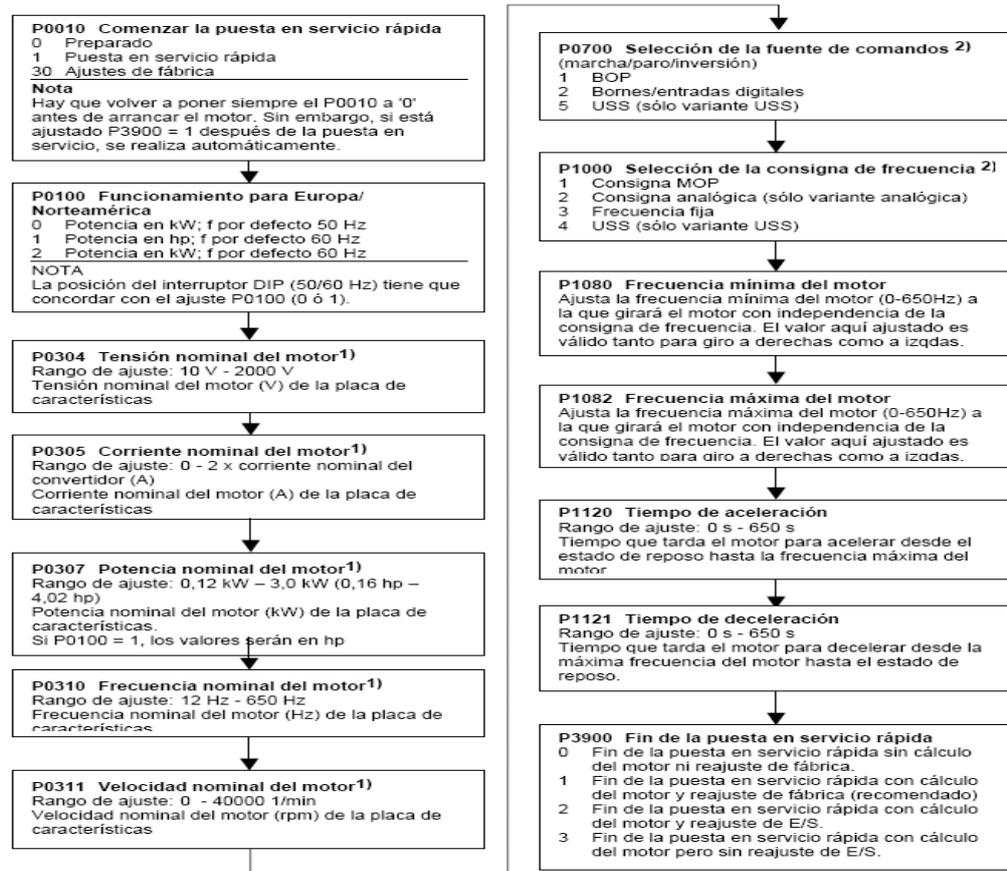
- Variante USS
- Variante analógica

Ambos modelos con o sin filtro EMC y disipador plano. El SINAMICS G110 puede utilizarse tanto en aplicaciones donde se encuentre aislado como integrado en sistemas de automatización.

### **Características de protección**

- Protección sobretensión / subtensión
- Protección de sobre temperatura para el convertidor
- Protección de defecto a tierra
- Protección de cortocircuito
- Protección térmica del motor por  $I^2t$
- Protección contra la pérdida de estabilidad (vuelco) del motor.

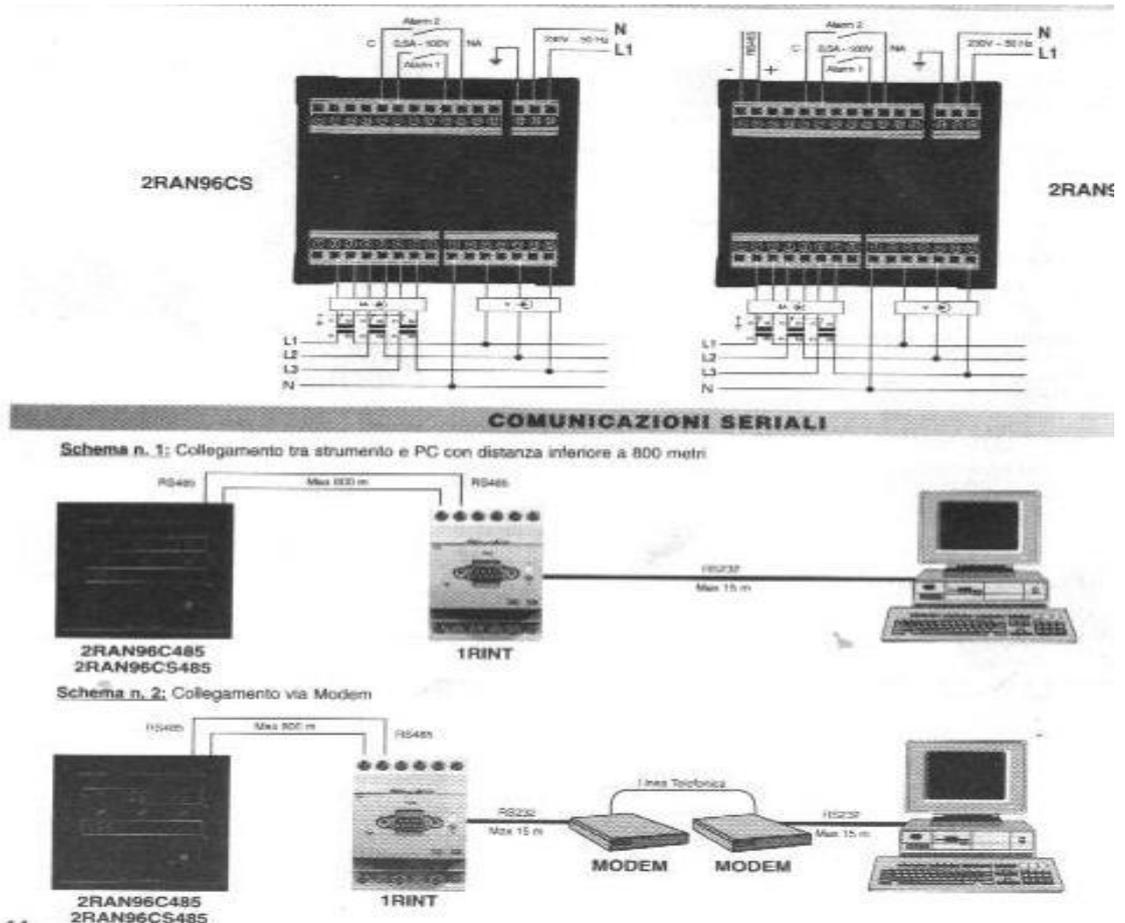
**Tabla. 1.5** Diagrama de flujo para puesta en servicio rápida del variador de frecuencia



**FUENTE:** Manual SINAMICS G110. Pg.50

### 1.3.6 Central de medidas (REVALCO 2RAN96C485)

La central de medida (**2RAN96C485**) es un módulo que nos proporciona mediciones para circuitos trifásicos como: voltaje, intensidad, potencia, energía, frecuencia y factor de potencia, dependiendo de las cargas instaladas en el circuito nos proveerá valores establecidos. Además puede ser monitoreado desde un PC a través de un interface con un cable RS485. Este módulo para sus mediciones se debe utilizar transformadores de corriente con relación del secundario del T/C de 5Amp.



*Fig.1.18 Conexión y comunicación del central de medidas*

### 1.3.7 Amperímetro

Es un dispositivo que permite medir intensidad de corriente eléctrica, presentado directamente sobre su escala calibrada las unidades empleadas para ello se denomina amperios o fracciones de amperio los amperímetros se caracterizan por:

- Tener una baja resistencia
- Se los conectan en serie con el circuito a medir.

Su utilización es muy amplia ya que con independencia de su propia aplicación directa de medida, también se emplea como base para la construcción de otros instrumentos. Su funcionamiento está basado en uno de los principios fundamentales del electromagnetismo. Estos instrumentos de medida pueden ser: De bobina móvil y de hierro móvil.

Normalmente los amperímetros de bobina móvil son utilizados en las mediciones de corriente continua, en las fuentes de alimentación de laboratorios y en convertidores de corriente continua en alterna.

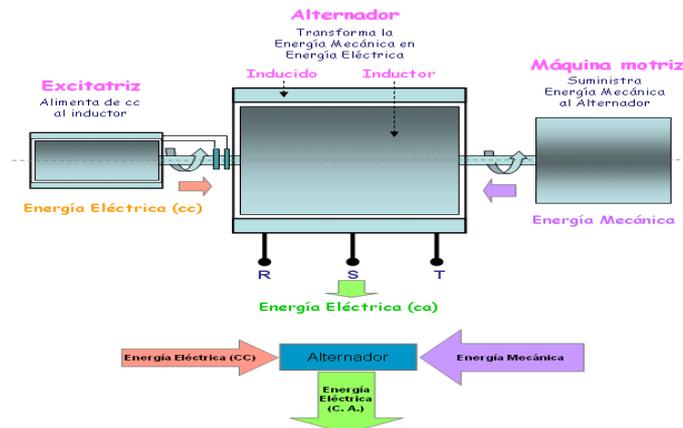
### 1.3.8 Voltímetro

Miden diferencia de potencial (voltaje) entre los puntos en los cuales se conectan. Al igual que el amperímetro ideal, el voltímetro ideal no debería hacer cambiar la corriente y el voltaje en el circuito que se está midiendo. Esta medición ideal del voltaje solo se puede alcanzar si el voltímetro no toma corriente alguna del circuito de prueba. Sin embargo, la mayoría de los voltímetros reales trabajan tomando una corriente pequeña, pero finita y por lo mismo también perturba el circuito de prueba hasta cierto grado. Los voltímetros se caracterizan por:

- Tener una resistencia alta.
- Se los conectan en paralelo con el circuito a medir.

## 1.4 CONCEPTOS GENERALES PARA LA CONSTRUCCION DE UN GENERADOR SÍNCRONO

### 1.4.1 Generalidades de un Generadores síncronos



*Fig.1.19 Diagrama los tipos de energía que actúan en un generador síncrono*

El generador síncrono es una máquina rotatoria de corriente alterna que convierte la energía mecánica (energía proporcionada por un primotor) en energía eléctrica, la misma que puede ser utilizada de acuerdo a nuestra conveniencia, esta puede ser polifásica o monofásica.

#### 1.4.1.1 Principio de funcionamiento

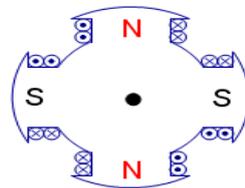
- La excitatriz alimenta de corriente directa al rotor, en donde se crea un campo magnético constante, por la corriente directa que circula por el arrollamiento del rotor.
- El rotor gira a un determinado número de revoluciones por minuto, el mismo que es impulsado por la máquina motriz o el primotor.
- El campo magnético que se creó en el rotor gira a la misma velocidad de giro del rotor.
- Este campo magnético giratorio induce tensiones, en los devanados del estator con una determinada frecuencia.
- Al conectarle una carga al generador, esta hace que circule una corriente por los devanados del estator.

- La circulación de esta corriente crea un campo magnético giratorio en el estator o lo que se conoce con el nombre de reacción del inducido.
- El campo magnético resultante en el generador es la suma de los dos campos inductor e inducido.
- La tensión en los bornes del generador es distinta a la tensión inducida por el campo magnético giratorio creado en el rotor, esto se debe a las caídas de tensión en el interior del generador, estas caídas se deben a la resistencia de los devanados del estator y a la reactancia síncrona.

## 1.4.2 Partes Constitutivas

La máquina síncrona o en nuestro caso el generador síncrono está constituido por un estator en el que se aloja el arrollamiento de la armadura o inducido, un rotor bipolar o multipolar en el que se encuentra el campo inductor el cual es excitado por medio de la circulación de corriente directa.

### 1.4.2.1 Rotor



*Fig.1.20 Rotor de polos salientes*

“Es el sistema inductor del generador síncrono, esta aloja a los polos magnéticos y a su bobinado de excitación de corriente continua, quienes conjuntamente crean un flujo magnético inductor. “El circuito de excitación de los polos del rotor se alimenta de un sistema de anillos colectores que giran naturalmente con el rotor y a los cuales llega la alimentación de corriente continua proporcionada por la fuente de excitación de la máquina” .<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Para una mayor aclaración de el circuito de excitación véase, en libro Curso de Máquinas Síncronas: Ing. Gilberto Enríquez Harper, 1980, pagina. 20

El rotor de una máquina síncrona puede ser de polos salientes o de polos lisos, con incidencia directa de la velocidad de rotación del rotor es decir el tipo de rotor de un generador síncrono depende directamente de la velocidad de giro del mismo, en cualquier caso la frecuencia que se genera depende del número de polos y de la velocidad de giro del rotor, y está dada por la siguiente ecuación.

$$f = P n / 60 = [Hz] \quad \text{Ecuación 1.20}$$

Donde:

$f$  → Frecuencia en Hz.

$n$  → Número de revoluciones por minuto.

$P$  → Número de par de polos.

#### 1.4.2.1.1 Rotor de Polos Salientes

Al inductor de polos salientes se lo conoce con el nombre de rueda polar, este lleva los polos fijados radialmente sobre la superficie externa de una corona de acero, la cual está fijada directamente a un árbol central.

Este tipo de rotor se emplea en la construcción de generadores que operan con velocidades no muy elevadas, básicamente se los emplea en las centrales hidroeléctricas. Aunque existen excepciones como en el caso de nuestro generador que es un generador síncrono de polos salientes que opera a una velocidad de 3600 rpm, velocidad alta en relación a la velocidad normal de funcionamiento de este tipo de rotores, Cabe indicar que la razón por la que se construyen generadores con este tipo de rotor guarda relación con el tamaño del mismo y es más conveniente fabricar generadores pequeños con polos salientes que con polos lisos por la complejidad de estos últimos en su construcción. También interviene en esta excepción lo que es el aspecto económico.

La estructura del soporte de los polos se puede hacer en diferentes sistemas constructivos que dependen de algunos parámetros como: el diámetro del rotor, el número de polos, la potencia y la velocidad de la máquina. “Cuando el número de polos es elevado la estructura del rotor se modifica tomando la forma de una corona circular

conectada a la masa central por medio de un disco solido, cualquiera que sea su forma esta debe estar diseñada para soportar el esfuerzo centrífugo sostenido. Por motivo de resistencia mecánica para los rotores de gran tamaño y velocidades considerables la franja superficial donde se montan los polos es de acero fundido o de placas de acero laminado de 20 a 25mm de espesor y para el caso de los rotores pequeñas la franja superficial puede ser un paquete de laminaciones de 0.5 a 0.6mm de espesor fijas o sujetas por medio de tornillos a compresión, este tipo constructivo es típico de la máquinas de pequeña potencia y los polos quedan constituidos por paquetes separados de 15 a 20mm” .<sup>2</sup>

Las inducciones que se usan para este tipo de rotores se encuentran detalladas en la siguiente tabla.

**Tabla 1.6** Inducciones que se usan en la construcción de rotores de polos salientes

Material	Inducción mínima	Inducción máxima	Unidad
Fierro Fundido	0.6	0.8	Wb/m <sup>2</sup>
Acero forjado o laminado	1.1	1.6	Wb/m <sup>2</sup>

**FUENTE:** Ing. Gilberto Enríquez Harper, Máquinas Síncronas. **Pág.30**

También se usan las expansiones polares con el objeto de reducir las pérdidas por corrientes parasitas producidas por la forma de las ranuras del inducido. Para fines más de reparación que de diseño de los devanados de este tipo de rotores se estudian algunos conceptos básicos de dimensionamiento de los polos, para un valor de inducción fijo dado en la tabla anterior, esta densidad de flujo se relaciona con el flujo y la sección del núcleo.

$$Bn = \phi / A_p = \left[ Wb / m^2 \right] \quad \text{Ecuación 1.21}$$

<sup>2</sup>Para una mayor explicación véase, en libro Curso de Máquinas Síncronas: Ing. Gilberto Enríquez Harper, 1980, pagina. 29

Donde:

$B_n \rightarrow$  Densidad de flujo magnético.

$\Phi \rightarrow$  Flujo magnético por polo.

$A_p \rightarrow$  Área del polo.

El ancho del polo entonces será:

$$a_p = \frac{\Phi}{l_p(B_n)} \quad \text{Ecuación 1.22}$$

$a_p \rightarrow$  Ancho del polo.

$l_p \rightarrow$  Longitud axial del polo.

#### 1.4.2.1.1.1 Campo Magnético del Rotor

Cuando se excita el bobinado del rotor se crea un campo magnético que trata de direccionarse con el campo que producen las líneas de fuerza del núcleo del polo produciéndose así un campo magnético más fuerte, este es el campo magnético del rotor el mismo que produce una distribución espacial de la densidad de flujo en el entre hierro, la misma que tiene forma sinusoidal.

Entonces el flujo total producido por un polo queda expresado en la siguiente expresión:

$$\Phi_e = \frac{2Lr}{p} B_{pico} = [Wb] \quad \text{Ecuación 1.23}$$

Donde:

$B_{pico} \rightarrow$  Densidad de flujo magnético.

$\Phi_e \rightarrow$  Flujo total por polo.

$L \rightarrow$  Longitud del Rotor.

$r \rightarrow$  Radio del Rotor.

#### 1.4.2.1.1.2 Accesorios eléctricos auxiliares del rotor de polos salientes

Los elementos a través de los cuales pasa la corriente de excitación hacia el devanado del rotor se conocen como anillos colectores y sus escobillas, los anillos colectores se

hacen de cobre o bronce y deben resistir a los esfuerzos mecánicos que produce la fuerza centrífuga de rotación, las escobillas deben ofrecer la posibilidad de tener una amplia superficie de contacto aun cuando por razones mecánicas para reducir la velocidad periférica los anillos y las escobillas se diseñan del menor diámetro posible. Esto se hace explícitamente para reducir vibraciones y calentamiento excesivo en las escobillas.

#### 1.4.2.1.1.2.1 Pérdidas mecánicas y eléctricas en las escobillas

Las pérdidas mecánicas se generan sobre la resistencia de entre de las escobillas y el anillo colector del rotor produciéndose un calentamiento.

$$Pm = 0.2 * Vr * Ac \quad \text{Ecuación 1.24}$$

$$Vr = \pi * Ns * Dr \quad \text{Ecuación 1.25}$$

$$Ac = ac * lc \quad \text{Ecuación 1.26}$$

Donde:

$Vr$  = Velocidad periférica del rotor (m/s)

$Ac$  = Área de contacto de las escobillas (cm<sup>2</sup>)

$ac$  = Ancho de contacto de la escobilla

$lc$  = longitud de contacto de la escobilla

Para calcular la velocidad periférica de la flecha tenemos:

$$Vf = \pi * Ns * Df = \text{rps} \quad \text{Ecuación 1.27}$$

Donde ( $Df$ ) es el diámetro del eje del motor

Las pérdidas eléctricas se generan en forma convencional alrededor de 1 Volt de caída de tensión por cada paso de corriente entre escobillas y anillos colectores, se calculan como:

$$Pe = 2 * Iex \quad \text{Ecuación 1.28}$$

Para encontrar la densidad de corriente de las escobillas tenemos la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{I_{ex}}{Ac * k} \quad \text{Ecuación 1.29}$$

Donde  $I_{ex}$  representa la corriente de excitación y  $k$  es el número de escobillas

“Las escobillas soportan una presión ante el anillo colector que varían en general entre 0.15 y 0.25 kg/cm<sup>2</sup>, ya que de hecho el uso de presiones mayores no dan reducciones en la caída de tensión sobre la resistencia de contacto, y por lo contrario puede hacer que se aumenten las pérdidas y incremente el consumo de la propia escobilla y de los anillos colectores. Es decir que para usar presiones mayores es necesario tomar en consideración varios factores que dependen del material de las escobillas, las condiciones mecánicas de los anillos y su velocidad periférica.”<sup>3</sup>

Para calcular la carga en los rodamientos tenemos:

$$Wb = \frac{Wr}{Ac * 2} \quad \text{Ecuación 1.30}$$

Donde:  $Wr$  es el peso del rotor

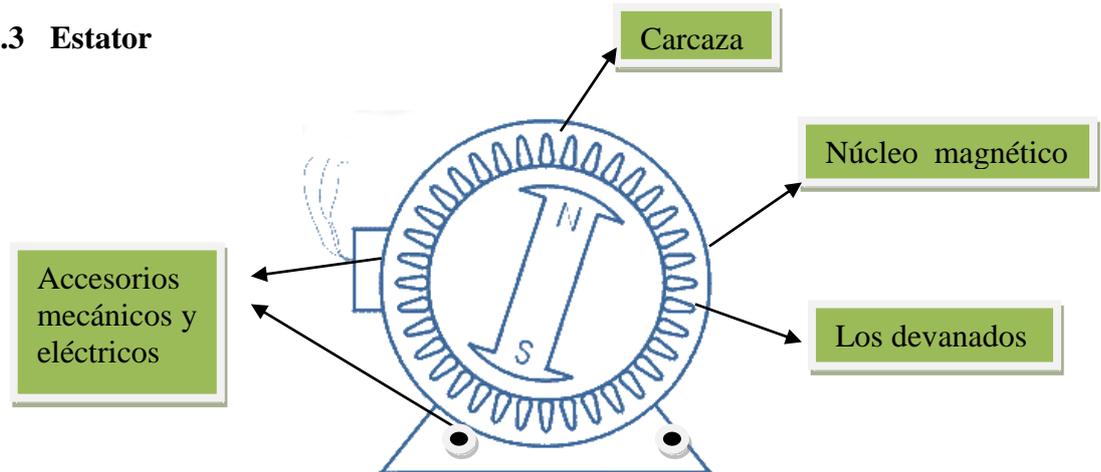
#### 1.4.2.2 Carcasa

La carcasa es una estructura mecánica construido con acero soldado o algunas veces con acero fundido y que tiene la función de sostener y centrar al núcleo magnético del estator, es decir que tiene solo una función mecánica y no magnética. Para las máquinas de potencias pequeñas esta estructura es por lo general de una sola pieza en tanto que para las máquinas de gran potencia se lo hace en dos partes esto se debe a razones de montaje y transporte.

---

<sup>3</sup> Para una mayor explicación véase, en el libro de Curso de Máquinas Síncronas: Ing. Gilberto Enríquez Harper, 1980, pagina. 45

### 1.4.2.3 Estator



*Fig.1.21 Estator de un generador síncrono.*

Es el sistema inducido del generador síncrono (fig. 1.22), está constituido por una parte activa que es el paquete de laminaciones magnéticas entre las cuales están alojados los conductores del bobinado, es aquí donde se produce la inducción de voltajes elevados es por eso que al estator siempre se lo construye como una parte fija del generador, para evitar la degradación de los materiales aislantes y para simplificar la conexión del mismo a la línea externa.

#### 1.4.2.3.1 Núcleo magnético del estator



*Fig.1.22 Núcleo magnético de una máquina síncrona.*

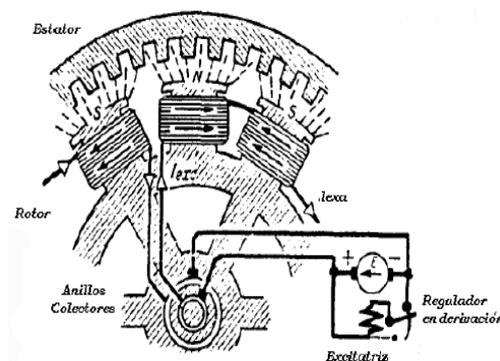
El núcleo magnético del estator de las máquinas síncronas está constituido por un conjunto de coronas circulares de laminación y que tienen en su parte interna ranuras o canales estrechos para alojar a los conductores del devanado del estator. Este conjunto o

paquete de laminaciones se encuentra centrado y fijo a la carcasa. Para disminuir el efecto de las corrientes circulantes las laminaciones se aíslan con diferentes métodos como el barnizado por un lado y una capa de papel por el otro.

### 1.4.3 Excitación de generadores síncronos

La excitación de generadores síncronos no es más que el abastecimiento de corriente directa al bobinado del rotor de generador, para de esta manera generar un campo magnético. La excitación de generadores síncronos se la realiza mediante dos métodos

- Mediante el abastecimiento de corriente continua desde una fuente externa, esto se lo podría hacer mediante una batería, un generador de corriente directa o cualquier otra fuente de corriente directa. Siempre y cuando se tenga en cuenta los niveles del voltaje y la corriente de excitación que necesita el generador, además se debe tomar en cuenta las características internas tanto del bobinado como del núcleo magnético del rotor. Este tipo de excitación se usa generalmente en sistemas de generación de energía eléctrica que son pequeños. Como en nuestro caso que se utiliza un reóstato para disminuir el voltaje y un puente rectificador de diodos para convertir la CA en CD.
- La otra forma de excitación se basa en el acoplamiento de una fuente de corriente directa en el eje del generador, esta fuente es básicamente un bobinado diseñado para proporcionar corriente directa en función de la velocidad a la que opera el generador. Este tipo de excitación se usa en sistemas de generación eléctrica grandes.



*Fig.1.23 Esquema de excitación de una máquina síncrona*

“La corriente de excitación de un generador síncrono es un 1.5% de la potencia total del generador”.<sup>4</sup>. Entonces la potencia de excitación será:

$$P_e = (1.5(N))/100 = [Watt] \quad \text{Ecuación 1.31}$$

$$I_{ex} = P_e / V_e \quad \text{Ecuación 1.32}$$

Donde:

$P_e$  → Potencia de excitación.

$N$  → Potencia nominal del generador.

$I_{ex}$  → Corriente de excitación.

$V_e$  → Voltaje de excitación.

#### 1.4.3.1 Efectos de la reacción de armadura.

El factor que aumenta la estabilidad de los alternadores síncronos que trabajan en paralelo, es que el alternador síncrono sobreexcitado tendería a tomar una corriente con mayor retraso, la cual, debido a su acción desmagnetizante, reducirá la **f.m.m** generada del alternador. Sin embargo, un motor síncrono sobreexcitado tiende a tomar una corriente en adelanto, lo cual también produce una mayor acción de desmagnetizante.

Ya sea que esté actuando como motor o como generador, cuando el generador síncrono este en paralelo con la barra de distribución y sincronizada a esta. Por lo tanto se puede decir que:

- Un generador síncrono sobreexcitado dará la barra una corriente en retraso, produciendo un efecto desmagnetizante como resultado de la reacción de armadura.
- Un motor síncrono sobreexcitado tomara una corriente en adelanto de la barra de distribución, produciendo un efecto desmagnetizante como resultado de la reacción de armadura.

---

<sup>4</sup> Para una mayor definición véase, en el libro de Curso de Máquinas Síncronas: Ing. Gilberto Enríquez Harper, 1980, pagina. 33

- Un generador síncrono bajo excitado o subexcitado suministrará a la barra una corriente en adelanto y de magnetización.
- Un motor síncrono bajo excitado tomará a la barra una corriente en retraso y de magnetización.

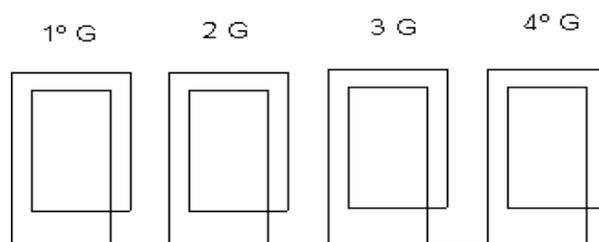
#### 1.4.4 Devanados

El devanado de la armadura consiste en un número de bobinas distribuidas en las ranuras del estator a lo largo de la periferia de la máquina en correspondencia al número deseado de polos y fases.

##### 1.4.4.1 Bobinado concéntrico trifásico

Por lo general los bobinados de trifásicos son de tipo abierto, estos pueden ser concéntricos e excéntricos. Los bobinados concéntricos pueden ser por polos o por polos consecuentes, mientras que los excéntricos pueden ser imbricados u ondulados.

Se explica que un bobinado es concéntrico cuando todas las bobinas que lo constituyen, tienen un mismo centro, por lo que todas las bobinas de un mismo grupo son diferentes. Estos bobinados se pueden construir “por polos” y “por polos consecuentes”: En los bobinados por polos, por cada fase del devanado existen tantos grupos de bobinas como polos tiene la máquina  $Gf = 2p$ . Mientras que en los bobinados por polos consecuentes, por cada fase del devanado existen tantos grupos como pares de polos tiene la máquina  $Gf = P$ . En los bobinados por polos se unirá, el final del primer grupo con el final del segundo grupo, el principio del segundo con el principio del tercero, el final del tercero con el final del cuarto y así sucesivamente; es decir, debemos de unir final con final, principio con principio.



**Fig.1.24** Bobinado por polos

- **Número de ranuras por polo y por fase (Nr)**

Dicha expresión se aplica a la relación que existe entre el número de ranuras **k** del inducido y el producto de los números de polos **p** y de fases **q** de dicho bobinado.

$$Nr = k/2 p q \quad \text{Ecuación 1.33}$$

$$N_{polo} = K/Polos \quad \text{Ecuación 1.34}$$

- **Número de bobinas del bobinado (B).**

Los bobinados de corriente alterna son construidos tanto de una capa como de dos capas por ranura. En un bobinado de dos capas el número de bobinas es igual al número de ranuras.

$$N_B = k \quad \text{Ecuación 1.35}$$

- **Número de grupos por bobinado (G)**

$$G = p * q \quad \text{Ecuación 1.36}$$

- **Número de bobinas por grupo (Ub)**

Para un bobinado por polos y de doble capa es:

$$Ub = \frac{k}{2 p q} \quad \text{Ecuación 1.37}$$

- **Amplitud del grupo (m)**

$$x = (q - 1)Ub \quad \text{Ecuación 1.38}$$

- **Paso de Principios ( $\gamma$ )**

En la siguiente fórmula se da el paso de principios, teniendo presente que los bobinados realizados son trifásicos.

$$\gamma = k/3 p \quad \text{Ecuación 1.39}$$

- **Factor de distribución (Kd)**

$$Kd = \sin \frac{Nr \lambda}{2} / Nr \sin \frac{\lambda}{2} \quad \text{Ecuación 1.40}$$

- **Factor de Paso (Kp)**

$$Kp = \text{sen } \left[ \frac{\beta}{2} \right] \quad \text{Ecuación 1.41}$$

- **Paso de bobina (Pb)**

$$Pb = 180 Pbr / N_{\text{polo}} \quad \text{Ecuación 1.42}$$

$$\beta = 180 - Pb \quad \text{Ecuación 1.43}$$

- **Los factores de devanado**

Como se sabe los devanados del estator pueden ser concentrados o distribuidos siendo estos últimos los que se localizan en forma de bobinas en diferentes ranuras de la periferia del estator, por lo que el voltaje que se induce en el devanado es la suma de los voltajes de cada bobina produciendo así los desfases, es por esto que se toma en cuenta un factor de distribución para la generación de voltaje. Por otro lado el factor de paso se refiere al ángulo que ocupa un devanado en la periferia del estator, este por lo general es de 180 grados para un devanado de paso completo, pero no todos los devanados tienen este paso por lo que hay pasos fraccionarios y es por esta razón que también se toma en cuenta un factor de paso para la determinación del voltaje generado.

Para propósitos de cálculo los factores de distribución y de paso se pueden combinar y su producto se conoce como el factor de devanado  $k_b$  el cual se lo utiliza en el cálculo del voltaje rms generado por una máquina síncrona

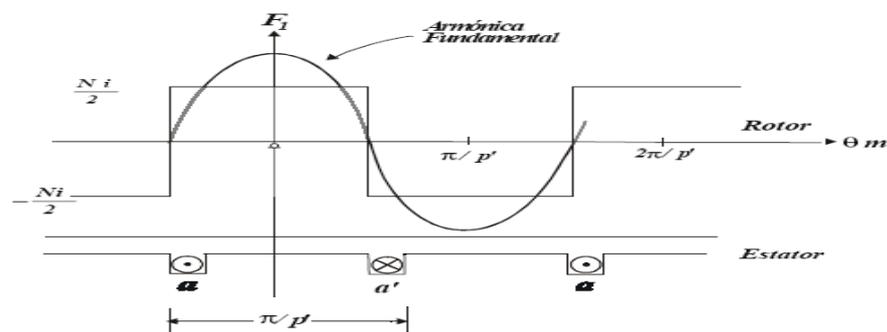
$$Kb = Kd * Kp \quad \text{Ecuación 1.44}$$

#### 1.4.4.2 Fuerza magnetomotriz en el devanado

La mayoría de los inducidos o armaduras presentan devanados distribuidos y su estudio se puede precisar al examinar el campo magnético de una bobina única. Dado que la

permeabilidad del inducido y del hierro de excitación es mucho mayor a la del aire, se puede asumir que la reluctancia más significativa del circuito magnético de una máquina síncrona esta en el entrehierro. La f.m.m. está determinada por los ampere-vueltas alrededor de una trayectoria cerrada indicada por una trayectoria de flujo, como la reluctancia del circuito esta en el entrehierro no habrá decrecimiento de la f.m.m, y por simetría se concluye que los campos en el entrehierro en los lados opuestos del rotor son iguales en magnitud pero diferentes en cuanto a dirección. Por lo tanto la f.m.m del entrehierro deberá distribuirse en forma similar, dado que cada línea de flujo atraviesa el entrehierro dos veces la f.m.m. deberá igualar a la mitad de ampere-vueltas/2.

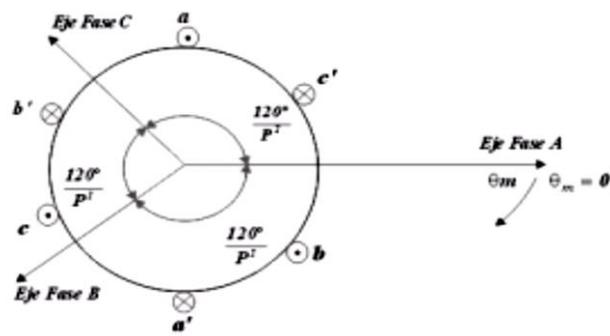
Normalmente el inducido es trifásico y consta de tres arrollamientos ubicados a  $120^\circ$  eléctricos. Los tres arrollamientos se conectan en estrella o a veces en triángulo y por consiguiente son recorridos por corrientes trifásicas que generalmente son balanceadas. Cada fase produce una onda de fuerza magneto motriz cuya distribución espacial está indicada en la figura siguiente:



*Fig.1.25 Fuerzas magneto motrices.*

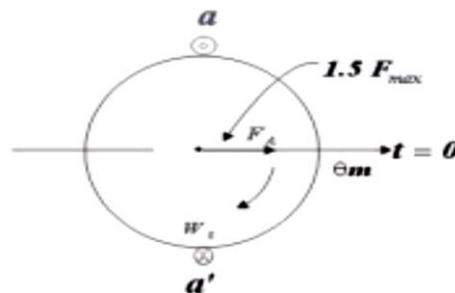
La onda rectangular puede descomponerse por FOURIER en una suma de sinusoides, es decir en varias armónicas. El arrollamiento de la armadura es generalmente de tipo distribuido, es decir cada fase ocupa varias ranuras para aprovechar toda la circunferencia del estator. Por ello se toman en cuenta los factores de paso y distribución, la amplitud de  $F_1$  pico variará continuamente y tomará su valor máximo cuando  $I$  sea máxima

El resultado de la intensidad máxima cambia completamente si se consideran las tres fases a b y c actuando simultáneamente a  $0^\circ$   $120^\circ$  y a  $-120^\circ$



*Fig.1.26 Onda de f.m.m resultante por fase*

Es decir las tres bobinas estáticas del estator han creado un campo giratorio que rota a una velocidad denominada síncrona.



*Fig.1.27 Onda de f.m.m resultante*

Esta velocidad depende de la frecuencia de las corrientes que produce el campo giratorio, esta velocidad síncrona es la misma que la velocidad mecánica del rotor. El campo producido por la armadura se denomina reacción de armadura, para hallar la f.m.m. resultante se suman las dos ondas, como se trata de sinusoides es posible representarlas con fasores. En el diagrama los fasores tienen como módulo la amplitud de la onda y giran con la velocidad síncrona en la dirección indicada.

#### 1.4.4.3 Campo Magnético Resultante

El campo magnético producido por la armadura es giratorio y su velocidad de rotación es la síncrona. El campo magnético del rotor también es giratorio por el movimiento que le proporciona el primotor, con respecto al estator y como la velocidad del primotor es justamente la síncrona, ambos campos giran en la misma dirección y a la misma

velocidad, manteniendo un desfase espacial constante entre sí. Este permite que interactúen y se produzca un par electromagnético constante.

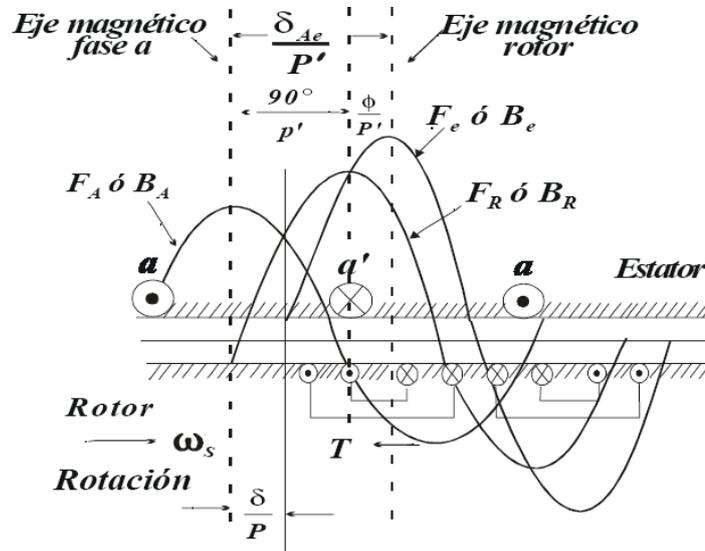


Fig.1.28 Relación de  $\Phi$ ,  $B$ , y  $f.m.m.$

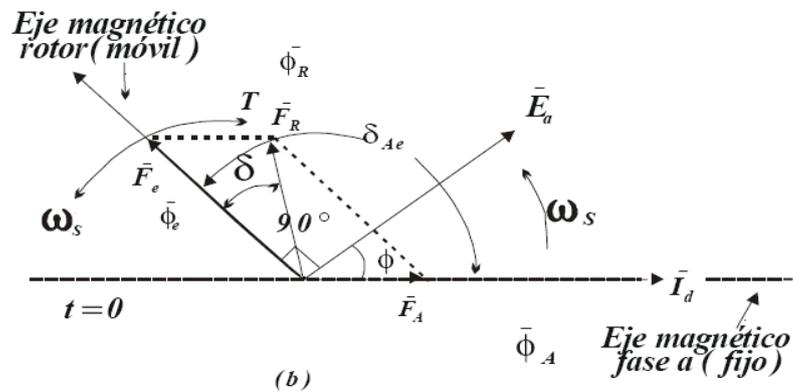
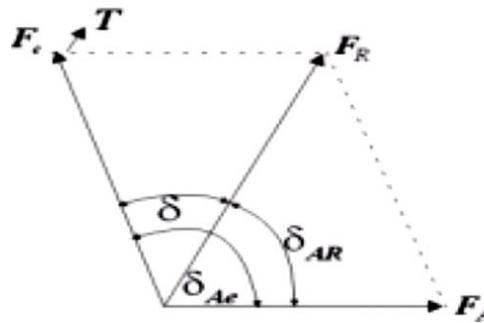


Fig.1.29 Diagrama fasorial  $\Phi$ ,  $B$ , y  $f.m.m.$

### 1.4.5 Torque Electromagnético

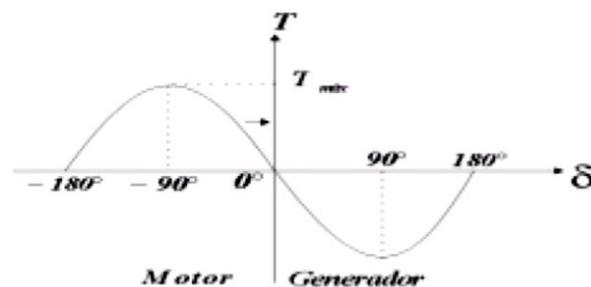
Los ejes magnéticos del rotor y del estator están desfasados en un ángulo:



*Fig.1.30 Torque electromagnético.*

Los dos campos giran a la velocidad síncrona y producen un torque que trata de alinearlos, para determinar su valor primero se calcula la coenergía en el entrehierro en función de las f.m.m. el torque viene a ser la derivada parcial de la coenergía con respecto al ángulo mecánico.

El signo negativo indica que el torque tiende a reducir los ángulos  $\delta_{Ae}$  y  $\delta$  es decir trata de alinear los campos magnéticos de los campos, El par electromagnético depende del ángulo  $\delta$ , la variación de este permite que la máquina ajuste el torque a los requerimientos de la carga, por tal razón se le denomina ángulo de torque o de potencia.  $\Phi_R$  y  $F_e$  son constantes por lo tanto el torque variara en forma sinusoidal.

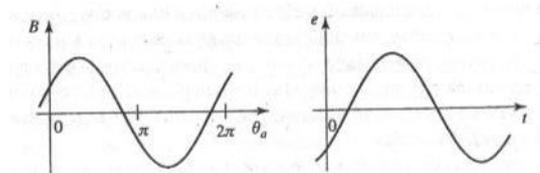
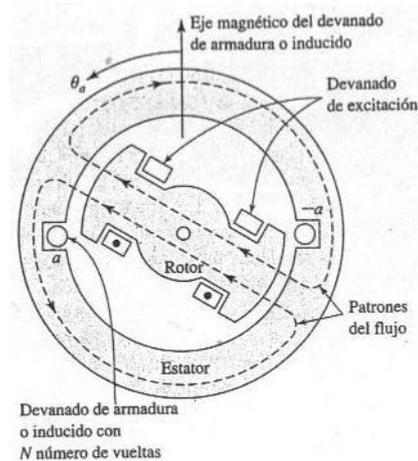


*Fig.1.31 Torque electromagnético de una máquina síncrona como motor y como generador.*

Si se le exige a la máquina un par superior esta sale de sincronismo.

### 1.4.6 Voltaje Generado

El rotor gira a una velocidad constante por medio de una fuente de potencia mecánica que se conecta a la flecha. Se asume que el devanado de excitación se encuentra en circuito abierto, por lo tanto, el flujo en esta máquina se produce solo mediante el devanado de excitación. Los patrones de flujo se indican en la siguiente figura:



**Fig.1.32** Generador síncrono de dos polos **Fig.1.33** Distribución espacial de la densidad de flujo

La densidad de flujo del entrehierro en las máquinas de polos salientes se produce de manera aproximada a una distribución sinusoidal al conformar de forma apropiada las caras del polo (fig.1.33) Al considerar la suposición de que el entrehierro es de menor tamaño, es posible asumir que el devanado de excitación produce flujo del entrehierro fundamental espacial radial con un pico de densidad de flujo  $B_{pico}$  esta densidad pico para un entrehierro uniforme es:

$$B_{pico} = \frac{4 \mu_0}{\pi g} \left( \frac{k_b N_f}{p} \right) I_{ex} \quad \text{Ecuación 1.45}$$

Donde:

$g$  → Longitud del entrehierro

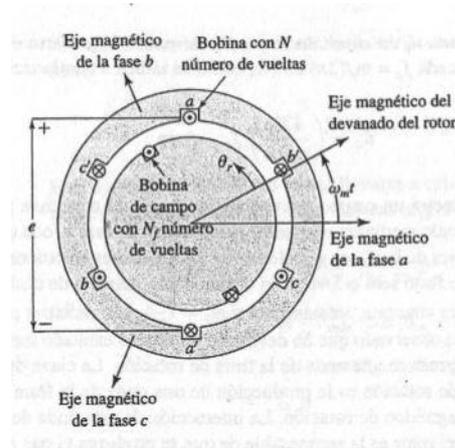
$\mu_0$  → Permeabilidad del aire

$N_f$  → Número total de vueltas en serie en el devanado de campo

$P$  → Número de polos

$I_{ex}$  → Corriente de campo o de excitación.

Cuando los polos del rotor se alinean con el eje magnético de la fase del estator, el flujo de dispersión con un devanado de fase del estator es  $k_b \Phi_p N_f$  donde  $N_f$  es el total de número de vueltas en serie por fase, y  $\Phi_p$  es el flujo por polo en el entrehierro, cuya fórmula se la definió en la sección anterior.



**Fig.1.34** Máquina de elemental de corriente alterna

Como ocurre mientras el rotor gira el flujo de dispersión varía de manera cosinusoidal con el ángulo que hay entre los ejes magnéticos de la bobina del rotor y del estator, al girar el rotor a una velocidad angular constante el flujo de dispersión en una de las fases es:

$$E_f = k_b N_f \Phi_p \cos(\omega_m t) \quad \text{Ecuación 1.46}$$

Donde:

$\omega_m$  → Velocidad mecánica del rotor

Luego por medio de la Ley de Faraday, el voltaje inducido en cualquiera de las fases es:

$$E_f = -\omega_m k_b N_f \Phi_p \sin(\omega_m t) \quad \text{Ecuación 1.47}$$

En esta expresión el signo negativo indica que la corriente fluiría en sentido contrario si la bobina del estator estuviera en cortocircuito, el término de la derecha es el voltaje

transformador y el segundo término es la velocidad del voltaje. Esta ecuación expresa valores instantáneos de generación pero en condiciones normales de operación de la máquina estos no se les presta mucha atención por lo que más importancia se le da a los valores **rms** de la misma y su valor se expresa en la siguiente ecuación:

$$E_{rms} = 4.44N_f\phi_p k_b \quad \text{Ecuación 1.48}$$

Este es el voltaje rms inducido en un devanado único y es monofásico, para la producción de voltajes rms trifásicos balanceados, deberá emplearse tres devanados desplazados 120 grados eléctricos en el espacio.

