

UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA



ÁREA DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS RECURSOS

NATURALES NO RENOVABLES

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA

TÍTULO

**DESARROLLO DE UN LABORATORIO VIRTUAL PARA PRÁCTICAS DE
MÁQUINAS ELÉCTRICAS.**

TESIS DE GRADO PREVIO A OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERO

ELECTROMECÁNICO

AUTOR

CARLOS LIVIO GALARZA LUDEÑA

DIRECTOR

ING. NORMAN AUGUSTO JIMÉNEZ LEÓN

LOJA-ECUADOR

30-MAYO-2014

CERTIFICACIÓN

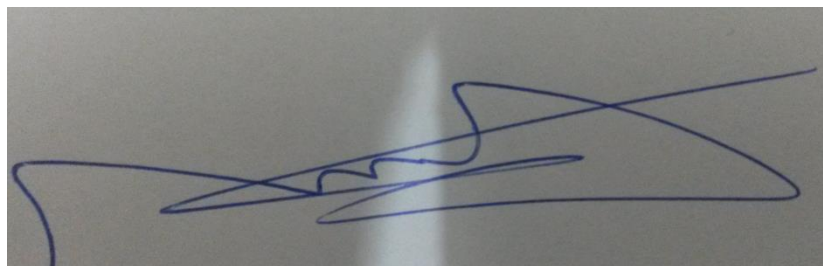
Ing. Norman Augusto Jiménez León

DIRECTOR DE TESIS

CERTIFICA:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de tesis de grado, en su proceso de investigación cuyo tema versa en **“DESARROLLO DE UN LABORATORIO VIRTUAL PARA PRÁCTICAS DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS.”**, previa a la obtención del título de Ingeniero **ELECTROMECAÁNICO**, realizado por el señor egresado: Carlos Livio Galarza Ludeña, la misma que cumple con la reglamentación y políticas de investigación, por lo que autorizo su presentación y posterior sustentación y defensa.

Loja 30 de mayo 2014



Ing. Norman Augusto Jiménez León

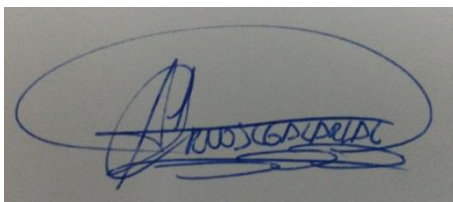
DIRECTOR DE TESIS

AUTORÍA

Yo Carlos Livio Galarza Ludeña declaro ser autor del presente trabajo de tesis y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales por el contenido de la misma.

Adicionalmente acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi tesis en el Repositorio Institucional – Biblioteca Virtual.

Autor: Carlos Livio Galarza Ludeña



Firma:

Cedula: 190052542-7

Fecha: 30/mayo/2014

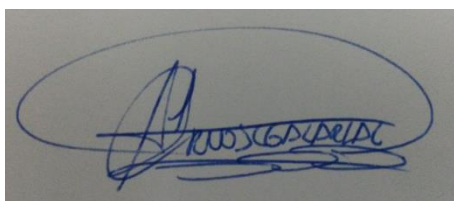
CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR, PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO.

Yo Carlos Livio Galarza Ludeña, declaro ser autor de la tesis titulada DESARROLLO DE UN LABORATORIO VIRTUAL PARA PRÁCTICAS DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS, como requisito para optar al grado de Ingeniero Electromecánico; autorizo al sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Digital Institucional:

Los usuarios pueden consultar el contenido del trabajo en el RDI, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad.

La Universidad Nacional de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia de la tesis que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja a los treinta días del mes de mayo del dos mil catorce.



Firma:

Autor: Carlos Livio Galarza Ludeña

Cedula: 190052542-7

Dirección: Eduardo Mora y Francisco Monteros

Correo: carloslivio11@gmail.com

Teléfono: 072573221 **Celular:** 0992858121

DATOS COMPLEMENTARIOS

Director de Tesis: Ing. Norman Augusto Jiménez León

Tribunal de Grado: Ing. Jorge Patricio Muñoz Vizhñay, Mg.Sc

Ing. Julio Cesar Cuenca Tinitana. Mg.Sc

Ing. Edwin Bladimir Paccha Herrera, Mg.Sc

PENSAMIENTO

Los que luchan una vez, son buenos. Los que luchan varias veces, son mejores. Los que luchan toda la vida, esos son los imprescindibles. *Albert Einstein.*

DEDICATORIA

Quiero dedicar la presente tesis a mis padres, hermanos, sobrinos, a mi novia y en especial a mi hijo Livio Andrés todos ellos contribuyeron y son parte de este trabajo son y serán el motor que me impulsan a superarme día a día.