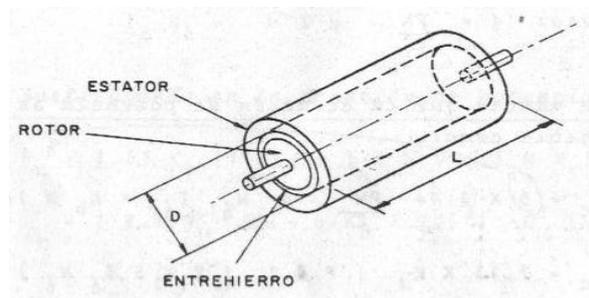
#### 1.4.7 Relación entre los valores nominales y las dimensiones físicas de una máquina síncrona

Para las personas que trabajan en proyectos de centrales eléctricas y en pequeñas plantas generadoras eléctricas, es muy útil conocer la relación entre los valores nominales de las máquinas rotatorias y sus dimensiones físicas. Para esto se han desarrollado algunas ecuaciones que son aplicables a todos los tipos de máquinas rotatorias.

##### a.) Dimensiones Principales

Se consideran como dimensiones principales de una máquina rotatoria al diámetro de la armadura  $D$  del estator, así como su longitud  $L$ .

Se consideran como dimensiones principales de una máquina rotatoria al diámetro de la armadura  $D$  del estator, así como su longitud  $L$ .



*Fig.1.35 Dimensiones principales en máquinas rotatorias.*

**b.) La carga magnética total ( $C_m$ )**

Es el flujo total presente alrededor de la periferia interna del estator en el entrehierro, también se la denomina como capacidad magnética total

$$C_m = p \Phi \quad \text{Ecuación 1.49}$$

**c.) La carga eléctrica total ( $C_e$ )**

Conocida como la capacidad eléctrica es el número total de amperes-conductores alrededor de la periferia del estator.

$$C_e = I_c N_c \quad \text{Ecuación 1.50}$$

**d.) La carga magnética específica ( $B_m$ )**

Es la densidad magnética promedio de flujo presente en el entrehierro de una máquina rotatoria.

$$B_m = \frac{p \Phi}{\pi D L} \quad \text{Ecuación 1.51}$$

**e.) La carga eléctrica específica ( $Q$ )**

El número de amperes-conductores por metro de armadura en la periferia del entrehierro se conoce como la carga eléctrica específica.

$$Q = \frac{I_c N_c}{\pi D} \quad \text{Ecuación 1.52}$$

**f.) La ecuación de salida de las máquinas de corriente alterna ( $P_c$ )**

Suponiendo que se tiene una máquina trifásica de corriente alterna con un circuito por fase, la potencia aparente en las terminales es:

$$P_c = 3 V_f I_f \quad \text{Ecuación 1.53}$$

El voltaje inducido por fase es:

$$Vf = \sqrt{2} \pi f N_f \Phi k_b \quad \text{Ecuación 1.54}$$

Sustituyendo la ecuación 4.1y 4.2 en la ecuación de la potencia de salida nos queda:

$$Pc = 3 \sqrt{2} \pi \frac{p N_s}{2} N_f \Phi k_b If \quad \text{Ecuación 1.55}$$

$Ic = If \rightarrow$  Si solo hay un circuito por fase.

El número total de conductores de la armadura es:

$$Nc = q (2 Ne) \quad \text{Ecuación 1.56}$$

La carga eléctrica total es:

$$Ce = Ic Nc = 2q If N_f \quad \text{Ecuación 1.57}$$

Luego:

$$Pc = 1.11 P \Phi N_s Ic Nc k_b \quad \text{Ecuación 1.58}$$

Como:

$$p \Phi = \pi D L Bm \quad \text{Ecuación 1.59}$$

$$Ic Nc = \pi D Q \quad \text{Ecuación 1.60}$$

Sustituyendo:

$$Pc = 1.11(\pi D L Bm)(\pi D Q)N_s k_b \quad \text{Ecuación 1.61}$$

$$Pc = (1.11 k_b \pi^2 Bm Q)D^2 L N_s \quad \text{Ecuación 1.62}$$

$$Pc = Co D^2 L N_s \quad \text{Ecuación 1.63}$$

Donde  $Co$  es un coeficiente de salida que para las máquinas síncronas es:

$$Co = 1.1Bm Qe Kd \quad \text{Ecuación 1.64}$$

### 1.4.8 Factores que afectan el tamaño de las máquinas síncronas

Observando la ecuación para la potencia de salida de las máquinas rotatorias, se observa que el producto  $D^2L$  se reduce con el incremento de la velocidad o con el incremento del coeficiente de salida.

Por otro lado la elevación de la temperatura se expresa como:

$$\Delta t = \frac{\tau c}{S_d} \quad \text{Ecuación 1.65}$$

$c \rightarrow$  Coeficiente de enfriamiento

$S_d \rightarrow$  Superficie de disipación

$\tau \rightarrow$  Perdidas a ser disipadas

#### 1.4.8.1 Separación de diámetro y longitud en función de la velocidad periférica

Para las máquinas síncronas de alta velocidad el diámetro  $D$  está limitado por la velocidad periférica, ya que si esta velocidad periférica se excede, el rotor podría ser dañado al incrementarse sus esfuerzos centrífugos por lo tanto resulta lógico expresar la ecuación de potencia de salida en términos de velocidad periférica.

$$V_a = \pi D N_s \quad \text{Ecuación 1.66}$$

Entonces la ecuación de potencia quedaría expresada así:

$$P_c = C_o D^2 L n_s \quad \text{Ecuación 1.67}$$

En el caso de las máquinas síncronas con polos salientes el diámetro de rotor  $D_r$  es prácticamente igual al del estator  $D$  ya que se puede despreciar la longitud del entre hierro comparada con el valor de  $D$ , este depende del tipo de polo usado y la velocidad periférica admisible.

"En las máquinas síncronas se usan polos circulares y polos rectangulares donde la relación  $L/\partial$  esta entre 0.6 a 0.7 en los circulares y de 1 a 5 en los rectangulares, donde  $\partial$  es el paso polar.

Las velocidades periféricas para generadores síncronos de polos salientes tienen los siguientes valores aproximados.

- Para construcción de polos atornillados esta alrededor de 50 m/s.
- Para polos remachados o unidos por ranurado esta alrededor de 80m/s. La densidad de flujo media para un generados síncrono de polos salientes está entre 0.52 a 0.65 weber/m<sup>2</sup>” .<sup>5</sup>

#### 1.4.9 Calentamiento y sistemas de enfriamiento en las máquinas síncronas

Como se sabe la energía que se pierde en las máquinas eléctricas, se transforma en calor, la mayor parte de este calor se desarrolla en los conductores y en el fierro de circuito magnético. La producción de calor hace aumentar la temperatura de la máquina con respecto a la del medio ambiente, tal sobre elevación de temperatura determina la transmisión de calor de la máquina hacia el medio por irradiación y parte por convección. La máquina alcanza su temperatura de régimen cuando la potencia que se pierde en el interior, es igual a la potencia térmica que se transmite al exterior.

La expresión para calcular la temperatura de funcionamiento en los devanados es la siguiente:

Donde:

$$R2/R1 = (234.5 + T2)/(234.5 + T1) \quad \text{Ecuación 1.68}$$

La ventilación de las máquinas eléctricas en general y en particular de las síncronas que alcanzan potencias elevadas se efectúa por razones de conveniencia económica, de hecho la potencia que se emplea para favorecer el enfriamiento esta compensado por el aumento de potencia así como el aumento de la temperatura de operación. Con relación al sistema de enfriamiento las máquinas síncronas pueden tener algunos sistemas de enfriamiento, los mismos que se usan de acuerdo a la potencia de la máquina.

<sup>5</sup>Para mayor investigación véase, en el libro de Curso de Máquinas Síncronas: Ing. Gilberto Enríquez Harper, 1980, pagina .127-128

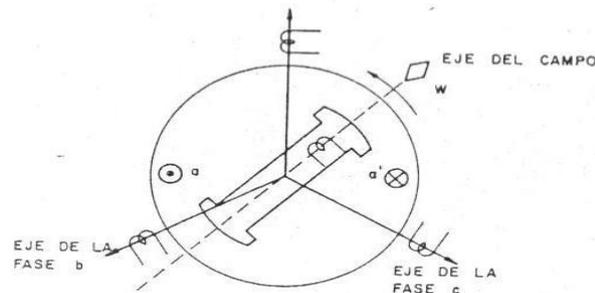
- **Sistema de auto ventilación**

Este sistema viene acoplado a los rotores de las máquinas síncronas, en este sistema se encuentran dispuestos órganos capaces de activar el movimiento del aire proveniente de la misma máquina o del exterior a través de conductos respectivamente dispuestos.

## 1.5 MÁQUINA SÍNCRONA EN RÉGIMEN ESTABLE

Como se conoce las máquinas síncronas se encuentran dentro de los tres tipos de máquinas eléctricas utilizadas, el gran volumen de energía eléctrica que se produce en la actualidad es por medio de generadores síncronos que tienen potencias elevadas.

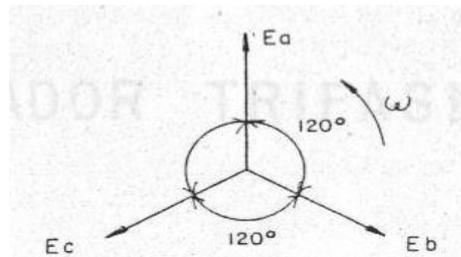
Estas operan bajo la base de la ley de Faraday, es decir, si el flujo proporcionado por el rotor cambiante en el tiempo, eslabona una bobina, se induce un voltaje. En la práctica la mayoría de generadores son trifásicos cuya representación se muestra en la gráfica.



**Fig.1.36** Inducción de voltajes de una máquina trifásica.

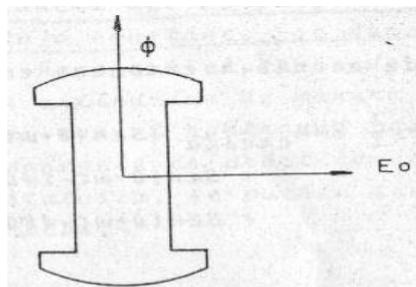
En la figura anterior se considera que la máquina trifásica es de dos polos en donde al girar el rotor el flujo que está presente en este y que lo suministra la excitatriz, lo cortan los devanados de las tres fases y de acuerdo al principio de inducción se induce en estos un voltaje que depende de la variación del tiempo de los eslabonamientos del flujo cortado. Como el devanado del rotor se construye para lograr una distribución senoidal de campo, los voltajes que se inducen en los devanados del estator son senoidales, estarán desfasados 120 grados eléctricos y tendrán igual magnitud. Una representación fasorial de estos voltajes es útil ya que a partir de esta se puede entender no solo al generador en su aspecto elemental, también a otras partes del sistema trifásico, ya que

justamente en el generador se inicia todo el proceso de producción de la energía eléctrica, de modo que las ecuaciones anteriores en forma fasorial como se indica en el siguiente gráfico.



*Fig.1.37 Desfasamiento de tensiones de una máquina trifásica.*

Inicialmente se puede considerar que el generador no alimenta a ninguna carga y entonces los voltajes de fase se conocen como voltajes de vacío, se pueden designar como  $E_o$  y son proporcionales a la corriente que circula por el devanado de campo  $I$ , y el flujo magnético estará desfasado 90 grados con respecto al voltaje de vacío.

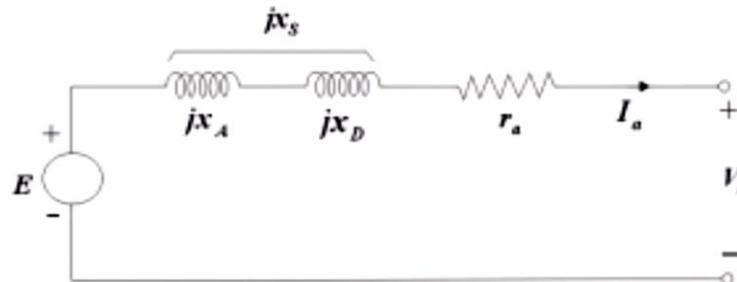


*Fig. 1.38 Desfase del voltaje en vacío con respecto al flujo de campo.*

Si ahora se considera que se conecta a las tres terminales del generador una carga trifásica balanceada, entonces circulara por cada fase una corriente balanceada. De diseño se logra una distribución senoidal de flujo en el entrehierro de los generadores, al excitarse los devanados de armadura con un valor fijo de corriente de fase y de campo de modo que el flujo total que se produce tiene relación con la f.m.m. La distribución de flujo conduce a una inducción de voltaje, este difiere del voltaje difiere del voltaje en los terminales de la armadura, debido a que el devanado del estator tiene resistencia e inductancia esto significa que cada fase del devanado de la armadura se puede representar por un circuito característico.

### 1.5.1 Circuito equivalente de la máquina síncrona

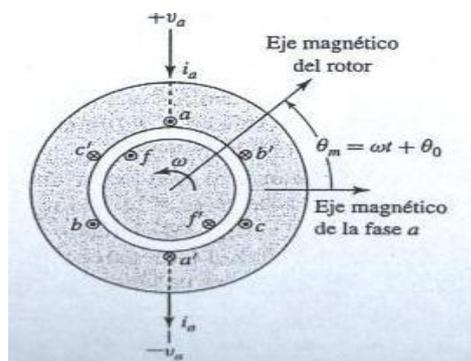
La máquina puede representarse mediante una fuente ideal de tensión en serie con la resistencia del arrollamiento de armadura de la máquina y una reactancia síncrona.



*Fig.1.39 Circuito equivalente de una máquina síncrona*

#### 1.5.1.1 Inductancias de una máquina síncrona

Las inductancias mutuas del estator al rotor varía periódicamente con respecto al flujo magnético, el ángulo eléctrico entre los ejes magnéticos del devanado de campo de fase de inducido a como se muestra en el siguiente gráfico.



*Fig. 1.40 Diagrama esquemático de una máquina síncrona trifásica bipolar*

Donde hay dos autoinductancias, la una que produce el flujo del entrehierro fundamental espacial y la otra que es adicional y que se debe a la dispersión de flujo del inducido. Las inductancias mutuas de fase a fase del inducido pueden determinarse a partir de la suposición que la inductancia mutua se debe únicamente al flujo del entrehierro fundamental. La inductancia síncrona representa la inductancia efectiva por fase bajo condiciones de operación trifásica balanceadas del estado estacionario en la máquina.

### 1.5.1.2 Reactancia síncrona de la máquina de rotor de polos salientes

Es la reactancia que con mayor frecuencia se la considera en el análisis de máquinas síncronas de polos lisos o rotor cilíndrico, y como se mencionó anteriormente esta tiene dos componentes que son la reactancia de dispersión y la reactancia de reacción de armadura. A la reactancia de dispersión se la considera como la imperfección inevitable del devanado del estator o armadura, mientras que la reactancia de reacción de armadura toma en cuenta el flujo de la reacción de armadura, el que se combina con el flujo del rotor para dar el flujo resultante en el entrehierro el cual produce una tensión llamada tensión en el entrehierro. En la práctica la máquina síncrona se representa con una impedancia compuesta por las reactancias que anteriormente se pudo analizar:

$$Z_s = r_a + jX_s \quad \text{Ecuación 1.69}$$

Y aplicando la ley de Kirchof se obtiene la siguiente ecuación para el voltaje interno de la máquina

$$E_f = E_t + I_a Z_s \quad \text{Ecuación 1.70}$$

### 1.5.1.3 Diagramas fasoriales para máquinas de polos salientes.

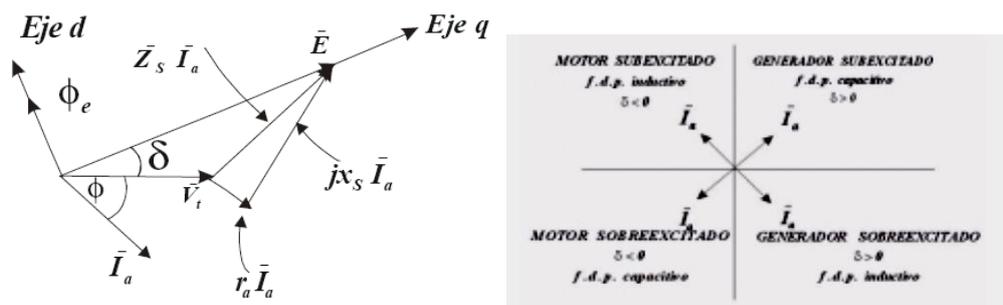
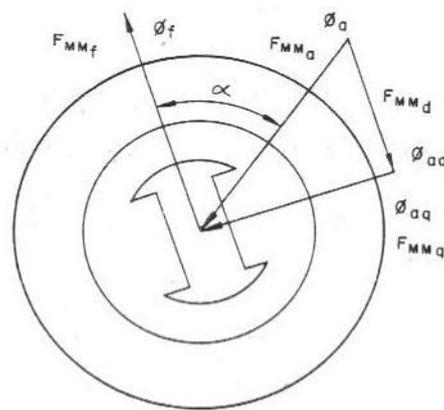


Fig.1.41 Diagrama fasorial del circuito equivalente.

Cuando la corriente está adelantada en un ángulo menor a 90 grados la máquina funciona como generador, y dependiendo de la magnitud del voltaje interno si es mayor o menor está sobrecitada o subexcitada respectivamente. Y si la corriente está

retrasada o adelantada más de 90 grados la máquina funciona como motor ya que en realidad está consumiendo corriente.

A diferencia de la teoría desarrollada anteriormente para la máquina síncrona en la que se considera que el rotor es cilíndrico y con lo cual se simplifica el modelo usado quedando equivalente a una fuente de voltaje en serie con una impedancia, lo que se puede hacer debido a que el entrehierro es uniforme al no haber variaciones bruscas, en el caso de la máquina de polos salientes se presenta el efecto de saliencia debido a que la reluctancia no es uniforme, al no ser uniforme el rotor y en consecuencia dependiendo de su posición varía la reluctancia.



**Fig.1.42** Fuerzas magnetomotrices de una máquina de polos salientes.

Como se ve en la figura 1.42, el eje de campo principal se le conoce como el eje directo y al eje colocado a 90 grados como el eje de cuadratura, de esta manera la f.m.m. resultante de la armadura se descompone en una f.m.m. sobre el eje directo y en una f.m.m. sobre el eje de cuadratura, de modo que la f.m.m. resultante es:

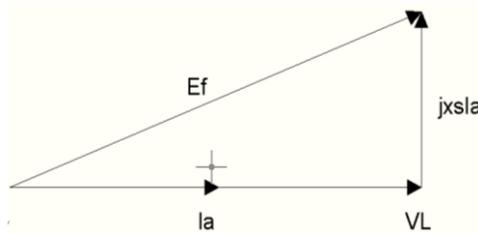
$$Fmm_r = Fmm_d + Fmma \quad \text{Ecuación 1.71}$$

La  $Fmma$  gira a la misma velocidad del rotor y tiene una trayectoria magnética sobre el eje que produce una caída de voltaje debido a la reacción de armadura en el eje directo.

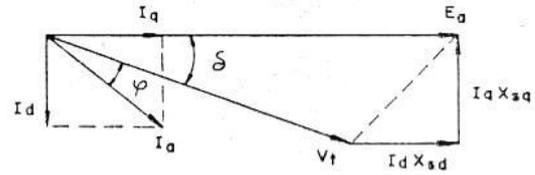
$$E_f = V_f + r_a * I_a + jX_s * I_a \quad \text{Ecuación 1.72}$$

$I_a \rightarrow$  Corriente de armadura del generador

Si se desprecia la resistencia de armadura, el voltaje de armadura, el voltaje interno o de excitación se calcula de acuerdo con el siguiente diagrama fasorial.



**Fig.1.43** Diagrama fasorial



**Fig.1.44** Diagrama fasorial para máquina de Polos salientes

$$E_f = V_o = V_l + jX_s I_a \quad \text{Ecuación 1.73}$$

$$I_d = I_a \text{sen}(\delta + \varphi) \quad \text{Ecuación 1.74}$$

$$I_q = I_a \text{cos}(\delta + \varphi) \quad \text{Ecuación 1.75}$$

$$\tan(\delta) = \frac{I_a X_q \text{cos}(\varphi)}{V_f + I_a X_q \text{sen}(\varphi)} \quad \text{Ecuación 1.76}$$

$$X_q = X_d(0.65) \quad \text{Ecuación 1.77}$$

$$V_d = I_d X_d \quad \text{Ecuación 1.78}$$

$$E_a = V_f \text{cos}(\delta) + V_d \quad \text{Ecuación 1.79}$$

$$\text{Reg.} = \frac{E_a - V_f}{V_f} * 100\% \quad \text{Ecuación 1.80}$$

“La reactancia síncrona del eje de cuadratura  $X_q$  es menor que la del eje directo  $X_d$ , debido a que la reluctancia es mayor en el entre hierro del eje de cuadratura, con frecuencia,  $X_q$  se encuentra entre  $0.6X_d$  y  $0.7X_d$ .”<sup>6</sup>

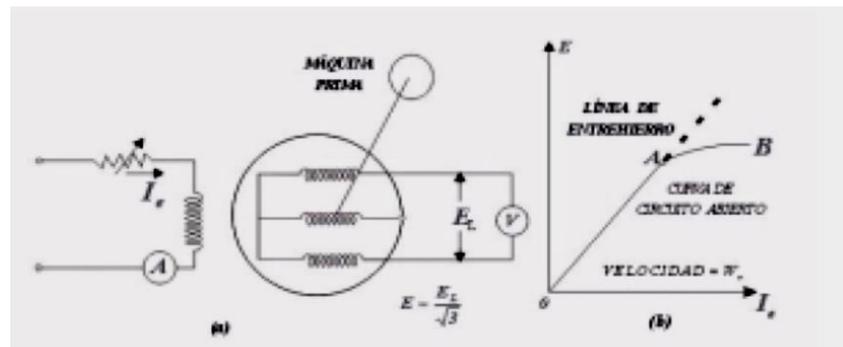
<sup>6</sup> Véase, en el libro Máquinas Eléctricas: Umans Stephen, 2005, pagina. 256

## 1.5.2 Características internas de la máquina síncrona

Mediante las pruebas de circuito abierto y de cortocircuito se obtienen las curvas características de circuito abierto y curva de corto circuito respectivamente. Estas curvas permiten determinar entre otras cosas la reactancia síncrona saturada y no saturada de la máquina síncrona.

### 1.5.2.1 Características de circuito abierto

Para obtener las características del circuito abierto de una máquina síncrona se acciona con el primotor hasta alcanzar su velocidad nominal, estando vacío, fijando varios valores para las corrientes de campo, se toman para cada valor los voltajes de línea a neutro, la curva que se traza con estos valores se conoce como la característica de circuito abierto o de saturación para la máquina síncrona.

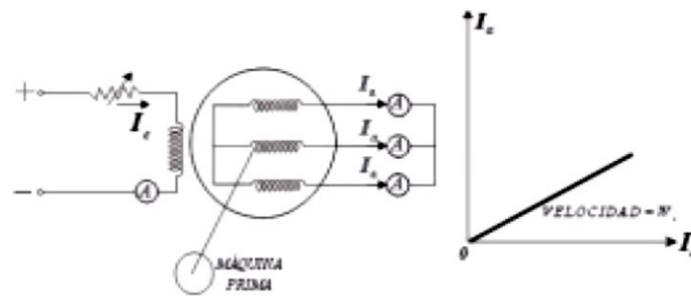


*Fig.1.45 Característica de circuito abierto*

Si no fuera por la saturación magnética del hierro la característica de circuito abierto sería lineal y estaría representada por la línea del entrehierro.

### 1.5.2.2 Característica de corto circuito

Las características de corto circuito de una máquina síncrona constituye la otra parte de la información básica para la determinación de los parámetros numéricos en esta prueba las tres terminales del devanado del estator (armadura) se ponen en corto circuito

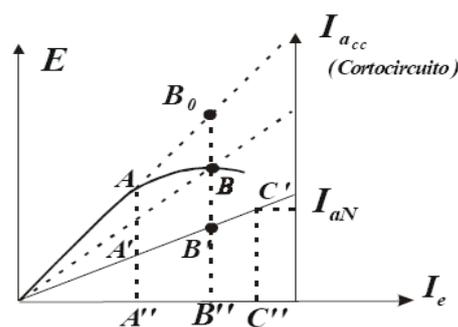


**Fig.1.46** Característica de cortocircuito.

La máquina se acciona hasta llegar aproximadamente su velocidad nominal fijando varios valores de corriente de campo se toman lecturas de las corrientes de corto circuito, hasta llegar al valor de corriente nominal de armadura o a un valor ligeramente superior a este, esta es casi lineal debido a que el hierro no está saturado al valor nominal de corriente de armadura.

### 1.5.2.3 Determinación reactancia síncrona

Las pruebas de cortocircuito y de circuito abierto permiten determinar la reactancia síncrona saturada y no saturada de la máquina, para eso se grafican las dos curvas en un plano cartesiano en el que se ha tomado como abscisa la corriente de excitación y como ordenadas la tensión del circuito abierto y la corriente de cortocircuito respectivamente



**Fig.1.47** Determinación de la reactancia síncrona.

La relación entre el voltaje de vacío y la corriente de corto circuito se conoce como la reactancia síncrona.

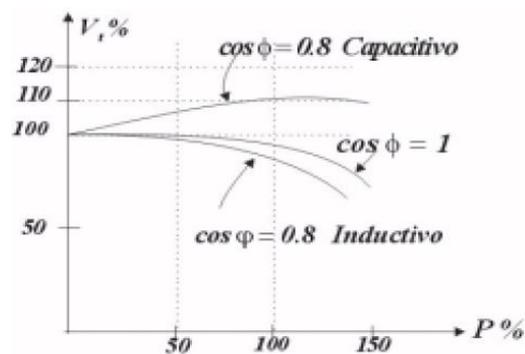
$$X_s = V_o / I_{CC} = E_f / I_{CC} \quad \text{Ecuación 1.81}$$

#### 1.5.2.4 Relación de corto circuito

Se define la relación de cortocircuito como la relación entre la corriente de excitación que produce la tensión nominal en circuito abierto y la corriente de excitación que produce la corriente de armadura nominal en cortocircuito, esta es inversa a la reactancia síncrona de la máquina.

#### 1.5.2.5 Características bajo carga de la máquina síncrona

Las principales características de operación de la máquina síncrona son las que interrelacionan la tensión en los terminales, la corriente de armadura, la corriente de excitación, el factor de potencia y la eficiencia. Se pueden trazar varias curvas para diferentes factores de potencia de la carga, estas son muy importantes para los generadores y generalmente se grafican en valores porcentuales, tomándose como bases la tensión nominal y la potencia que la máquina entrega a plena carga.



**Fig.1.48** Diagrama de la máquina síncrona a bajo carga

- Con factores de potencia capacitivos la tensión tiende a subir por efecto aditivo de la reacción de armadura que se suma al campo producido por el rotor.
- Con estas curvas se puede determinar fácilmente la regulación de la máquina.
- Con factores de potencia inductiva, se tiene que sobre excitar la máquina para mantener la tensión constante, cuando la carga aumenta, mientras que con cargas capacitivas hay que sub excitarlo.

- Con factores de potencia unitarios las reacciones son muy leves, esto es con cargas resistivas.

### 1.5.3 Característica ángulo- potencia de la máquina síncrona de polos salientes

Para el análisis de esta característica se puede centrar el estudio a un sistema elemental formado por una máquina de polos salientes conectada a un bus infinito de voltaje constante  $E_e$  a través de una reactancia por fase, por lo general la resistencia de armadura es pequeña comparativamente con la reactancia por lo que se la puede despreciar. El diagrama vectorial para la máquina operando como generador es el siguiente:

El efecto de la impedancia externa se incluye agregando esta al valor de las reactancias de la máquina, es decir que los valores totales de reactancia entre el voltaje interno o de excitación de la máquina y el del bus, y si se los expresa de acuerdo al diagrama vectorial anterior la potencia que se entrega al bus infinito es:

$$P = I_d E_e \sen \delta + I_q E_e \cos \delta \quad \text{Ecuación 1.82}$$

### 1.5.4 Sincronización del Generador con el Sistema de Potencia

Para la puesta en paralelo de generadores trifásicos ya sea con la red o con otros generadores, se lo puede hacer de dos formas: manual a través de instrumentos de medida analógicos, y automática por medio de instrumentos electrónicos de control.

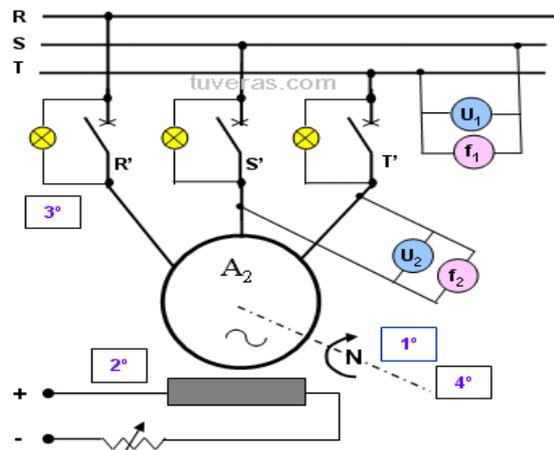
En las centrales eléctricas, propiamente dicho, es condición normal que se tenga más de una unidad generadora operando en paralelo y para lograr esto, es necesario que se satisfagan tres condiciones en el momento de la conexión.

- Debe existir igualdad de fases
- Debe existir igualdad de frecuencias
- Debe haber coincidencias de fases.

La coincidencia de fases indica la igualdad en el sentido de rotación, esto se puede verificar con instrumentos electrónicos, y es una práctica a realizar en el laboratorio de máquinas eléctricas. El procedimiento consiste en individualizar el sentido cíclico de las

sucesiones de las fases, igualdad de los otros valores (tensión y frecuencia), mediante voltímetros dobles, frecuencímetros y un voltímetro de cero que se inserta en el circuito, este mide la diferencia entre las dos tensiones y se pone en posición de cero cuando las dos tensiones además de ser iguales se encuentran también en fase. La velocidad de desplazamiento del índice del voltímetro de centro es función creciente de la diferencia de las dos frecuencias, de modo que cuando estas son muy cercanas la velocidad de desplazamiento es muy pequeña. El accionamiento mediante el cierre del interruptor se puede efectuar en el momento en que el índice del voltímetro de cero alcanza su posición muy lentamente.

#### 1.5.4.1 Sincronización de generadores mediante el método de las lámparas apagadas.



*Fig 1.49 Sincronización de generadores mediante el método de lámparas apagadas*

Como se puede observar en la figura el generador que se va a acoplar con la red o con otro generador, tiene conectada las tres lámparas de modo que estas brillan y se opacan juntas. Si brillan y se apagan en secuencia quiere decir que el generador o la red no se encuentra conectado correctamente con las barras y por lo tanto se debe cambiar dos de los tres conductores del mismo de su posición. Cuando el parpadeo de las lámparas se hace más lento, el interruptor de puesta en paralelo se cierra instantáneamente.

#### 1.5.5 Pérdidas y eficiencia

La potencia total que pierde una máquina síncrona bajo carga se obtiene como la suma las siguientes pérdidas:

- Pérdidas en el estator: Que son las que se dan por el efecto joule y por pérdidas adicionales en el estator.
- Pérdidas en el circuito magnético: Las que se pueden determinar con las pruebas de vacío.
- Pérdidas mecánicas: Estas pueden ser casi constantes ya que la velocidad de estas máquinas no varía.
- Pérdidas por excitación: Estas pérdidas están constituidas por la resistencia a 75°C del devanado inductor.
- Pérdidas en los accesorios de las máquinas: Son aquellas pérdidas que se representan en los accesorios de la máquina síncrona.

### 1.5.5.1 Eficiencia del generador

La eficiencia del generador se expresa como la relación entre la potencia eléctrica de salida (**P<sub>s</sub>**) y la potencia de entrada (**P<sub>i</sub>**) más las pérdidas anteriormente mencionadas (**P<sub>p</sub>**). Es conveniente recordar que la potencia de entrada de la máquina es mecánica mientras que la de salida es eléctrica.

$$\eta = P_s / (P_i + P_p) \quad \text{Ecuación 1.83}$$

Si se desprecian las pérdidas el par requerido para accionar la máquina sería:

$$T_d = P_s / \omega \quad \text{Ecuación 1.84}$$

Y considerando las pérdidas el par requerido sería:

$$T_d = (P_s + P_p) / \omega \quad \text{Ecuación 1.85}$$

## CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1 EVALUACIÓN DEL OBJETO DE INVESTIGACIÓN

#### 2.1.1 Características generales del equipo planteado

El banco planteado en nuestra tesis consta de los siguientes elementos:

- Generador síncrono trifásico de polos salientes: El mismo que originalmente fue un generador síncrono monofásico de polos salientes auto excitado con una potencia máxima de 3.5 KVA, el mismo que tras un proceso de rebobinado se lo logro transformar en un generador síncrono de polos salientes trifásico, con excitación de campo independiente, esto debido a fines académicos.
- Motor de inducción trifásico: El cuál cumple la función de primotor es decir es el encargado de transmitir la energía mecánica al generador.
- Variador de frecuencia: El cuál va a controlar la velocidad de giro del primotor, para así hacer llegar al generador la velocidad síncrona que este necesita.
- Central de medidas: La que nos dará las medidas que nuestro generador nos va a proporcionar.
- Acople mecánico motor-generator: Encargado de transmitir la energía mecánica del primotor al generador
- Cargas, Inductivas (motor de inducción trifásico), Resistivas (focos) y Capacitivas (capacitores): Las mismas que nos permitirán observar y comprender el comportamiento del generador en régimen de trabajo estable y aislado.
- Instrumentos de eléctricos de protección y de mando: Los mismos que en el primer caso serán los encargados de proteger los equipos utilizados, y en el segundo caso controlaran la alimentación general del banco y el accionamiento de las cargas.
- Estructura del mismo: La misma que sirve de soporte y de contenedora de los componentes del banco.

### 2.1.2 Propuesta alternativa

La propuesta alternativa que se plantea en este proyecto trata de fortalecer de alguna manera el pensum académico de la Carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Nacional de Loja, especialmente en la unidad de Maquinas Eléctricas, cada uno de los elementos del equipo que se describieron anteriormente reúnen las condiciones idóneas para en conjunto armar un equipo confiable y seguro para cuando el estudiante de Ingeniería Electromecánica realice sus prácticas de laboratorio.

Es por eso que se decidió dejar un equipo didáctico que permita la relación del estudiante con la generación de energía eléctrica tal como lo realizan las grandes centrales de generación, El presente trabajo tiene un fin didáctico y será utilizado para el beneficio de estudiantes y docentes de la carrera de Ingeniería Electromecánica de la Universidad Nacional de Loja.

## 2.2 CÁLCULOS MATEMÁTICOS DEL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL BANCO.

Como se expresó en la sección donde se describió cada uno de los elementos del banco, inicialmente adquirimos un generador síncrono monofásico de polos salientes auto excitado con los siguientes datos:

*Numero de polos = 2*

*Velocidad de giro = 3600 rpm. (Ns)*

*Frecuencia = 60Hz. (f)*

*Tipo de Bobinado = Concéntrico de doble capa*

*Número de ranuras = 36 (K)*

*Número de fases = 1 (q)*

*Voltaje = 110 Volt. (V)*

*Diámetro del Estator = 14.7 cm.*

*Longitud del estator = 12.8 cm.*

*Diámetro del bobinado del rotor = AWG # 22*

*Diámetro del bobinado del estator = AWG # 15*

*Número de vueltas de las bobinas del estator = 12*

*Altura de las ranuras = 11.5 mm.*

Ancho de las ranuras = 5 mm.

Para el cumplimiento de nuestro objetivo a este generador se le practicó un proceso de rebobinado eléctrico cuyo proceso se especifica a continuación:

### 2.2.1 Determinación del número de vueltas y de la sección del cable para el rebobinado.

Cómo originalmente el generador fue monofásico a un voltaje de 110 voltios, y como necesitábamos obtener un voltaje de 220 voltios trifásico en las terminales del mismo se realizó el siguiente cálculo para determinar el número de vueltas del bobinado del estator:

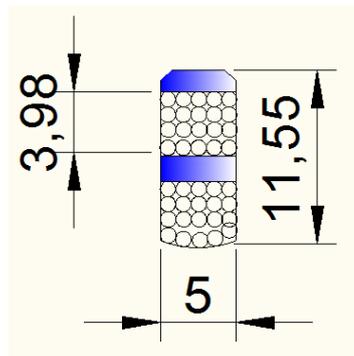
De la ecuación 1.19 tenemos:

$$\frac{U_p}{U_s} = \frac{N_p}{N_s}$$

$$N_s = \frac{U_s * N_p}{U_p}$$

$$N_s = \frac{220V * 12}{110V}$$

$N_s = 24$  vueltas  $\rightarrow$  Cómo es doble capa serían 48 vueltas



*Fig 1.50 Dimensiones de la ranura del generador*

Como el área de la ranura es de:

$$A_R = 11,55 \text{ mm} * 5 \text{ mm}$$

$$A_R = 57,75 \text{ mm}^2$$

El área del aislante entre capas es de  $9 \text{ mm}^2$

El área útil para alojar a los conductores es:

$$A_{\text{útil}} = A_R - [2 * (9\text{mm})^2]$$

$$A_{\text{útil}} = 39.5\text{mm}^2$$

El número total de conductores a alojar en la ranura son 48 debido a que el bobinado es de doble capa.

Entonces la sección del conductor para realizar el bobinado en el estator será de:

$$AWG = \frac{39.5\text{mm}^2}{48 \text{ cond.}} \rightarrow 0.823\text{mm}^2 \rightarrow \text{El conductor apto es el AWG\#18 (anexos).}$$

## 2.2.2 Cálculos del rebobinado del generador

### 2.2.2.1 Número de ranura por polo

Tomada de la ecuación (1.34)

$$N_{\text{polo}} = K/p$$

$$N_{\text{polo}} = 36/2 \rightarrow 18 \text{ Corresponde a } 180^\circ$$

### 2.2.2.2 Ángulo entre ranuras adyacentes

$$\alpha = \frac{180^\circ}{N_{\text{polo}}}$$

Ecuación 1.85

$$\alpha = \frac{180^\circ}{18} \rightarrow 10^\circ$$

### 2.2.2.3 Número de ranuras /polo y por fase

Tomada de la ecuación (1.33)

$$N_r = \frac{K}{p \times q}$$

$$N_r = \frac{36}{2 \times 3} \rightarrow 6$$

#### 2.2.2.4 Factor de distribución

Tomada de la ecuación (1.40)

$$K_d = \frac{\text{sen}\left(\frac{N_r \alpha}{2}\right)}{N_r \text{sen}(\alpha/2)}$$

$$K_d = \frac{\text{sen}\left(\frac{6 \times 10}{2}\right)}{6 \times \text{sen}\left(\frac{10}{2}\right)} \rightarrow 0.956$$

#### 2.2.2.5 Número de bobinas

$$B = K$$

Ecuación 1.86

$B = 36 \rightarrow$  Por que el bobinado es de doble capa y por polos consecuentes

#### 2.2.2.6 Número de grupos del bobinado

Tomada de la ecuación (1.36)

$$G = P * q$$

$$G = 1 * 3 \rightarrow 3$$

#### 2.2.2.7 Número de bobinas por grupo

Tomada de la ecuación (1.37)

$$U_b = B/p * q$$

$$U_b = 36/2 * 3 \rightarrow 6$$

#### 2.2.2.8 Amplitud del grupo

Tomada de la ecuación (1.38)

$$x = (q-1) * U_b$$

$$x = (3 - 1)6 \rightarrow 12$$

### 2.2.2.9 Pasos de bobina

$$Y_1 = x + 1$$

Ecuación 1.87

$$Y_1 = 12 + 1 \rightarrow 13$$

### 2.2.2.10 Paso fraccionario de la bobina

$$\beta = Y_1 * 180 / N_{\text{polo}} \rightarrow 130^\circ$$

### 2.2.2.11 Principios de fase

*Tomada de la ecuación (1.39)*

$$Y_{120^\circ} = \frac{K}{q * P} \rightarrow \frac{36}{3 * 1} = 12$$

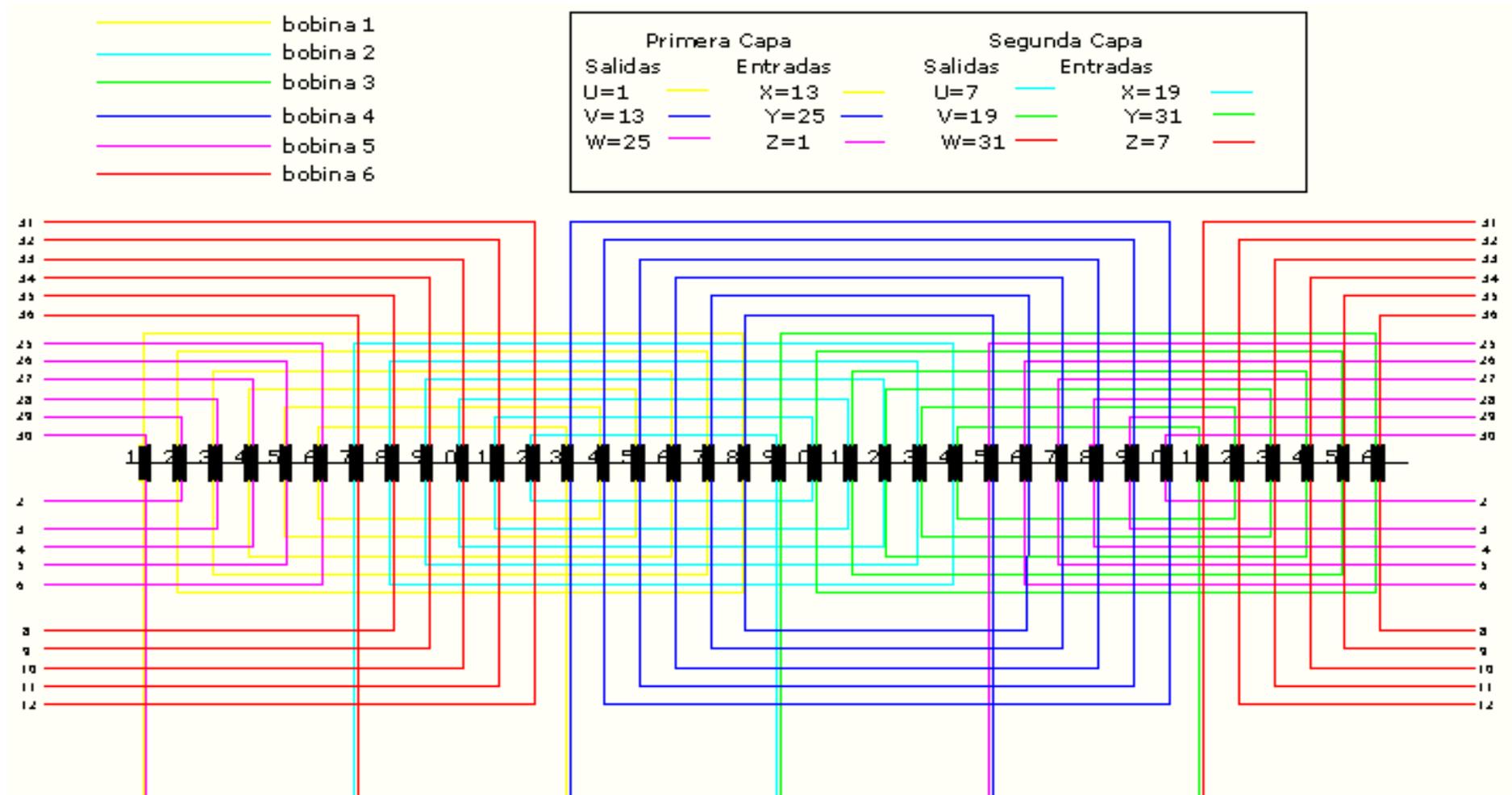


Fig.1.51 Diagrama del bobinado del generador

### 2.2.2.12 Factor de paso

Tomada de la ecuación (1.41)

$$K_p = \frac{\text{sen}\beta}{2} \rightarrow 0.90$$

### 2.2.2.13 Factor del devanado

Tomada de la ecuación (1.44)

$$K_b = K_p * K_d$$

$$K_b = 0.956 * 0.90 \rightarrow 0.86$$

### 2.2.2.14 Número total de conductores activos por fase

$N_{c.R}$  = Número de conductores por ranura  $\rightarrow$  48conductores

$$N = (N_{c.R}) K/q$$

Ecuación 1.90

$$N = 288\text{cond.}$$

### 2.2.2.15 Flujo magnético por polo

Tomada de la ecuación (1.48)

$$\Phi = Vf / (4.44 * N * f * Kb)$$

$$\Phi = 127V / 4.44(288)(60\text{hz})(0.86) \rightarrow 0.00192\text{Wb}$$

Voltaje de línea  $V_l = 220V$

“Para encontrar la potencia máxima del generador se debe considerar la operación en vacío puede haber una caída máxima del 25% de la tensión en línea”.<sup>7</sup> , donde el voltaje en los terminales es.

$$V_t = V_l - 0.25(V_l) \rightarrow 165V$$

$S =$  Sección del conductor del bobinado del estator AWG18  $\rightarrow 0.82\text{mm}^2$ .

$I_{adm.} = 7.5A \rightarrow$  Corriente máxima admisible (Anexos).