También quiero dedicar a mis abuelitos, primitas y tías gracias por cuidarme y guiarme desde el cielo, siempre estarán vivos dentro de mí.

AGRADECIMIENTO

A Dios, la Virgencita del Cisne, a mi patrono San Francisco de Asís por brindarme todo lo bueno y sobre todo por los momentos difíciles que me han enseñado a valorarlo cada día más, por permitirme llegar a este momento especial y de mucha alegría de mi vida.

A mis padres Carlos Galarza Astudillo, Mercy Ludeña Carrión por su apoyo durante toda mi preparación como estudiante por sus enseñanzas por los valores y por sobretodo la comprensión que siempre me dan.

A mis hermanos Isabel, Freddy, Karina y Jackson con quienes quiero compartir momento feliz de mi vida.

A mi hijo que amo con mi vida Livio Andrés Galarza por ser mi motivo de superación día a día

A mi novia Raquel Jaramillo por estar a mi lado apoyándome, estar pendiente de mí y de este trabajo de tesis que hoy llega a su fin.

A todos los Docentes de la Carrera de Ingeniería Electromecánica por sus conocimientos impartidos, un agradecimiento especial al director de mi tesis Ing. Norman Augusto Jiménez León, al ingeniero Julio Cesar Cuenca por todo el apoyo brindado y por la amistad sincera.

A mis demás familiares y amigos que de una u otra manera formaron parte de esta tesis, gracias a todos.

Dios los bendiga

TABLA DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	I
CARTA DE AUTORIZACIÓN DE TESIS POR PARTE DEL AUTOR, PARA LA CONSULTA, REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO.	III
A.-TÍTULO	14
B. RESUMEN	15
B.- ABSTRACT.....	16
C.- INTRODUCCIÓN	17
D.- REVISIÓN DE LITERATURA	19
D.1 CAPÍTULO I: MODELADO MATEMÁTICO DE MÁQUINAS ASÍNCRONAS DE CORRIENTE ALTERNA	19
D.1.1 MOTOR Y GENERADOR ASÍNCRONOS.....	19
D.1.1.1 CIRCUITO EQUIVALENTE Y MODELADO MATEMÁTICO DEL MOTOR ASÍNCRONO (O MOTOR DE INDUCCIÓN.....	19
D.1.1.2 ENSAYO EN VACÍO:	20
D.1.1.3 ENSAYO EN CORTOCIRCUITO:.....	23
D.1.2 CIRCUITO EQUIVALENTE Y MODELADO MATEMÁTICO DEL GENERADOR ASÍNCRONO.	25
D.2 CAPÍTULO II: MODELADO MATEMÁTICO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS DE CORRIENTE ALTERNA	31
D.2.1 GENERADOR Y MOTOR SÍNCRONO.....	31
D.2.1.1 CIRCUITO EQUIVALENTE Y MODELADO MATEMÁTICO DEL GENERADOR SÍNCRONO	31
<i>d.2.1.1.1 Circuito equivalente con diferentes cargas:</i>	<i>32</i>
<i>d.2.1.1.1.1 Carga Resistiva.....</i>	<i>33</i>
<i>d.2.1.1.1.2 Carga inductiva.</i>	<i>33</i>
<i>d.2.1.1.1.3 Carga capacitiva.....</i>	<i>34</i>
<i>d.2.1.2 ENSAYO EN VACÍO:.....</i>	<i>34</i>
<i>Ensayo en vacío, para obtener la característica en vacío</i>	<i>34</i>
<i>d.2.1.3 ENSAYO EN CORTOCIRCUITO:</i>	<i>35</i>
<i>d.2.1.3.1 Diagrama de potencias:.....</i>	<i>36</i>
<i>d.2.2 CIRCUITO EQUIVALENTE Y MODELO MATEMÁTICO DEL MOTOR SÍNCRONO.</i>	<i>37</i>
<i>d.2.2.1. Carga inductiva:</i>	<i>38</i>
<i>d.2.2.2 Carga Resistiva.....</i>	<i>39</i>
<i>d.2.2.3 Carga capacitiva</i>	<i>39</i>
D.3 CAPÍTULO III: MÁQUINAS ESTÁTICAS.....	41
D.3.1 EL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO	41
D.3.2 MODELADO MATEMÁTICO Y CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO	41