### 2.2.2.16 Potencia máxima entregada del generador

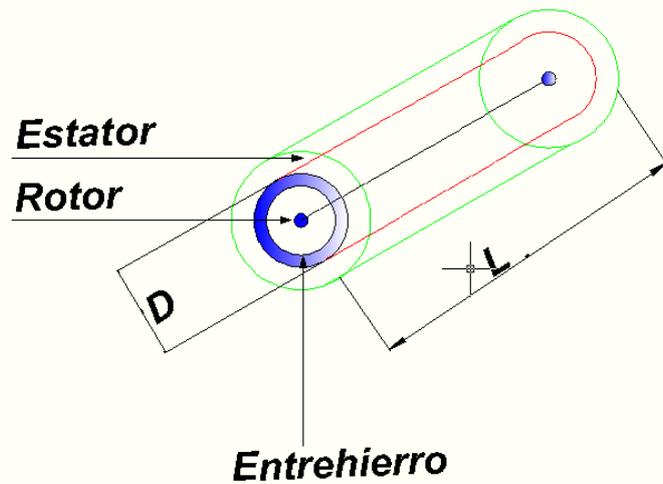
$$P_{max.} = I_{adm.} V_t \sqrt{3}$$

Ecuación 1.91

$$P_{max.} = 7.5(165V)\sqrt{3} \rightarrow 2.14KVA$$

<sup>7</sup> Véase, en el libro Máquinas Síncronas: Ing. Gilberto Enríquez. 1983, pagina. 118

## 2.3 MÉTODO ADICIONAL PARA CALCULAR LA POTENCIA DEL GENERADOR EN FUNCION DE SUS DIMENSIONES REALES



1.52 Dimensiones principales en las máquinas rotatorias

Las principales dimensiones de una máquina síncrona son el diámetro interno del estator y su longitud.

### 2.3.1 Cálculo de la carga eléctrica específica.

$$I_c = I_{adm}$$

$$N_c = 48 * k$$

$$N_c = 1728 \text{ cond}$$

Tomada de la ecuación (1.52)

$$Q = (I_c * N_c) / (\pi * D)$$

$$Q = 28063.12 \frac{\text{Wb} \cdot \text{m}^2}{\text{m}}$$

### 2.3.2 Coeficiente de salida

Tomada de la ecuación (1.64)

$$C_o = 1.1 B_m(Q)(K_d)10^{-3}$$

“Densidad de flujo medio  $B_m = 0.52 - 0.65 \text{Wb/m}^2$  para máquinas de polos salientes.”<sup>8</sup>

$$C_o = 1.1(0.585)(28063.12)(0.95)10^{-3}$$

$$C_o = 17.155$$

### 2.3.3 Cálculo de la potencia de salida

Tomada de la ecuación (1.67)

$$P_c = C_o \cdot D^2 \cdot L \cdot n_s$$

$$P_c = 17.155(0.147\text{m})^2(0.128\text{m})(60\text{rps})$$

$$P_c = 2.8\text{KVA}$$

## 2.4 SELECCIÓN DEL PRIMOTOR

La selección del motor se la realizo teniendo en cuenta:

1. **Las condiciones de la red de alimentación eléctrica:** El motor deberá de funcionar a un voltaje de 220V y a una frecuencia de 60hz que son normalizadas en nuestro país.
2. **La carga que el motor va accionar y su velocidad:** El motor va a ser utilizado como un primotor el mismo que va accionar a un generador trifásico de 3600rpm y una potencia de 2.14Kva. A continuación se detalla la selección del motor.

<sup>8</sup> Véase, en el libro Máquinas Síncronas: Ing. Gilberto Enríquez. 1983, paginas. 128-129

**Tabla 1.7** Tabla de selección de motores Weg.

Potencia		Carcasa IEC	RPM	Corriente nominal en 220V A	Corriente a rotor bloqueado Ip / In	Par Nominal Cn (NM)	Par a rotor bloqueado Cp / Cn	Momento máximo Cmax. Cn	220 V						Factor de servicio F.S.	Momento de Inercia J kgm <sup>2</sup>	Tiempo max. con rotor bloqueado en caliente / frio (s)	Peso aprox. (kg)
									Rendimiento η%			Factor de Potencia Cos φ						
									% de la potencia nominal									
kW	HP							50	75	100	50	75	100					
<b>II Polos - 3600 rpm</b>																		
0,12	0,16	63	3420	0,774	5,3	0,33	4	4	45	53	58,1	0,53	0,63	0,7	1,15	0,0001	21/46	6,3
0,18	0,25	63	3380	1,02	4,7	0,52	3	3,4	52	58	61,9	0,6	0,68	0,75	1,15	0,00012	16/35	6,5
0,25	0,33	63	3390	1,34	5	0,68	3,2	3	54,2	59	62,9	0,62	0,72	0,78	1,15	0,00014	12/26	6,8
0,37	0,5	63	3360	1,71	5,5	1,05	3,2	3,2	55,2	65,5	68,4	0,6	0,73	0,83	1,15	0,00019	9/20	7,4
0,25	0,33	71	3430	1,24	6,3	0,68	3	3	55	62,5	63,9	0,65	0,75	0,83	1,15	0,00033	13/29	9,5
0,37	0,5	71	3420	1,7	6,3	1,03	3	3,2	60	65	68	0,63	0,76	0,84	1,15	0,00033	7/15	9,3
0,55	0,75	71	3400	2,39	6,2	1,55	2,9	3,1	63,2	68,5	71	0,64	0,77	0,85	1,15	0,00037	8/18	9,6
0,75	1	71	3425	3	7,2	2,05	3,5	3,6	70	74	77,1	0,68	0,78	0,85	1,15	0,00052	9/20	10,3
0,55	0,75	80	3400	2,38	6,7	1,55	2,6	2,7	65	70,4	71,3	0,7	0,81	0,85	1,15	0,00067	8/18	12
0,75	1	80	3405	2,97	7	2,06	3	3,4	69,5	74	77,1	0,74	0,83	0,86	1,15	0,00079	11/24	13,4
1,1	1,5	80	3395	4,42	7	3,1	3,5	3,1	75	78,2	78,6	0,65	0,76	0,83	1,15	0,00074	11/24	13,1
1,5	2	80	3370	5,64	6,9	4,17	3,4	3	78,5	81	81,1	0,69	0,8	0,86	1,15	0,00085	9/20	14,6
1,1	1,5	90S	3440	4,22	7	3,06	2,5	3	72,5	76,5	78,6	0,75	0,83	0,87	1,15	0,00157	7/15	17,4
1,5	2	90S	3450	5,64	7,5	4,07	2,7	3,2	75,5	79	81,1	0,73	0,82	0,86	1,15	0,00157	11/24	17,9
2,2	3	90S	3450	8,42	6,7	6,11	3	3	78,5	80,7	81,6	0,66	0,77	0,84	1,15	0,00205	5/11	19,3
2,2	3	90L	3450	8,42	6,7	6,11	3	3	78,5	80,7	81,6	0,66	0,77	0,84	1,15	0,00205	5/11	19,4
3	4	90L	3450	11,4	7,6	8,14	3,3	3,6	82,9	84,5	83,9	0,65	0,76	0,82	1,15	0,00266	4/9	22,8
3	4	100L	3490	10,8	7,5	8,05	2,8	3,2	78,5	81,5	83	0,75	0,84	0,88	1,15	0,0056	8/18	29,5

**FUENTE:** Manuales de motores de inducción WEG.

- El lugar de instalación:** Se debe considerar un lugar donde va ser instalado teniendo en cuenta la altura sobre nivel del mar y la temperatura ambiente del mismo, teniendo en cuenta que un motor de inducción esta diseñado para operar en un ambiente con temperatura no superior a los 40°C y en una altura no superior a los 1000 metros sobre nivel del mar, la instalación en cualquier ambiente por encima de estas condiciones ara que el motor deba ser operado a una carga menor a la nominal.

Pero la combinación de altura y temperatura no siempre es desfavorable, pues nuestra ciudad de Loja se encuentra a 2133 metros sobre nivel del mar y a una temperatura ambiente de 20°C, podemos decir que prácticamente se compensa este efecto.

- Como se va hacer el arranque del motor:** Para el motor la mejor condición de arranque es la que garantiza el menor calentamiento, y teniendo en cuenta que para nuestro proyecto necesitamos de frecuencias variables, el arranque del motor se lo va ser por medio de un variador de frecuencia.

## 2.5 SELECCIÓN DEL VARIADOR DE FRECUENCIA

Para la selección del variador se debe considerar la potencia del motor y el voltaje del mismo, por ello se seleccionó el variador SINAMIC G110 con una alimentación bifásica a salida trifásica.

**Tabla 1.8** Tabla de selección de variador de frecuencia SIEMENS.

No. de Depósito	Tipo	Pot. del motor (HP) <sup>1)</sup>		Corriente de Entrada (A) 1 F / 3F	Corriente de Salida (A)	
		Par cons.	Par cuad.		Par cons.	Par cuad.
Equipos para tensión de conexión 220V						
SINAMICS G110						
111732	6SL3211-0AB13-7UA1	0,5		6.2 /	2.3	
131965	6SL3211-0AB15-5UA1	0,75		7.7 /	3.2	
131966	6SL3211-0AB17-5UA1	1		10.0 /	3.9	
131967	6SL3211-0AB21-1UA1	1,5		14.7 /	6.0	
131968	6SL3211-0AB21-5UA1	2		19.7 /	7.8	
131969	6SL3211-0AB22-2UA1	3		27.2 /	11.0	
134152	6SL3211-0AB23-0UA1	4		35.6 /	13.6	

**FUENTE:** Catálogo de variadores de frecuencia SIEMENS – SINAMICS G110.

## 2.6 CÁLCULOS DEL PRIMOTOR PARA ENCONTRAR LA POTENCIA QUE ENTREGA EN LA FLECHA

Datos:

$$n_s = 3600rpm$$

$$n_p = 3470rpm$$

$$V_L = 220V$$

$$I_L = 9Amp.en\Delta$$

$$Cos\varphi = 0.82$$

$$Hp = 3hp$$

### 2.6.1 Intensidad de corriente por fase

$$I_f = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \rightarrow 5.19Amp$$

Ecuación 1.92

### 2.6.2 Impedancia de entrada al estator

$$Z_e = \frac{V_f}{I_f} \quad \text{Ecuación 1.93}$$

$$Z_e = \frac{220V \angle 0^\circ}{5.19A \angle -35^\circ} \rightarrow 42.33\Omega \angle 35^\circ$$

$$Z_e = (34.7\Omega + j24.7\Omega)$$

*Impedancia por fase*

$$Z_f = (R_f + jX_f)$$

$$Z_f = Z_e - (R_{bobina} + jX_{bobina}) \quad \text{Ecuación 1.94}$$

### 2.6.3 Prueba para determinar la resistencia efectiva por fase

$$R_{dc} = \frac{V_{dc}}{I_{dc}^2} \quad \text{Ecuación 1.95}$$

$$R_{dc} = \frac{20V}{4.93A^2} \rightarrow 2.028\Omega$$

$$R_{bobina} = 1.5 \times R_{dc} \rightarrow 3.042\Omega * 3 = 9.12\Omega$$

En en nuestro caso el motor se encuentra conectado en delta. La resistencia equivalente, reactancia e impedancia por fase conectada en delta es 3 veces el valor que tienen cuando se conectan en estrella.

$$Z_f = (34.7\Omega + j24.7\Omega) - (9.12\Omega + jX_{bobina})$$

$$R_f = 25.58\Omega$$

### 2.6.4 Deslizamiento

$$S\% = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100 \quad \text{Ecuación 1.96}$$

$$S = \frac{3600 - 3470}{3600} \times 100\% \rightarrow 3.6\%$$

### 2.6.5 Potencia de entrada al estator

*La potencia de entrada al estator del primotor es la potencia nominal del mismo o sea 3 HP.*

### 2.6.6 Potencia transferida a través del entrehierro

$$P_{\text{entrehierro}} = 3I_f^2 R_f \quad \text{Ecuación 1.97}$$

$$P_{\text{entrehierro}} = 3(5.19A)^2 \times 25.58\Omega \rightarrow 2067.07W$$

### 2.6.7 Potencia mecánica

$$P_{\text{mec}} = (1 - S)P_{\text{entrehierro}} \quad \text{Ecuación 1.98}$$

$$P_{\text{mec}} = (1 - 0.036)2067.07W \rightarrow 1990.59W$$

### 2.6.8 Pérdida de potencia en el rotor

$$P_{\text{rotor}} = SP_{\text{entrehierro}} \quad \text{Ecuación 1.99}$$

$$P_{\text{rotor}} = 0.036(2067.07) \rightarrow 74.4145W$$

### 2.6.9 Potencia de salida en la flecha

$$P_{\text{flecha}} = P_{\text{mec}} - P_{\text{rotor}} \quad \text{Ecuación 1.100}$$

$$P_{\text{flecha}} = 1990.59W - 74.4145W \rightarrow \mathbf{1916.1755W}$$

### 2.6.10 Velocidad angular mecánica sincrónica

$$\omega_s = 4\pi f / \text{polos} \quad \text{Ecuación 1.101}$$

$$\omega_s = \frac{4\pi(60\text{hz})}{2} \rightarrow 377\text{rad/seg}$$

### 2.6.11 Velocidad angular mecánica del rotor

$$\omega_m = (1 - S)\omega_s$$

Ecuación 1.102

$$\omega_m = (0.963)377\text{rad/seg} \rightarrow 363.38\text{rad/seg}$$

### 2.6.12 Par de salida en la flecha

Tomada de la ecuación (1.85)

$$T_{flecha} = \frac{P_{flecha}}{\omega_m}$$

$$T_{flecha} = \frac{1916.1755W}{363.38\text{rad/seg}} \rightarrow 5.273N.m$$

### 2.6.13 Eficiencia del primotor

Tomada de la ecuación (1.83)

$$\eta = \frac{P_{flecha}}{P_{ent.}}$$

$$\eta = \frac{1916.1755W}{2238W} \rightarrow 85\%$$

## 2.7 DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DEL GENERADOR

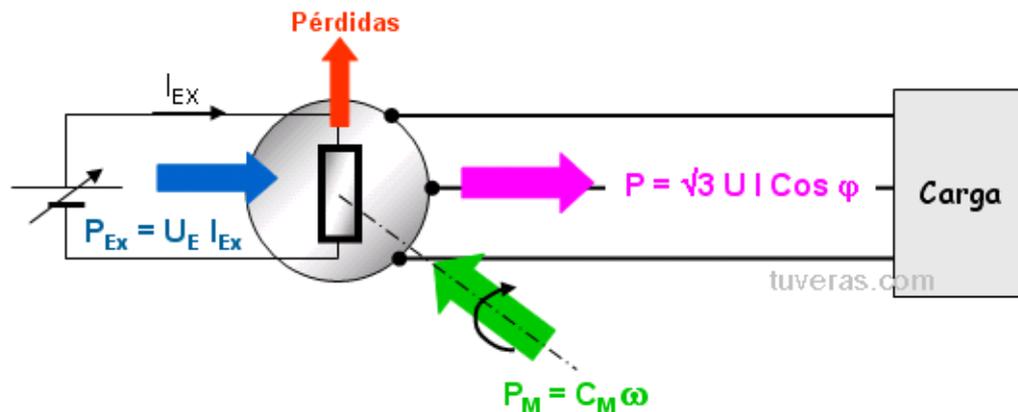


Fig. 1.53 Balance Potencia-Rendimiento de un generador síncrono

### 2.7.1 Pérdidas en el devanado armadura

$$P_{arm} = 3(I_{adm.})^2(r_a) \quad \text{Ecuación 1.103}$$

#### 2.7.1.1 Prueba para determinar la resistencia efectiva por fase

Tomada de la ecuación (1.95)

$$r_{dc} = \frac{V_{dc}}{I_{dc}}$$

$$r_{dc} = 20V / (7A * 2) \rightarrow 1.425\Omega$$

“Multiplicando por un factor de corriente alterna de 1.5”.<sup>9</sup>

$$r_a = 1.425\Omega * 1.5 \rightarrow 2.1375\Omega$$

$$P_{arm} = 3(7.5A)^2(2.1375\Omega/fase) \rightarrow 360.703W$$

<sup>9</sup> Véase, en el libro Máquinas Eléctricas y transformadores: Ing. Irving Kósow. 1993, paginas. 186

### 2.7.2 Pérdidas por fricción en los rodamientos

$$P_{fr} = CP\sqrt{n_s} \quad \text{Ecuación 1.104}$$

"C=Constante 0.5 - 0.6 para generador de polos salientes".<sup>10</sup>

$$P_{fr} = CP\sqrt{n_s}$$

$$P_{fr} = 0.6(2.140KVA)\sqrt{3600rpm} \rightarrow 77.04W$$

### 2.7.3 Velocidad periférica del colector

$$V = n_s \pi Dc \quad \text{Ecuación 1.105}$$

$Dc$ =Diámetro del colector. 0.048m

$$V = 3600rpm \times \pi(0.048m) \rightarrow 542.8m/seg.$$

### 2.7.4 Pérdidas por fricción entre los rodamientos y anillos colectores

$$P_{fr.c} = 9.81K_f pAV \quad \text{Ecuación 1.106}$$

" $K_f$  = Coeficiente de fricción 0.12 – 0.35".<sup>11</sup>

" $P$ =Presión de la escobilla sobre el anillo colector 0.10 – 0.250kg/cm<sup>2</sup>".<sup>12</sup>

$A$ = Área de contacto entre la escobilla y el anillo colector. 0.36cm<sup>2</sup>

$$P_{fr.c} = 9.81(0.235)(0.175kg/cm^2)(0.36cm^2)(542.8m/seg.) \rightarrow 77W$$

### 2.7.5 Pérdidas mecánicas totales

$$P_{mect} = P_{fr} + P_{fr.c} \quad \text{Ecuación 1.107}$$

Tomando valores promedios de el coeficiente " $K_f$  y de la presión en las escobillas

$$P_{mec} = 77.04W + 77W \rightarrow 154.04W$$

<sup>10-11-12</sup> Véase, en el libro Máquinas Síncronas: Ing. Gilberto Enríquez. 1983, paginas. 193-194

### 2.7.6 Determinación de la corriente de excitación

Para determinar la corriente de excitación se puede interpolar a partir de los datos de prueba, lo cual da una aproximación.

Para  $V_0 = 208V$

$$I_{exc.} = 0.50A \quad I_{exc.} = 233.50V \times 0.50A / 208V \rightarrow 0.56A$$

Para  $V_0 = 233.29V$

$$I_{exc.} = ?$$

Tomando otro valor de prueba

Para  $V_0 = 222V$

$$I_{exc.} = 0.59A \quad I_{exc.} = 233.50V \times 0.59A / 222V \rightarrow 0.62A$$

Para  $V_0 = 233.50V$

$$I_{exc.} = ?$$

Tomando la media de estos valores  $I_{exc.} = (0.56 + 0.62) / 2 \rightarrow 0.59A$

### 2.7.7 Potencia de excitación

$$P_{exc.} = R_{campo} I_{exc.}^2$$

Ecuación 1.109

$$P_{exc.} = 42\Omega(0.59)^2 \rightarrow 14.62W$$

### 2.7.8 Pérdidas en el núcleo del generador

Para determinar estas pérdidas se realiza la siguiente prueba: Primero se acciona el primotor a la velocidad nominal que el generador necesita para poder generar energía, e inmediatamente se toma el valor de la potencia que el primotor está consumiendo en ese instante, luego se excita el generador hasta que este alcance su tensión nominal, en ese instante se toma de nuevo la potencia que el primotor está entregando al generador, la diferencia entre estas potencias son las denominadas pérdidas en el núcleo.

**Tabla.1.9** Datos obtenidos en la prueba para determinar las pérdidas en el núcleo

Estado del generador	Tensión que le entrega el variador al motor	Intensidad que le entrega el variador al motor	Potencia entregada por el variador al motor
Sin excitación	207V	3.3A	946W
Con excitación	203V	3.8A	1068.9W

$$P_H = P \text{ con excitación} - P \text{ sin excitación}$$

$$P_H = (1068.9 - 946)W$$

$$P_H = 122.9W$$

### 2.7.9 Pérdidas totales de potencia

$$P_{\text{totales}} = P_{\text{arm}} + P_{\text{mec}} - P_{\text{exc.}}$$

Ecuación 1.110

$$P_{\text{totales}} = 623.1W$$

### 2.7.10 Potencia de entrada del generador

$$P_{\text{entrada}} = P_{\text{flecha}}$$

$$P_{\text{salida}} = P_{\text{flecha}} - P_{\text{totales}}$$

Ecuación 1.111

$$P_{\text{tsalida}} = 1916.755W - 500.123W \rightarrow 1293.73W$$

### 2.7.11 Eficiencia del generador

Tomada de la ecuación (1.83)

$$\eta = P_{\text{tsalida}} / P_{\text{entrada}}$$

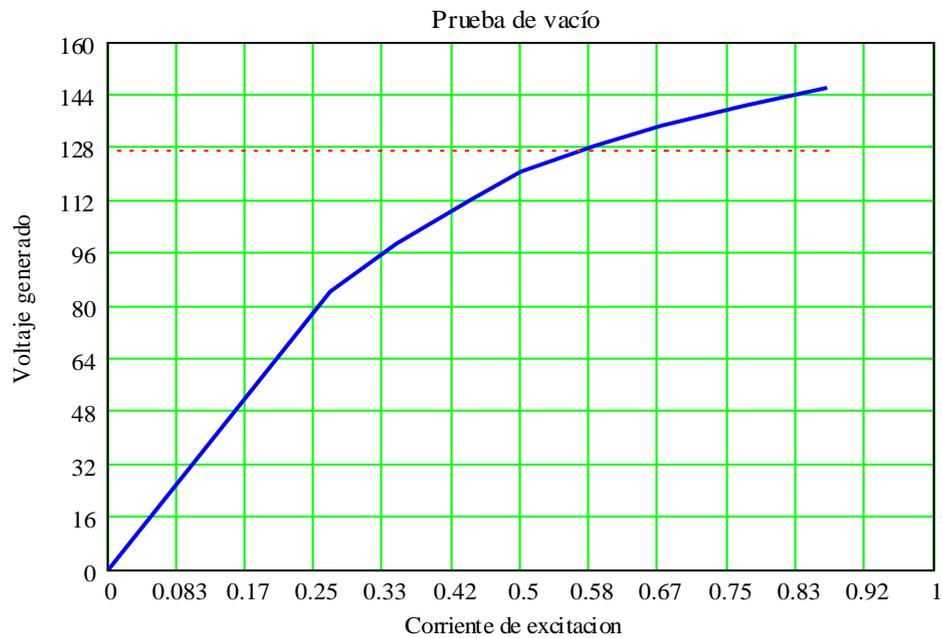
$$\eta = 1293.73W / 1916.18W * (100\%) \rightarrow 68\%$$

## 2.8 PRUEBAS REALIZADAS AL GENERADOR

### 2.8.1 Prueba de Vacío

*Tabla.1.10 Datos obtenidos de la prueba de vacío*

Eo (V)	0	145	171	194	208	220	233	243	252
Eexc.(V)	0	15	20	25	30	33	40	45	50
Iexc.(A)	0	0.27	0.35	0.44	0.50	0.59	0.67	0.77	0.87



*Fig.1.54 Curva de la prueba de vacío*

### 2.8.2 Prueba de corto circuito

*Tabla.1.11 Datos obtenidos de la prueba de corto circuito*

I(A)	0	4.2	5.5	7	8	9.1	10.6	12.36	13.9
Iexc.(A)	0	0.27	0.35	0.44	0.50	0.59	0.67	0.77	0.87
Vexc.(V)	0	15	20	25	30	33	40	45	50

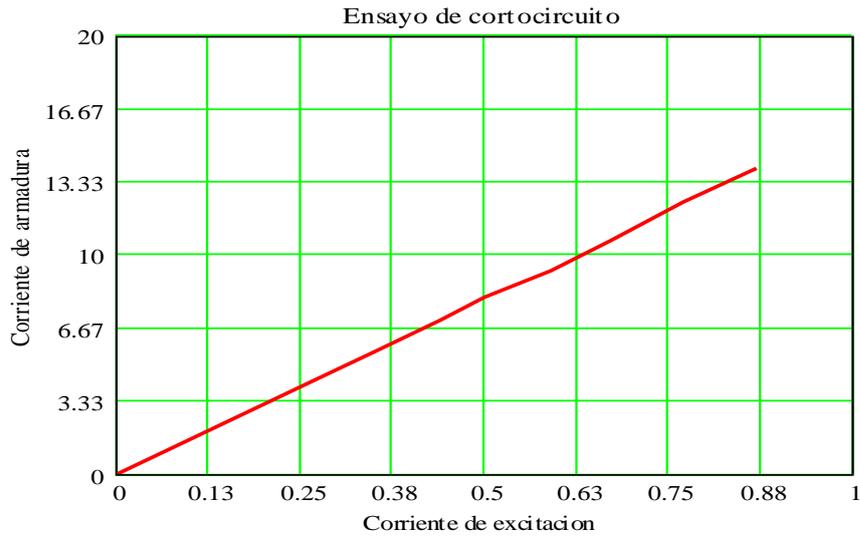
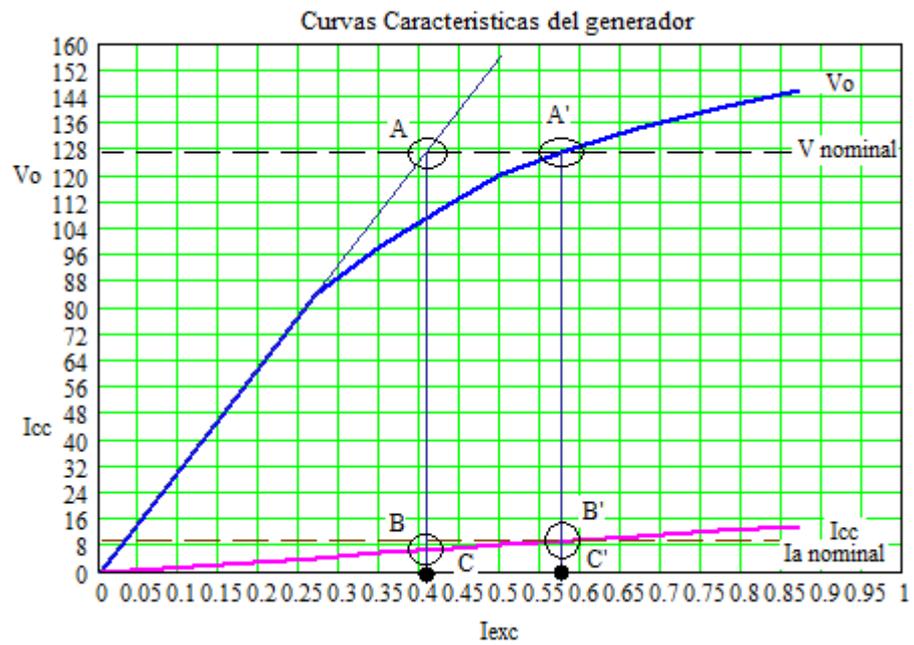


Fig.1.55 Curva de la prueba de cortocircuito

**2.8.3 Determinación de la reactancia síncrona saturada y no saturada del generador.**



**1.56 Determinación de la reactancia síncrona saturada y no saturada**

$$Zs \text{ nosat} = \frac{AC}{BC}$$

$$Zs \text{ nosat} = \frac{127V}{6.5A}$$

$$Zs \text{ no sat} = 19.53\Omega$$

$$Zs \text{ sat} = \frac{A'C'}{B'C'}$$

$$Zs \text{ sat} = \frac{127V}{9.1A}$$

$$Zs \text{ sat} = 13.95\Omega$$

$$Rcd = \frac{Vcd}{Icd * 2} = \frac{20V}{7A * 2} = 1.42\Omega$$

$$Rca = 1.5 * Rcd = 1.5 * 1.42 \Omega = 2.41\Omega$$

$$Xl \text{ no sat} = \sqrt{Rca^2 - Zs \text{ no sat}^2} = 19.38\Omega$$

$$Xl \text{ sat} = \sqrt{Rca^2 - Zs \text{ sat}^2} = 13.74\Omega \dots (Xs \text{ ..Síncrona})$$

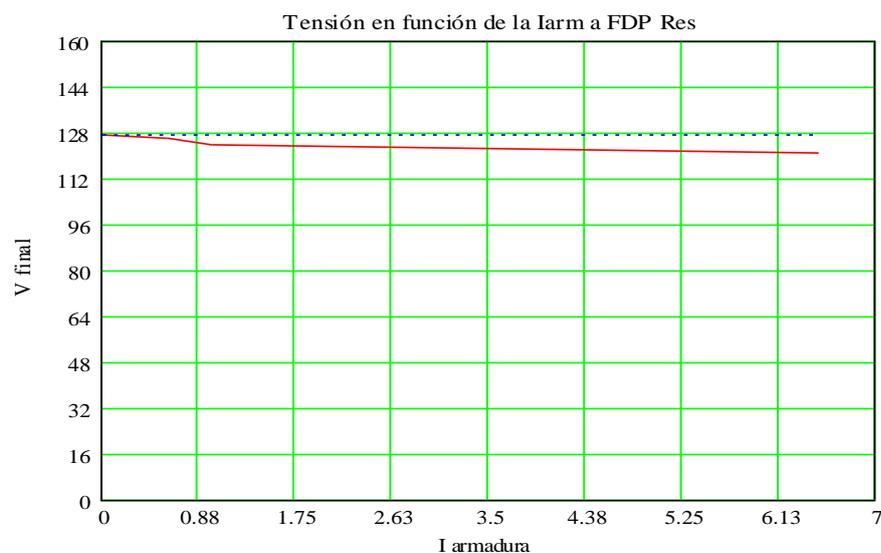
$$L \text{ no sat} = \frac{Xl \text{ no sat}}{2\pi f} = 0.0514H$$

$$L \text{ sat} = \frac{Xl \text{ sat}}{2\pi f} = 0.0365H$$

#### 2.8.4 Comportamiento del generador con carga resistiva

**Tabla.1.12** Datos obtenidos de la prueba con carga resistiva

Cargas	V inicial	V final	I armadura	Cos $\varphi$
100W	127V	126V	0.6A	1
150W	127V	124V	1A	1
1000W	127V	121V	6.5A	1

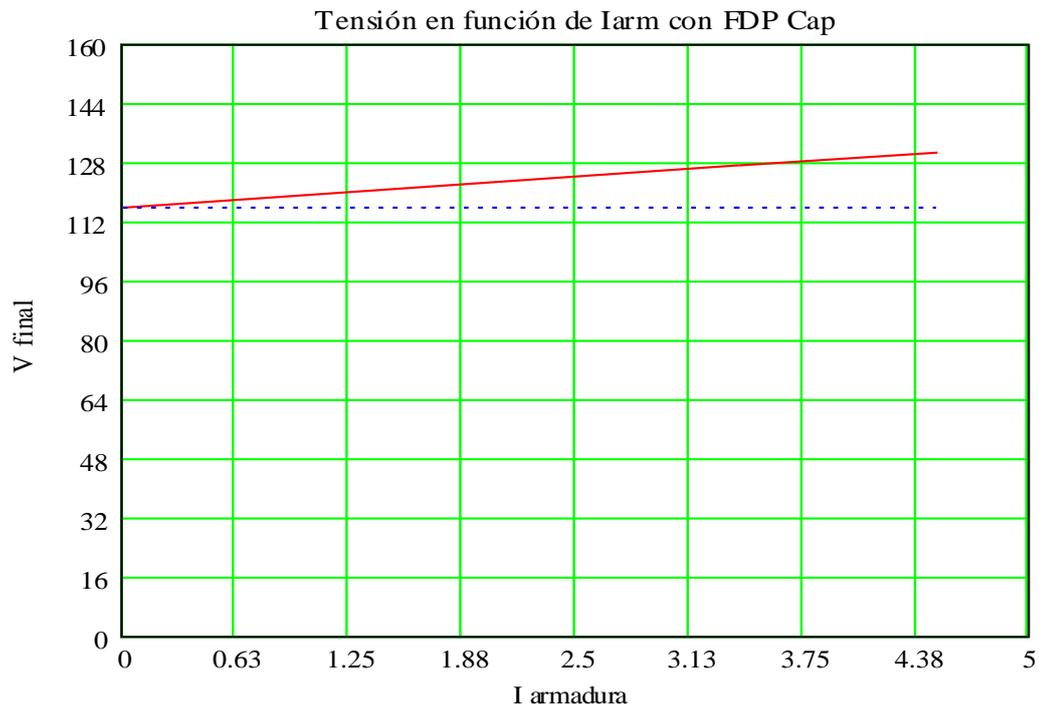


**Fig.1.57** Curva de la prueba de comportamiento con cargas resistivas

### 2.8.5 Comportamiento del generador con carga capacitiva

**Tabla.1.13** Datos obtenidos de la prueba con carga capacitiva

Carga	V inicial	V final	I armadura	Cos $\varphi$
60uF	116V	127V	3.4A	En adelante
103uF	116V	130.5V	4.5A	En adelante

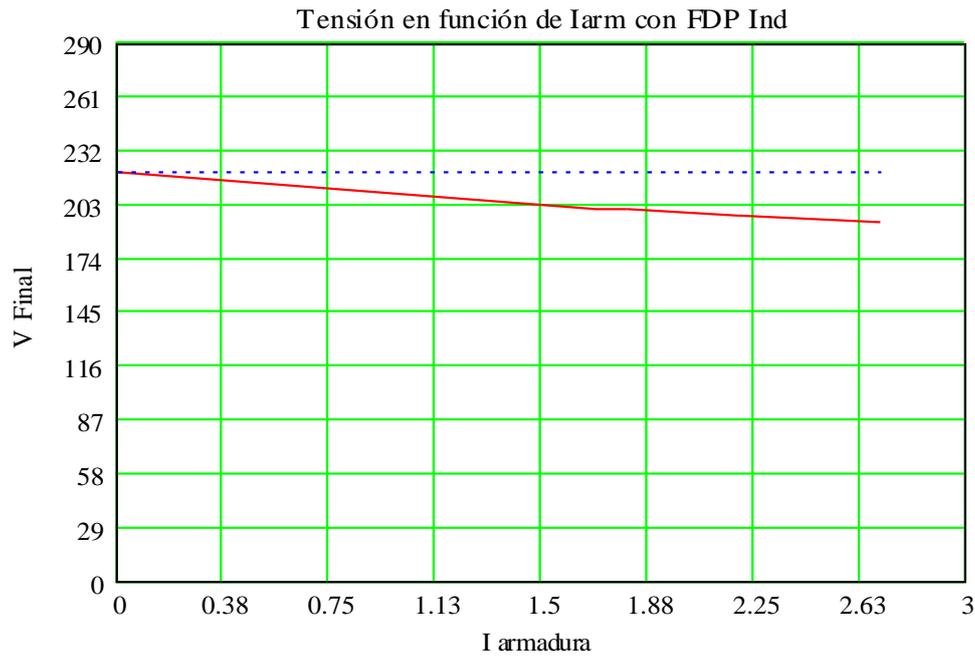


**Fig.1.58** Curva de la prueba de comportamiento con cargas capacitivas

### 2.8.6 Comportamiento del generador con carga inductiva

**Tabla.1.14** Datos obtenidos de la prueba con carga inductiva

Motor 3 $\sim$	Potencia	V inicial	V final	I armadura
Vacio	536W	220V	201	1.7A
Punto 1	590W	220V	200	1.8A
Punto 2	763W	220V	197	2.2A
Punto 3	907W	220V	193	2.7A

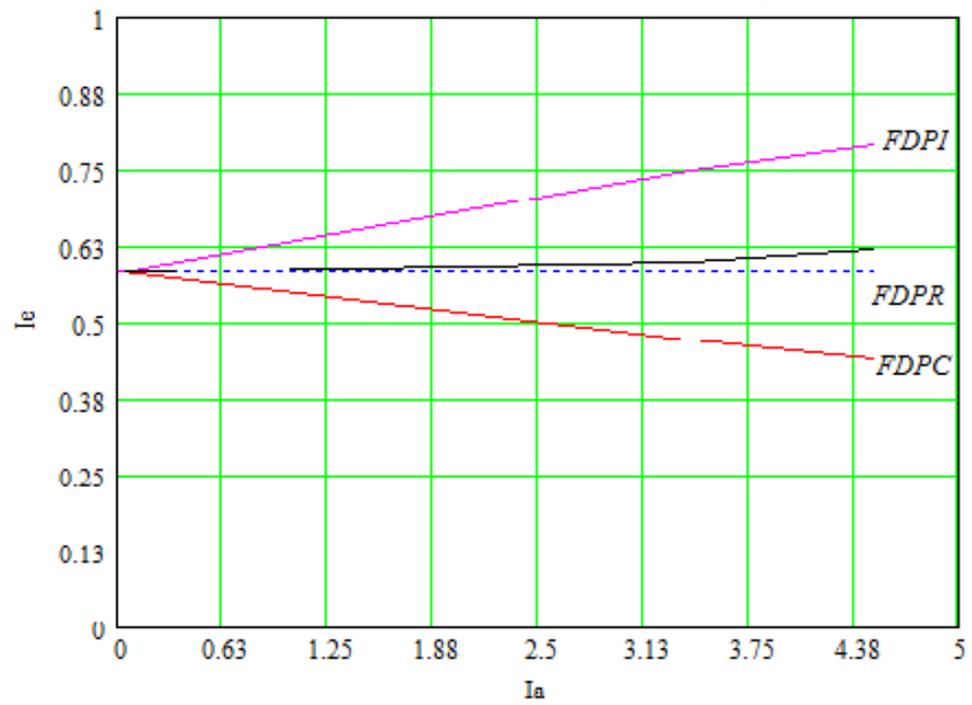


*Fig.1.59* Curva de la prueba de comportamiento con cargas inductivas

### 2.8.7 Regulación del generador con cargas resistivas, capacitivas e inductivas a través de su corriente de excitación.

*Tabla.1.15* Datos obtenidos de la prueba con carga (R,L,C) a diferentes potencias

Cargas	I <sub>exc.</sub> inicial	I <sub>exc.</sub> final	I armadura	Cos $\phi$
100W	0.58 A	0.60A	0.6A	Resistivo
150W	0.58 A	0.62A	1A	Resistivo
1000W	0.58 A	0.68A	6.5A	Resistivo
Motor vacío	0.58 A	0.75A	1.5A	Inductivo
Motor ½ carga	0.58 A	0.79A	2.2A	Inductivo
60 $\mu$ F	0.58 A	0.47A	3.4A	Capacitivo
103 $\mu$ F	0.58 A	0.44A	3.5A	Capacitivo



**Fig.1.60** Curva de regulación de voltaje para diferentes factores de potencia

## 2.9 CÁLCULO DEL EJE DE CUADRATURA Y EJE DIRECTO DEL GENERADOR A UNA CARGA DETERMINADA

### 2.9.1 Determinación del factor e potencia a diferentes tipos de cargas

*Carga inductiva*

$$P_n = 990w$$

$$\cos \varphi = 0.82$$

*Carga resistiva*

$$R_1 = R_2 = R_3 = 150w$$

*Carga capacitiva*

$$C_1 = C_2 = C_3 = 103\mu f$$

$$I_L = \frac{P_n}{V_L \cdot \cos \varphi \cdot \sqrt{3}}$$

$$I_L = \frac{990w}{220V \cdot \cos 35^\circ \cdot \sqrt{3}} \rightarrow 2.5A \angle -34.91^\circ$$

$$I_R = \frac{150W \cdot 3}{V_L \cdot \sqrt{3}}$$

$$I_R = \frac{450W}{220V \cdot \cos 0^\circ \cdot \sqrt{3}} \rightarrow 1.1A \angle 0^\circ$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

Ecuación 1.112

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot (60Hz) \cdot (103\mu f)} \rightarrow 25.75\Omega$$

$$I_C = \frac{V_L}{X_C \cdot \sqrt{3}}$$

$$I_C = \frac{220V \angle 0^\circ}{25.75\Omega \angle -90^\circ \cdot \sqrt{3}} \rightarrow 4.9A \angle 90^\circ$$

$$I_{Total} = I_L + I_R + I_C$$

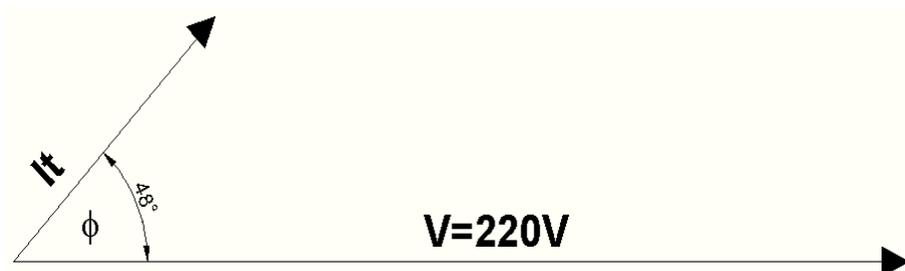
Ecuación 1.113

$$I_{Total} = 2.5A \angle -34.91^\circ + 1.1A \angle 0^\circ + 4.9A \angle 90^\circ$$

$$I_{Total} = (2.050 - 1.43j + 1.1 + 0j + 0 + 4.9j)$$

$$I_{Total} = (3.15 + 3.47j)$$

$$I_{Total} = 4.68 \angle 48^\circ$$



**Fig.1.61** Ángulo de desfase entre la corriente y tensión

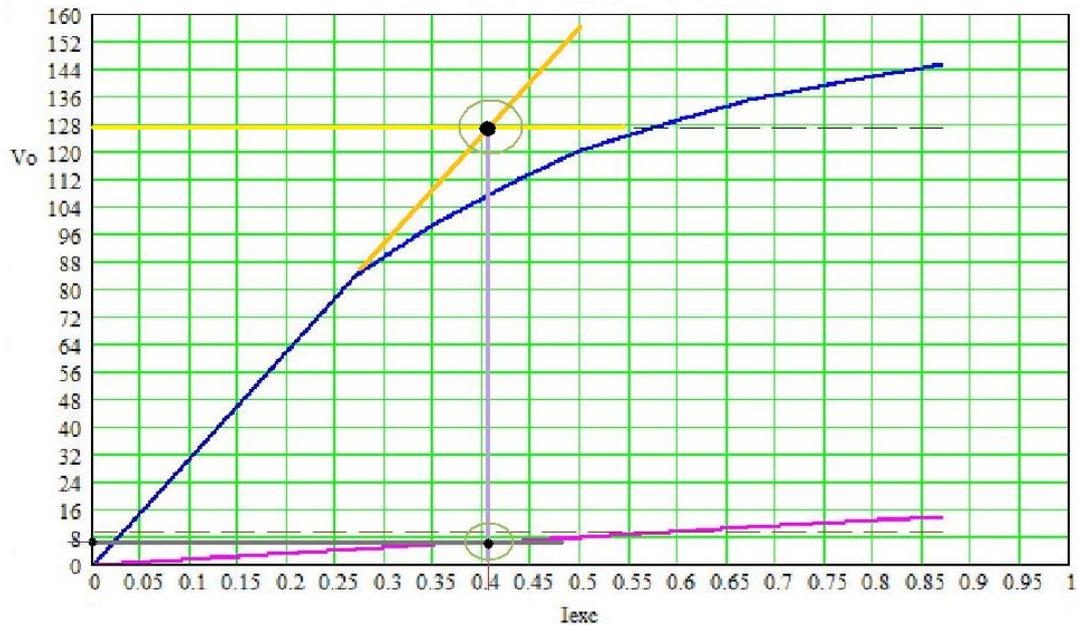
$$P_n = 2140VA$$

$$\cos \varphi = 0.66$$

$$E_L = 220V$$

$$I_n = \frac{2140VA}{3 \times 128V} \rightarrow 5.61A = I_a$$

### 2.9.2 Determinación de la reactancia del eje directo y la del eje de cuadratura.



**Fig.1.62** Curva para determinar la reactancia de cuadratura

Tomando valores de la grafica tenemos:

$$V_f = 127V$$

$$I_{cc \text{ no sat}} = 6.5A \text{ aproximadamente}$$

$$X_d = 127V / 6.5A \rightarrow 19.53\Omega /$$

fase

$$X_q = 19.53\Omega / \text{fase}(0.65) \rightarrow 12.69\Omega /$$

fase

### 2.9.3 Determinación del ángulo del voltaje de fase con respecto a la corriente del eje de cuadratura

Tomada de la ecuación (1.76)

$$\tan(\delta) = \frac{I_a X_q \cos(\varphi)}{V_f + I_a X_q \sin(\varphi)}$$

$$\tan(\delta) = \frac{5.61(12.69)(0.66)}{127 + 5.61(12.69)(0.74)}$$

$$\tan(\delta) = \frac{46.98}{179.68} \rightarrow \delta = 15^\circ$$

### 2.9.4 Voltaje de armadura

Tomada de la ecuación (1.73)

$$E_f = V_o = V_l + jx_s I_a$$

$$E_f = 220 + j0 + j13.75(5.61)$$

$$E_f = 220 + j77.13 \rightarrow 233.13V \angle 19.32^\circ$$

### 2.9.5 Corriente del eje directo

Tomada de la ecuación (1.74)

$$I_d = I_a \sin(\delta + \varphi)$$

$$I_d = 5.61 \sin(15^\circ + 48^\circ) \rightarrow I_d = 4.98A$$

### 2.9.6 Corriente del eje de cuadratura

Tomada de la ecuación (1.75)

$$I_q = I_a \cos(\delta + \varphi)$$

$$I_q = I_a \cos(63^\circ) \rightarrow I_q = 2.54A$$

### 2.9.7 Voltaje en el eje directo

Tomada de la ecuación (1.78)

$$V_d = I_d X_d$$

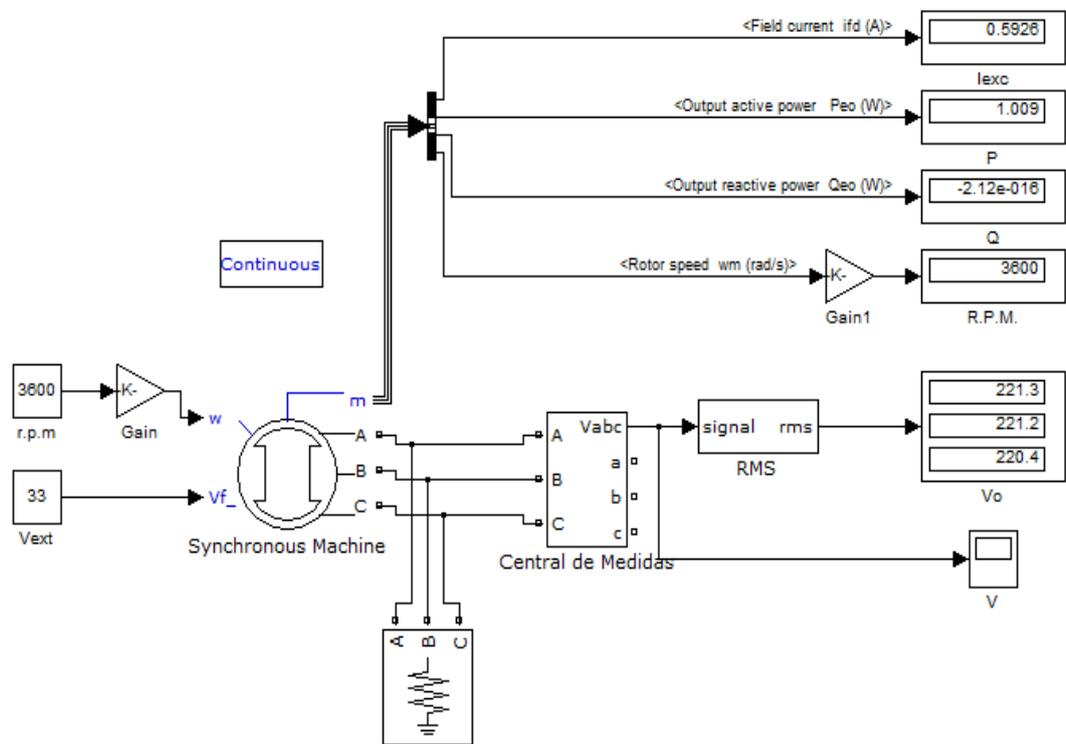
$$V_d = 4.98A * 19.53\Omega \rightarrow V_d = 97.25V$$



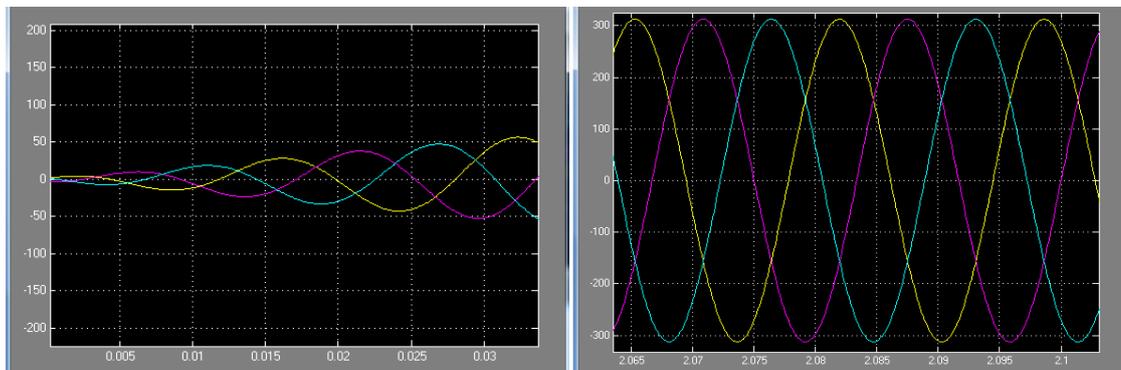
## CAPÍTULO III: SIMULACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO MEDIANTE MATLAB Y ELABORACIÓN DE GUÍAS PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO

### 3.1 Resultados de la simulación de Prácticas

#### 3.1.1 Prueba de Vacío

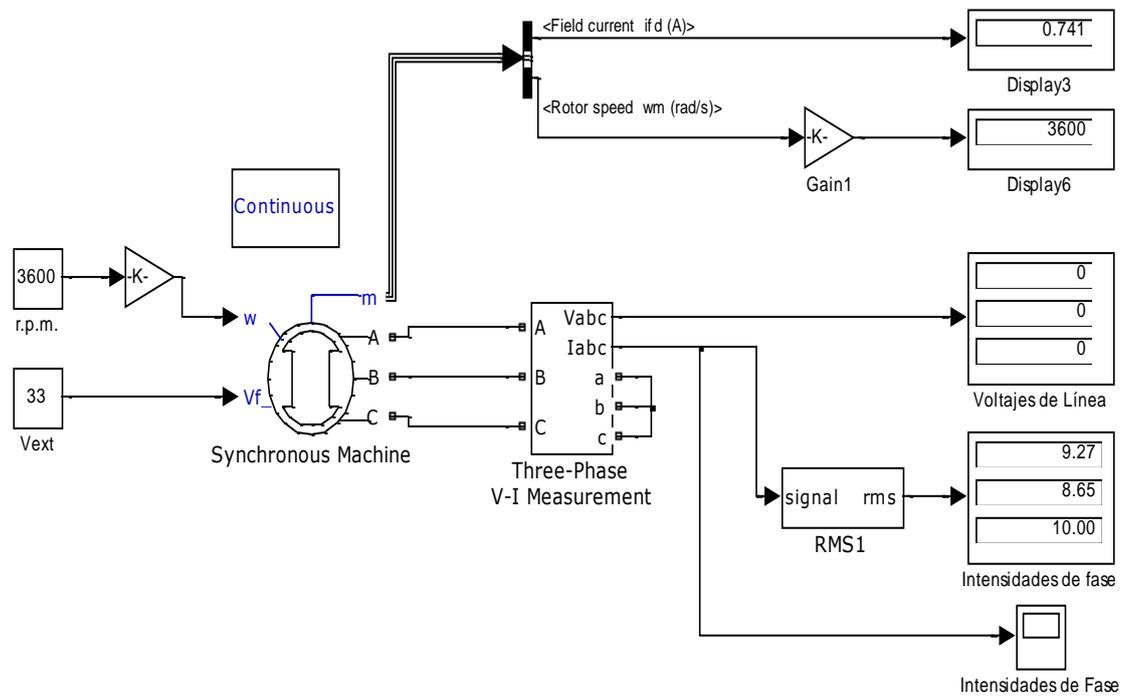


*Fig.1.64 Diagrama de simulación de la prueba de vacío mediante Simulink*

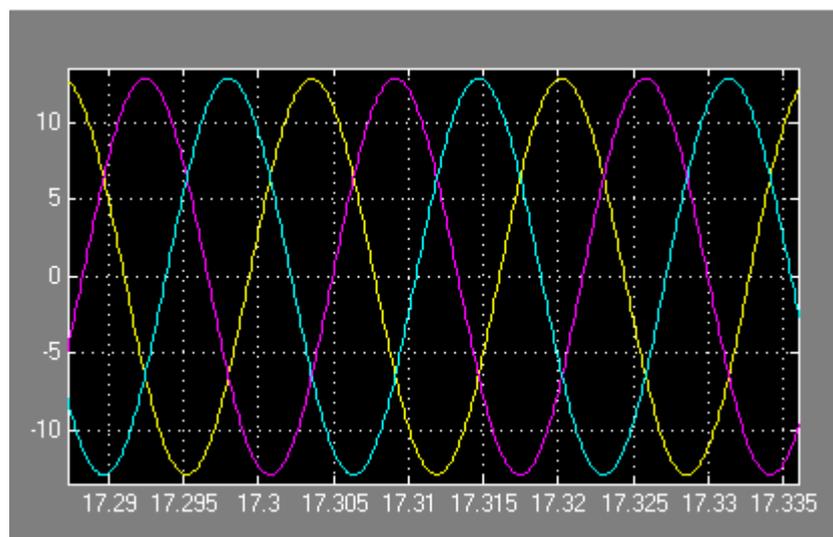


*Fig.1.65 Voltajes Generados en la prueba de Vacío*

**3.1.2 Prueba de Cortocircuito**

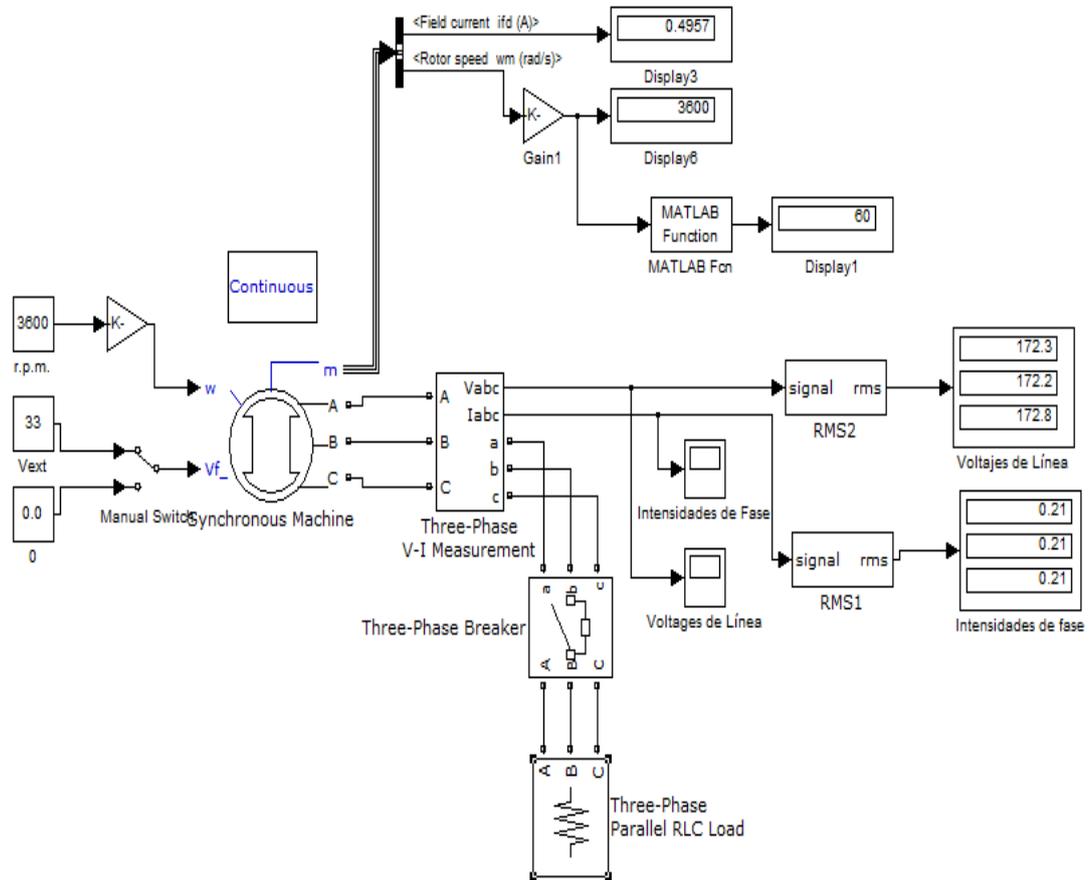


*Fig.1.66 Diagrama de simulación de la prueba de cortocircuito mediante Simulink*

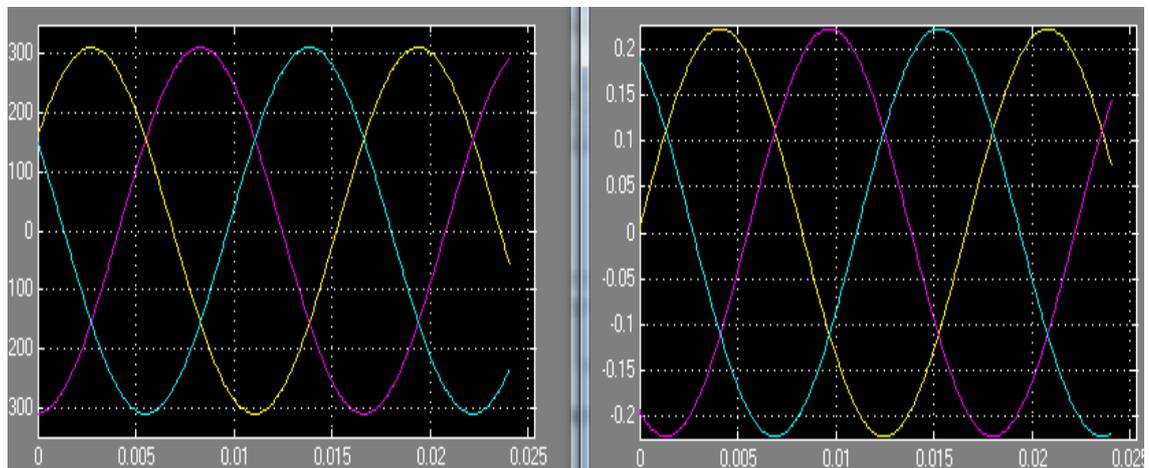


*Fig.1.67 Intensidades de armadura en la prueba de cortocircuito*

**3.1.3 Comportamiento del generador con carga resistiva en régimen aislado**

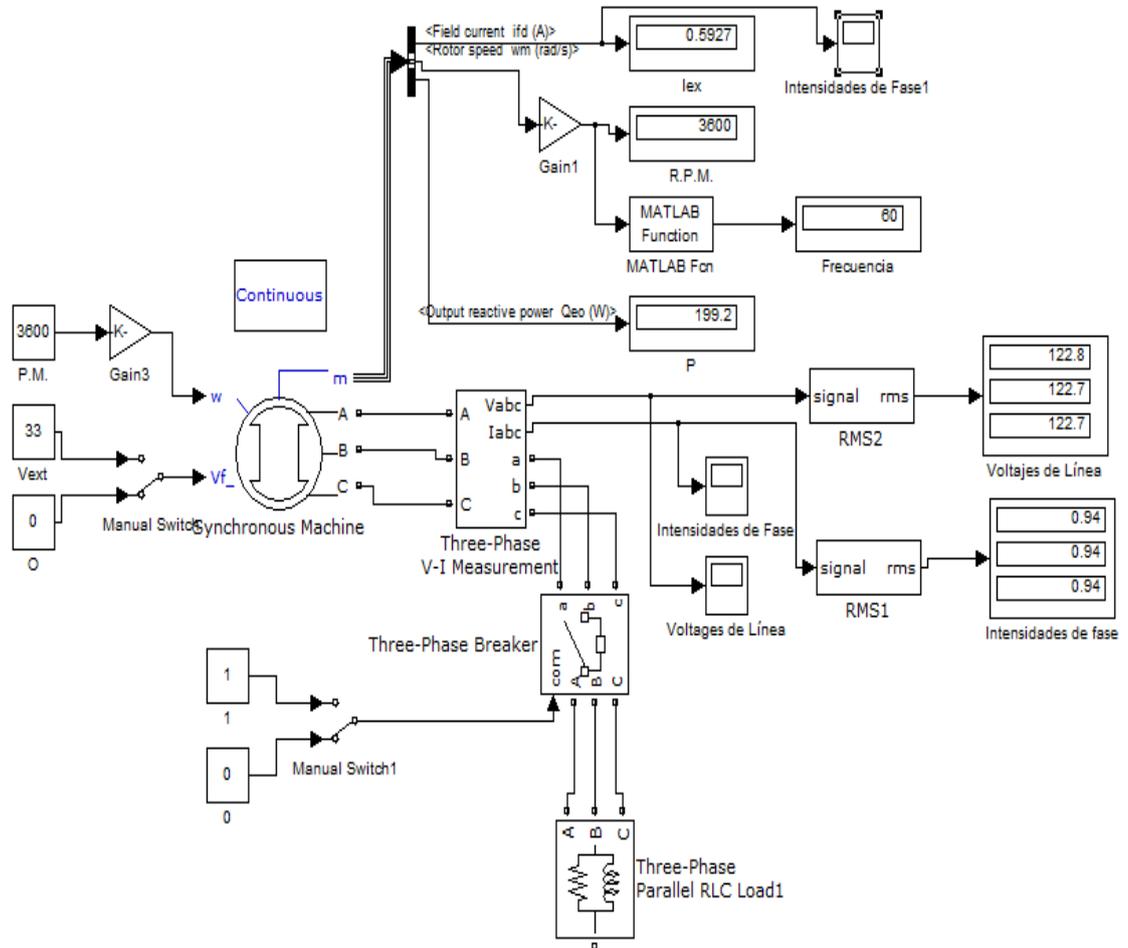


*Fig.1.68 Diagrama de simulación de la prueba con carga resistiva mediante Simulink*

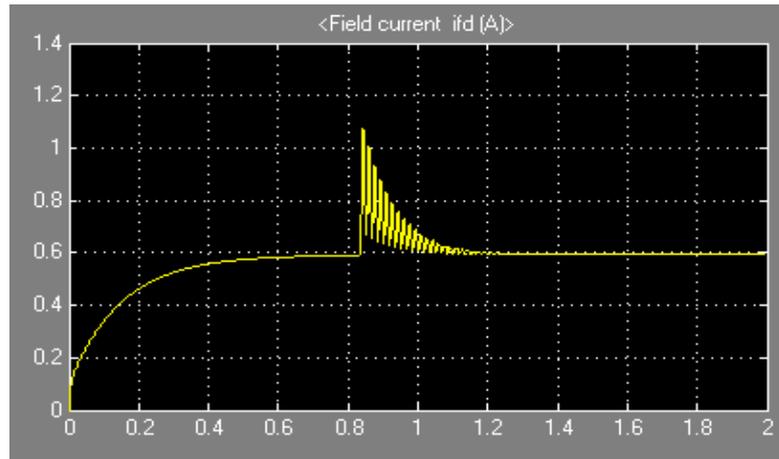


**Fig.1.69** Intensidad de fase y Voltajes de línea del generador a una carga de 180W.

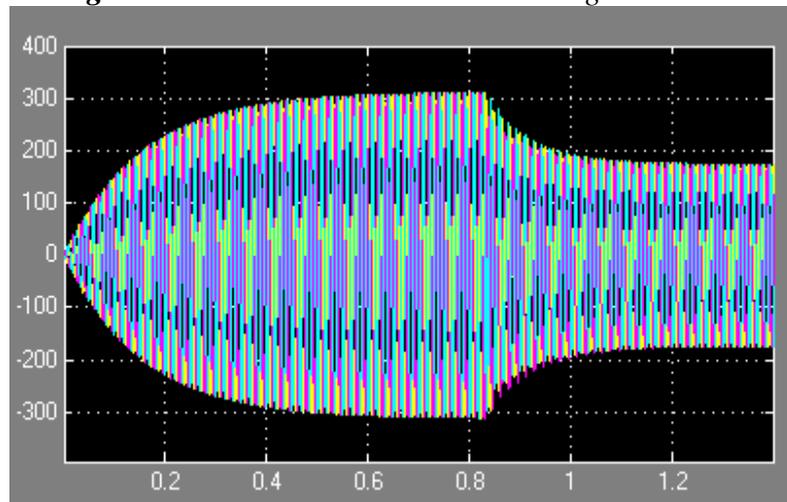
**3.1.4 Comportamiento del generador con carga inductiva**



**Fig.1.70** Diagrama de simulación de la prueba de comportamiento del generador con carga inductiva mediante Simulink.

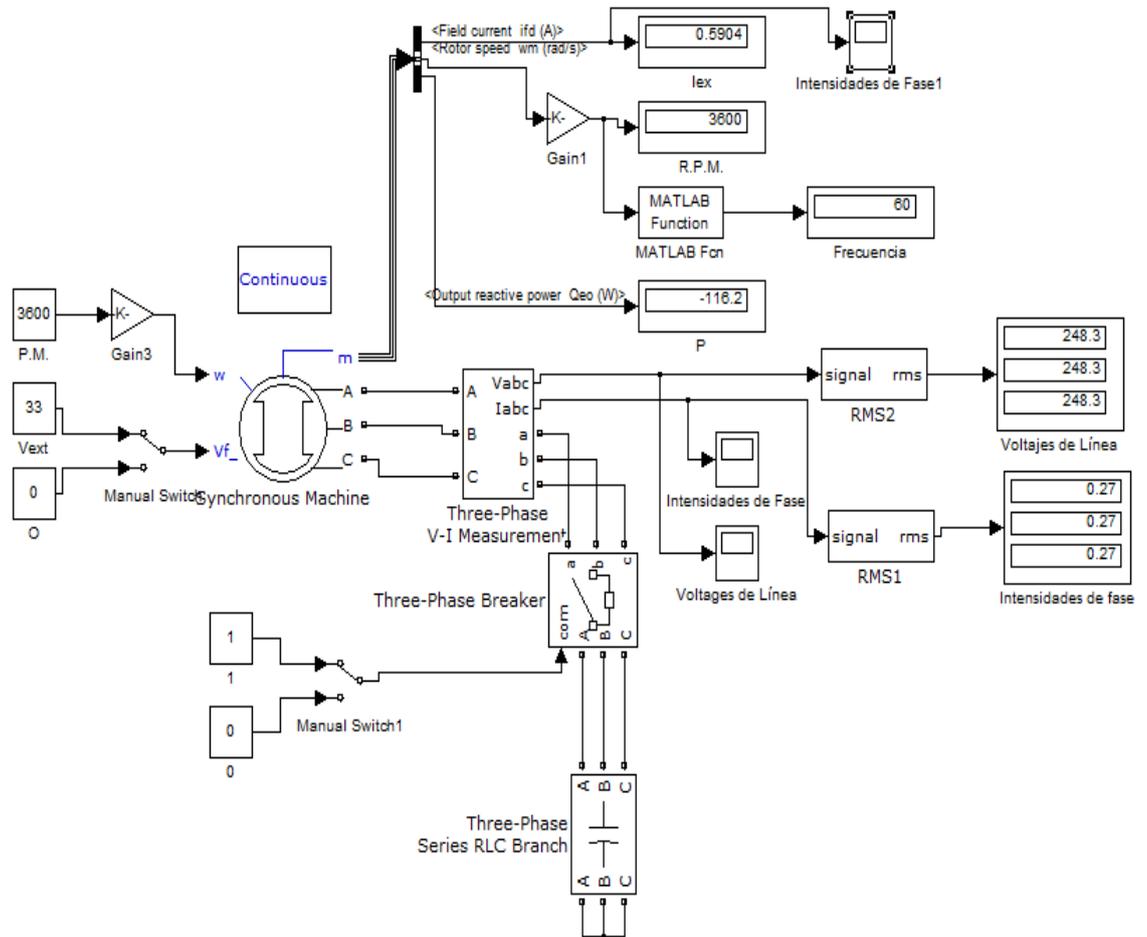


*Fig.1.71 Corriente de excitación con carga inductiva*

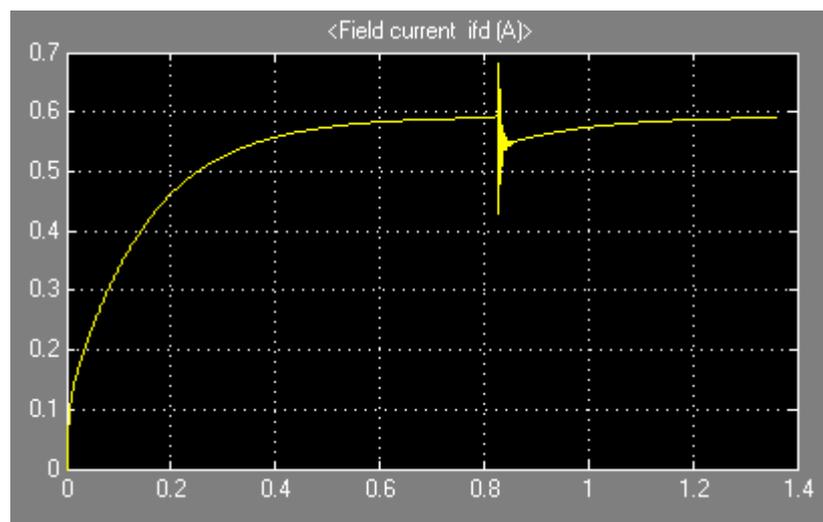


*Fig.1.72 Caída de voltaje con carga inductiva*

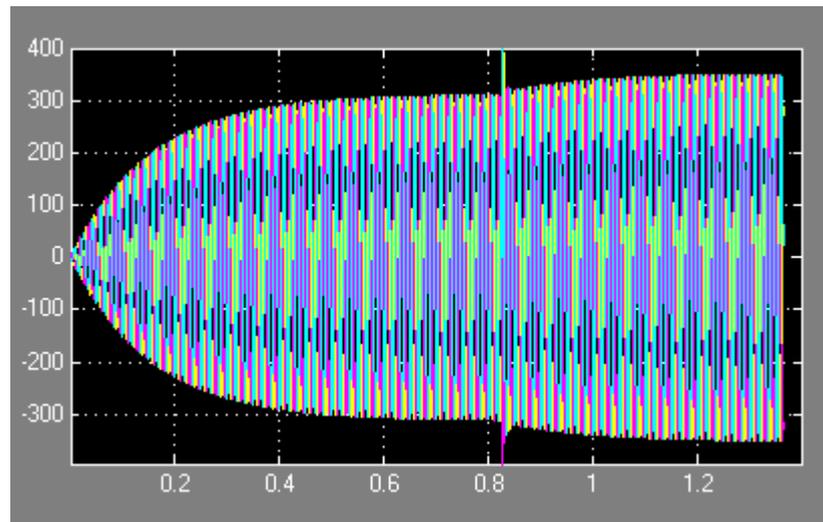
### 3.1.5 Comportamiento del generador con carga capacitiva



**Fig.1.73** Diagrama de simulación de la prueba de corriente de excitación en función de la corriente de armadura mediante Simulink

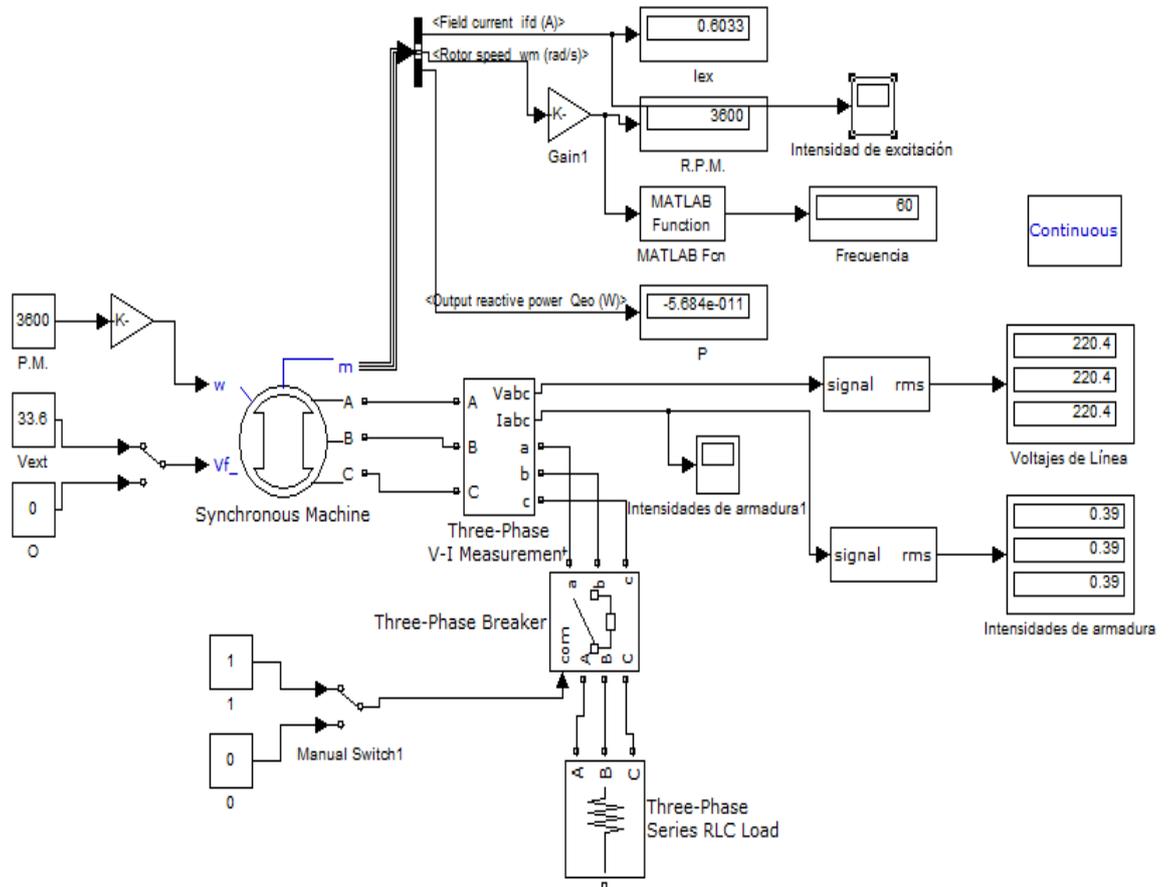


**Fig.1.74** Corriente de excitación con carga capacitiva

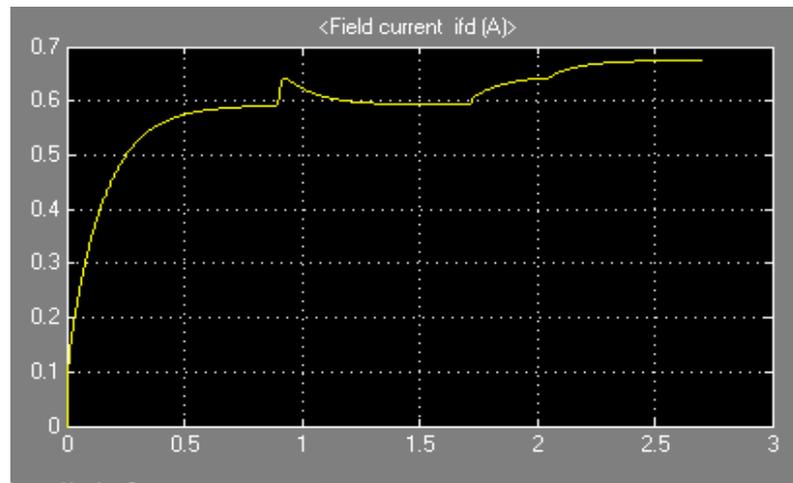


*Fig.1.75 Aumento de voltaje debido a la carga capacitiva*

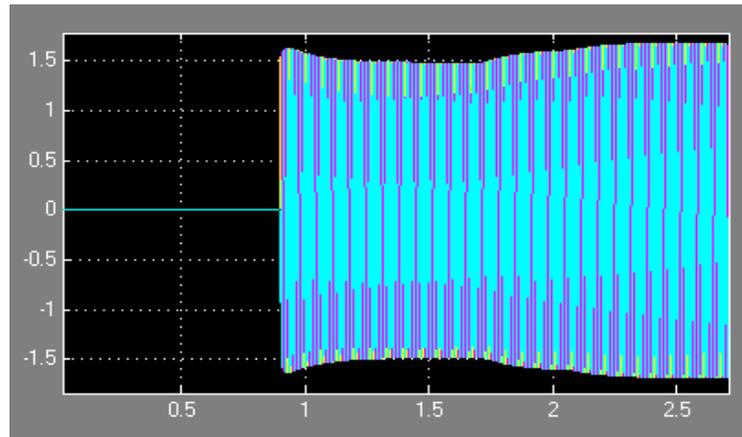
### **3.1.6 Determinación de la curva de corriente de excitación en función de la corriente de armadura o de la potencia suministrada.**



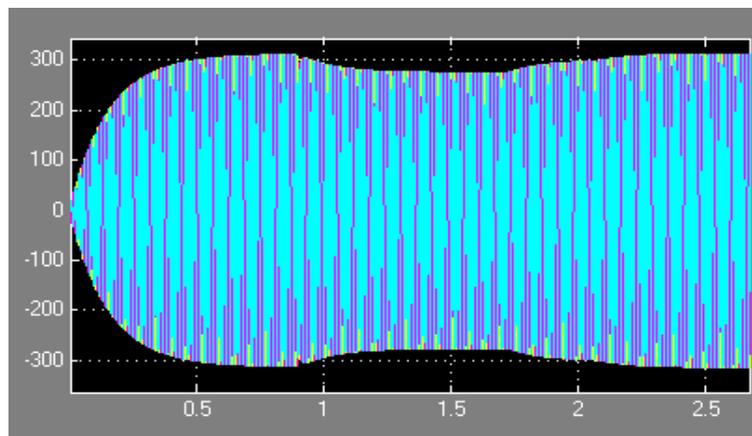
**Fig.1.76** Diagrama de simulación de la prueba de corriente de excitación en función de la corriente de armadura mediante Simulink



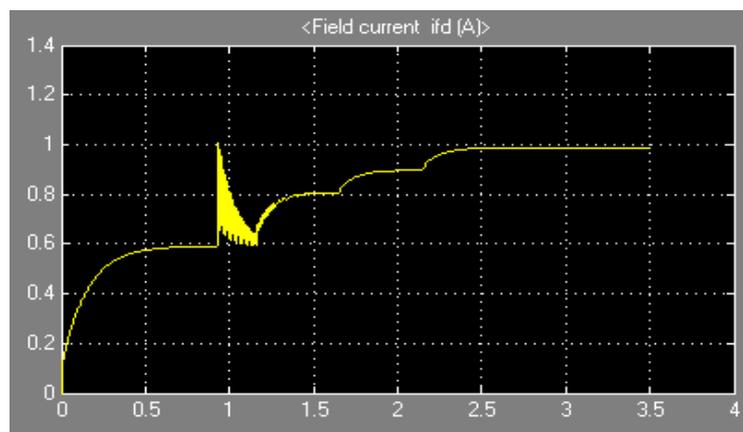
**Fig.1.77** Variación de la corriente de excitación para mantener el voltaje nominal con carga resistiva



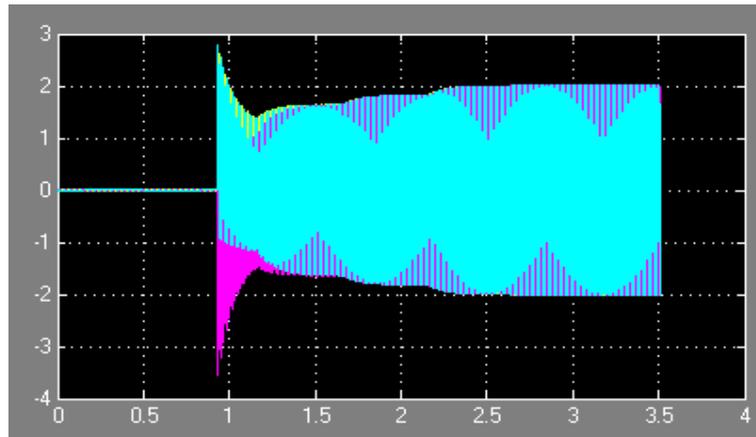
**Fig.1.78** Corriente de armadura para una carga de 450W



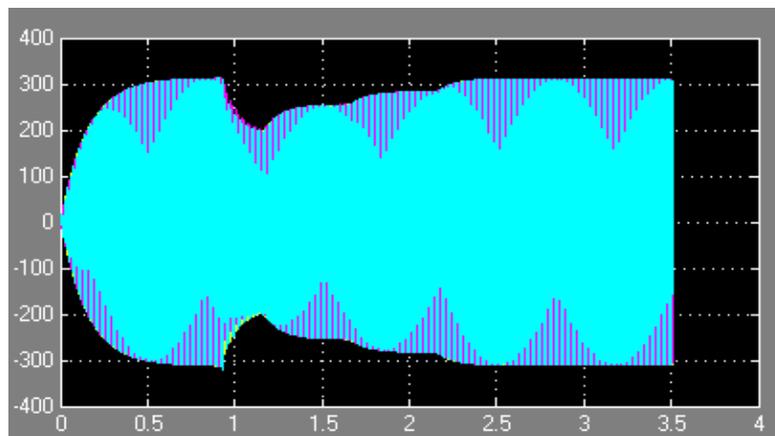
**Fig.1.79** Regulación de voltaje para una carga de 450W



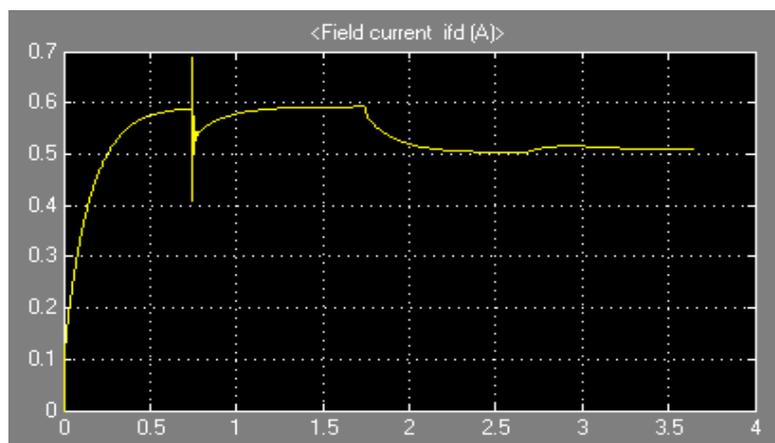
**Fig.1.80** Variación de la corriente de excitación para mantener el voltaje nominal con carga inductiva de 640 VAR



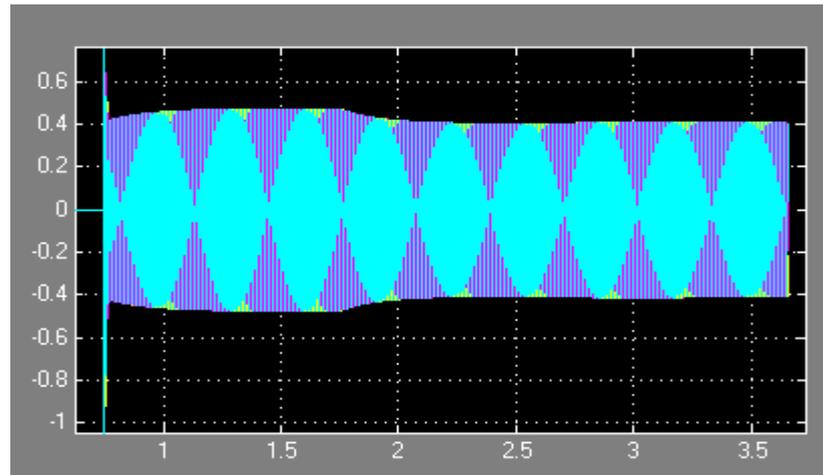
*Fig.1.81* Corriente de armadura para una carga inductiva de 640 VAR



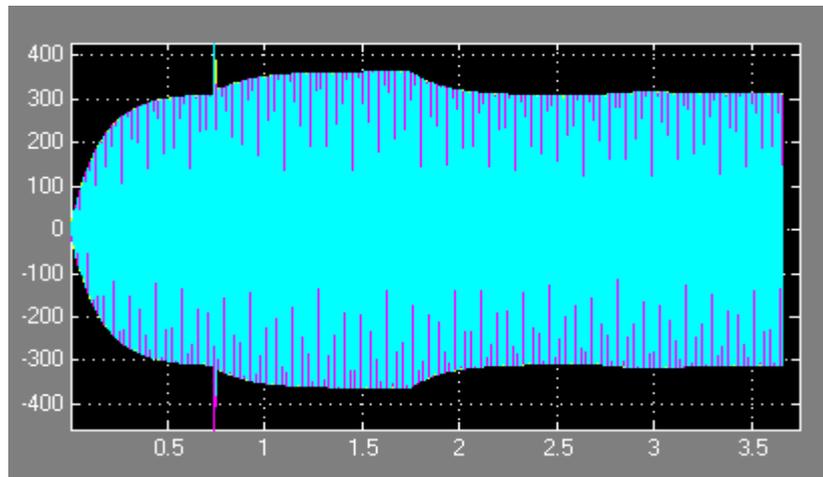
*Fig.1.82* Regulación de voltaje para una carga inductiva de 640 VAR



*Fig.1.83* Variación de la corriente de excitación para mantener el voltaje nominal con carga capacitiva

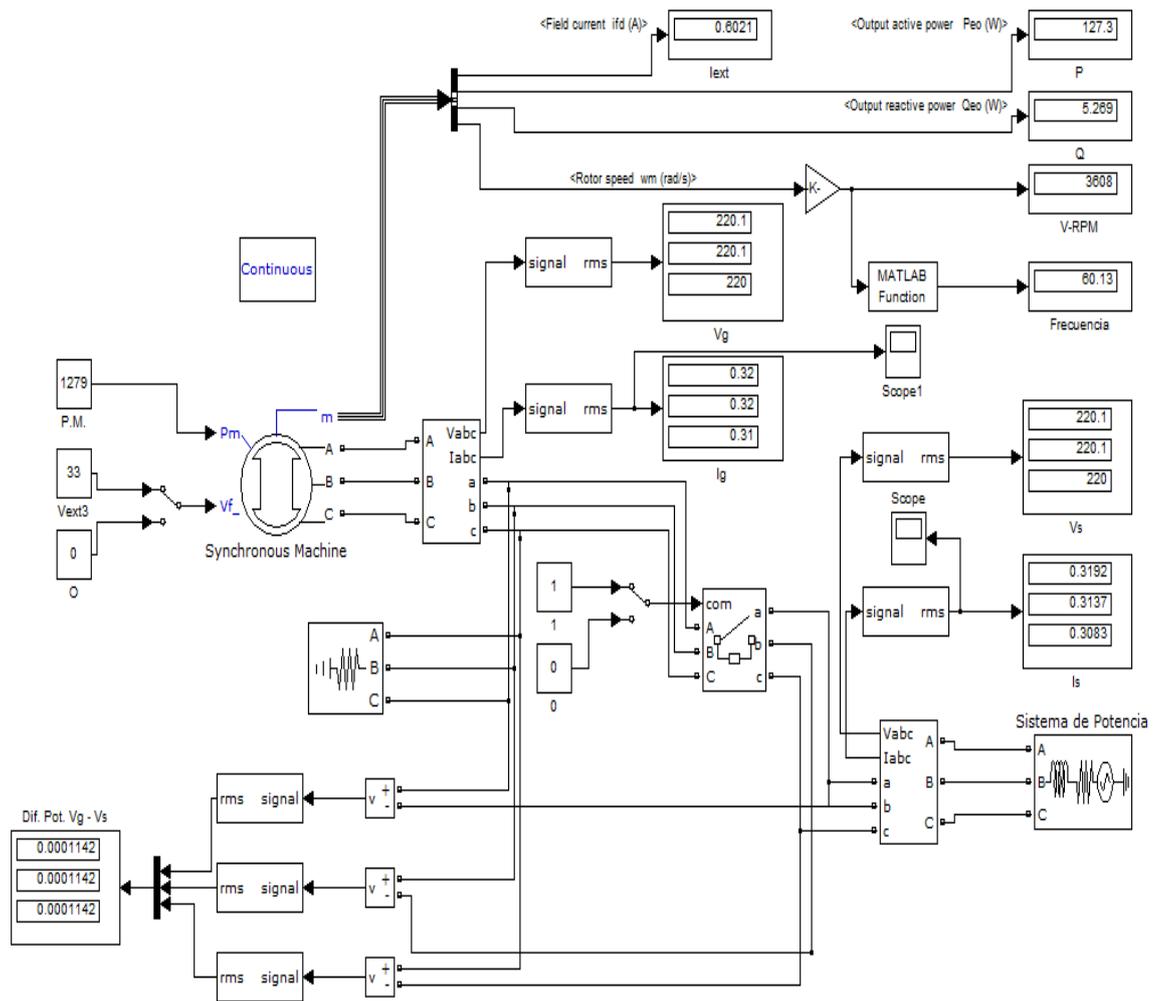


*Fig.1.84 Corriente de armadura con carga capacitiva*

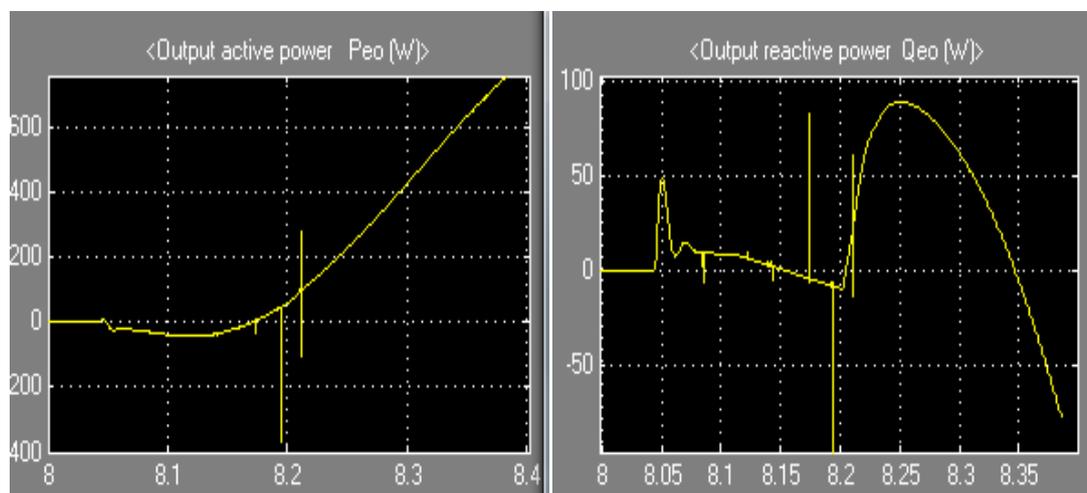


*Fig.1.85 Regulación de voltaje para una carga capacitiva*

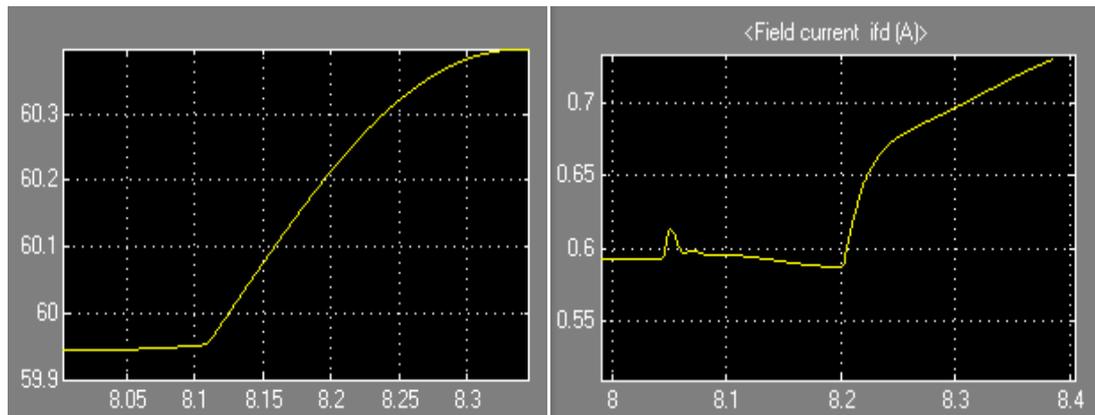
### 3.1.7 Sincronización del generador con el sistema de potencia



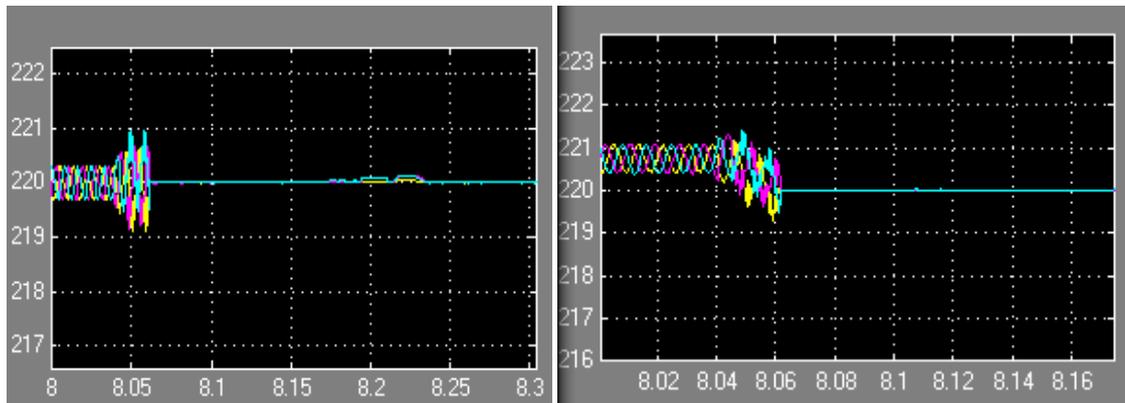
*Fig.1.86 Diagrama de simulación de la prueba sincronismo mediante Simulink*



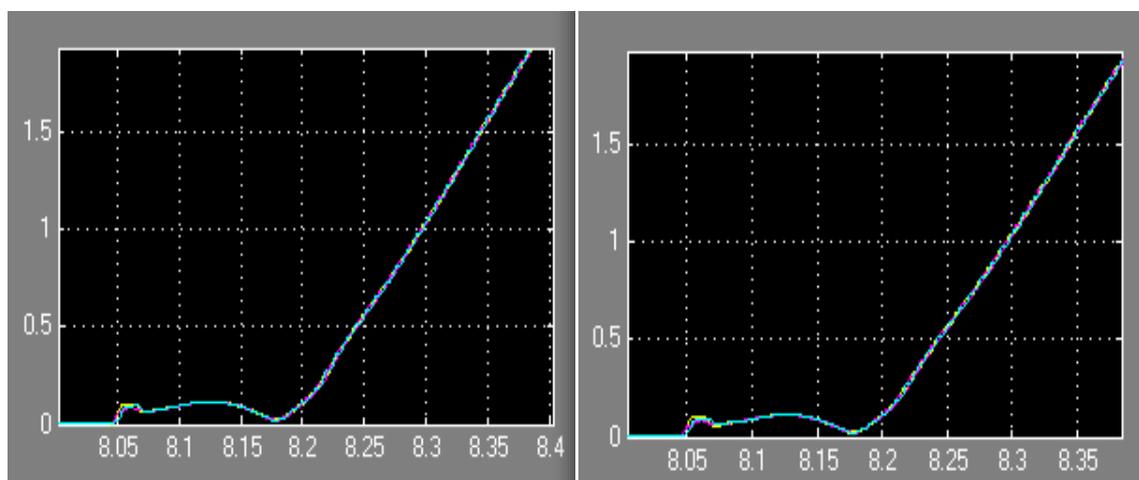
*Fig.1.87 Potencia activa y reactiva del generador durante el sincronismo*



*Fig.1.88 Frecuencia e intensidad de campo durante el sincronismo*



*Fig.1.89 Voltajes nominales (sistema y generador) durante el sincronismo*



*Fig.1.90 Intensidades (sistema y armadura) durante el sincronismo*

### 3.2 ELABORACIÓN DE GUÍAS DE LABORATORIO

**1. Nombre de la práctica:** Característica de vacío de un generador síncrono de polos salientes

**2. Objetivos:**

- Determinación de la curva de vacío de la máquina síncrona funcionando como generador.
- Determinación de las impedancias síncrona saturada y no saturada.