d.3.2.1.1 Con factor de potencia unitario:.....	43
d.3.2.1.2 Con el factor de potencia en adelante:.....	44
d.3.2.2.1 Si el factor de potencia es unitario:	45
d.3.2.2.2 Con el factor de potencia en adelante:	46
D.3.3.TIPOS DE CONEXIONES DEL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO.....	46
D.3.3.1. DELTA – DELTA	46
D.3.3.2. ESTRELLA – ESTRELLA	49
D.3.3.2 DELTA – ESTRELLA	51
D.3.3.2 ESTRELLA – DELTA	54
D.3.4. ENSAYOS DEL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO.....	56
D.3.4. 1. ENSAYO EN VACÍO DE UN TRANSFORMADOR.....	56
d.3.4. 2 ENSAYO EN CORTOCIRCUITO DE UN TRANSFORMADOR.	57
E.- MATERIALES Y MÉTODOS	59
E.1 MATERIALES.....	59
E.2 MÉTODOS.....	60
E2.1 (CONSTRUCCIÓN DE LAS PRÁCTICAS DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS EN LABVIEW)..	60
E.2.1.1 MÁQUINAS ASÍNCRONAS.....	60
E.2.1.1.1 MOTOR ASÍNCRONO	60
e.2.1.1.1.2 Práctica 1.-	60
d.2.1.1.1.2.1 Ensayo en vacío:	61
d.2.1.1.1.3 Ensayo en cortocircuito:	64
d.2.1.1.1.4 Ensayo para la curva Tpar-Velocidad de sincronismo del motor de inducción.	68
d.2.1.1.2 GENERADOR ASÍNCRONO	77
d.2.1.1.2.1. práctica 2.-	77
d.2.1.1.2.1.1 Ensayo para la curva Tpar-velocidad de sincronismo del generador de inducción.	77
D.2.1.2.MÁQUINAS SÍNCRONAS	83
D.2.1.2.1. GENERADOR SÍNCRONO.....	83
d.2.1.2.1.1. Práctica 3.-	83
d.2.1.2.2. MOTOR SÍNCRONO.....	94
d.2.1.2.2.1. Práctica 4.-	94
d.2.1.3. MÁQUINAS ESTÁTICAS.....	102
d.2.1.3.1. TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.	102
d.2.1.3.1.1. Práctica 5.....	102
d.2.1.3.1.1.1. Ensayo en vacío o circuito abierto.....	103
d.2.1.3.1.1.2. Ensayo en cortocircuito	104
d.2.1.3.1.1.3. Ensayos con variación de la carga.	106
F.- RESULTADOS.....	116
G.- DISCUSIÓN	117
H.- CONCLUSIONES	119
I.- RECOMENDACIONES.....	120
J.- BIBLIOGRAFÍA.....	121
K. ANEXOS	122

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.Circuito equivalente del motor asíncrono.....	20
Figura 2.corrientes según la ley de Kirchhoff.....	21
Figura 3.triángulos vectoriales de corrientes.....	22
Figura 4-vectores de reactancia e impedancia	23
Figura 5. Motor asíncrono gráfica característica Par-Velocidad (Alexandre Wagemakers, Francisco J. Escribano, 2008).....	24
Figura 6.Curva par-velocidad variando la carga en el rotor $R'2$ (Alexandre Wagemakers, Francisco J. Escribano, 2008).....	25
Figura 7. Circuito equivalente generador asíncrono.....	26
Figura 8. Curva característica Par-Velocidad de las máquinas asíncronas (generador con deslizamiento negativo) (Chapman, 2005)	30
Figura 9.circuito equivalente generador síncrono	32
Figura 10. Circuito equivalente del generador síncrono con carga	32
Figura 11. Vectores del generador síncrono con carga.....	33
Figura 12.Generador síncrono carga resistiva	33
Figura 13.Generador síncrono carga inductiva	34
Figura 14. Generador síncrono carga capacitiva.....	34
Figura 15. Circuito equivalente del generador síncrono, ensayo en vacío	34
Figura 16. Curva del generador síncrono, ensayo en vacío	35
Figura 17. Circuito equivalente del generador síncrono, ensayo en cortocircuito.....	35
Figura 18. Vectores del generador síncrono, ensayo cortocircuito	35
Figura 19. Curvas del generador síncrono, ensayo en cortocircuito.....	36
Figura 20. Generador síncrono vectores de potencia.....	36
Figura 21. Circuito equivalente del motor síncrono.....	38
Figura 22. Motor síncrono, diagrama fasorial.....	38
Figura 23.Motor síncrono, carga inductiva	39
Figura 24. Motor síncrono, carga resistiva.....	39
Figura 25. Motor síncrono, carga capacitiva	39
Figura 26. Curva en V del motor síncrono (Chapman, 2005).....	40
Figura 27. Circuito equivalente del transformador trifásico	42
Figura 28. Transformador reduciendo los valores del primario referido al secundario	42
Figura 29. Transformador, reduciendo el circuito en referencia al secundario.....	43
Figura 30. Transformador, vectores representado el primario referido del secundario	43
Figura 31. Transformador, gráfica vectorial con factor de potencia unitario	44
Figura 32. Transformador, gráfica vectorial con factor de potencia en adelanto	44
Figura 33. Transformador, refiriendo los valores del primario al secundario	45
Figura 34. Transformadores, vectores refiriendo los valores del primario al secundario	45
Figura 35. Transformador, gráfica vectorial con factor de potencia unitario	45
Figura 36.Transformador, gráfica vectorial con factor de potencia en adelanto	46
Figura 37. Conexión delta-delta	47
Figura 38. Vectores de tensiones de la conexión delta-delta	47
Figura 39. Vectores de corriente conexión delta-delta.....	48
Figura 40. Conexión estrella-estrella.....	49