**3. Procedimiento:**

- Conecte el estator de la máquina síncrona en estrella y en vacío, es decir, sin carga eléctrica.
- Mediante el panel del operador BOP y la tabla de puesta en servicio rápida del variador de frecuencia fijar la frecuencia mínima del primotor en 60.4 Hz para que el generador alcance una velocidad síncrona de 3600 rpm.
- Arrancar la máquina motriz mediante el variador de frecuencia con los parámetros seleccionados anteriormente.
- Antes de conectar la excitación al devanado del rotor, mida la tensión en bornes de la máquina.
- Conecte la excitación al devanado del rotor de la máquina y aumente la corriente de la excitación, desde 0.3 hasta un valor máximo de 0.87 A.
- Para cada valor de  $I_{exc}$  se mide la tensión en los terminales de la máquina síncrona o el voltaje de Vacío ( $V_0$ ).

**4. Sistema Categorical:**

- Característica de vacío del generador síncrono.
- Línea del entrehierro.

**5. Preguntas de Control:**

- Qué es la curva de magnetización.
- Que parámetros relaciona la característica de vacío de una máquina síncrona.
- A que se denomina línea de entrehierro.

**6. Bibliografía y anexos:**

- GUTIERREZ, Agustín. 2000. Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas. Perú, 382p.

- HARPER, Gilberto.2005.Curso de máquinas síncronas. México, Editorial Limusa S.A.pp.163-165.
- KINGSLEY, Charles. UMANS, Stephen.2005.Máquinas Eléctricas. México, Litográfica Ingramex Centeno.pp.258-260.

**Anexos:**

Esquema de conexión:

### Prueba de Vacío

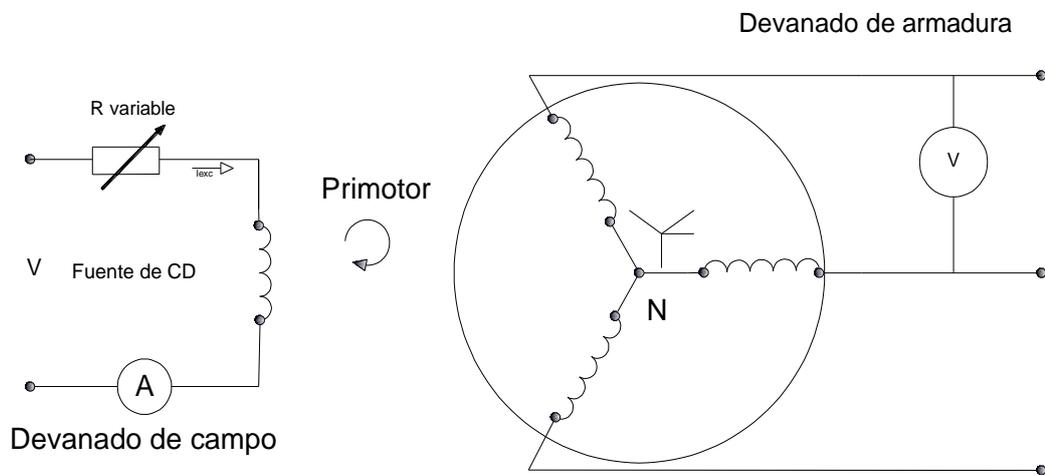


Tabla de control de resultados:

Vo									
Iexc									
Vexc	0	15	20	25	30	34	40	45	50

- 1. Nombre de la práctica:** Característica de cortocircuito del generador síncrono de polos salientes
- 2. Objetivos:**
  - Determinación de la curva de cortocircuito de la máquina síncrona funcionando como generador.
  - Determinación de las impedancias síncrona saturada y no saturada.
- 3. Procedimiento:**
  - Conecte el estator de la máquina síncrona en estrella y en cortocircuito según el esquema.
  - Mediante el panel del operador BOP y la tabla de puesta en servicio rápida del variador de frecuencia fijar la frecuencia mínima del primotor en 60Hz para que el generador alcance una velocidad próxima a la síncrona de 3600 rpm. Mediante una máquina motriz se lleva la máquina síncrona a la velocidad de sincronismo o 3600 rpm.
  - Antes de conectar la excitación al devanado del rotor, mida la corriente que circula por el inducido de la máquina.
  - Manteniendo el estator cortocircuitado ( $V = 0$ ), se conecta la excitación al devanado del rotor y se aumenta  $I_{exc}$  hasta obtener una  $I_{exc}$  igual a 0.87A ( $I_{exc}$  máx.) o hasta llegar a una corriente en el inducido igual a 14 A (es decir, el doble de la corriente nominal de armadura).
  - Las medidas obtenidas en los ensayos de vacío y de cortocircuito permiten obtener la curva de la impedancia síncrona en función de la corriente de excitación.
- 4. Sistema Categorical:**
  - Característica de cortocircuito del generador síncrono.
  - Impedancia síncrona saturada y no saturada.
  - Relación de cortocircuito
- 5. Preguntas de Control:**
  - Qué representa la curva de cortocircuito.
  - Que sucede con el voltaje en la prueba de cortocircuito.
  - Porqué parámetro se ve afectada la corriente de armadura en la prueba de cortocircuito.

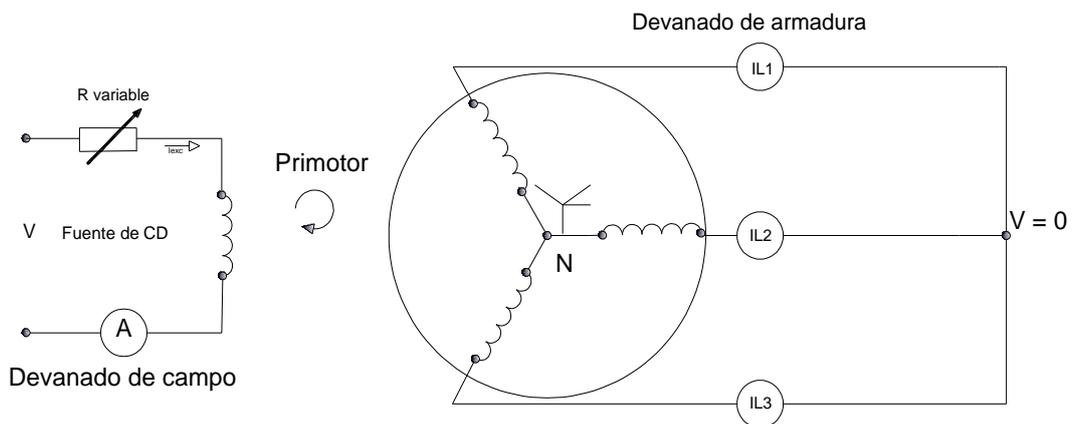
**6. Bibliografía y anexos:**

- GUTIERREZ, Agustín.2000.Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas. Perú, 382p.
- HARPER, Gilberto.2005.Curso de máquinas síncronas. México, Editorial Limusa S.A.pp.163-165.
- KINGSLEY, Charles. UMANS, Stephen.2005.Máquinas Eléctricas. México, Litográfica Ingramex Centeno.pp.258-260.

**Anexos:**

Esquema de conexión:

**Prueba de Cortocircuito**



Tablas de control de resultados:

I <sub>cc</sub> (A)									
I <sub>ex</sub> (A)									
V <sub>ex</sub> (V)									

**1. Nombre de la practica:** Determinación de la curva de tensión en función de la corriente de armadura de la carga a FDP resistivo y corriente de excitación constante

**2. Objetivos:**

- Determinación de la curva de tensión en función de la corriente de armadura a FDP resistivo y corriente de excitación constantes.
- Comprender el comportamiento del generador síncrono de polos salientes cuando trabaja en estado permanente y aislado.

**3. Procedimiento:**

- Conecte el estator de la máquina síncrona en estrella.
- Conecte las cargas resistivas en estrella, tenga en cuenta la conexión del neutro.
- Mediante el panel del operador BOP y la tabla de puesta en servicio rápida (anexos) del variador de frecuencia fijar la frecuencia mínima del primotor en 60.4 Hz para que el generador alcance una velocidad síncrona de 3600 rpm.
- Arrancar la máquina motriz mediante el variador de frecuencia con los parámetros seleccionados anteriormente.
- Conecte la excitación al devanado del rotor de la máquina y aumente la corriente de la excitación, hasta un valor que fluctúe entre de 0.57 y 0.59 amperios que son los necesarios para que el generador nos dé un valor nominal de 220V.
- Revise la frecuencia generada en la central de medidas debe estar en 60 Hz caso contrario actúe en el variador de frecuencia, este si nos permite su regulación cuando está trabajando.
- Accione el Breaker termomagnético y luego la bornera de control de la carga resistiva.
- Mediante los dimers de regulación accione las cargas resistivas, utilice potencias iguales y diferentes.

**4. Sistema categorial**

- Principio de operación del generador síncrono
- Reacción de armadura.

**5. Preguntas de control**

- ¿Cuándo el generador trabaja con cargas resistivas, la corriente se encuentra en fase, en adelanto o en retazo con relación al voltaje?

- ¿Cuáles son los tipos de rotores que se utilizan en los generadores y en que se los emplean?

## 6. Bibliografía y anexos:

- HARPER, Gilberto. 2005. Curso de máquinas síncronas. México, Editorial Limusa S.A. pp.163-165.
- KINGSLEY, Charles. UMANS, Stephen. 2005. Máquinas Eléctricas. México, Litográfica Ingramex Centeno. pp.258-260.

### Anexos:

Esquema de conexión:

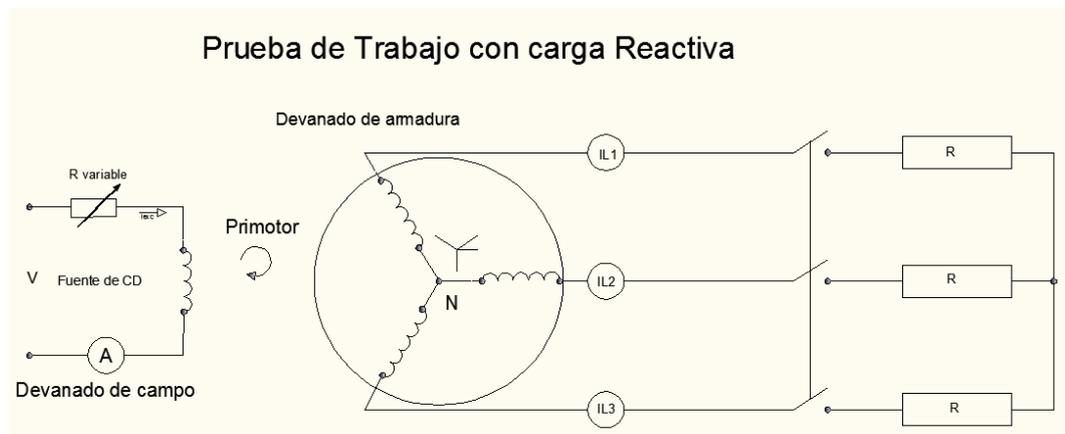


Tabla de control de resultados:

Cargas	V inicial	V final	I armadura	Cos $\phi$
100W	127V			Resistivo
150W	127V			Resistivo
500W	127V			Resistivo

**1. Nombre de la practica:** Determinación de la curva de tensión en función de la corriente de armadura o de la potencia suministrada a la carga a FDP Capacitivo y corriente de excitación constantes.

**2. Objetivos:**

- Determinación de la curva de tensión en función de la corriente de armadura a FDP capacitivo y corriente de excitación constantes.
- Comprender el comportamiento del generador síncrono de polos salientes cuando trabaja con cargas capacitivas.

**3. Procedimiento:**

- Conecte el estator de la máquina síncrona en estrella.
- Conecte las cargas capacitivas en estrella, tenga en cuenta la conexión del neutro.
- Mediante el panel del operador BOP y la tabla de puesta en servicio rápida (anexo...) del variador de frecuencia fijar la frecuencia mínima del primotor en 60.4 Hz para que el generador alcance una velocidad síncrona de 3600 rpm.
- Arrancar la máquina motriz mediante el variador de frecuencia con los parámetros seleccionados anteriormente.
- Conecte la excitación al devanado del rotor de la máquina y aumente la corriente de la excitación, hasta un valor que fluctúe entre 0.43 y 0.45 amperios que son los necesarios para que el generador nos dé un valor no superior al de 200V entre líneas, ya que si aumentamos el voltaje inicial al nominal de 220V los capacitores no resistirían el voltaje aplicado a los mismos, fruto de su propio efecto.
- Revise la frecuencia generada en la central de medidas debe estar en 60 Hz caso contrario actué en el variador de frecuencia, este si nos permite su regulación cuando está trabajando.
- Accione el Breaker termomagnético y luego la bornera de control de la carga capacitiva.

**4. Sistema categorial:**

- Características de operación de los condensadores en un circuito trifásico.
- Ventajas y límites económicos de la corrección del factor de potencia
- Métodos de corrección o mejoramiento del factor de potencia.

## 5. Preguntas de control

- ¿Qué entiende por sobreexcitación?
- ¿Explique cuando una máquina síncrona entra a funcionar como generador y como motor?
- ¿Qué entiende por excitación normal de un generador?

## 6. Bibliografía y anexos:

- GUTIERREZ, Agustín.2000.Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas. Perú, 370p.
- KOSOW, Irving.1993. Máquinas Eléctricas y Transformadores II edición impreso en México.pp.275-278, 282.

### Anexos:

Esquema de conexión:

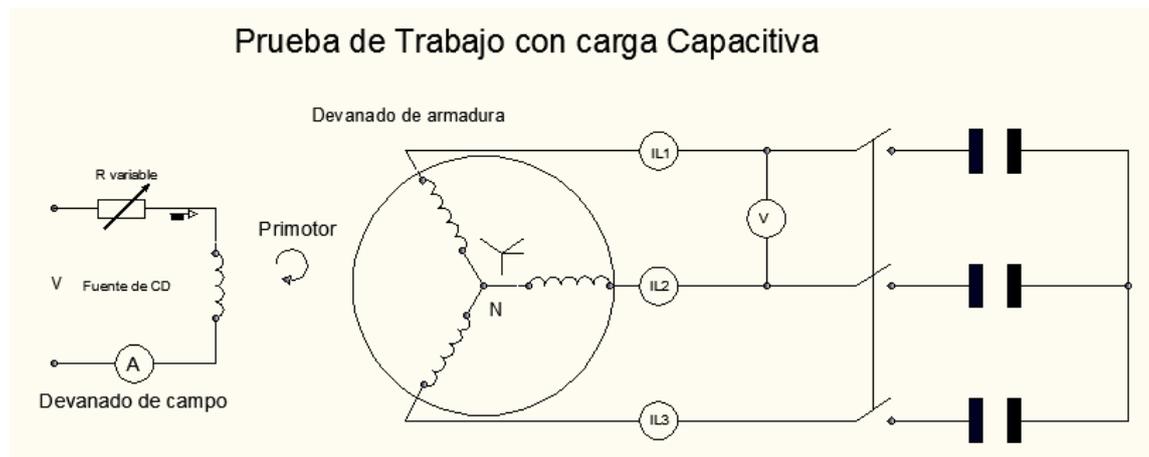


Tabla de control de resultados:

Carga	V inicial	V final	I armadura	$\text{Cos } \varphi$
60 $\mu\text{f}$	116V			
103 $\mu\text{f}$	116V			

1. **Nombre de la práctica:** Determinación de la curva de tensión en función de la corriente de armadura de la carga a FDP Inductivo y corriente de excitación constantes
2. **Objetivos:**
  - Determinación de la curva de tensión en función de la corriente de armadura a FDP inductivo y corriente de excitación constantes.
  - Comprender el comportamiento del generador síncrono de polos salientes cuando trabaja en estado permanente y aislado.
3. **Procedimiento:**
  - Conecte el estator de la máquina síncrona en estrella.
  - Conecte el motor de inducción de 1.2HP que actúa como carga en triángulo.
  - Mediante el panel del operador BOP y la tabla de puesta en servicio rápida del variador de frecuencia fijar la frecuencia mínima del primotor en 60.4 Hz para que el generador alcance una velocidad síncrona de 3600 rpm.
  - Arrancar la máquina motriz mediante el variador de frecuencia con los parámetros seleccionados anteriormente.
  - Conecte la excitación al devanado del rotor de la máquina y aumente la corriente de la excitación, hasta un valor que fluctúe entre de 0.57 y 0.59 amperios que son los necesarios para que el generador nos dé un valor nominal de 220V.
  - Revise la frecuencia generada en la central de medidas debe estar en 60 Hz caso contrario actúe en el variador de frecuencia, este si nos permite su regulación cuando está trabajando.
  - Accione el Breaker termomagnético y luego la bornera de control de la carga inductiva.
  - Mediante el freno hidráulico del motor obtenga diferentes cargas inductivas.
4. **Sistema Categorial:**
  - Características de operación en estado permanente.
  - Comportamiento del generador con cargas inductivas.
  - Reacción de armadura

### 5. Preguntas de Control:

- ¿Qué pasa con el voltaje generado cuando al generador se le conecta una carga inductiva?
- ¿Qué pasa con la corriente de campo cuando al generador se le conecta una carga inductiva?

### 6. Bibliografía y anexos:

- GUTIERREZ, Agustín.2000.Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas. Perú, 382p.
- HARPER, Gilberto.2005.Curso de máquinas síncronas. México, Editorial Limusa S.A.pp.163-165.
- KINGSLEY, Charles. UMANS, Stephen.2005.Máquinas Eléctricas. México, Litográfica Ingramex Centeno.pp.258-260.

#### Anexos:

Esquema de conexión:

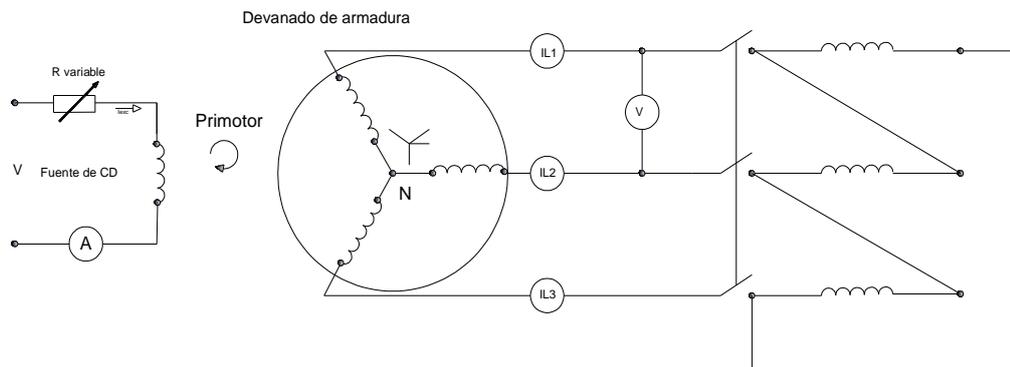


Tabla de control de resultados:

Cargas	Vf inicial	Vf final	I armadura	Cos $\phi$
Motor Vacío				Inductivo
Punto 1				Inductivo
Punto 2				Inductivo
Punto 3				Inductivo

**1. Nombre de la práctica:** Determinar la curva de corriente de excitación en función de la corriente de armadura o de la potencia suministrada a la carga con FDP de diferentes tipos (Regulación del voltaje en terminales).

**2. Objetivos:**

- Determinación de la curva de corriente de excitación en función de la corriente de armadura a FDP Resistivo.
- Determinación de la curva de corriente de excitación en función de la corriente de armadura a FDP Inductivo.
- Determinación de la curva de corriente de excitación en función de la corriente de armadura a FDP Capacitivo.
- Comprender el efecto de la regulación de generadores a diferentes cargas.

**3. Procedimiento:**

- Conecte el estator de la máquina síncrona en estrella.
- Conecte las cargas resistivas en estrella, la carga inductiva en triángulo, y las capacitivas en estrella, tenga en cuenta la conexión del neutro para las conexiones en estrella.
- Mediante el panel del operador BOP y la tabla de puesta en servicio rápida del variador de frecuencia fijar la frecuencia mínima del primotor en 60.4 Hz para que el generador alcance una velocidad síncrona de 3600 rpm.
- Arrancar la máquina motriz mediante el variador de frecuencia con los parámetros seleccionados anteriormente.
- Conecte la excitación al devanado del rotor de la máquina y aumente la corriente de la excitación, hasta un valor que fluctúe entre de 0.57 y 0.59 amperios.
- Accione el Breaker termomagnético y luego la bornera de control de los diferentes tipos de cargas según corresponda.
- Regule la corriente de campo para que el generador siempre trabaje a 220V entre líneas.

**4. Sistema Categorical:**

- Regulación de generadores síncronos.
- Sobrexcitación y subexcitación de generadores síncronos.

## 5. Preguntas de Control:

- ¿Se podría compensar el efecto que produce una carga inductiva aumentando la velocidad síncrona del primotor?
- ¿A qué se debe de que cuando al generador se le conecta una carga capacitiva este aumenta en cierto porcentaje el voltaje generado?
- Calcule la regulación de voltaje del generador para las cargas utilizadas.

## 6. Bibliografía y anexos:

- GUTIERREZ, Agustín.2000.Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas. Perú, 382p.
- HARPER, Gilberto.2005.Curso de máquinas síncronas. México, Editorial Limusa S.A.pp.163-165.
- KINGSLEY, Charles. UMANS, Stephen.2005.Máquinas Eléctricas. México, Litográfica Ingramex Centeno.pp.258-260.

### Anexos:

Esquema de conexión:

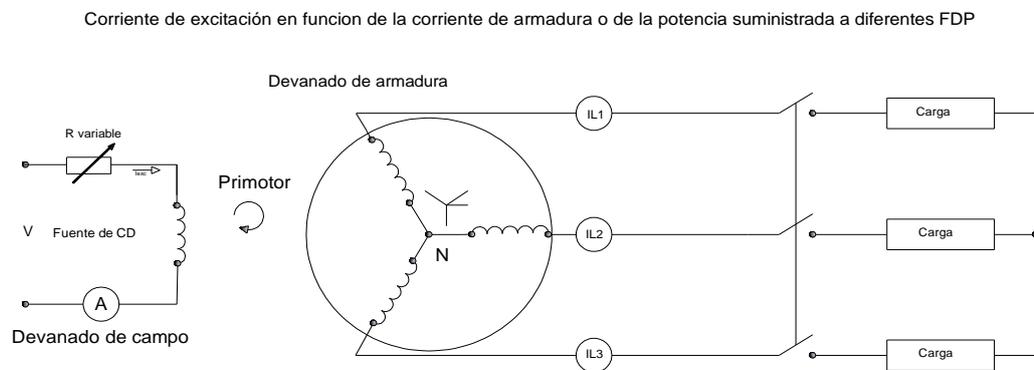


Tabla de control de resultados:

Cargas	Iexc. inicial	Iexc. final	I armadura	Cos $\phi$
100W	0.59 A			Resistivo
150W	0.59 A			Resistivo
1000W	0.59 A			Resistivo
Motor vacío	0.59 A			Inductivo
Motor ½ carga	0.59 A			Inductivo
60 $\mu$ F	0.59 A			Capacitivo
103 $\mu$ F	0.59 A			Capacitivo

**1. Nombre de la practica:** Determinación del eje de cuadratura y eje directo del generador

**2. Objetivos:**

- Determinar el factor de potencia del generador.
- Establecer el diagrama vectorial del generador
- Contrastar el porcentaje de regulación del voltaje

**3. Procedimiento:**

- Conecte el estator de la máquina síncrona en estrella.
  - Conecte las cargas resistivas de 150W en estrella, tenga en cuenta la conexión del neutro tome valores de corriente y de potencia total activa.
  - Desconecte las cargas resistivas y conecte la carga inductiva (motor), tome valores de potencia, voltaje y corriente cuando funcione sin carga.
  - Desconecte la carga inductiva (motor) y conecte las cargas capacitivas ya sea los de 60 $\mu$ f o los de 103 $\mu$ f en estrella siempre con cargas equilibradas, luego tome valores de mediciones.
  - Mediante el panel del operador BOP y la tabla de puesta en servicio rápida (anexos) del variador de frecuencia fijar la frecuencia mínima del primotor en 60.4 Hz para que el generador alcance una velocidad síncrona de 3600 rpm.
  - Arrancar la máquina motriz mediante el variador de frecuencia con los parámetros seleccionados anteriormente.
  - Conecte la excitación al devanado del rotor de la máquina y aumente la corriente de la excitación, hasta un valor que fluctúe entre de 0.57 y 0.59 amperios que son los necesarios para que el generador nos dé un valor nominal de 220V para las cargas resistivas e inductiva; regule la corriente de excitación para las cargas capacitivas a 0.43 – 0.45.
  - Revise la frecuencia generada en la central de medidas debe estar en 60 Hz caso contrario actúe en el variador de frecuencia, este si nos permite su regulación cuando está trabajando.
  - Accione el Breaker termomagnético y luego la bornera de control de las cargas.
- Nota:** Siempre cuando realice cambios de cargas hágalo des energizado el sistema y por preferencia apague el generador por medio del variador de frecuencia y no se olvide de apagar la corriente de excitación.

#### 4. Sistema categorial

- Diagrama fasorial para maquinas se polos salientes.

#### 5. Preguntas de control

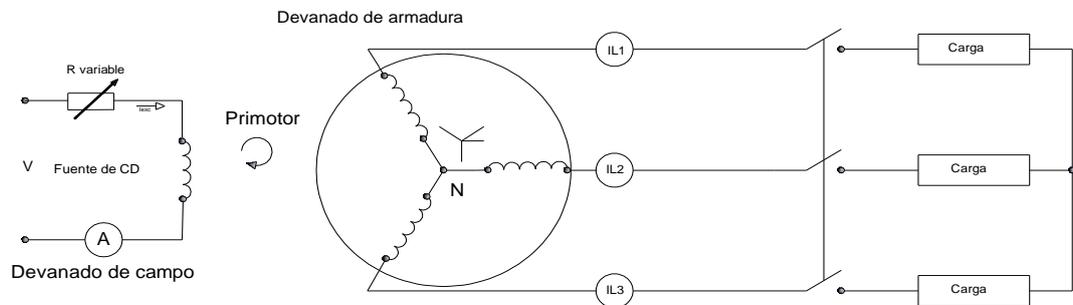
- ¿Qué entiende por eje de cuadratura?
- ¿Qué entiende por regulación de voltaje?

#### 6. Bibliografía y anexos:

- KINGSLEY, Charles. UMANS, Stephen. 2005. Máquinas Eléctricas. México, Litográfica Ingramex Centeno. pp. 285-286; 290-291; 650

#### Anexos:

- Esquema de conexión:



## 1. Nombre de la práctica: Sincronización del generador con el sistema de potencia.

### 2 Objetivos:

- Sincronizar el generador con el sistema de potencia.
- Conocer el comportamiento del generador en el momento de sincronización

### 3 Procedimiento:

- Conecte el estator de la máquina síncrona en estrella.
- Accione el primotor, cuando el generador llegue a su velocidad sincrónica excítelo con una corriente de 0.59 A para obtener un voltaje de 220V igual al voltaje de la red.
- Verifique la frecuencia de la red generada que sea igual a la de la red de alimentación (60Hz.), si no esta entregando esta frecuencia actúe en el variador de frecuencia, este si nos permite su regulación cuando está trabajando.
- Alimente el tablero con corriente trifásica en los terminales de la red para el sincronismo.
- Conecte las lámparas indicadoras que indiquen la sincronización del generador.
- Accione el Breaker de la red de alimentación con la red del generador en el momento que las lámparas se encienden y apaguen muy lentamente, el accionamiento debe hacerse en el momento que las lámparas se encuentren apagadas.
- Con la máquina en paralelo con el sistema, se llevara mediante el campo a suministrar la potencia reactiva que se indique en la práctica.

### 4 Sistema categorial

- Sincronización por el método de tres lámparas
- Operación en paralelo con el sistema

### 5 Preguntas de control

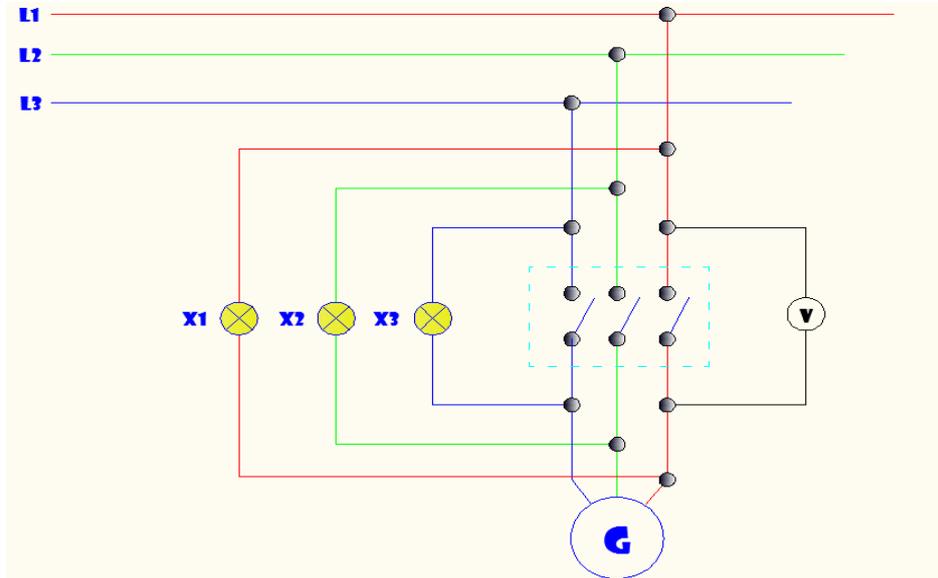
- ¿Qué entiende por sincronismo?
- ¿Cuáles son las condiciones para sincronizar un generador síncrono?

### 6 Bibliografía y anexos:

- HARPER, Gilberto.2005.Curso de máquinas síncronas. México, Editorial Limusa S.A.pp.301-307

**Anexos:**

Esquema de conexión:



## CAPÍTULO IV: RESULTADOS

A continuación se exponen los cálculos matemáticos que validan el proceso investigativo de ésta tesis:

### Determinación del número de vueltas y de la sección del cable para el rebobinado

$$N_s = \frac{U_s * N_p}{U_p}$$

$$N_s = \frac{220V * 12}{110V}$$

$N_s = 24$  vueltas  $\rightarrow$  Como es doble capa serían 48 vueltas

La sección del conductor para realizar el bobinado en el estator será de:

$$AWG = \frac{39.5mm^2}{48 \text{ cond.}} \rightarrow 0.823mm^2 \rightarrow \text{El conductor apto es el AWG\#18 (anexos).}$$

### Resultados del proceso de rebobinado



*Fig. 1.91 Colocación de aislante al estator*



*Fig. 1.92 Rebobinado del estator*



*Fig. 1.93 Terminación del proceso de rebobinado*

### Determinación de la potencia del generador

Para encontrar la potencia máxima del generador se debe considerar la operación en vacío puede haber una caída máxima del 25% de la tensión en línea, donde el voltaje en los terminales es.

$$V_t = V_l - 0.25(V_l) \rightarrow 165V$$

$S =$  Sección del conductor del bobinado del estator AWG18  $\rightarrow 0.82\text{mm}^2$ .

$I_{adm.} = 7.5A \rightarrow$  Corriente máxima admisible (Anexos).

$$P_{max.} = I_{adm.} V_t \sqrt{3}$$

$$P_{max.} = 7.5(165V)\sqrt{3} \rightarrow 2.14KVA$$

### Selección del primotor

Para determinar la potencia del primotor se debe considerar dos aspectos: la potencia del generador y su velocidad síncrona, por lo cuál se eligió un motor asincrónico trifásico de 3460 rpm con una potencia de 3Hp.

### Selección del Variador de frecuencia

Para la selección del variador se debe considerar la potencia del motor y el voltaje del mismo, por ello se selecciono el variador SINAMIC G110 de 3Hp-220V.

### Eficiencia del generador

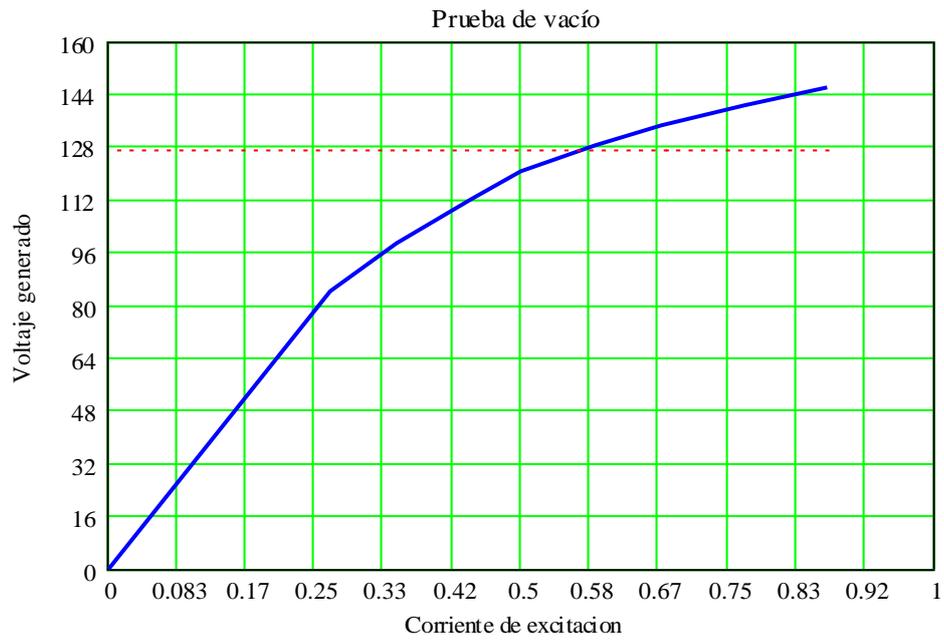
$$\eta = P_{tsalida} / P_{entrada}$$

$$\eta = 1415.95W / 1916.18W * (100\%) \rightarrow 73.9\%$$

### Pruebas realizadas en el generador

#### Prueba de Vacío

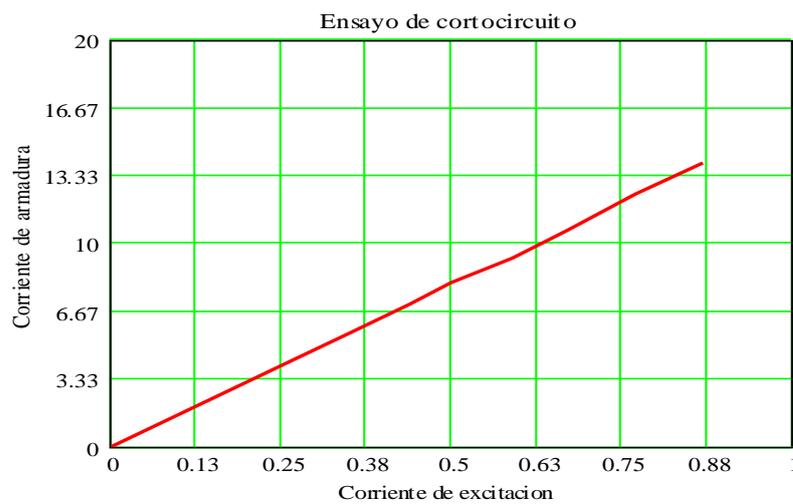
Eo (V)	0	145	171	194	208	220	233	243	252
Eexc.(V)	0	15	20	25	30	33	40	45	50
Iexc.(A)	0	0.27	0.35	0.44	0.50	0.59	0.67	0.77	0.87



*Fig.1.53 Curva de la prueba de vacío*

**Prueba de Cortocircuito**

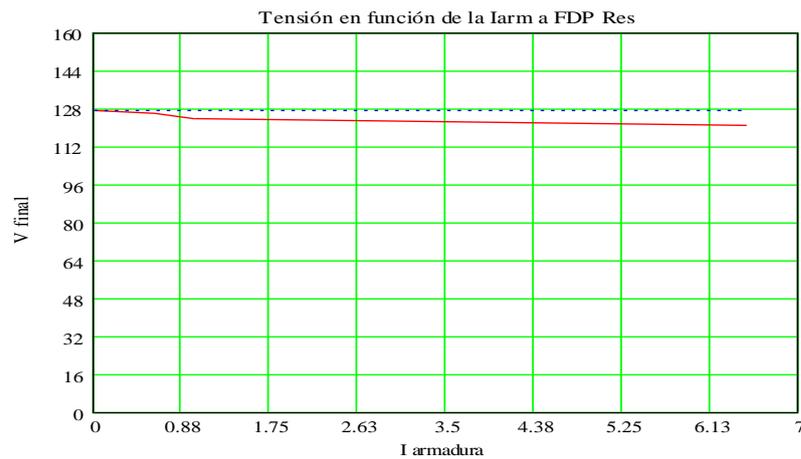
I(A)	0	4.2	5.5	7	8	9.1	10.6	12.36	13.9
I <sub>exc.</sub> (A)	0	0.27	0.35	0.44	0.50	0.59	0.67	0.77	0.87
V <sub>exc.</sub> (V)	0	15	20	25	30	33	40	45	50



*Fig.1.54 Curva de la prueba de cortocircuito*

### Comportamiento del generador con carga resistiva

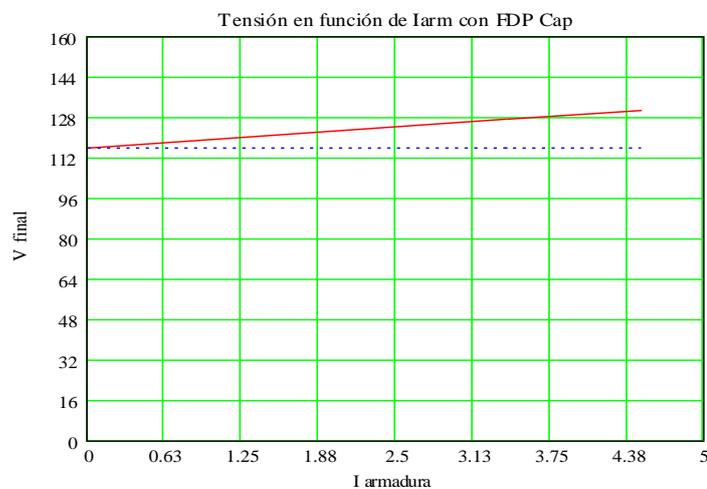
Cargas	V inicial	V final	I armadura	Cos $\varphi$
100W	127V	126V	0.6A	1
150W	127V	124V	1A	1
1000W	127V	121V	6.5A	1



*Fig.1.56* Curva de la prueba de comportamiento con cargas resistivas

### Comportamiento del generador con carga capacitiva

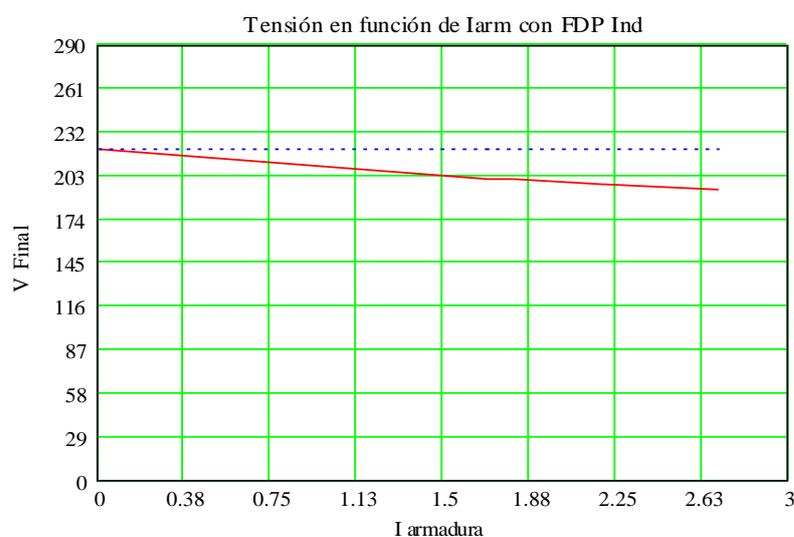
Carga	V inicial	V final	I armadura	Cos $\varphi$
60uF	116V	127V	3.4A	En adelante
103uF	116V	130.5V	4.5A	En adelante



*Fig.1.57* Curva de la prueba de comportamiento con cargas capacitivas

### Comportamiento del generador con carga inductiva

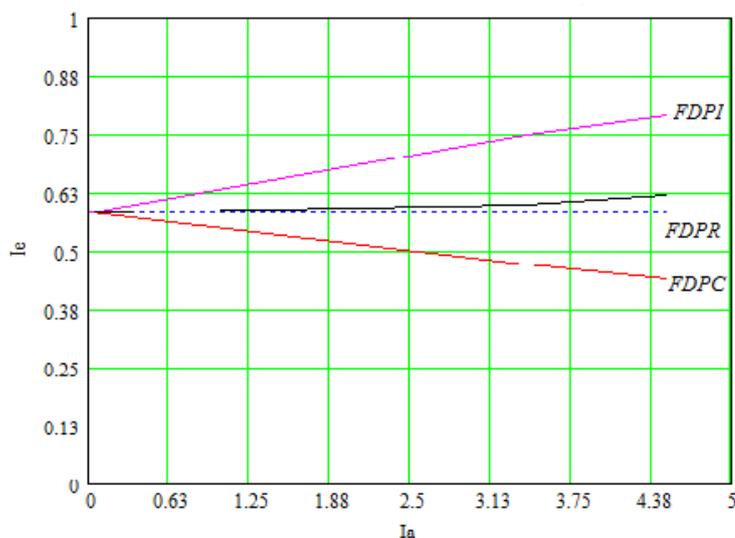
Motor 3 <sub>~</sub>	Potencia	V inicial	V final	I armadura
Vacio	536W	220V	201	1.7A
Punto 1	590W	220V	200	1.8A
Punto 2	763W	220V	197	2.2A
Punto 3	907W	220V	193	2.7A



*Fig.1.58* Curva de la prueba de comportamiento con cargas inductivas

**Regulación del generador con cargas resistivas, capacitivas e inductivas a través de su corriente de excitación.**

Cargas	Iexc. Inicial	Iexc. final	I armadura	Cos $\phi$
100W	0.58 A	0.60 A	0.6 A	Resistivo
150W	0.58 A	0.62 A	1 A	Resistivo
1000W	0.58 A	0.68 A	6.5 A	Resistivo
Motor vacío	0.58 A	0.75 A	1.5 A	Inductivo
Motor ½ carga	0.58 A	0.79 A	2.2 A	Inductivo
60 $\mu$ F	0.58 A	0.47 A	3.4 A	Capacitivo
103 $\mu$ F	0.58 A	0.44 A	3.5 A	Capacitivo



*Fig.1.59 Curva de regulación de voltaje para diferentes factores de potencia*

#### 4.1 DISCUSIÓN

De los cálculos matemáticos efectuados para validar la propuesta alternativa podemos asegurar que son aplicables al tipo de diseño y construcción del banco de generador propuesto. Considerando los resultados se estableció un diseño óptimo en cuanto a validez y confiabilidad de trabajo del mismo.

Los datos matemáticos expuestos en el capítulo anterior expresan cuales son las deducciones referentes al voltaje, potencia y eficiencia; deduciendo que al variar de la corriente de excitación y la velocidad primaria del generador, el voltaje generado del mismo también variará.

Basándose en la eficiencia del generador (68%) se podría señalar que este porcentaje se debe a las pérdidas que tienen los generadores y al proceso de rebobinado que se le practicó.

En cuanto a potencia del generador se puede decir que ésta, bajo considerablemente con respecto a la potencia inicial (3.5KVA) debido al proceso de rebobinado que se le aplicó.

## 4.2 VALORACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA Y AMBIENTAL

### 4.2.1 VALORACIÓN TÉCNICO-ECONÓMICA

Descripción	Cantidad	P. Unidad	P. Total
Generador Síncrono	1	500	500
Motor Asíncrono (Primotor)	1	150	150
Variador de Frecuencia	1	385	385
Central de medidas	1	300	300
Transformador de Corriente	3	20	60
Transformador de Tensión	1	15	15
Interruptor termomagnético	1	28	28
Botoneras trifásicas	4	3	12
Interruptor Magnético	2	17	34
Motor trifásico (carga)	1	70	70
Condensadores	6	6	36
Boquillas	3	1,50	4,50
Focos incandescentes	9	1,25	11,25
Puente Rectificador	1	1	1
Conectores (hembra )	60	0,15	9
Conectores (macho)	120	0,15	18
Conductor AWG # 12	10m	0,40	4
Conductor AWG # 14	40m	0,35	14
Conductor AWG # 16	20m	0.30	6
Cable reforzado	4m	4,50	18
Enchufe	2	1,50	3

Voltímetro analógico CD	1	4,50	4,50
Múltímetro digital	1	5	5
Luces de señalización a 220V	3	3	9
Reóstatos o dimmers	4	6	24
Terminales	40	0,08	3,20
Protección del motor y generador	2	5	10
Freno hidráulico	1	15	15
Acople Motor – Generador	1	20	20
Pernos y arandelas	50	0.25	12,50
Material para la estructura	.....	150	150
		<b>SUBTOTAL</b>	<b>1931,50</b>

### Gasto en mano de obra

Categoría	Cantidad	Tiempo de Operación (h)	Tarifa Salarial \$/h (USD)	Importe USD
Tornero	1	1	10,0	10
Taladrador	1	3	5,00	15,00
Soldador	1	7	12,75	89,25
			<b>SUBTOTAL</b>	<b>114.25</b>

**Gasto en investigación**

Denominación	Tarifa (\$/h) USD	Cantidad	Tiempo de operación (h)	Importe USD
Internet	1,00		50	50
Copias	0,02	300		6
Transporte	0.25	600		150
Viajes Institucionales		2	50	100
<b>SUBTOTAL</b>				306

**Gasto de energía eléctrica en la construcción del equipo**

Equipo	Potencia Instalada (Kw)	Tarifa Eléctrica \$/Kwh (USD)	Tiempo de operación (h)	Importe USD
Taladro	0,75	0,12	3	0,27
Amoladora	1,1	0,12	1	0,132
Soldadora	5,2	0,12	7	4,36
Sierra de corte	0,5	0,12	1	0,06
Ensayo de prácticas	2,2	0,12	5	1,32
<b>SUBTOTAL</b>				6,14

**Gastos totales para la construcción del Banco**

<b>Costos de la inversión</b>	<b>Gastos USD</b>
Gasto de materiales	1931,50
Gasto de Ingeniería	800,00
Gasto de mano de obra	114,25
Gasto en investigación	306
Gasto en energía eléctrica	6,14
<b>TOTAL</b>	<b>3157,89</b>

#### 4.2.2 VALORACIÓN AMBIENTAL

La utilización de este tipo de banco solo produce un efecto negativo para el medio ambiente, como lo es la contaminación acústica que producen las máquinas eléctricas que forman parte del proyecto.

La energía eléctrica que se utiliza para el funcionamiento de este banco produce de alguna manera contaminación al medio ambiente pero lo hace de una forma indirecta, al consumir energía eléctrica de la red, por lo que la instalación adecuada del banco se considera una alternativa que produce bajos efectos ecológicos.

## CONCLUSIONES

Una vez terminado el proyecto se puede concluir que los objetivos planteados en un inicio se han alcanzado con éxito:

- ☞ Se logró conocer la constitución y el funcionamiento de los generadores eléctricos más utilizados en las centrales de generación eléctrica, como son los generadores síncronos.
- ☞ Se diseñó y construyó el banco de pruebas, utilizando para ello un generador síncrono trifásico de polos salientes, el cuál es el más utilizado por las centrales de generación eléctrica.
- ☞ Se demostró atravez de prácticas de laboratorio que el banco de pruebas es eficaz y confiable, por que los resultados obtenidos de las mismas son similares a los resultados expuestos en diversas fuentes de investigación.
- ☞ Se consiguió simular las diferentes prácticas de laboratorio, atravez del software Matlab – Simulink, obteniendo resultados favorables.

## RECOMENDACIONES

- ☞ Para el funcionamiento adecuado del banco se debe considerar la guía de operación y mantenimiento del mismo, y su manipulación deberá ser realizada por un profesional relacionado con el tema.
- ☞ Para la realización de las diferentes prácticas tome en cuenta las recomendaciones expuestas en los informes de las mismas.
- ☞ La simulación de prácticas de laboratorio se deberán realizar mediante el software de Matlab.
- ☞ Este proyecto podría ser automatizado para de esta manera poder controlar de una manera más precisa los sistemas de regulación.
- ☞ Instalar el banco en un lugar donde exista un sistema de 220V con puesta a tierra para así evitar posibles daños a los elementos constitutivos y al personal.

## BIBLIOGRAFÍA:

### LIBROS:

- APLEYARD, R. ROSENBERG, T Ms.1995.Generadores de corriente alterna.Manual de Ingeniería Eléctrica.Mexico,pp 7-1 – 7-41.
- CAMARENA, Pedro. 1983.Datos y cálculos prácticos para bobinadore electricistas.Mexico, Editorial Continental S.A.
- GUTIERREZ, Agustín.2000.Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas. Perú.
- HARPER, Gilberto.2005.Curso de máquinas síncronas. México, Editorial Limusa S.A.
- KINGSLEY, Charles. UMANS, Stephen.2005.Máquinas Eléctricas. México, Litográfica Ingramex Centeno.
- KOSOW, .1990.Máquinas eléctricas y transformadores. Rusia.
- VALKENBURGH, Van. NEVILLE, NOOGER. 1978. Electricidad Básica, Argentina, Talleres gráficos Litodar.

### TESIS:

- ABENDAÑO, Victor. CASTILLO, Hugo. ECHEVERRÍA, Carlos. JIMENEZ, Lenín. Diseño Construcción de una máquina manual para el ensayo a la tracción de materiales ferrosos. (Tesis de Ing. Electromecánicos) Loja, Ecuador, Universidad Nacional de Loja. Área de Energía, Industrias y Recursos Naturales no Renovables.
- BUSTAN, Diógenes. PESANTES, Patricio. Diseño Construcción de un prototipo didáctico de turbo bomba para el aprovechamiento hidráulico. (Tesis de Ing. Electromecánicos) Loja, Ecuador, Universidad Nacional de Loja. Área de Energía, Industrias y Recursos Naturales no Renovables.

### SITIOS WEB:

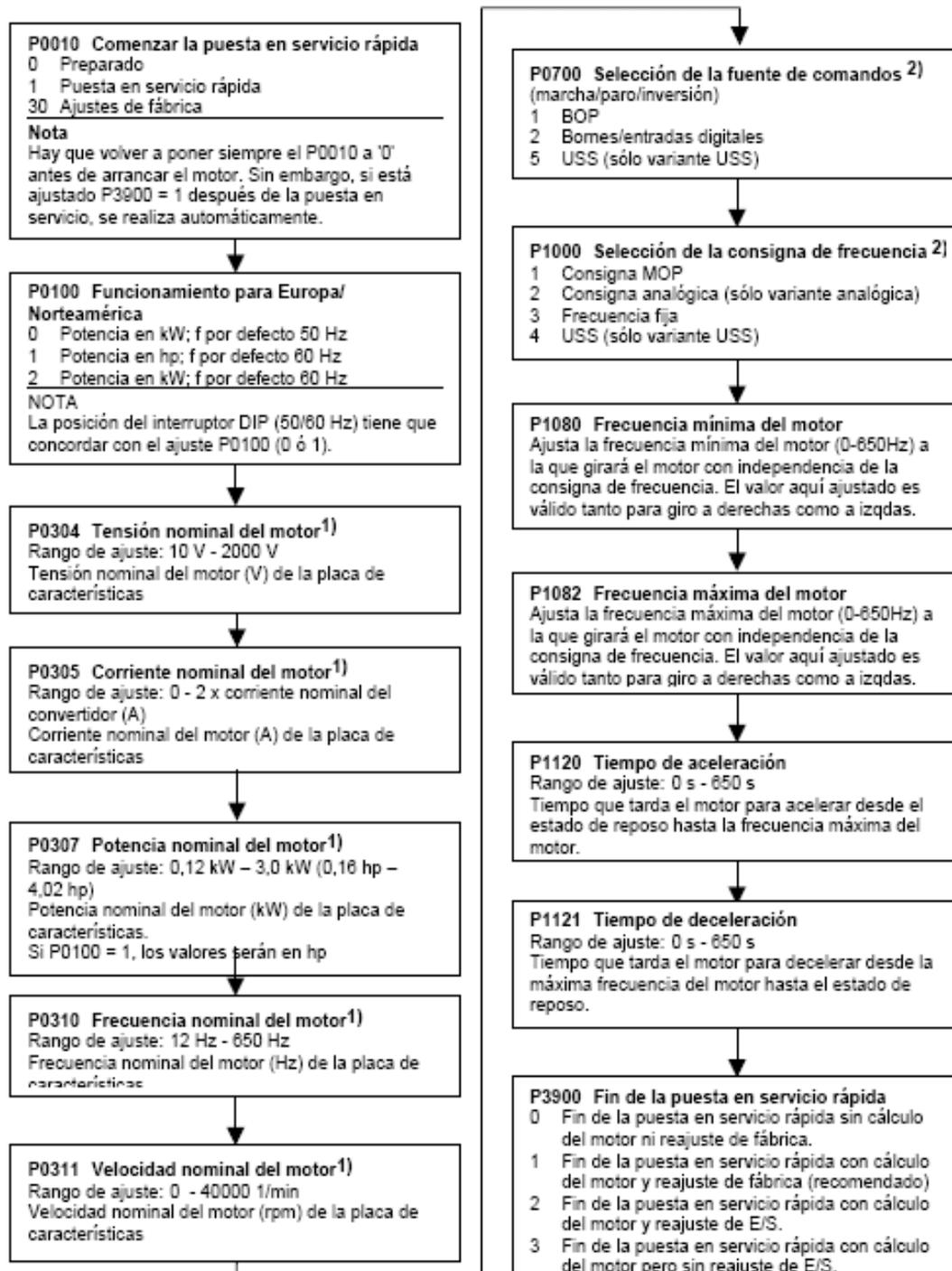
- [www.fielddevices.com](http://www.fielddevices.com)
- [www.honda.com/Generadores.html](http://www.honda.com/Generadores.html)
- [www.tuveras.com/Máquinas síncronas/El alternador.mht](http://www.tuveras.com/Máquinas_síncronas/El_alternador.mht)
- [www.tuveras.com/Máquinas síncronas.mht](http://www.tuveras.com/Máquinas_síncronas.mht)

- [www.tuveras.com/Máquinas eléctricas/acoplamiento.mht](http://www.tuveras.com/Máquinas eléctricas/acoplamiento.mht)
- [www.weg.com.br/manual de motores.html](http://www.weg.com.br/manual de motores.html)
- [www.siemens.com](http://www.siemens.com)

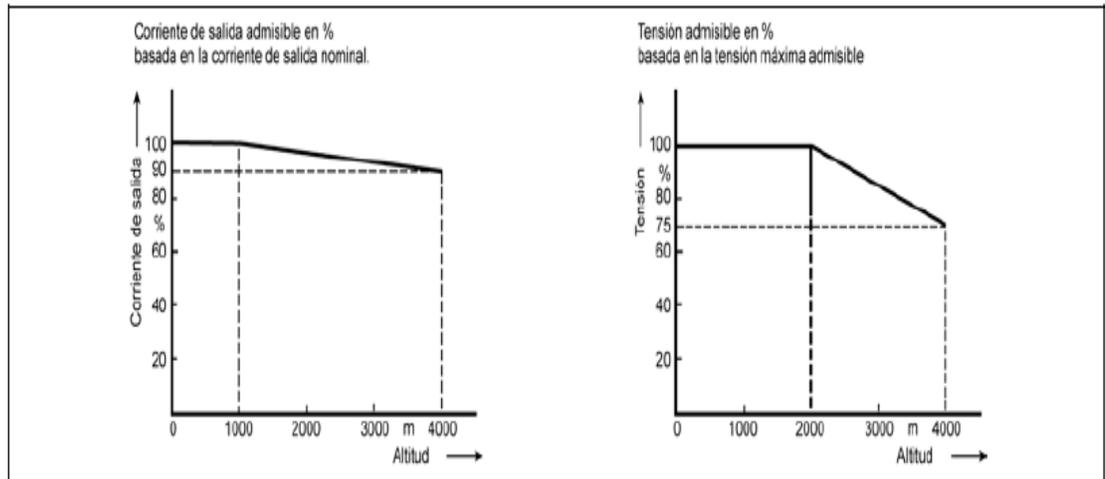
## ANEXO 1: TABLAS TÉCNICAS GENERALES

*Tabla.1.15 Diagrama de flujo para puesta de servicio rápida del variador de frecuencia.*

### Diagrama de flujo para puesta en servicio rápida (nivel de acceso 1 - P0003=1)



**Tabla.1.16** Curvas de reducción para corriente y tensión en función de la altura.



**Tabla.1.17** Disipación de potencia del convertidor Sinamics G110.

Tamaño constructivo	Potencia de salida (kW)	Pérdidas (W)
A	0,12	22
A	0,25	28
A	0,37	36
A	0,55	43
A	0,75	54
B	1,1	86
B	1,5	118
C	2,2	174
C	3	210

**Tabla.1.18** Datos técnicos del variador Sinamics G110.

<b>Tensión de entrada</b>	1 AC 200 V – 240 V, ± 10 %				
<b>Gamas de potencia</b>	1.1 kW - 3.0 kW				
<b>Tamaño constructivo</b>	B	B	C	C	
<b>Potencia nominal del motor</b> [kW] [hp] <sup>1</sup>	1,1 1,5	1,5 2,0	2,2 3,0	3,0 4,0	
<b>Referencia</b>	6SL3211-				
<b>Sin filtro</b>	<b>Analógica</b>	0AB21-1UA0*	0AB21-5UA0*	0AB22-2UA0*	0AB23-0UA0*
	<b>USS</b>	0AB21-1UB0*	0AB21-5UB0*	0AB22-2UB0*	0AB23-0UB0*
<b>Con filtro EMC integrado</b>	<b>Analógica</b>	0AB21-1AA0*	0AB21-5AA0*	0AB22-2AA0*	0AB23-0AA0*
	<b>USS</b>	0AB21-1AB0*	0AB21-5AB0*	0AB22-2AB0*	0AB23-0AB0*
<b>Corriente de salida</b> <sup>2</sup> [A]	6,0	7,8 (40°C)	11,0	13,6 (40°C)	
<b>Corriente de entrada</b> <sup>3</sup> [A]	14,7	19,7	27,2	32,0	
<b>Fusibles recomendados</b> [A]	20,0 3NA3807	25,0 3NA3810	35,0 3NA3814	50,0 3NA3820	
<b>Secciones para cables de entrada (red)</b> [mm <sup>2</sup> ] [AWG]	2,5 – 6,0 12 – 10	2,5 – 6,0 12 – 10	4,0 – 10 11 – 8	6,0 – 10 10 – 8	
<b>Secciones para cables de salida (motor)</b> [mm <sup>2</sup> ] [AWG]	1,5 – 6,0 14 – 10	1,5 – 6,0 14 – 10	2,5 – 10 12 – 8	2,5 – 10 12 – 8	

**Tabla.1.19** Comportamiento de disparo del interruptor termomagnético con temperatura ambiente de 30°C.

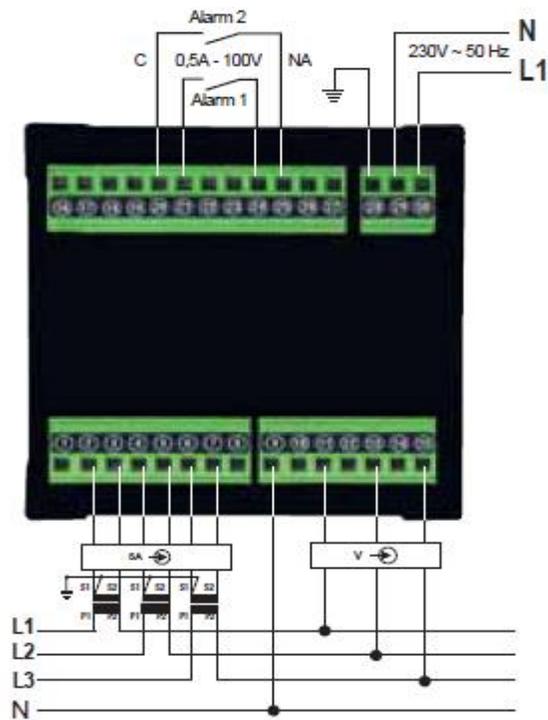
Comportamiento de disparo con temperatura ambiente de 30°C							
Característica de disparo	Normas	Disparador térmico			Disparador electromagnético		
		Corrientes de prueba:			Corrientes de prueba:		
		Corriente baja	Corriente alta	Tiempo de disparo	Sin disparo	Disparo asegurado	Tiempo de disparo
		$I_1$	$I_2$	$t$	$I_4$	$I_5$	$t$
A		$1,13 \times I_n$	$1,45 \times I_n$	$> 1 \text{ h}$ $< 1 \text{ h}$	$> 2 \text{ h}$ $< 2 \text{ h}$	$2 \times I_n$	$\geq 0,1 \text{ s}$ $< 0,1 \text{ s}$
B	IEC 60 898/ EN 60 898/ DIN VDE 0641 parte 11	$1,13 \times I_n$	$1,45 \times I_n$	$> 1 \text{ h}$ $< 1 \text{ h}$	$> 2 \text{ h}$ $< 2 \text{ h}$	$3 \times I_n$	$\geq 0,1 \text{ s}$ $< 0,1 \text{ s}$
C		$1,13 \times I_n$	$1,45 \times I_n$	$> 1 \text{ h}$ $< 1 \text{ h}$	$> 2 \text{ h}$ $< 2 \text{ h}$	$5 \times I_n$	$\geq 0,1 \text{ s}$ $< 0,1 \text{ s}$
D		$1,13 \times I_n$	$1,45 \times I_n$	$> 1 \text{ h}$ $< 1 \text{ h}$	$> 2 \text{ h}$ $< 2 \text{ h}$	$10 \times I_n$	$\geq 0,1 \text{ s}$ $< 0,1 \text{ s}$

(IEC 60 898:  $50 \times I_n$ )

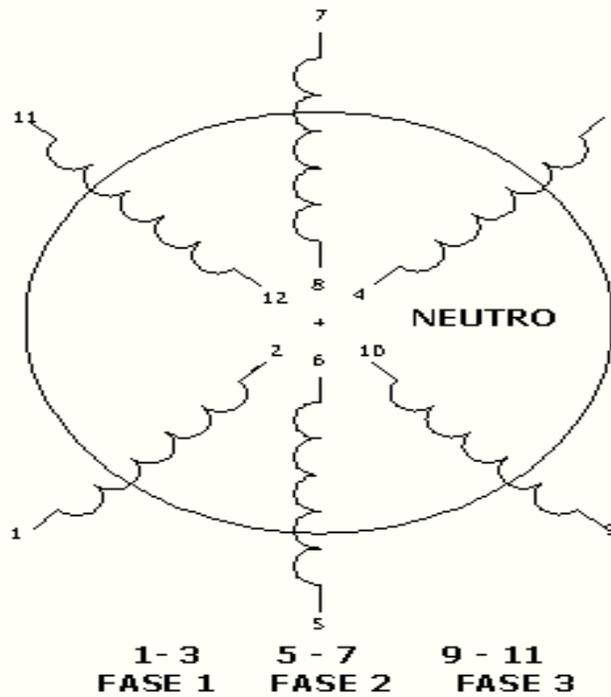
**Tabla.1.20** Tabla de intensidades admisibles para conductores de cobre.

INTENSIDAD DE CORRIENTE ADMISIBLE PARA CONDUCTORES DE COBRE (SECCIONES AWG)								
AISLADOS TEMPERATURA DE SERVICIO: 60° 75° 90°C								
SECCION	SECCION	GRUPO A			GRUPO B			DESNUDO
		TEMPERATURA DE SERVICIO			TEMPERATURA DE SERVICIO			
Nominal (mm) <sup>2</sup>	AWG	60°C	75°C	90°C	60°C	75°C	90°C	
0.32	22	3	3					
0.51	20	5	5					
0.82	18	7.5	7.5					
1.31	16	10	10					
2.08	14	15	15	25	20	20	30	
3.31	12	20	20	30	25	25	40	
5.26	10	30	30	40	40	40	55	
8.36	8	40	45	50	55	65	70	90
13.30	6	55	65	70	80	95	100	130
21.15	4	70	85	90	105	125	135	150
26.67	3	80	100	105	120	145	155	200
33.62	2	95	115	120	140	170	180	230
42.41	1	110	130	140	165	195	210	270
54.49	1/0	125	150	155	195	230	245	310
67.42	2/0	145	175	185	225	265	285	360
85.01	3/0	165	200	210	260	310	330	420
107.2	4/0	195	230	235	300	360	385	490
127	250 MCM	215	255	270	340	405	425	540
152.0	300 MCM	240	285	300	375	445	480	610
177.3	350 MCM	260	310	325	420	505	530	670
202.7	400 MCM	280	355	360	455	545	575	730
253.4	500 MCM	320	380	405	515	620	660	840
304	600 MCM	355	420	455	475	690	740	
354.7	700 MCM	385	460		630	755		
380	750 MCM	400	475	500	655	785	845	
405.4	800 MCM	410	490		680	815		
456	900 MCM	435	520		730	870		
506.7	1000 MCM	455	545	585	780	925	1000	
633.4	1250 MCM	495	590		890	1065		
760.1	1500 MCM	520	625		980	1175		
886.7	1750 MCM	545	650		1070	1280		
1013	2000 MCM	560	665		1155	1385		

Grupo A: Hasta 3 conductores en tubo o en cable o directamente enterrados.  
Grupo B: Conductor simple al aire libre.



*Fig. 1.91 Esquema de conexión de la central de medidas REVALCO 2RAN96C485*



*Fig. 1.92 Esquema de conexión en estrella de las bobinas del generador*

## ANEXO 2: INFORME DE PRÁCTICAS

Universidad Nacional de Loja

### Practica # 1

**Carrera:** Ingeniería Electromecánica

**Laboratorio o Taller:** Taller de Máquinas Eléctricas

**Tema:** Característica de vacío de un generador síncrono de polos salientes

**Autores:** Javier Flores Paladines

Fabián Calle Chamba

**Docente:** Ing. Norman Jiménez

**Fecha:** 06-01-2010

### 2. Introducción

En el estudio de las máquinas síncronas es importante el conocimiento de sus propiedades numéricas, esto debido a que generalmente estas máquinas se construyen para propósitos específicos y no para aplicaciones generales. Para llegar a los parámetros indicados de una máquina síncrona los diseñadores utilizan diferentes técnicas, algunas de ellas de basadas en aproximaciones, y cuando esta ha sido construida su comprobación se la hace por medio de pruebas, es decir que tanto para compradores como para fabricantes se hace indispensable comprobar los valores numéricos de la misma, para este fin existen ciertas pruebas que permiten corroborar estos valores. La curva de saturación de la máquina síncrona o de circuito abierto no es más que la relación que existe entre la corriente de campo o de excitación del generador y el voltaje que este genera en sus terminales ya sea de línea a línea voltaje línea-neutro. La parte esencial de esta práctica radica en observar el voltaje que se genera a partir de los diferentes valores que se le da a la corriente de excitación.

### 3. Fundamentos teóricos

- **Característica de vacío del generador síncrono.**

La característica de vacío de las máquinas síncronas se basa en la dependencia del voltaje generado con respecto a la corriente de campo es decir el voltaje en función de la corriente de excitación. Para obtener las características del circuito abierto, la máquina síncrona se acciona con el primotor hasta alcanzar su velocidad nominal, estando vacío, es decir sin carga alguna, y fijando varios valores para las corrientes de campo, se toman para cada valor los voltajes de línea a neutro, la curva que se traza con estos valores se conoce como la característica de circuito abierto o de saturación para la máquina síncrona.

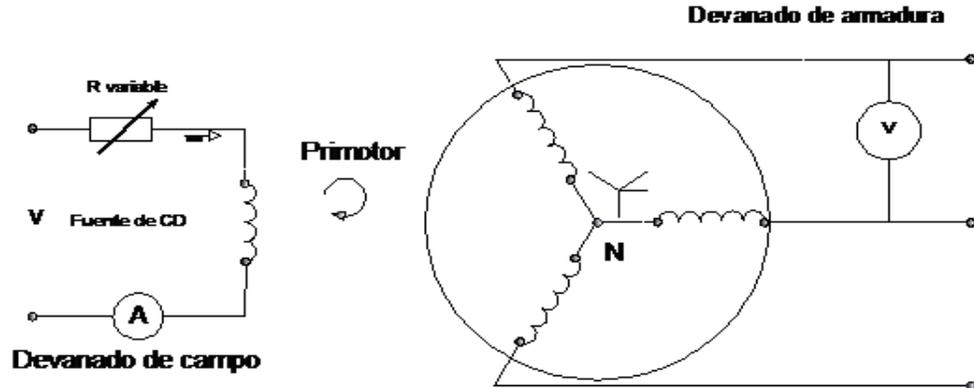
- **Línea del entrehierro**

Se denomina línea de entrehierro al la recta trazada por el origen, tangente a la parte lineal de la curva de saturación en vacío y representa el voltaje en los bornes en función de la corriente de excitación que existiría en la máquina si no hubiera saturación.

### 4. Características del equipo utilizado

- Máquina síncrona de polos salientes.
- Fuente de tensión continua variable (0–50V).
- Primotor o máquina motriz
- Voltímetro DC.
- Amperímetro DC.
- Central de medidas REVALCO 2RAN96C485.
- Variador de frecuencia Sinamics G110

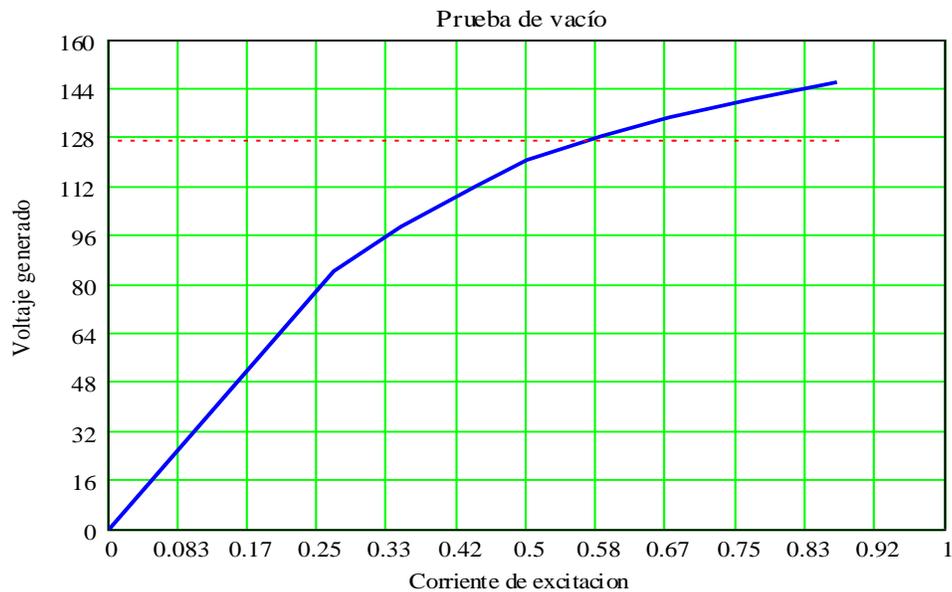
## 5. Esquema de montajes y resultados



- **Tabla de resultados:**

$V_o$	0	145	171	194	208	220	233	243	253
$I_{exc}$	0	0.27	0.35	0.44	0.51	0.59	0.67	0.77	0.87
$V_{exc}$	0	15	20	25	30	33	40	45	50

- **Gráfica de resultados:**



## 6. Conclusiones

- El voltaje generado en los terminales del generador está en función de la corriente de excitación del mismo, a velocidad síncrona constante.

- El voltaje generado cambia si se aumenta o disminuye la velocidad del primotor es decir también está en función de la velocidad del rotor.
- La corriente de excitación para generadores síncronos es aproximadamente el 1.5% de la potencia que entrega el generador.

## 7. Recomendaciones

- No exceda el valor de la corriente de campo más allá de los 50 VCD.
- Accione el reóstato de campo hasta sobrepasar la resistencia interna del devanado del rotor, aproximadamente de 20VCD.
- La línea del entrehierro es una característica del voltaje generado en función de la intensidad de campo, si no hubiera saturación en el núcleo del rotor.

## 8. Bibliografía

- GUTIERREZ, Agustín.2000.Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas. Perú, 382p.
- HARPER, Gilberto.2005.Curso de máquinas síncronas. México, Editorial Limusa S.A.pp.163-165.
- KINGSLEY, Charles. UMANS, Stephen.2005.Máquinas Eléctricas. México, Litográfica Ingramex Centeno.pp.258-260.

## 9. Respuestas a las preguntas de control

- La curva de saturación relaciona la densidad de flujo magnético con la intensidad de flujo de en un determinado material en un determinado medio que generalmente es el aire.
- Los parámetros que relaciona la curva de vacío de una máquina síncrona son: la corriente de excitación y el voltaje generador en los terminales del generador
- Se denomina línea de entrehierro al la recta trazada por el origen, tangente a la parte lineal de la curva de saturación en vacío y representa el voltaje en los bornes en función de la corriente de excitación que existiría en la máquina si no hubiera saturación.

# Universidad Nacional de Loja

## Practica # 2

**Carrera:** Ingeniería Electromecánica

**Laboratorio o Taller:** Taller de Máquinas Eléctricas

**Tema:** Característica de cortocircuito del generador síncrono de polos salientes

**Autores:** Javier Flores Paladines

Fabián Calle Chamba

**Docente:** Ing. Norman Jiménez

**Fecha:** 06-01-2010

### 2. Introducción

En el estudio de las máquinas síncronas es importante el conocimiento de sus propiedades numéricas, esto debido a que generalmente estas máquinas se construyen para propósitos específicos y no para aplicaciones generales. Para llegar a los parámetros indicados de una máquina síncrona los diseñadores utilizan diferentes técnicas, algunas de ellas de basadas en aproximaciones, y cuando esta ha sido construida su comprobación se la hace por medio de pruebas, es decir que tanto para compradores como para fabricantes se hace indispensable comprobar los valores numéricos de la misma, para este fin existen ciertas pruebas que permiten corroborar estos valores. La curva de cortocircuito de la máquina síncrona es la relación que existe entre la corriente de campo o de excitación del generador y la corriente que circula por la armadura cuando los terminales del generador están cortocircuitados. La parte esencial de esta práctica radica en observar el comportamiento de la corriente de armadura a partir de los diferentes valores que se le da a la corriente de excitación, cabe indicar que el voltaje en esta prueba es cero.

### 3. Fundamentos teóricos

- **Característica de cortocircuito del generador síncrono.**

Las características de corto circuito de una máquina síncrona constituye la otra parte de la información básica para la determinación de los parámetros numéricos

en esta prueba las tres terminales del devanado del estator (armadura) se ponen en corto circuito. La máquina se acciona hasta llegar aproximadamente su velocidad nominal fijando varios valores de corriente de campo se toman lecturas de las corrientes de corto circuito, hasta llegar al valor de corriente nominal de armadura o a un valor ligeramente superior a este, esta es casi lineal debido a que el hierro no está saturado al valor nominal de corriente de armadura.

- **Reactancia síncrona saturada y no saturada**

Las pruebas de cortocircuito y de circuito abierto permiten determinar la reactancia síncrona saturada y no saturada de la máquina, para eso se grafican las dos curvas en un plano cartesiano en el que se ha tomado como abscisa la corriente de excitación y como ordenadas la tensión del circuito abierto y la corriente de cortocircuito respectivamente. La relación entre el voltaje de vacío y la corriente de corto circuito se conoce como la reactancia síncrona.

- **Relación de cortocircuito.**

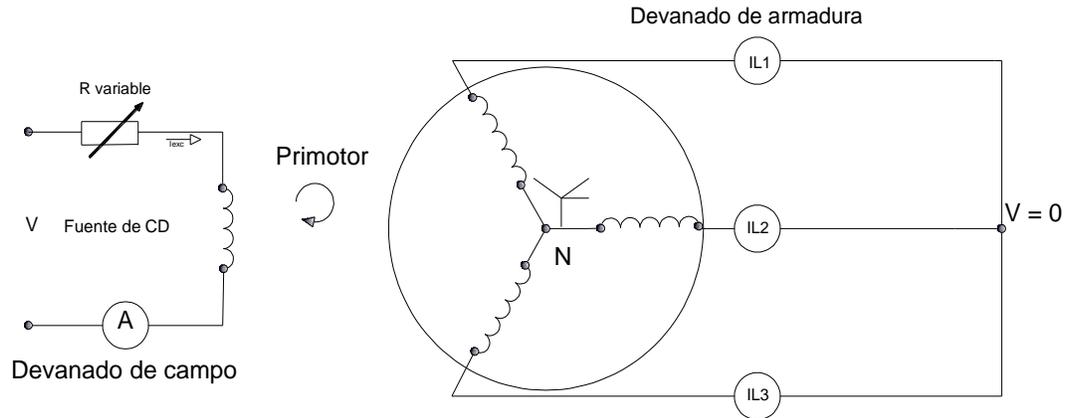
Se define la relación de cortocircuito como la relación entre la corriente de excitación que produce la tensión nominal en circuito abierto y la corriente de excitación que produce la corriente de armadura nominal en cortocircuito, esta es inversa a la reactancia síncrona de la máquina.

#### **4. Características del equipo utilizado**

- Máquina síncrona de polos salientes.
- Fuente de tensión continua variable (0–50V).
- Primotor o máquina motriz
- Voltímetro DC.
- Amperímetro DC.
- Central de medidas REVALCO 2RAN96C485.
- Variador de frecuencia Sinamics G110

## 5. Esquema de montajes y resultados

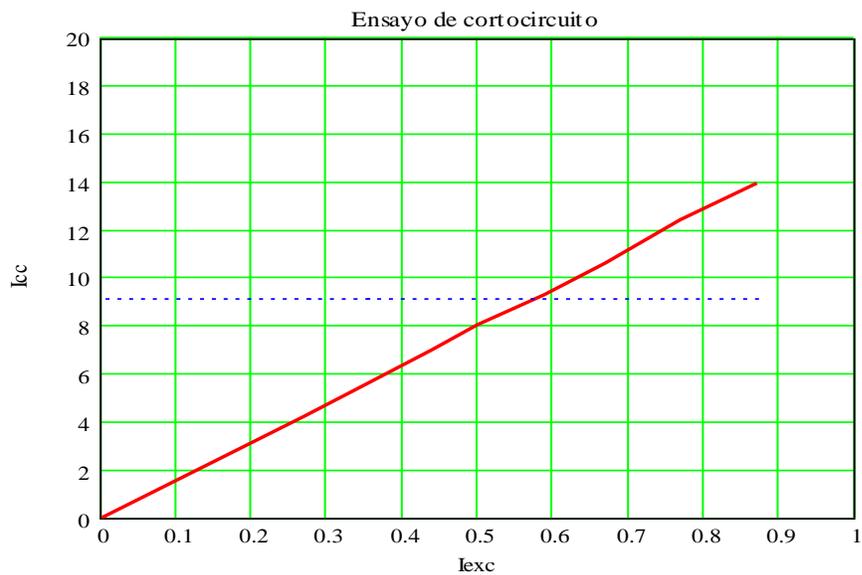
### Prueba de Cortocircuito



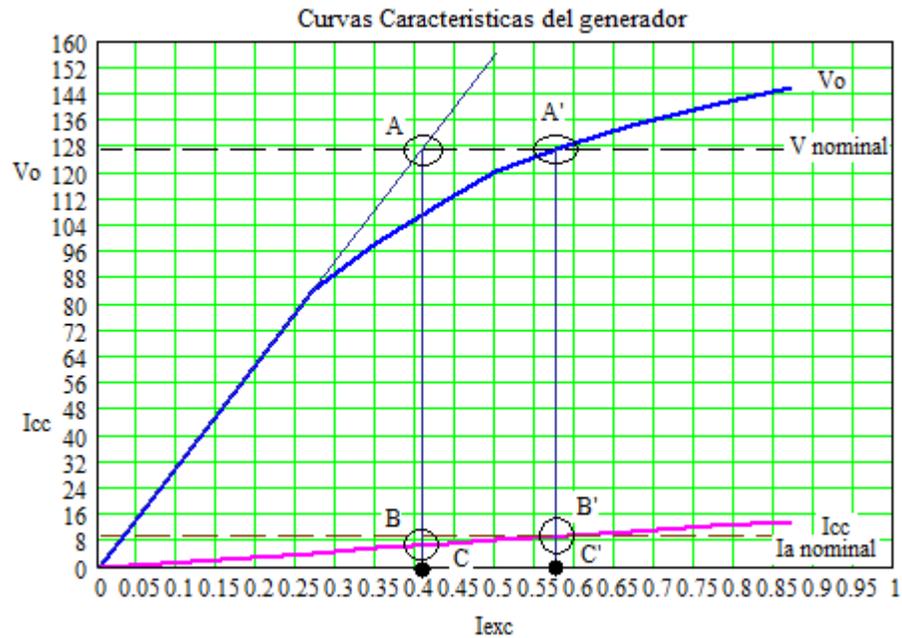
- **Tabla de resultados:**

$I_{cc}$ (A)	0	4.2	5.5	7	8	9.1	10.6	12.36	13.9
$I_{ex}$ (A)	0	0.27	0.35	0.44	0.50	0.59	0.67	0.77	0.87
$V_{ex}$ (V)	0	15	20	25	30	33	40	45	50

- **Gráfica de resultados:**



- **Determinación de la reactancia síncrona saturada y no saturada del generador.**



$$Zs \text{ no sat} = \frac{AC}{BC}$$

$$Zs \text{ no sat} = \frac{127V}{6.5A}$$

$$Zs \text{ no sat} = 19.53\Omega$$

$$Zs \text{ sat} = \frac{A'C'}{B'C'}$$

$$Zs \text{ sat} = \frac{127V}{9.1A}$$

$$Zs \text{ sat} = 13.80\Omega$$

$$Rcd = \frac{Vcd}{Icd * 2} = \frac{20V}{7A * 2} = 1.42\Omega$$

$$Rca = 1.5 * Rcd = 1.5 * 1.42 \Omega = 2.41\Omega$$

$$Xl \text{ no sat} = \sqrt{Rca^2 - Zs \text{ no sat}^2} = 19.50\Omega$$

$$Xl \text{ sat} = \sqrt{Rca^2 - Zs \text{ sat}^2} = 13.75\Omega$$

$$L \text{ nosat} = \frac{Xl \text{ no sat}}{2\pi f} = 0.0517H$$

$$L_{sat} = \frac{Xl_{sat}}{2\pi f} = 0.0365H$$

## 6. Conclusiones

- El voltaje en la prueba de cortocircuito es cero.
- Como el voltaje es cero la corriente de armadura se ve afectada únicamente por la impedancia síncrona del generador.
- La impedancia síncrona esta a su vez dividida en dos componentes la reactancia síncrona y la resistencia efectiva del devanado del estator por fase.
- La resistencia efectiva por fase del devanado se la puede calcular mediante el método de la resistencia con corriente directa.

## 7. Recomendaciones

- No exceda el valor de la corriente de campo más allá de los 50 VCD.
- Accione el reóstato de campo hasta sobrepasar la resistencia interna del devanado del rotor, aproximadamente de 20VCD.
- La corriente de armadura durante la prueba de cortocircuito no debe sobrepasar el doble de la corriente nominal del generador caso contrario este podría sufrir daños significativos en su estructura interna.
- La curva de cortocircuito de un generador síncrono es una característica lineal.

## 8. Bibliografía

- GUTIERREZ, Agustín.2000.Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas. Perú, 382p.
- HARPER, Gilberto.2005.Curso de máquinas síncronas. México, Editorial Limusa S.A.pp.163-165.
- KINGSLEY, Charles. UMANS, Stephen.2005.Máquinas Eléctricas. México, Litográfica Ingramex Centeno.pp.258-260.

## 9. Respuestas a las preguntas de control

- **¿Qué representa la curva de cortocircuito?**

La curva de cortocircuito de un generador síncrono representa la relación que hay entre la corriente de campo y la corriente que circula por la armadura, esta curva

es muy importante para determinar la impedancia síncrona saturada y no saturada del generador.

- **¿Qué sucede con el voltaje en la prueba de cortocircuito?**

El voltaje en la prueba de cortocircuito es cero.

- **¿Por qué parámetro se ve afectada la corriente de armadura en la prueba de cortocircuito?**

La corriente en la prueba de cortocircuito se ve afectada únicamente por la impedancia interna de la máquina por fase.

# Universidad Nacional de Loja

## Practica # 3

**Carrera:** Ingeniería Electromecánica

**Laboratorio o Taller:** Taller de Máquinas Eléctricas

**Tema:** Determinación de la curva de tensión en función de la corriente de armadura de la carga a FDP Inductivo y corriente de excitación constantes

**Autores:** Javier Flores Paladines

Fabián Calle Chamba

**Docente:** Ing. Norman Jiménez

**Fecha:** 06-01-2010

### 2. Introducción

Las principales características de operación del estado estacionario de una máquina síncrona se describen mediante las interrelaciones que hay entre el voltaje terminal, la corriente de excitación, la corriente de armadura, el factor de potencia y su eficiencia.

Si la carga tiene factor de potencia atrasado, que corresponde al caso de una carga predominantemente inductiva y que también se le conoce en algunos casos como factor de potencia negativo, el solo hecho de conectar una carga inductiva al generador produce una caída de tensión en el mismo.

### 3. Fundamentos teóricos

- **Característica de operación en estado permanente**

Las principales características de operación son las relaciones que existen entre el voltaje terminal, la corriente de campo, la corriente de armadura, el factor de potencia y la eficiencia. La corriente de armadura se presenta cuando existe una carga conectada entre terminales a la cual alimentar, esta puede estar en fase, atrasada o adelantada con respecto al voltaje terminal dependiendo de si el factor de potencia de la carga es unitario, adelantado o atrasado, con factores de potencia capacitivos la tensión tiende a subir por efecto aditivo de la reacción de armadura que se suma al campo producido por el rotor, con factores de potencia inductiva,

se tiene que sobre excitar la máquina para mantener la tensión constante, cuando la carga aumenta, mientras que con cargas capacitivas hay que sub excitarlo y con factores de potencia unitarios las reacciones son muy leves.

- **Reacción de armadura**

La corriente de armadura no es uniforme al contrario varía en forma sinusoidal y puede estar adelantada o retrasada con respecto al flujo de campo, de acuerdo al factor de potencia de la carga que se le aplique. Cuando la corriente circula por la armadura, el flujo que se crea en el interior de la máquina ya no es solo el que proporciona el inductor, si no que a la acción de este se le superpone el flujo creado por el inducido, fruto de la aplicación de una carga al generador.

- **Comportamiento del generador con cargas inductivas**

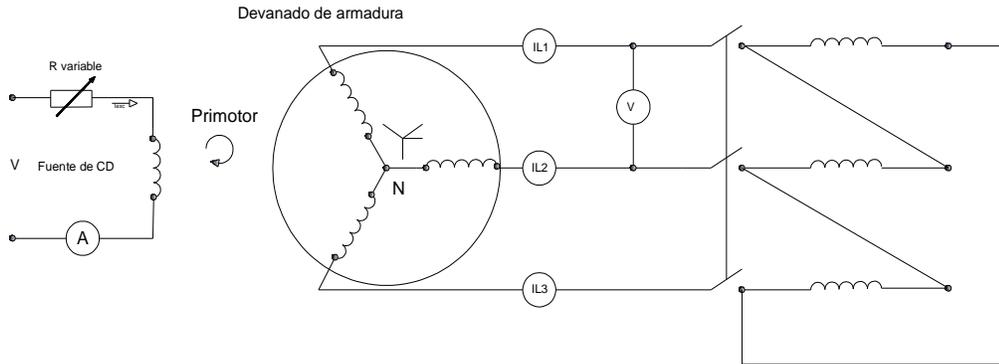
Cuando el factor de potencia está en retraso, la corriente de fase de armadura está retrasada con respecto al voltaje de fase, la caída de tensión por la resistencia del devanado está en fase con la corriente de armadura, mientras que la reactancia de cuadratura y la reacción de armadura preceden a  $90^\circ$  a la corriente de armadura, de acuerdo a esto para poder obtener el mismo voltaje, se necesita inducir un voltaje mayor. Es decir para una carga inductiva la regulación de voltaje siempre será positiva.

#### **4. Características del equipo utilizado**

- Máquina síncrona de polos salientes.
- Fuente de tensión continua variable (0–50V).
- Primotor o máquina motriz
- Voltímetro DC.
- Amperímetro DC.
- Central de medidas REVALCO 2RAN96C485.
- Variador de frecuencia Sinamics G110
- Carga inductiva o motor de inducción de 2.2 H

## 5. Esquema de montajes y resultados

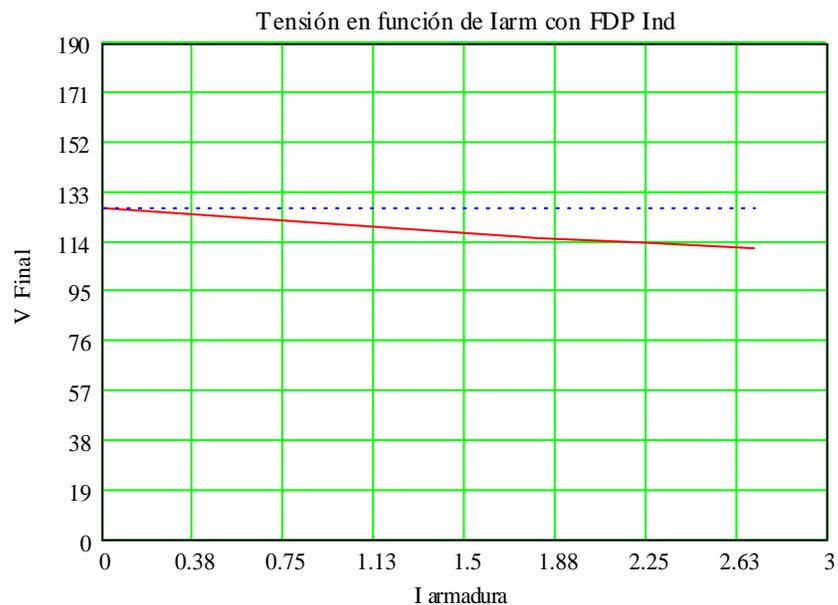
### Prueba de Trabajo con carga Inductiva



- **Tabla de resultados:**

Cargas	Vf inicial	Vf final	I armadura	Cos $\phi$
Motor Vacío	127V	116V	1.7A	Inductivo
Punto 1	127V	115.4V	1.9A	Inductivo
Punto 2	127V	113.73V	2.2A	Inductivo
Punto 3	127V	111.42V	2.7A	Inductivo

- **Gráfica de resultados:**



## 6. Conclusiones

- Cuando se conecta una carga inductiva al generador, el voltaje terminal del mismo desciende por efecto de la reacción de armadura y la impedancia síncrona.
- A medida que se aumenta la carga inductiva al generador, este experimenta una caída de tensión por efecto de la reacción de armadura.

## 7. Recomendaciones

- Accione el reóstato de campo hasta sobrepasar la resistencia interna del devanado del rotor, aproximadamente de 20VCD.
- No frene la carga inductiva al máximo, podría dañar la misma
- Tenga en cuenta que la potencia de la carga inductiva es de 1.2 HP no la sobrepase.
- Cuando se conecte una carga con factor de potencia inductivo, esta siempre produce una caída de tensión en los bornes del mismo.

## 8. Bibliografía

- GUTIERREZ, Agustín.2000.Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas. Perú, 382p.
- HARPER, Gilberto.2005.Curso de máquinas síncronas. México, Editorial Limusa S.A.pp.163-165.
- KINGSLEY, Charles. UMANS, Stephen.2005.Máquinas Eléctricas. México, Litográfica Ingramex Centeno.pp.258-260.

## 9. Respuestas a las preguntas de control

- **¿Qué pasa con el voltaje generado cuando al generador se le conecta una carga inductiva?**

Este desciende en un porcentaje significativo

- **¿Qué pasa con la corriente de campo cuando al generador se le conecta una carga inductiva?**

La corriente de campo se mantiene constante, salvo en el caso de que se quiera compensar la caída de tensión por la carga inductiva, entonces se debería aumentar el valor de la corriente de campo para lograr generar el voltaje nominal.

# Universidad Nacional de Loja

## Practica # 4

**Carrera:** Ingeniería Electromecánica

**Laboratorio o Taller:** Taller de Máquinas Eléctricas

**Tema:** Determinar la curva de corriente de excitación en función de la corriente de armadura o de la potencia suministrada a la carga con FDP de diferentes tipos.

**Autores:** Javier Flores Paladines

Fabián Calle Chamba

**Docente:** Ing. Norman Jiménez

**Fecha:** 06-01-2010

### 2. Introducción

Las principales características de operación del estado estacionario de una máquina síncrona se describen mediante las interrelaciones que hay entre el voltaje terminal, la corriente de excitación, la corriente de armadura, el factor de potencia y su eficiencia.

Si la carga tiene factor de potencia atrasado, que corresponde al caso de una carga predominantemente inductiva y que también se le conoce en algunos casos como factor de potencia negativo, el solo hecho de conectar una carga inductiva al generador produce una caída de tensión en el mismo.

### 3. Fundamentos teóricos

- **Regulación de generadores síncronos.**

Cuando se conecta cargas al generador, cual quiera que sea su factor de potencia produce un efecto en el mismo, el mismo que se lo puede cuando el voltaje por fase del generador varía, este efecto se toma en cuenta para la regulación del voltaje de un generador. Mientras menor sea el factor de potencia en adelanto, mayor es el aumento del voltaje entre el funcionamiento sin carga y el funcionamiento a plena carga. Y mientras menor sea el factor de potencia en retraso, mayor es la disminución del voltaje desde el funcionamiento sin carga hasta el funcionamiento a

plena carga, esto también se da con cargas resistivas pero en un porcentaje un poco menor.

- **Sobreexcitación y subexcitación de generadores síncronos.**

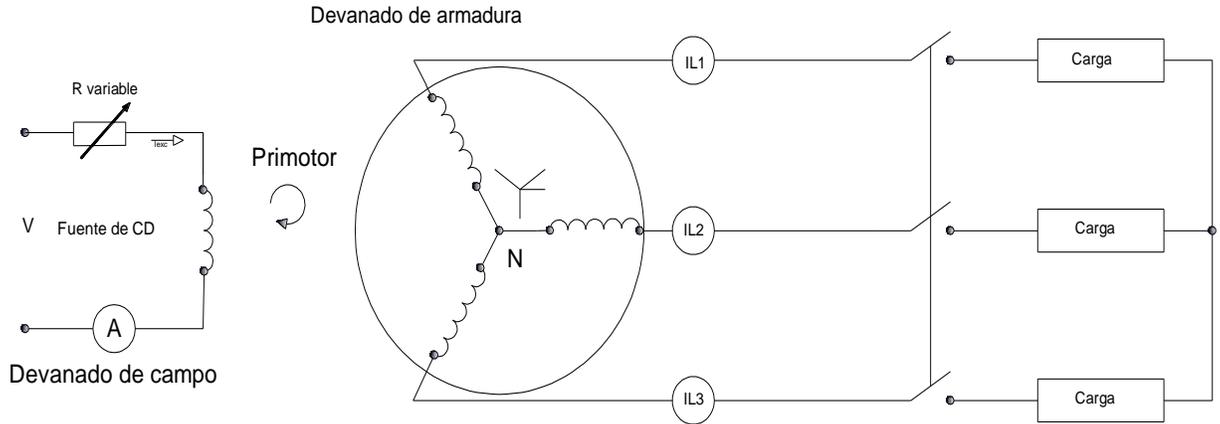
Un generador esta en un régimen de sobreexcitación cuando la corriente de campo es superior a la corriente de campo que se necesita para generar un voltaje nominal, este efecto se puede observar claramente cuando al generador se le conecta una carga inductiva o resistiva. Lo contrario al régimen de sobreexcitación es el de subexcitación, el mismo que se presenta cuando al generador se le conecta una carga netamente capacitiva, aquí la corriente de campo que se necesita para producir un voltaje nominal es menor que la corriente de campo que se necesita para generar un voltaje nominal, esto se debe a la reacción de armadura que produce una carga capacitiva.

#### **4. Características del equipo utilizado**

- Máquina síncrona de polos salientes.
- Fuente de tensión continua variable (0–50V).
- Primotor o máquina motriz
- Voltímetro DC.
- Amperímetro DC.
- Central de medidas REVALCO 2RAN96C485.
- Variador de frecuencia Sinamics G110
- Cargas inductivas, capacitivas y resistivas.

## 5. Esquema de montajes y resultados

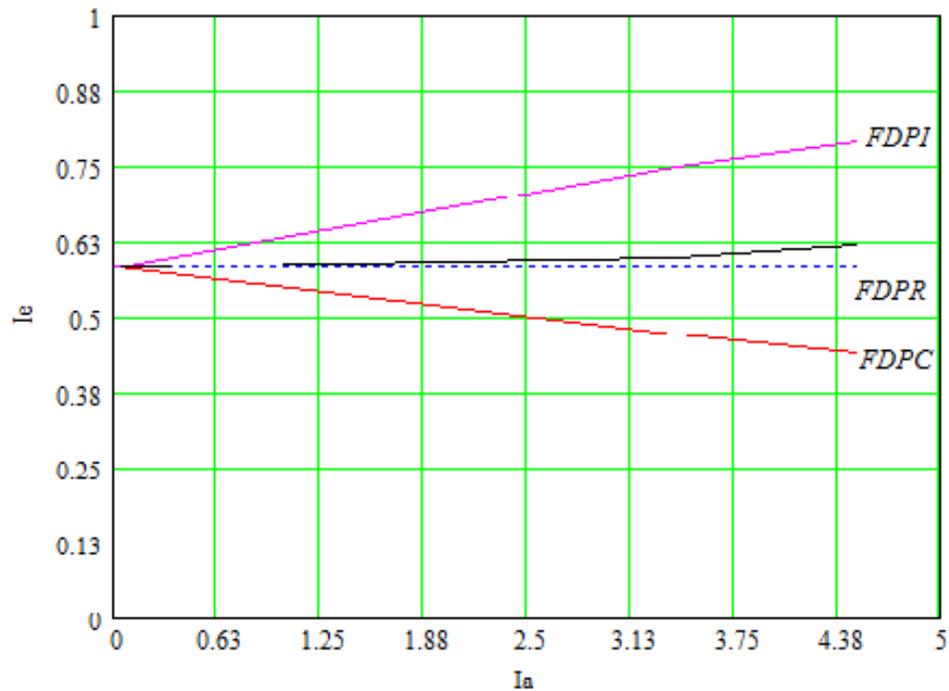
Corriente de excitación en función de la corriente de armadura o de la potencia suministrada a diferentes FDP



### • Tabla de resultados:

Cargas	$I_{exc. inicial}$	$I_{exc. final}$	I armadura	$\text{Cos } \phi$
100W	0.58 A	0.60A	0.6A	Resistivo
150W	0.58 A	0.62A	1A	Resistivo
1000W	0.58 A	0.68A	6.5A	Resistivo
Motor vacío	0.58 A	0.75A	1.5A	Inductivo
Motor ½ carga	0.58 A	0.79A	2.2A	Inductivo
60 $\mu\text{F}$	0.58 A	0.47A	3.4A	Capacitivo
103 $\mu\text{F}$	0.58 A	0.44A	3.5A	Capacitivo

- **Gráfica de resultados:**



## 6. Conclusiones

- Con cargas inductivas y resistivas se necesita aumentar la corriente de campo para mantener el voltaje nominal, es decir hay que sobreexcitar el generador.
- Con cargas capacitivas se necesita disminuir la corriente de campo para mantener el voltaje nominal.
- La reacción de armadura es magnetizante y desmagnetizante según el factor de potencia capacitivo o inductivo respectivamente, en el primer caso tiende a producir más voltaje generado, mientras que en el segundo el voltaje generado tiende a disminuir, esto también se da con cargas resistivas.

## 7. Recomendaciones

- Accione el reóstato de campo hasta sobrepasar la resistencia interna del devanado del rotor, aproximadamente de 20VCD.
- Espere a que el voltaje generado se estabilice, cuando se le aplique una carga de cualquier tipo, para proceder a su respectiva regulación.

- Tome en cuenta la reacción de armadura para diferentes cargas para así poder comprender con mayor claridad su efecto.

## 8. Bibliografía

- GUTIERREZ, Agustín.2000.Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas. Perú, 382p.
- HARPER, Gilberto.2005.Curso de máquinas síncronas. México, Editorial Limusa S.A.pp.163-165.
- KINGSLEY, Charles. UMANS, Stephen.2005.Máquinas Eléctricas. México, Litográfica Ingramex Centeno.pp.258-260.

## 9. Respuestas a las preguntas de control

- **¿Se podría compensar el efecto que produce una carga inductiva aumentando la velocidad síncrona del primotor?**

Si se podría compensar este efecto por que el voltaje que se induce en una máquina síncrona está en función de la corriente de campo y de la velocidad a la que gira el rotor, pero tenga presente que si varía la velocidad síncrona del generador este cambiará su frecuencia eléctrica.

- **¿A qué se debe de que cuando al generador se le conecta una carga capacitiva este aumenta en cierto porcentaje el voltaje generado?**

Esto se debe a la reacción de armadura que en este caso es magnetizante y en consecuencia tiende a generar más voltaje con respecto al voltaje de vacío.

- **Calcule la regulación de voltaje del generador para las cargas utilizadas**

*Con carga resistiva de 100W*

$$Reg = \frac{V_o - V_f}{V_f} * 100 \rightarrow 0.78\% \rightarrow \text{positivo}$$

*Con carga resistiva de 150W*

$$Reg = \frac{V_o - V_f}{V_f} * 100 \rightarrow 2.3\% \rightarrow \text{positivo}$$

*Con carga resistiva de 1000W*

$$Reg = \frac{V_o - V_f}{V_f} * 100 \rightarrow 9.8\% \rightarrow \text{positivo}$$

*Con carga capacitiva de 1.2HP en vacío*

$$Reg = \frac{V_o - V_f}{V_f} * 100 \rightarrow 10\% \rightarrow \text{positivo}$$

*Con carga capacitiva de 1.2HP con carga*

$$Reg = \frac{V_o - V_f}{V_f} * 100 \rightarrow 14\% \rightarrow \text{positivo}$$

*Con carga capacitiva de 60 $\mu$ F*

$$Reg = \frac{V_o - V_f}{V_f} * 100 \rightarrow 8.3 \rightarrow \text{negativo}$$

*Con carga resistiva de 103 $\mu$ F*

$$Reg = \frac{V_o - V_f}{V_f} * 100 \rightarrow 10.5\% \rightarrow \text{negativo}$$

# Universidad Nacional de Loja

## Practica # 5

**Carrera:** Ingeniería Electromecánica

**Laboratorio o Taller:** Taller de Máquinas Eléctricas

**Tema:** Determinación de la curva de tensión en función de la corriente de armadura de la carga a FDP resistivo y corriente de excitación constantes

**Autores:** Javier Flores Paladines

Fabián Calle Chamba

**Docente:** Ing. Norman Jiménez

**Fecha:** 06-01-2010

### 1. Introducción

Los generadores al operar con cargas resistivas, la caída de tensión en los devanados del estator es baja como se observa en la grafica la tensión generada decrece con relación a la potencia de las cargas, por lo cual se deberá de aumentar la corriente de excitación para mantener en un voltaje nominal de 127 – 128V.

### 2. Fundamentos teóricos

**Principio de operación del generador síncrono:** Las máquinas síncronas se encuentran dentro de los tres tipos más comunes de máquinas eléctricas, los otros son las máquinas de corriente directa. La mayor parte de la energía eléctrica que se produce es por medio de de generadores síncronos que tienen potencias de cientos de MVA.

Al girar el rotor el flujo que está presente en este y que lo suministra la excitatriz, lo cortan los devanados de las fases a,b,c y de acuerdo con el principio de inducción se induce en estos un voltaje que depende de la variación en el tiempo de los eslabonamientos del flujo cortado, como el devanado del rotor se construye para lograr una distribución senoidal de campo, los voltajes que se inducen en los devanados del estator son senoidales también de diseño deben ser iguales en ,magnitud y desfasados a 120°.

La utilización de los generadores síncronos es muy importante porque se puede poner en sincronismo con la red cuando se tiene generadores conectados en paralelo y además

cuando se encuentra conectada a una red finita.

**Reacción de Armadura:** La distribución del flujo de armadura debido a la corriente de los conductores de ésta y la distorsión consiguiente del flujo del entrehierro se aplica en los generadores de ca, la corriente en los conductores individuales de armadura no es uniforme sino que varía senoidalmente.

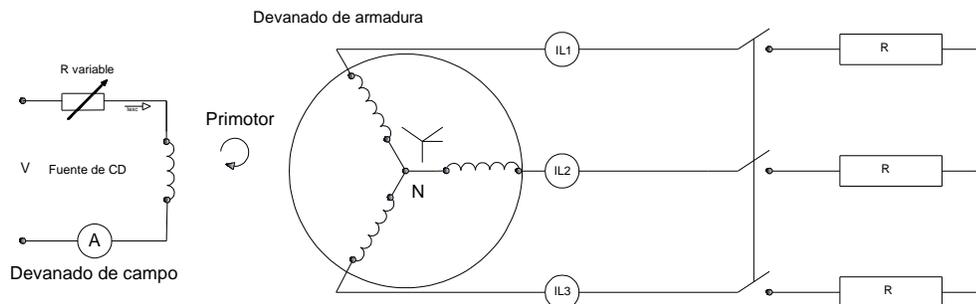
El modo en que afectan las diversas condiciones de carga del factor de potencia en los generadores se puede determinar a partir de la relación de fase entre la fuerza electromotriz inducida y la corriente que pasa por los conductores de armadura

### 3. Características y equipos utilizados

- Máquina síncrona.
- Fuente de tensión continua variable (0–50V).
- Primotor o máquina motriz
- Voltímetro DC.
- Amperímetro DC.
- Central de medidas REVALCO 2RAN96C485.
- Variador de frecuencia Sinamics G110.
- Cargas resistivas de 100-150-1000 watos.

### 4. Esquema de montaje y resultados

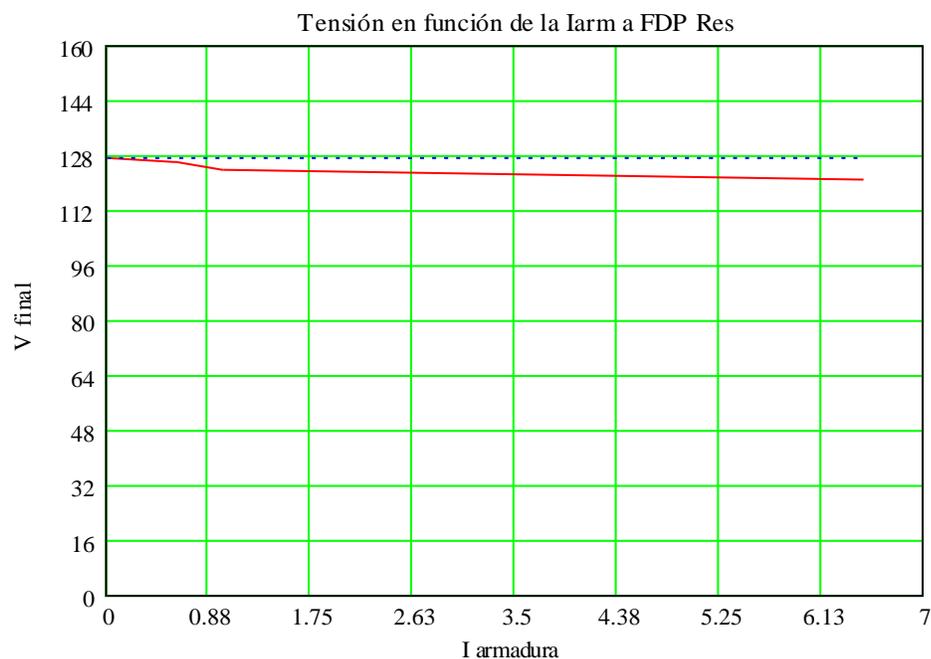
#### Prueba de Trabajo con carga Reactiva



- **Tabla de resultados:**

Cargas	V inicial	V final	I armadura	Cos $\varphi$
100W	127V	126V	0.6A	1
150W	127V	124V	1A	1
1000W	127V	121V	6.5A	1

- **Gráfica de resultados:**



## 5. Conclusiones

- Se determinó la curva de tensión con respecto a la corriente de armadura para diferentes cargas resistivas.
- Se observó el comportamiento del generador con carga y sin carga lo que nos permitió notar una pequeña caída de tensión en las líneas.

## 6. Recomendaciones

- Conectar las cargas resistivas siempre en estrella no en delta.
- Regular la excitación hasta que el voltaje generado sea el adecuado para el funcionamiento de las cargas.

- No sobrecargue el generador a potencias superiores de 2000W

## **7. Bibliografía**

- GUTIERREZ, Agustín.2000.Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas. Perú, 382p.
- HARPER, Gilberto.2005Curso de máquinas síncronas. México, Editorial Limusa S.A.pp.163-165.
- KINGSLEY, Charles. UMANS, Stephen.2005.Máquinas Eléctricas. México, Litográfica Ingramex Centeno.pp.258-260.

## **8. Respuestas de las preguntas de control**

**¿Cuándo el generador trabaja con cargas resistivas, la corriente se encuentra en fase, en adelante o en retazo con relación al voltaje?**

En circuitos trifásicos cuando se tiene cargas resistivas ya sea equilibradas o desequilibradas el ángulo de potencia es de  $0^\circ$  es decir está en fase la corriente con el voltaje

**¿Cuáles son los tipos de rotores que se utilizan en los generadores y en que se los emplean?**

El rotor de las máquinas síncronas puede ser de polos salientes y de polos lisos, los de polos salientes se utilizan en máquinas lentas, es decir en centrales hidroeléctricas y los de polos lisos se los emplean en las centrales termo eléctricas que operan a grandes velocidades.

# Universidad Nacional de Loja

## Practica # 6

**Carrera:** Ingeniería Electromecánica

**Laboratorio o Taller:** Taller de Máquinas Eléctricas

**Tema:** Determinación de la curva de tensión en función de la corriente de armadura de la carga a FDP capacitivo y corriente de excitación constantes

**Autores:** Javier Flores Paladines

Fabián Calle Chamba

**Docente:** Ing. Norman Jiménez

**Fecha:** 06-01-2010

### 1. Introducción

En un circuito con cargas capacitivas la corriente eléctrica esta adelantada a 90° con relación al voltaje, los condensadores dan un aumento de la tensión generada en la red que depende de la capacidad del mismo que viene en unidades de microfaradios. La reactancia de un condensador es:  $X_c = 1/2\pi fC \cdot 10^{-6}$  cuya unidad se da en ohmio.

La potencia de los condensadores es la potencia reactiva (KVAR).

### 2. Fundamentos teóricos

**Características de operación de circuito con condensadores:** Cuando se aplica una tensión continua entre las placas de un condensador hay un primer flujo de corriente que carga el condensador a la tensión aplicada. Después ya no circula más corriente si la tensión se mantiene constante. Si las placas del condensador se ponen en corto circuito, reduciendo a cero su diferencia de potencial, sale una corriente de la placa positiva.

En corriente alterna, el condensador se carga y se descarga alternativamente, de tal modo que llega a la placa positiva una cantidad de electricidad que sale luego nuevamente de ella, y así sucesivamente. Es esa cantidad de electricidad que circula para cargar y para descargar el condensador la que constituye la corriente alterna. Si se instala un amperímetro en la línea del condensador indicará el paso de la corriente. Cuando más rápida pase la tensión de positiva a

negativa, mayor será la cantidad de electricidad con que se cargue y descargue el condensador por segundo y mayor será la intensidad de la corriente. Por consiguiente, esta intensidad debe ser proporcional a la frecuencia.

$$V = I / C * 2\pi f \rightarrow I = V * C * 2\pi f$$

**Ventajas y límites económicos de la corrección del factor de potencia:** Las cargas que tienen factores de potencias de moderados a bajos en adelanto o retraso menores de 0.65, ocasionan una gran pérdida de energía eléctrica a las compañías del servicio. Los factores de potencia bajos hacen que las compañías aumenten su capacidad o potencia patentes (en VA), para abastecer una corriente mayor a las cargas de menor factor de potencia. Esta capacidad mayor, y corriente mayor se necesitan en todos los componentes, desde la estación generadora, pasando por los transformadores y las líneas de transmisión, hasta llegar a la carga.

Casi todas las cargas comerciales, industriales y residenciales tienden a tener factores de potencia en retraso, es decir, que la corriente está retrasada con respecto al voltaje, debido a las cargas reactivas inductivas que interaccionan en motores, lámparas fluorescentes, etc. En consecuencia, la corrección (elevación) de los factores de potencia consiste en agregar cargas capacitivas en paralelo con las cargas inductivas existentes.

**Métodos de corrección o mejoramiento del factor de potencia:** La corrección o mejorar el factor de potencia implica diferentes maneras de elevarlo. Todos los métodos del mejoramiento del **FP** consiste en conectar dispositivos entre los conductores, en paralelo con las cargas inductivas existentes,  $+jQ$ , para tomar de las líneas cargas en adelanto, al igual que potencia negativa reactiva en cuadratura,  $-jQ$ . Se usan en forma comercial tres tipos de dispositivos.

- **Capacitores de corrección:** Son capacitores grandes de alto voltaje y alta capacitancia, que se conectan entre las líneas del sistema monofásico y trifásico. Los capacitores de corrección se especifican en KVA, o KVAR.
- **Capacitores síncronos:** Son motores síncronos sobre excitados, diseñados sin ejes que sobresalgan, de modo que no se puedan acoplar a cargas mecánicas, y tienen por objeto “flotar” en las líneas trifásicas o monofásicas para tomar solo corriente en adelanto del suministro y corregir el factor de potencia.

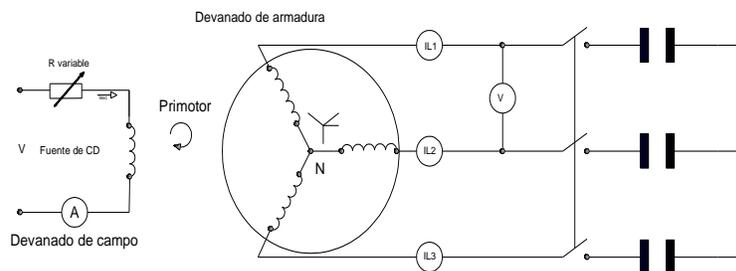
- **Motores síncronos:** Son motores de velocidad constante que, cuando se sobreexcitan, son capaces de impulsar cargas mecánicas y, simultáneamente, de tomar corrientes del suministro que estén en adelanto. Si no se acoplan a carga alguna, los motores síncronos se pueden emplear como capacitores síncronos. En esta última aplicación, casi toda su capacidad en KVA se representa como  $-jQ$  kilovars de corrección.

### 3. Características y equipos utilizados

- Máquina síncrona.
- Fuente de tensión continua variable (0–50V).
- Primotor o máquina motriz
- Voltímetro DC.
- Amperímetro DC.
- Central de medidas REVALCO 2RAN96C485.
- Variador de frecuencia Sinamics G110.
- Cargas capacitivas de 60 – 103  $\mu\text{F}$ .

### 4. Esquema de montaje y resultados

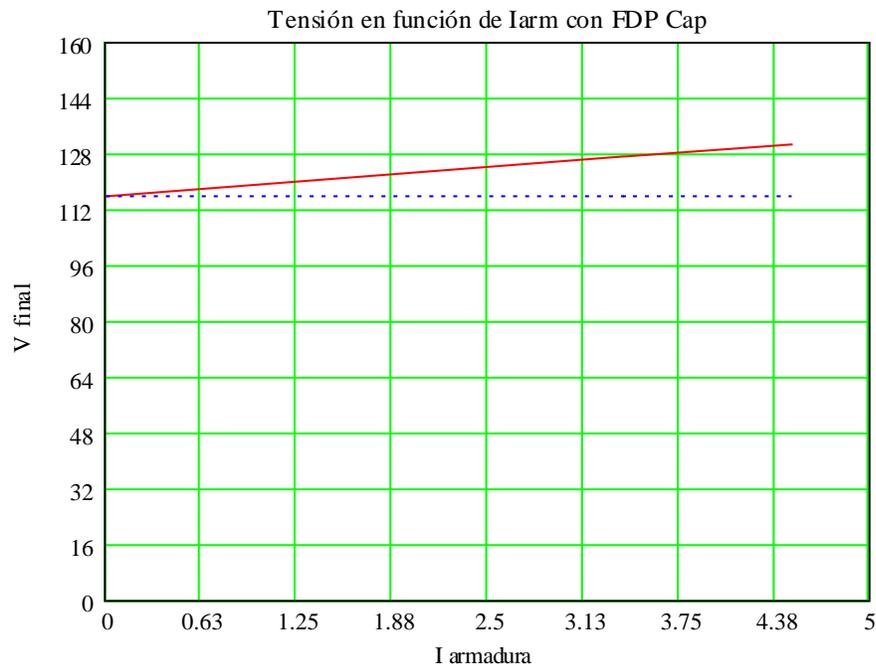
Prueba de Trabajo con carga Capacitiva



- **Tabla de resultados:**

Carga	V inicial	V final	I armadura	Cos $\varphi$
60 $\mu\text{f}$	116V	127V	3.4A	En adelanto
103 $\mu\text{f}$	116V	130.5V	4.5A	En adelanto

- **Gráfica de resultados:**



## 5. Conclusiones

- Se determinó la curva de tensión con respecto a la corriente de armadura de cada condensador.
- Se verificó un aumento de voltaje por parte de los condensadores de  $60\mu\text{f}$  un 10% y el de  $103\mu\text{f}$  un 13%.

## 6. Recomendaciones

- Realizar las conexiones de los condensadores siempre en estrella.
- Utilizar capacitores con cargas equilibradas.
- Disminuye la corriente de excitación para generar tensiones menores a 110V entre fase y neutro, el momento en que va a realizar esta práctica para evitar un posible calentamiento y por ende una sobrecarga de los capacitores.

## 7. Bibliografía

- GUTIERREZ, Agustín.2000.Teoría y Análisis de Máquinas Eléctricas. Perú, 382p.
- HARPER, Gilberto.2005Curso de máquinas síncronas. México, Editorial Limusa S.A.pp.163-165.

- KINGSLEY, Charles. UMANS, Stephen. 2005. Máquinas Eléctricas. México, Litográfica Ingramex Centeno. pp.258-260.

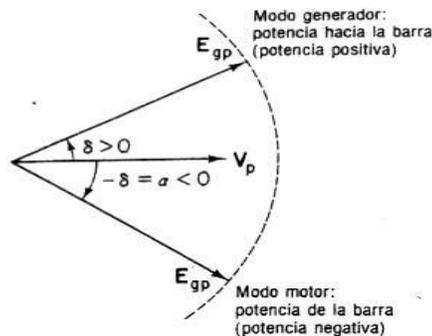
## 8. Respuestas de las preguntas de control

### ¿Qué entiende por sobreexcitación?

Es cuando el voltaje generado de excitación es mayor que el voltaje de fase y en el que la corriente de armadura se adelanta al voltaje de fase, produciendo un estado de factor de potencia en adelanto.

### ¿Explique cuando una máquina síncrona entra a funcionar como generador y como motor?

Cuando voltaje generado por fase  $E_{gp}$  siempre está en retraso con respecto al voltaje de fase  $V_p$ , funciona como motor y a la inversa funciona como generador.



Siempre que el ángulo del par de la máquina síncrona sea positivo, es decir mayor que cero, la máquina trabaja como generador y cuando el ángulo del par sea negativo, es decir menor que cero, la máquina trabaja como motor.

### ¿Qué entiende por excitación normal de un generador?

Es el aumento de carga que tiende a aumentar el voltaje generado por fase como resultado de la acción ligera de magnetización que se producen debido a las cargas ligeramente en retraso.

# Universidad Nacional de Loja

## Practica # 7

**Carrera:** Ingeniería Electromecánica

**Laboratorio o Taller:** Taller de Máquinas Eléctricas

**Tema:** Determinación del eje de cuadratura y eje directo del generador

**Autores:** Javier Flores Paladines

Fabián Calle Chamba

**Docente:** Ing. Norman Jiménez

**Fecha:** 06-01-2010

**Tema:** Determinación del eje de cuadratura y eje directo del generador

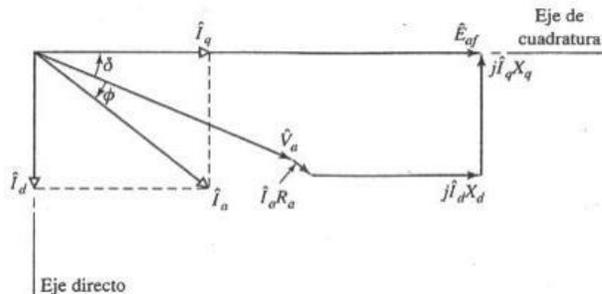
### 1. Introducción

Para resolver las cantidades de la armadura de una máquina síncrona hacia dos componentes giratorias, una alineada con el eje del devanado de campo, la componente en el eje directo, y una en cuadratura con ese eje, que se introducen como un medio para facilitar el análisis de las máquinas de polos salientes. La utilidad de este concepto se basa en el hecho de que, aun cuando cada una de las fases del estator ve una inductancia variable en el tiempo debido a los polos salientes del rotor, las cantidades transformadas giran con este, y por consiguiente, ven trayectorias magnéticas constantes. La utilidad de este concepto

### 2. Fundamentos teóricos

**Diagrama fasorial para máquinas de polos salientes:** Cada una de las componentes de las corrientes en el eje directo y en el eje de cuadratura ( $I_d, I_q$ ) asociadas a un componente la caída de voltaje de la reactancia síncrona,  $jI_d X_d$  y  $jI_q X_q$  respectivamente. Las reactancias  $X_d$  y  $X_q$  representan, las reactancias síncronas en el eje directo y del eje de cuadratura; estos valores se toman en consideración para los efectos inductivos de todos los flujos fundamentales espaciales creados por las corrientes de inducido a lo largo del eje directo y del eje de cuadratura, incluyendo el flujo de dispersión del inducido y el flujo de reacción de inducido. Así los efectos inductivos de las ondas de flujo del eje directo y del eje de cuadratura

pueden considerarse para las reactancias de magnetización del eje directo y del eje de cuadratura. La reactancia síncrona del eje de cuadratura  $X_q$  es menor que la del eje directo  $X_d$ , debido a que la reluctancia es mayor en el entrehierro del eje de cuadratura. Con frecuencia,  $X_q$  se encuentra entre  $0.6X_d$  y  $0.7 X_d$ .



### 3. Características y equipos utilizados

- Máquina síncrona.
- Fuente de tensión continua variable (0–50V).
- Primotor o máquina motriz
- Voltímetro DC.
- Amperímetro DC.
- Central de medidas REVALCO 2RAN96C485.
- Variador de frecuencia Sinamics G110.
- Cargas capacitivas de 60 o 103  $\mu\text{F}$
- Cargas resistivas 100 o 150W
- Carga inductiva (motor) en vacío o con carga.

### 4. Esquema de montaje y resultados

*Carga inductiva*

$$P_n = 990\text{W}$$

$$\cos\varphi = 0.82$$

*Carga resistiva*

$$R_1 = R_2 = R_3 = 150\text{W}$$

*Carga capacitiva*

$$C_1 = C_2 = C_3 = 103\mu\text{f}$$

$$I_L = \frac{P_n}{V_L \cdot \cos\varphi \cdot \sqrt{3}}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$$

$$I_L = \frac{990W}{220V \cdot \sqrt{3}} \rightarrow 2.5A \angle -34.91^\circ$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi(60Hz)(103\mu f)} \rightarrow 25.75\Omega$$

$$I_R = \frac{150W \cdot 3}{V_L \cdot \sqrt{3}}$$

$$I_C = \frac{V_L}{X_C \cdot \sqrt{3}}$$

$$I_R = \frac{450W}{220V \cdot \sqrt{3}} \rightarrow 1.1A \angle 0^\circ$$

$$I_C = \frac{220V \angle 0^\circ}{25.75\Omega \angle -90^\circ (\sqrt{3})} \rightarrow 4.9A \angle 90^\circ$$

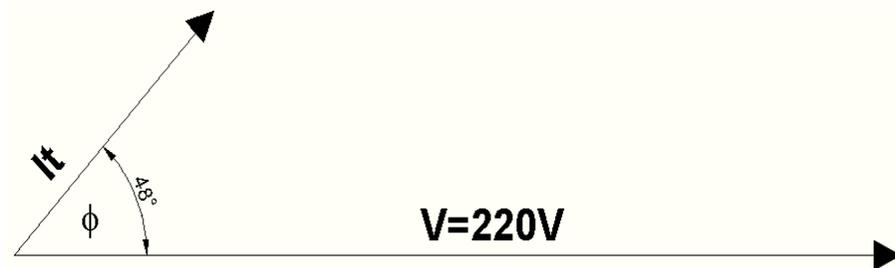
$$I_{Total} = I_L + I_R + I_C$$

$$I_{Total} = 2.5A \angle -34.91^\circ + 1.1A \angle 0^\circ + 4.9A \angle 90^\circ$$

$$I_{Total} = (2.050 - 1.43j + 1.1 + 0j + 0 + 4.9j)$$

$$I_{Total} = (3.15 + 3.47j)$$

$$I_{Total} = 4.68A \angle 48^\circ$$

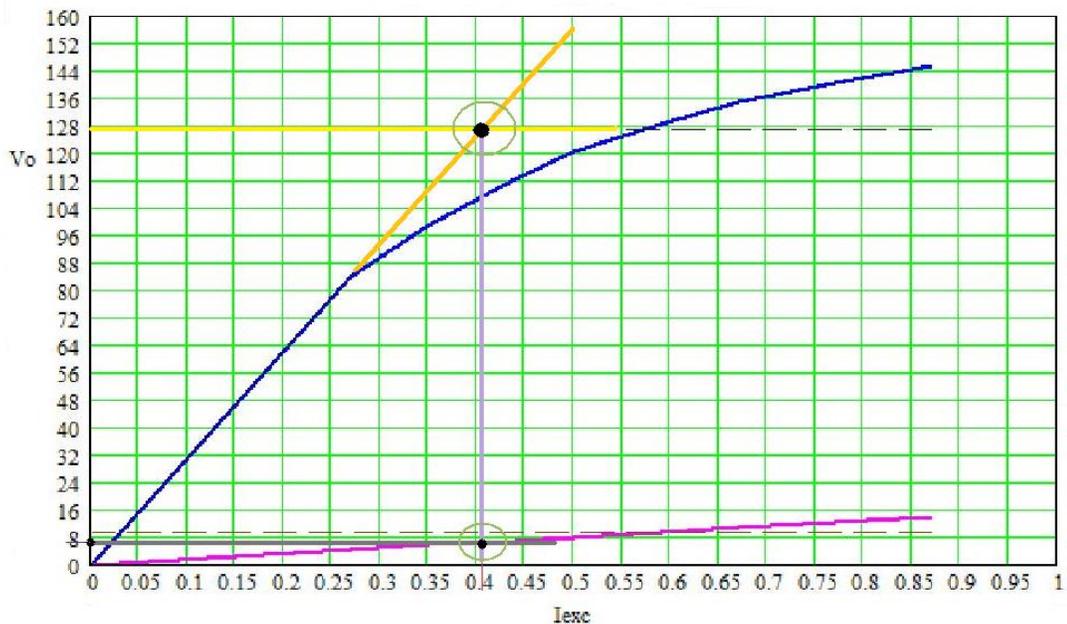


$$P_n = 2140VA$$

$$\cos \phi = 0.66$$

$$E_L = 220V$$

$$I_n = \frac{2140VA}{3 \times 128V} \rightarrow 5.61A = I_a$$



Tomando valores de la grafica realizadas con la prueba en vacío y de corto circuito

$$V=127V$$

$$I= 6.5A \text{ aproximadamente}$$

$$X_d = 127V/6.5A \rightarrow 19.53\Omega/\text{fase}$$

$$X_q = 19.53\Omega/\text{fase}(0.65) \rightarrow 12.69\Omega/\text{fase}$$

Ángulo del voltaje de fase con respecto a la corriente del eje de cuadratura

$$\tan(\delta) = \frac{I_a X_q \cos(\varphi)}{V_f + I_a X_q \sin(\varphi)}$$

$$\tan(\delta) = \frac{5.61(12.69)(0.66)}{127 + 5.61(12.69)(0.74)}$$

$$\tan(\delta) = \frac{46.98}{179.68} \rightarrow \delta = 15^\circ$$

Corriente del eje directo

$$I_d = I_a \sin(\delta + \varphi)$$

$$I_d = 5.61 \sin(15^\circ + 48^\circ) \rightarrow I_d = 4.98A$$

Corriente del eje de cuadratura

$$I_q = I_a \cos(\delta + \varphi)$$

$$I_q = I_a \cos(63^\circ) \rightarrow I_q = 2.54A$$

Voltaje en el eje directo

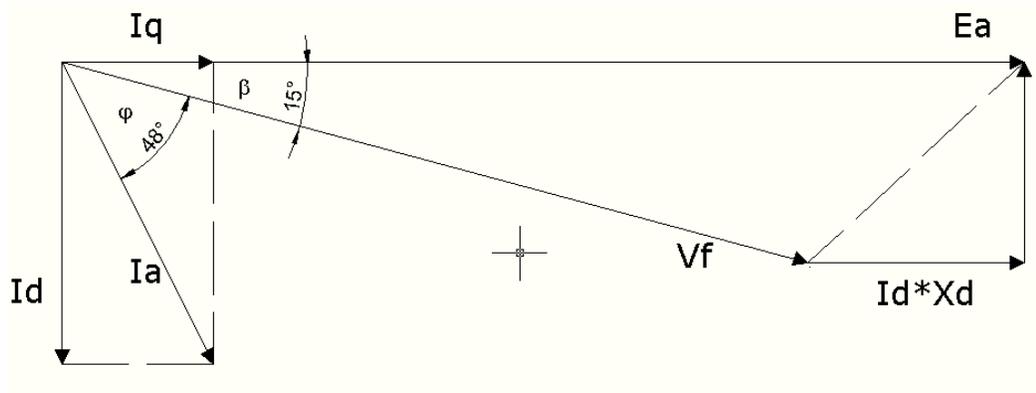
$$V_d = I_d X_d$$

$$V_d = 4.98A * 19.53\Omega \rightarrow V_d = 97.25V$$

Voltaje a cargas desbalanceadas

$$E_a = V_f \cos(\delta) + V_d$$

$$E_a = 127 \cos(14.65) + 97.25 \rightarrow E_a = 220.12V$$



*Diagrama vectorial del generador síncrono*

*Regulación de voltaje*

$$Reg. = \frac{E_a - V_f}{V_f}$$

$$Reg. = \frac{220.12V - 127V}{127V} * 100 \rightarrow 73.33\%$$

## 5. Conclusiones

- Se determinó el factor de potencia de la carga un  $\cos\phi$  de 0.66
- Se diseñó el diagrama de vectorial del generador con un ángulo de separación de  $15^\circ$  con relación a la corriente del eje de cuadratura.
- Se determinó la regulación de voltaje a la carga especificada de un 73.3%

## 6. Recomendaciones

- Utilizar capacitores con un voltaje nominal de 220V para que en el momento de realizar las pruebas soporte el voltaje autogenerado de los mismos.
- Conectar los capacitores, las resistencias y las carga inductiva en estrella
- No utilizar cargas capacitivas desequilibradas.
- No excitarlo el generador cuando el primotor no se encuentre en marcha.

## 7. Bibliografía

- KINGSLEY, Charles. UMANS, Stephen.2005.Máquinas Eléctricas. México, Litográfica Ingramex Centeno.pp. 285-286; 290-291; 650

## **8. Respuestas de las preguntas de control**

### **¿Qué entiende por eje de cuadratura?**

Es el eje que representa la dirección del plano radial a lo largo del cual devanado de campo principal no produce magnetización y que normalmente coinciden con el plano radial a media distancia entre los polos adyacentes.

### **¿Qué entiende por regulación de voltaje?**

Es la variación de voltaje desde sin carga hasta la carga nominal, expresada como porcentaje de la carga nominal.

# Universidad Nacional de Loja

## Practica # 8

**Carrera:** Ingeniería Electromecánica

**Laboratorio o Taller:** Taller de Máquinas Eléctricas

**Tema:** Sincronización del generador con el sistema de potencia

**Autores:** Javier Flores Paladines

Fabián Calle Chamba

**Docente:** Ing. Norman Jiménez

**Fecha:** 06-01-2010

### 1. Introducción

Una parte importante del estudio de los generadores síncronos la constituye la operación en paralelo, que es un tema relacionada con la operación. En la mayoría de los sistemas eléctricos de potencia los generadores no operan aislados alimentando a una carga, mas bien, operan interconectados a través de una red eléctrica para alimentar cargas localizadas geográficamente y eléctricamente en puntos diversos de los sistemas centrales.

### 2. Fundamentos teóricos.

#### Sincronización por el método de tres lámparas

La sincronización por el método de las tres lámparas posee dos tipos de conexión, en el primer caso las tres lámparas se conectan entre fases iguales en el generador y en el sistema, de ahí que cuando el generador pueda ser sincronizado las tres lámparas estarán apagadas. Este método tiene la desventaja que no indica si el generador tiene frecuencia superior o inferior al sistema. En el segundo método, se conecta la lámpara 1 entre fases iguales del generador y del sistema y las restantes lámparas entre fases distintas. Cuando sea posible la sincronización, la lámpara 1 estará apagada y las dos restantes encendidas. Con este método, cuando el generador va adelantado al sistema las lámparas se apagan en la secuencia 1 - 2 - 3 - 1. Si el sistema se adelanta, entonces la secuencia de apagado seria 1 - 3 - 2 - 1, además se usa un voltímetro auxiliar para conocer cuando la diferencia de tensión es igual a cero. Actualmente es más utilizado el sincronoscopio que al conectarse debidamente al generador y al sistema

indica mediante una aguja el instante correcto de la sincronización y además, si el generador va atrasado o adelantado respecto al sistema.

### **Operación en paralelo con el sistema:**

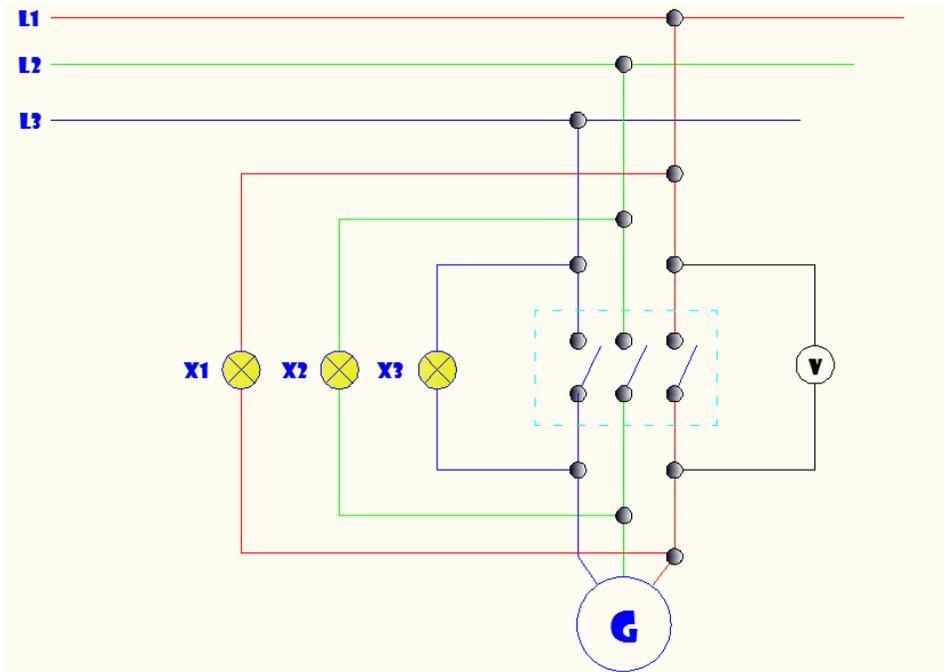
Al sincronizar un generador al sistema se pretende que suministre a este tanto potencia activa como reactiva, de acuerdo con los requerimientos de los consumidores. Analizaremos por tanto como se regula la entrega de potencia activa y reactiva del generador al sistema.

Como suponemos es un sistema eléctrico muy grande en comparación con el generador, tanto la frecuencia como el voltaje terminal pueden tomarse como constantes. Partiremos de un estado de carga determinado, a partir del que se analizara la forma de regular la entrega de potencia activa y reactiva al sistema.

### **3. Características y equipos utilizados**

- Máquina síncrona.
- Fuente de tensión continua variable (0–50V).
- Primotor o máquina motriz
- Voltímetro DC.
- Amperímetro DC.
- Central de medidas REVALCO 2RAN96C485.
- Variador de frecuencia Sinamics G110.
- Tres lámparas de señalización de 220V
- Dos voltímetros de CA
- Amperímetro CA.
- Fuente trifásica (Red de alimentación)
- Breaker trifásico de 6A

#### 4. Esquema de montaje



#### 5. Conclusiones

- Se debe variar potencia el primotor para obtener una diferencia de voltaje bajo para entrar así al sincronismo.
- Las intensidades de corriente son muy bajas cuando el sincronismo se lo ha hecho adecuadamente.
- El generador entrega potencia reactiva a la red cuando se aumenta corriente de excitación.
- El generador entrega o consume potencia activa de la red cuando su velocidad síncrona varía.
- La frecuencia y la tensión cuando el generador esta sincronizado la impone la red.

## 6. Recomendaciones

- Considerar que la tensión y frecuencia de la red y la del generador sea iguales.
- No entrar en sincronismo cuando la diferencia de tensión del generador y la red sea elevada.
- Realizar el sincronismo cuando los voltímetros midan una tensión bien baja de 0 a 10 VCA.
- En el momento que el generador este sincronizado con la red tome en cuenta las lecturas de corriente por fase de la central de medidas, si una de ellas marca 0A es posible que uno o varios fusibles estén quemados, y si se da esto suspenda la prueba de sincronismo inmediatamente y reemplace los fusibles.
- Los fusibles de protección deben ser de 5 A para evitar causarle daños a la estructura interna al generador.

## 7. Bibliografía

- HARPER, Gilberto.2005.Curso de máquinas síncronas. México, Editorial Limusa S.A.pp.301-307

## 8. Respuestas de las preguntas de control

### ¿Qué entiende por sincronismo?

Sincronismo es cuando un generador entrega su potencia generada al sistema de red.

### ¿Cuáles son las condiciones para sincronizar un generador síncrono?

- Igualdades de voltajes
- Igualdad de frecuencia
- Coincidencia de fases

## ANEXO 3: DISEÑO DEL PROYECTO

### 1. TÍTULO

“Diseño y construcción de un banco para pruebas de caracterización de los principales parámetros de los generadores eléctricos para el AEIRNNR de la Universidad Nacional de Loja”

### 2. PROBLEMÁTICA

#### 2.1 Situación Problemática

Al diseñar y construir un banco de pruebas de generadores eléctricos, para el Área de la Energía las Industrias y los Recursos Naturales No Renovables de la Universidad nacional de Loja se va a contribuir en el fortalecimiento de los conocimientos adquiridos por los estudiantes en las diferentes unidades de la carrera de Ingeniería en Electromecánica como: Máquinas Eléctricas I y II, Automatización, y Circuitos II. Con este proyecto se logrará optimizar los conocimientos teóricos que posee el estudiante de las unidades anteriormente mencionadas y a su vez se logrará también insertarlos de alguna forma en el campo laboral práctico que como ingeniero electromecánico debe afrontar en el futuro.

En la Universidad Nacional de Loja, existen falencias en los laboratorios, del Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables, especialmente en las unidades mencionadas anteriormente. Frente a esto los principales directivos del AEIRNNR con apoyo de la administración central de la Universidad han puesto en marcha la creación de un nuevo edificio de laboratorios, ya que se generarían nuevos proyectos de tesis con lo cual se favorecería de alguna manera a los egresados de las diferentes carreras de esta área.

En virtud de lo expuesto anteriormente hemos visto necesario realizar el diseño y la construcción de un banco para pruebas de caracterización de los principales parámetros de los generadores eléctricos, para de alguna manera colaborar en el aprendizaje académico de los estudiantes básicamente en las unidades expuestas.

## 2.2 Problema General de Investigación

- ☞ La falta de un banco de generadores eléctricos, que permita a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica realizar prácticas de laboratorio

## 2.3 DELIMITACIÓN

### 2.3.1 Problemas Específicos de Investigación

- ☞ Limitado conocimiento en lo concerniente a generadores eléctricos trifásicos, por parte de los estudiantes carrera de Ingeniería Electromecánica del A.E.I.R.N.N.R.
- ☞ En el A.E.I.R.N.N.R. no existe un banco de generadores eléctricos, que permita a los estudiantes reforzar sus conocimientos teórico-prácticos.
- ☞ La falta de claridad en el desarrollo de las prácticas de laboratorio realizadas en algunas unidades de la carrera
- ☞ La falta de prácticas de laboratorio, que permitan fortalecer los conocimientos teórico-prácticos de los estudiantes de la carrera, en lo referente a generadores eléctricos.

### 2.3.2 Espacio

El proyecto será instalado en el AEIRNNR de la Universidad Nacional de Loja, el mismo que servirá como apoyo al currículo en la carrera de Ingeniería Electromecánica

### 2.3.3 Tiempo

Para ejecutar este proyecto se requiere ocho meses, tiempo suficiente para lograr recopilar información bibliográfica y obtener técnicas de los procesos a realizarse.

### 2.3.4 Unidades de Observación

- ☞ Bancos de pruebas de generadores eléctricos existentes en otras instituciones.

### **3. JUSTIFICACIÓN**

#### **3.1 Justificación**

Este proyecto investigativo tiene como objetivo poner en práctica algunos de los conocimientos que hemos adquirido en diferentes unidades a lo largo de la carrera, pero también debemos tomar en cuenta que nuestras prácticas profesionales se constituyen en prácticas sociales es decir nosotros como profesionales atenderemos las necesidades sociales para el desarrollo local, nacional y regional en el cuál la Universidad Nacional de Loja a través del AEIRNNR pretende contribuir a la sociedad en la formación de profesionales. Tomando en cuenta que en la ingeniería la eficiencia de recursos es el factor más importante, debido a que la universidad dispone de un bajo presupuesto para la adquisición de nuevos implementos para las prácticas, teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto creemos conveniente ayudar con la implementación de este banco de generadores eléctricos para el AEIRNNR. Este proyecto permitirá a los estudiantes reforzar sus conocimientos y comparar la teoría con la práctica si se cumple o no, de esta forma aumentara el nivel académico y por ende se beneficiara a la sociedad con profesionales bien capacitados.

#### **3.2 Viabilidad**

Para la ejecución del proyecto se contará con: la suficiente información de catálogos, libros, Internet, etc. Así como con el apoyo de profesionales especializados en la rama; además consideramos el tiempo que tardaremos en lograr los objetivos planteados. Para la realización de este proyecto se dispondrá de todos los elementos necesarios para la construcción del banco, de igual manera contamos con los conocimientos básicos y habilidades que posibilitaran el desarrollo del mismo, además se contará con el apoyo de las autoridades ya que nos permitirán utilizar el taller mecánico y el de automatización del área para la realización de este proyecto.

El proyecto es viable porque cuenta con todos los factores que ayudarán a la ejecución del mismo, considerando que es un implemento mas para el AEIRNNR.

## **4. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.**

### **4.1 Objetivo General**

- ☞ Diseñar y construir un banco de pruebas, con sus respectivas guías de laboratorio las mismas que permitan a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica realizar prácticas con generadores eléctricos.

### **4.2 Objetivos Específicos**

- ☞ Conocer la constitución y funcionamiento de los generadores eléctricos más utilizados.
- ☞ Diseñar y construir un banco con un generador eléctrico síncrono trifásico para el AEIRNNR de la Universidad Nacional de Loja.
- ☞ Demostrar la validez, confiabilidad y seguridad del banco de generadores eléctricos
- ☞ Simular mediante software de Matlab las prácticas de laboratorio con generadores eléctricos.

## **5 MARCO TEÓRICO**

### **CAPITULO 1: MÁQUINAS ELECTRICAS**

- 1.1 Características de las Máquinas Eléctricas
- 1.2 Tipos de Máquinas Eléctricas
  - 1.2.1 Generadores Eléctricos
  - 1.2.2 Motores Eléctricos
  - 1.2.3 Transformadores Eléctricos
  - 1.2.4 Convertidores Eléctricos

### **CAPITULO 2: MAQUINAS SINCRONAS**

- 2.1 Generalidades
- 2.2 Estructura general de las máquinas Síncronas
- 2.3 Partes de una máquina síncrona
  - 2.3.1 Rotor de polos salientes
  - 2.3.2 Rotor de polos lisos
  - 2.3.3 Características del Estator
  - 2.3.4 La carcasa
  - 2.3.5 El núcleo magnético del estator
- 2.4 El calentamiento y sistemas de enfriamiento en las máquinas síncronas

### **CAPÍTULO 3: GENERADORES ELECTRICOS**

- 3.1 Generadores síncronos
  - 3.1.1 Principio de funcionamiento
  - 3.1.2 Condiciones de operación
  - 3.1.3 Características de circuito abierto y cortocircuito
  - 3.1.4 Características de operación en estado permanente
  - 3.1.5 Valores normalizados
  - 3.1.6 Pérdidas y eficiencia en los generadores
- 3.2 Generadores asíncronos

- 3.2.1 El rotor de jaula de ardilla.
- 3.2.2 Funcionamiento como motor.
- 3.2.3 Funcionamiento como generador
- 3.2.4 Deslizamiento del generador asíncrono.
- 3.2.5 Requerimientos de conexión a la red de un generador asíncrono

## **CAPITULO 4: MOTORES ELECTRICOS**

- 4.1 Clasificación
- 4.2 Motores síncronos
  - 4.2.1 Característica de operación de un motor síncrono
  - 4.2.2 Aplicación de los motores síncronos
  - 4.2.3 Operación de los motores síncronos en operaciones permanentes
  - 4.2.4 El efecto de la carga en los motores síncronos
  - 4.2.5 Métodos de arranque
- 4.3 Motores asíncronos
  - 4.3.1 Característica de operación de un motor asíncrono
  - 4.3.2 Aplicación de los motores asíncronos

## **CAPITULO 5: GUIAS PARA EL DESARROLLO DE PRÁCTICAS**

- 5.1 Elaboración de una guía de laboratorio
- 5.2 Simulación de prácticas mediante software

## **6 DISEÑO METODOLÓGICO DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN**

El proceso investigativo se lo va a realizar en la ciudad de Loja en el Área de la Energía, las Industrias y los Recursos Naturales no Renovables de la Universidad Nacional de Loja, para la investigación de este proyecto se utilizará varios métodos de investigación como: el método analítico, el método deductivo, el método inductivo y el método experimental, los mismos que están encaminados a la búsqueda de información bibliográfica que permitió la identificación del problema y objetivos además estos métodos están dirigidos a obtener información primaria, es decir directamente del campo investigativo, el mismo que se realizará en universidades o industrias dedicadas a éste tipo de tareas, empleando la técnica de la observación. Se indica que para la realización de la tesis se utilizaran recursos como el humano, financieros, técnicos (laboratorios del A.E.I.R.N.N.R.) y materiales; los cuales nos permitirán alcanzar los objetivos establecidos en la misma, y finalmente se logrará caracterizar los principales parámetros de los generadores eléctricos, además se obtendrá diversas variaciones y graficaciones de las curvas de: tensión, intensidad, potencias, etc, los mismos que van a permitir que los estudiantes entiendan de una mejor manera el proyecto planteado.

## 6.1 Matriz de consistencia general

<b>PROBLEMA GENERAL DE INVESTIGACIÓN:</b> La falta de un banco de generadores eléctricos, que permita a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica realizar prácticas de laboratorio.			
<b>TEMA</b>	<b>OBJETO DE INVESTIGACIÓN</b>	<b>OBJETIVO GENERAL</b>	<b>HIPOTESIS GENERAL</b>
“Diseño y construcción de un banco para pruebas de caracterización de los principales parámetros de los generadores eléctricos para el AEIRNNR de la Universidad Nacional de Loja”	Banco para pruebas de generadores eléctricos.	Diseñar y construir un banco de pruebas, con sus respectivas guías de laboratorio las mismas que permitan a los estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica realizar prácticas con generadores eléctricos.	Con el diseño y construcción de un banco de pruebas con sus respectivas guías de laboratorio, los estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica lograrán realizar prácticas con generadores eléctricos.

## 6.2 Materiales, métodos y técnicas de trabajo

### Materiales:

- ☞ Generador eléctrico síncrono trifásico
- ☞ Motor eléctricos síncrono
- ☞ Software ( Matlab )
- ☞ Reóstatos e Inductores
- ☞ PLC
- ☞ Sensores
- ☞ Instrumentos de Medición Eléctrica
- ☞ Calculadora
- ☞ Madera, latón y pintura

### Métodos:

- ☞ Método Inductivo
- ☞ Método Deductivo
- ☞ Método Experimental

### Técnicas:

- ☞ Técnica de la Entrevista
- ☞ Técnica de la Observación
- ☞ Técnica de la encuesta

## 7 CRONOGRAMA

Meses	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Semanas										
Actividades										
Presentación y aprobación del proyecto	x x									
Asesoramiento de la tesis para su desarrollo.		x								
Inicio de la tesis.			x							
Cumplimiento del primer objetivo.			x x							
Cumplimiento del segundo objetivo				x x x x x x x x x x x x x x x x x						
Cumplimiento del tercer objetivo.							x x x x x x x x			
Cumplimiento del cuarto objetivo									x x x x	
Elaboración del informe final.										x x
Disertación del proyecto.										x

## 8. PRESUPUESTO Y FINANCIAMIENTO

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	VALOR
1	GENERADOR SINCRONO	2	800
2	MOTOR SINCRONO	1	300
7	ACSESORIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL BANCO	.....	500
8	GASTOS VARIOS	.....	300
9	COSTO DE DISEÑO	.....	500
TOTAL			3250

### FINANCIAMIENTO

El financiamiento del presente proyecto estará a cargo de los autores del dicho proyecto (Crédito del IECE), y una parte del proyecto como es la construcción del banco se lo realizará en los talleres del AEIRNNR.

## 9. BIBLIOGRAFÍA.

### LIBROS:

- HARPER, Enriquez. 1983. Curso de máquinas síncronas, México, Editorial LIMUSA.
- HILL, McGraaw, Inc. 1947. A course in electrical engineering, volumen 2, Mexico, Edimex SA.
- INTERMEDIATE TECHNOLOGY DEVELOPMENT GROUP, Itdg. 1995. Manual de mini y micro centrales hidráulicas. Perú, Impreso en febrero de 1996. Pág. (185 – 210).

- VALKENBURGH, Van. 1978. Electricidad Básica. Argentina, Talleres Gráficos Litodar.

#### **SITIOS WEB:**

- Apuntes sobre Generadores Eléctricos, [<http://www.schneiderelectric.es.>], [25 de octubre del 2008]
- Catálogos de Motores, Variadores de frecuencia y PLC, [<http://siemens.com.>], [6 de noviembre del 2008)]

## 10 Matriz de Consistencia Específica

<p><b>PROBLEMA ESPECÍFICO:</b> Limitado conocimiento en lo concerniente a generadores eléctricos , por parte de los estudiantes carrera de Ingeniería Electromecánica del A.E.I.R.N.N.R.</p>			
<b>OBJETIVO ESPECÍFICO</b>	<b>HIPÓTESIS ESPECIFICA</b>	<b>UNIDAD DE OBSERVACIÓN</b>	<b>SISTEMA CATEGORIAL</b>
<p>Conocer la constitución y funcionamiento de los generadores eléctricos más utilizados.</p>	<p>Al conocer la constitución y funcionamiento de los generadores eléctricos se logrará se lograra determinar cuáles son los más utilizados en la industria.</p>	<p>Información relevante y actualizada sobre generadores eléctricos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Generadores Eléctricos síncronos.</li> <li>☞ Generadores Eléctricos asíncronos.</li> </ul>

**PROBLEMA ESPECÍFICO:** En el A.E.I.R.N.N.R. no existe un banco de generadores eléctricos, que permita a los estudiantes reforzar sus conocimientos teóricos-prácticos.

<b>OBJETIVO ESPECÍFICO</b>	<b>HIPÓTESIS ESPECÍFICA</b>	<b>UNIDAD DE OBSERVACIÓN</b>	<b>SISTEMA CATEGORIAL</b>
<p>Diseñar y construir un banco con un generador eléctrico síncrono trifásico para el AEIRNNR de la Universidad Nacional de Loja</p>	<p>Con el diseño y construcción de este banco de pruebas, se conseguirá que los estudiantes de la carrera realicen prácticas de laboratorio con generadores eléctricos.</p>	<p>Banco de pruebas de generadores existentes en otras Instituciones.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☞ Máquinas eléctricas</li> <li>☞ Máquinas eléctricas síncronas</li> <li>☞ Generadores Eléctricos síncronos.</li> <li>☞ Motores eléctricos</li> </ul>

**PROBLEMA ESPECÍFICO:** La falta de prácticas de laboratorio, que permitan fortalecer los conocimientos teórico-prácticos de los estudiantes de la carrera, en lo referente a generadores eléctricos

<b>OBJETIVO ESPECÍFICO</b>	<b>HIPÓTESIS ESPECÍFICA</b>	<b>UNIDAD DE OBSERVACIÓN</b>	<b>SISTEMA CATEGORIAL</b>
<p>Demostrar la validez, confiabilidad y seguridad del banco de generadores eléctricos.</p>	<p>La experimentación del banco a construirse posibilitara demostrar su validez, confiabilidad y seguridad</p>	<p>Banco de pruebas existentes en otras Instituciones.</p>	<p>☞ Elaboración de una guía de para prácticas de laboratorio</p>

**PROBLEMA ESPECÍFICO:** La falta de claridad en el desarrollo de las prácticas de laboratorio realizadas en algunas unidades de la carrera

<b>OBJETIVO ESPECÍFICO</b>	<b>HIPÓTESIS ESPECÍFICA</b>	<b>UNIDAD DE OBSERVACIÓN</b>	<b>SISTEMA CATEGORIAL</b>
<p>Simular mediante software las prácticas de laboratorio con generadores eléctricos.</p>	<p>Al simular mediante software las prácticas con generadores eléctricos se logrará dar mayor claridad al desarrollo a las mismas.</p>	<p>Banco de pruebas existentes en otras Instituciones.</p>	<p>☞ Simulación de prácticas de laboratorio mediante software</p>

## 10.1 Matriz de Operatividad de Objetivos Específicos

<b>OBJETIVO ESPECÍFICO:</b> Conocer la constitución y funcionamiento de los generadores eléctricos más utilizados.						
Actividad o Tarea	Metodología	Fecha		Responsables	Presupuesto	Resultados Esperados
		Inicio	Final			
<p>☞ Recopilación y análisis de información sobre generadores eléctricos que se usan en la industria.</p> <p>☞ Sistematización de</p>	<p>☞ Se procederá a revisar libros, manuales, esquemas y documentos técnicos de los diferentes generadores eléctricos usados en la industria, para ello se hará uso del método de investigación deductivo.</p> <p>☞ Organizar la información obtenida</p>	30-03-2009	14-04-2009	<p>Calle Chamba Fabián</p> <p>Flores Paladines Javier</p>	\$50	<p>☞ Entrega de manuales, esquemas y documentos técnicos referentes a este proyecto.</p>

<p>la información obtenida.</p> <p>☞ Realizar una encuesta a las principales industrias de Loja con el fin de determinar qué clase de generadores eléctricos usan.</p>	<p>de una manera eficiente.</p> <p>☞ Se procederá a visitar las principales industrias de Loja con el fin de obtener información sobre los generadores eléctricos que se usan en la ciudad, utilizando técnicas de investigación como la técnica de la encuesta y la de observación</p>	<p>14-04-2009</p> <p>21-04-2009</p>	<p>21-04-2009</p> <p>04-05-2009</p>	<p>Calle Chamba Fabián</p> <p>Flores Paladines Javier</p>	<p>\$10</p>	<p>☞ Entrega de un documento que contenga la información útil para la ejecución de este proyecto.</p> <p>☞ Entrega de encuestas, acompañado de un informe sobre los datos obtenidos de las encuestas y de la observación.</p>
--	---	-------------------------------------	-------------------------------------	---	-------------	---

**OBJETIVO ESPECÍFICO:** Diseñar y construir un banco con un generador eléctrico síncrono trifásico para el AEIRNNR de la Universidad Nacional de Loja

Actividad o Tarea	Metodología	Fecha		Responsables	Presupuesto	Resultados Esperados
		Inicio	Final			
☛ Realizar una visita a bancos de pruebas ya existentes en otras instituciones	☛ Visitar instituciones que posean bancos de pruebas relacionados con este temase utilizará técnicas como: técnica de observación directa, participante, estructurada, de laboratorio y de equipo.	04-05-2009	21-05-2009	Calle Chamba Fabián	\$50	☛ Fotos, videos, esquemas, manuales, guías de bancos de pruebas existentes.
☛ Obtener algún tipo de asesoramiento	☛ Entrevistarse con profesionales que estén vinculados con	21-05-2009	20-06-2009	Flores Paladines	\$10	☛ Obtener algún tipo de Software

<p>por parte de profesionales en este tema.</p> <p>☛ Procesamiento de toda la información conseguida.</p>	<p>este tema (técnica de la entrevista).</p> <p>☛ Tratamiento de toda la información conseguida, para lo cual se utilizará los siguientes métodos de investigación: el método inductivo y el método experimental.</p>	20-06-2009	12-07-2009	Javier	\$10	<p>y catálogos sobre este tema.</p> <p>☛ Documento que contenga el diseño del proyecto.</p>
<p>☛ Adquirir los elementos que se necesitan para la construcción del banco de pruebas.</p>	<p>☛ Compra de los elementos que se van a utilizar en la construcción del proyecto.</p>	12-07-2009	06-08-2009		\$2400	<p>☛ Entrega de manuales de los equipos adquiridos.</p>
<p>☛ Construcción de la estructura del banco.</p>	<p>☛ Se construirá el banco en el taller mecánico en base a un proceso tecnológico previamente</p>	06-08-2009	24-08-2009	<p>Calle Chamba Fabián Flores Paladines</p>	\$500	<p>☛ Fotos de la construcción del banco de pruebas.</p>

<p>☛ Acoplamiento e instalación de los elementos constitutivos de este banco de pruebas.</p>	<p>planificado. El acabado final se realizará luego de cumplir el objetivo siguiente.</p> <p>☛ Instalación y ensamblaje de los equipos utilizando las herramientas necesarias teniendo en cuenta que hay disponibilidad por parte de las autoridades del taller mecánico para poder trabajar en dicho taller.</p>	<p>24-08-2009</p>	<p>31-08-2009</p>	<p>Javier</p>	<p>\$100</p>	<p>☛ Fotos del ensamblaje e instalación del banco de pruebas.</p>
--	---	-------------------	-------------------	---------------	--------------	---

**OBJETIVO ESPECÍFICO:** Demostrar la validez, confiabilidad y seguridad del banco de generadores eléctricos.

Actividad o Tarea	Metodología	Fecha		Responsables	Presupuesto	Resultados Esperados
		Inicio	Final			
<p>☞ Construcción de guías para prácticas de laboratorio tomando en cuenta la estrategia metodológica y los contenidos teóricos de las unidades que se relacionan con este tema.</p>	<p>☞ Se tomará en consideración el programa de estudio de la carrera y el criterio del docente de la las unidades pertinentes.</p>	31-08-2009	20-09-2009	<p>Calle Chamba Fabián</p> <p>Flores Paladines Javier</p>	\$100	<p>☞ Entrega de guías para prácticas de laboratorio.</p>
<p>☞ Desarrollo de actividades prácticas en el banco de pruebas.</p>	<p>☞ Las realizará el grupo de investigación y estudiantes de la carrera para demostrar</p>	20-09-2009	01-10-2009			<p>☞ Entrega de resultados de las prácticas realizadas por el</p>

<p>☞ Validación de contexto.</p>	<p>su confiabilidad.</p> <p>☞ Se realizará prácticas en otra universidad del país a fin de demostrar su validez.</p>	<p>01-10-2009</p>	<p>21-10-2009</p>	<p>Calle Chamba Fabián</p>		<p>grupo de investigación y por los estudiantes.</p> <p>☞ Entrega de las prácticas realizadas en otra universidad del país.</p>
<p>☞ Demostrar que el equipo es seguro.</p>	<p>☞ En base a normas de seguridad.</p>	<p>21-10-2009</p>	<p>29-10-2009</p>	<p>Flores Paladines Javier</p>		<p>☞ Entrega de normas de seguridad y una guía de operación del equipo.</p>

**OBJETIVO ESPECÍFICO:** Simular mediante software las prácticas de laboratorio con generadores eléctricos.

Actividad o Tarea	Metodología	Fecha		Responsables	Presupuesto	Resultados Esperados
		Inicio	Final			
☞ Seleccionar el tipo de software que permita realizar la simulación de las prácticas	☞ Con el criterio de profesionales en el campo informático se determine el software más adecuado para este tipo de prácticas	29-10-2009	21-11-2009	Calle Chamba Fabián Flores Paladines Javier	\$300	☞ Programa informático que nos permita realizar la simulación de estas prácticas.  ☞ Simulación de las prácticas de laboratorio.
☞ Configuración del software elegido	☞ Elaboración de la programación del software tomando en cuenta el tipo de lenguaje y el ambiente gráfico	21-11-2009	28-11-2009		\$60	

## 10.2 Matriz de control de Resultados

Nro.	RESULTADOS	FECHA DE PRESENTACIÓN	FIRMA DEL DIRECTOR DE TESIS
1	☞ Entrega de manuales, esquemas y documentos técnicos referentes a este proyecto.	30-03-2009	
2	☞ Entrega de un documento que contenga la información útil para la ejecución de este proyecto.	14-04-2009	
3	☞ Entrega de encuestas, acompañado de un informe sobre los datos obtenidos de las encuestas y de la observación.	21-04-2009	
4	☞ Fotos, esquemas, manuales de bancos de pruebas existentes.	04-05-2009	
5	☞ Obtener algún tipo de Software y catálogos sobre este tema.	21-05-2009	
6	☞ Documento que contenga el diseño del proyecto.	20-06-2009	
7	☞ Entrega de manuales de los equipos adquiridos.	12-07-2009	
8	☞ Fotos de la construcción del banco de pruebas.	06-08-2009	
9	☞ Fotos del ensamblaje e instalación del banco de pruebas.	24-08-2009	
10	☞ Fotos del banco de pruebas concluido.	31-08-2009	
11	☞ Entrega de guías para prácticas de laboratorio.	20-09-2009	
12	☞ Entrega de resultados de las prácticas realizadas por el grupo de investigación.	01-10-2009	

13	☞ Entrega de prácticas realizadas en otra universidad del país.	21-10-2009	
14	☞ Entrega de normas de seguridad y una guía de operación del equipo.	29-10-2009	
15	☞ Programa informático que nos permita realizar la simulación de estas prácticas.	21-04-2009	
16	☞ Simulación de las prácticas de laboratorio	28-11-2009	
17	☞ Elaboración del informe final del proyecto de investigación	13-12-2009	
18	☞ Socialización del proyecto de investigación	17-12-2009	

# **ANEXO 5: ESQUEMA ELÉCTRICO DEL BANCO DE PRUEBAS**

## ANEXO 6: FOTOS DE LA CONSTRUCCIÓN DEL BANCO

*Foto 1. Colocación de aislante en las ranuras del estator para el proceso de rebobinado*



*Foto 2. Rebobinado del generador*



*Foto 3. Terminación del proceso de rebobinado*



*Foto 4. Construcción del Banco*



*Foto 5. Ensamble de los elementos del banco*



*Foto 6. Pintado del banco*



*Foto 7. Banco de pruebas culminado*



## **ANEXO 4: GUÍA DEL USUARIO**

### **BANCO DE PRUEBAS DE GENERADOR ELÉCTRICO SÍNCRONO TRIFÁSICO**



*Por favor lea este Manual cuidadosamente antes de utilizar este banco.*

### **CONTENIDO**

<i>PRECAUCIONES DE SEGURIDAD</i> .....	<i>3</i>
<i>PARTES CONSTITUTIVAS</i> .....	<i>4</i>
<i>OPERACIÓN DEL BANCO</i> .....	<i>5</i>
<i>MANTENIMIENTO</i> .....	<i>5</i>
<i>RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS</i> .....	<i>5</i>

*Lea este Manual*

*En este manual usted encontrara consejos útiles sobre cómo usar y mantener el banco de generación. Con un poco de cuidado preventivo de su parte puede evitar perder tiempo y dinero para prolongar la vida útil del mismo. Encontrara muchas respuestas a problemas comunes en la tabla de Resolución de Problemas. Si se revisa primero la Tabla de Resolución de Problemas, quizás no tenga que solicitar servicio técnico.*

### **PRECAUCION**

- ☞ *Póngase en contacto con un técnico o constructor del mismo para la reparación o mantenimiento de este banco.*
- ☞ *Póngase en contacto con el instalador para instalar este banco.*
- ☞ *Este banco no debería ser utilizado por personas que no posean conocimientos de maquinas eléctricas, sin supervisión alguna.*

### **PRECAUCIONES DE SEGURIDAD**

*Cumpla con las siguientes instrucciones para evitar lesiones al usuario u otras personas y daños a la propiedad*

*El funcionamiento incorrecto por desconocer las instrucciones puede causar lesiones daños. La gravedad está clasificada de acuerdo con los siguientes requerimientos:*

- ☞ *Asegúrese de leer las ADVERTENCIAS que figuran a continuación antes de instalar el banco.*
- ☞ *Asegúrese de tener en cuenta las precauciones especificadas aquí ya que ellas incluyen ítems importantes relacionados con la seguridad.*
- ☞ *Luego de leer estas instrucciones asegúrese de conservarlas en un lugar seguro para futuras referencias.*

### **ADVERTENCIAS**

***Antes de operar el banco***

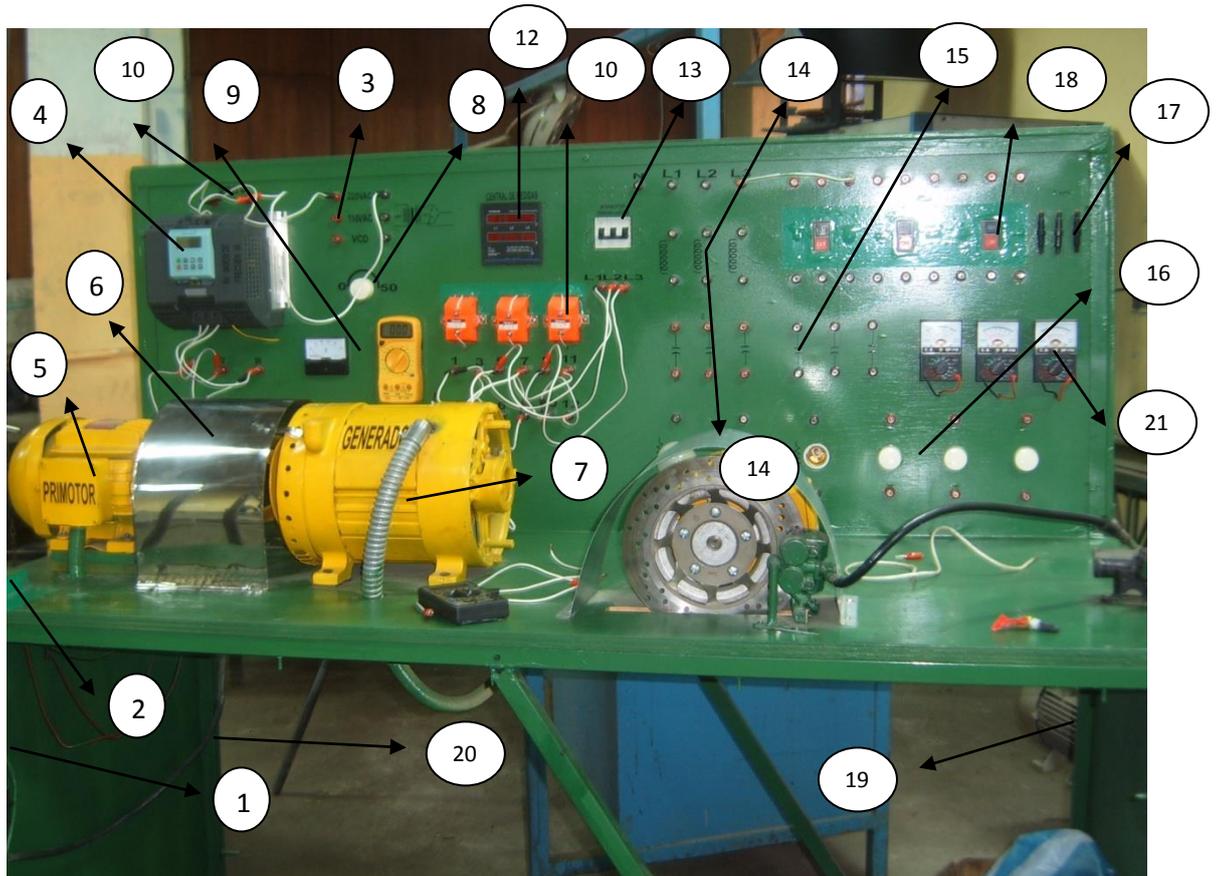
- ☞ *No instale el equipo usted mismo, hágalo con un técnico.*

- ☞ *La instalación incorrecta de la unidad puede causar daños al mismo y a la persona que lo está operando.*
- ☞ *Asegúrese que el lugar donde va a ser operado el banco, posea una alimentación eléctrica de 220 voltios con su respectiva puesta a tierra, esto evitara riesgos eléctricos.*
- ☞ *La conexión eléctrica del primotor se debe realizar en triangulo.*
- ☞ *No manipular las conexiones internas del banco.*
- ☞ *Asegures que el generador se lo conecte siempre en estrella.*
- ☞ *El sistema de excitación del generador no debe sobrepasar los 50 voltios de corriente directa.*
- ☞ *Asegúrese en conectar el neutro para que se pueda obtener las mediciones correspondientes en la central de medidas.*
- ☞ *No haga llegar voltajes superiores a las cargas del banco, esto podría causar lesiones.*
- ☞ *Las conexiones eléctricas se deberán realizar siempre cuando el banco este des energizado.*
- ☞ *Tome en cuenta que antes de energizar el banco, la regulación de la excitación y la regulación de las cargas resistivas estén apagadas.*
- ☞ *La conexión eléctrica de la carga inductiva (motor) debe estar conectada en triangulo.*
- ☞ *Asegúrese que el variador este programado para una frecuencia en el primotor de 60.4Hz.*

#### ***Durante el funcionamiento del banco***

- ☞ *Manipule únicamente el panel de control del variador, el contacto con otras partes del mismo puede causar choques eléctricos y por consiguiente la muerte.*
- ☞ *No exponerse al sistema de acoplamiento del generador con el primotor, esto puede causar lesiones graves.*

### ***PARTES CONSTITUTIVAS***



- |   |   |
|---|---|
| <i>1. Breaker principal</i>                               | <i>12. Central de medidas</i>               |
| <i>2. Sistema de mando</i>                                | <i>13. Breaker termo magnético</i>          |
| <i>3. Conectores</i>                                      | <i>14. Cargas Inductivas</i>                |
| <i>4. Variador de frecuencia</i>                          | <i>15. Cargas Resistivas</i>                |
| <i>5. Motor trifásico de inducción</i>                    | <i>16. Cargas Capacitivas</i>               |
| <i>6. Sistema de acople</i>                               | <i>17. Fusibles</i>                         |
| <i>7. Generador síncrono trifásico de polos salientes</i> | <i>18. Botoneras de mando de las cargas</i> |
| <i>8. Fuente de excitación</i>                            | <i>19. Estructura del banco</i>             |
| <i>9. Amperímetro y Voltímetro DC</i>                     | <i>20. Cable de alimentación</i>            |
| <i>10. Transformadores de corriente 30/5 Amp</i>          | <i>21. Voltímetros para sincronismo</i>     |
| <i>11. Cables conectores</i>                              |   |

### **OPERACIÓN DEL BANCO**

1. Alimente el tablero a una tensión de 220V de AC.
2. Accione el Breaker principal.
3. Accione el sistema de mando.
4. Poner en marcha el primotor mediante el variador de frecuencia.
5. Excitar el generador hasta que la central de medidas marque un valor de nominal de 220V línea – línea.
6. Para realización de las diferentes practicas tome en cuenta las guías de las mismas.

### **MANTENIMIENTO**

- ☞ Antes de limpiar el banco, asegure de desenergizarlo.
- ☞ Utilice la grasa apropiada para engrasar el rodamiento del generador.
- ☞ En el caso de cambiar las escobillas del generador, hágalo con unas nuevas y no utilice las desechadas de otros equipos.
- ☞ Realice mediciones constantes de continuidad en las bobinas del generador, primotor y el motor de carga.
- ☞ Realice permanentemente mediciones de voltaje de acuerdo a lo especificado en el tablero. Asegúrese que los cables conectores estén realizando un contacto adecuado para el paso de corriente.

### **RESOLUCION DE PROBLEMAS**

<b>Problema</b>	<b>Causas ó Posibles Fallas</b>	<b>Solución</b>
<i>El banco no genera la tensión adecuada</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mal conexionado de las bobinas del generador</li> <li>• Las escobillas no proporcionan la tensión adecuada para la excitación.</li> <li>• La fuente de excitación no proporciona el voltaje adecuado.</li> <li>• El primotor no le está proporcionando la velocidad síncrona al generador.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conecte en estrella las bobinas del generador</li> <li>• Cambiar las escobillas</li> <li>• Revise internamente el puente de rectificación.</li> <li>• Revise que el variador se encuentre programado a 60.4Hz.</li> </ul>
<i>El variador no acciona al primotor y si lo hace es por un corto periodo.</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La programación de servicio rápido de operación del variador no está vigente.</li> <li>• El variador no está en modo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Revise los parámetros de programación de puesta en marcha rápido del variador.</li> </ul>

	<i>de programación y su pantalla parpadea constantemente con el valor mínimo de frecuencia.</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Presione la tecla (P) y ponga en marcha el primotor.</i></li> </ul>
<i>El primotor no arranca pese a que el variador está funcionando normalmente.</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Mal conexionado del mismo.</i></li> <li>• <i>Los cables conductores no hacen suficiente contacto</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Revise que las bobinas del primotor estén conectadas en triángulo.</i></li> <li>• <i>Realice continuidad en los mismos.</i></li> </ul>
<i>Mediciones erróneas en la central de medida.</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Mal programación del dispositivo de medida.</i></li> <li>• <i>No tiene el valor correspondiente de fase-neutro.</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Revisar el manual de programación (anexo).</i></li> <li>• <i>Conecte el neutro de generador al conector correspondiente</i></li> </ul>
<i>La central de medidas no realiza mediciones.</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Las conexiones internas posiblemente se desconectaron</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>Revise la conexión de los Transformadores de corriente y la parte interna de la central, conecte de acuerdo al diagrama de conexiones especificado en el manual(anexo)</i></li> </ul>
<p><i>Si el problema no se ha solucionado, por favor póngase en contacto con sus constructores o en su defecto puede pedir asesoramiento en el taller eléctrico de la Universidad Nacional de Loja. Asegúrese de informarles en forma detallada de los problemas suscitados.</i></p>		

**NOTA:** *No intente reparar la unidad usted mismo siempre consulte a un técnico autorizado para la manipulación del mismo.*

**AVISO:** *No realice la conexión del banco sin tener presente personal capacitado que guíe la instalación, porque podrían generarse daños o mal funcionamiento en los equipos.*