Figura 41. Vectores de corrientes de la conexión estrella-estrella.....	50
Figura 42. Vectores de tensión conexión estrella-estrella	50
Figura 43. Conexión delta-estrella	51
Figura 44. Vectores de tensión conexión delta-estrella.....	52
Figura 45. Desfase de tensiones conexión delta-estrella.....	52
Figura 46. Vectores de corrientes conexión delta-estrella	53
Figura 47. Desfase de corrientes conexión delta-estrella	53
Figura 48. Conexión estrella-delta	54
Figura 49. Desfase de tensiones estrella-delta	54
Figura 50. Vectores de corrientes conexión estrella-delta	55
Figura 51. Desfase de corrientes conexión estrella-delta	55
Figura 52. Circuito de conexión del transformador, ensayo en vacío.....	56
Figura 53. Circuito equivalente del transformador, ensayo en vacío	56
Figura 54. Circuito de conexión del transformador, ensayo en cortocircuito	58
Figura 55. Circuito equivalente del motor asíncrono.....	61
Figura 56. Resistencia Triangulo a resistencia estrella.....	61
Figura 57. Cálculo del Ángulo theta de vacío	62
Figura 58. Deducción trigonométrica de corrientes.	63
Figura 59. Proceso para el Cálculo de la Reactancia de Magnetización.....	63
Figura 60. Proceso para el cálculo de Potencia en el núcleo magnético, parte imaginaria.....	64
Figura 61. Proceso para el cálculo de la Potencia del núcleo, parte real.....	64
Figura 62. Proceso para el cálculo de la resistencia del núcleo magnético	64
Figura 63. Circuito equivalente para el ensayo en cortocircuito.	65
Figura 64. Proceso para el cálculo de theta en cortocircuito.....	65
Figura 65. Proceso para el cálculo de la Impedancia en cortocircuito.....	66
Figura 66. Por trigonometría se encuentra la resistencia y reactancia de cortocircuito.	66
Figura 67. Proceso para el cálculo de la resistencia equivalente del ensayo en cortocircuito ...	66
Figura 68. Proceso para el cálculo de la reactancia equivalente en el ensayo de cortocircuito.	67
Figura 69. Proceso para el cálculo de la resistencia de estator	67
Figura 70. Proceso para el cálculo de Reactancia del Inducido y Reactancia del estator	68
Figura 71. Circuito equivalente para determinar el voltaje de Thevenin.	68
Figura 72. Proceso para el cálculo de la velocidad de sincronismo	68
Figura 73. Proceso para el cálculo de la velocidad del rotor en (radianes)	69
Figura 74. Proceso para el cálculo de la tensión de Thevenin	69
Figura 75. Circuito reducido para determinar la impedancia de Thevenin.	69
Figura 76. Proceso para el cálculo de la impedancia de Thevenin como su resistencia y reactancia.....	70
Figura 77. Proceso para el cálculo del Par de Arranque	71
Figura 78. Proceso para el cálculo del Par-máximo	72
Figura 79. Circuito equivalente con todos los valores característicos determinados por Thevenin.....	72
Figura 80. Proceso para calcular el deslizamiento con variaciones de cincuenta valores	73
Figura 81. Proceso para el cálculo de la velocidad de rotor	73
Figura 82. Proceso para el cálculo de la curva par-velocidad de sincronismo.....	73
Figura 83. Panel Frontal del laboratorio Virtual del Motor Asíncrono	74

Figura 84. Diagrama de Bloques del laboratorio Virtual del Motor Asíncrono.....	75
Figura 85. Curva del motor Asíncrono par-velocidad	76
Figura 86.Circuito equivalente al generador asíncrono	77
Figura 87. Proceso para el cálculo de la velocidad de sincronismo del generador.....	77
Figura 88. Proceso para el cálculo del deslizamiento del generador.....	78
Figura 89. Proceso para el cálculo de la velocidad del rotor.....	78
Figura 90. Proceso para el cálculo de la curva (T-Par) del generador.....	79
Figura 91. Pantalla frontal del laboratorio de generador asíncrono.....	80
Figura 92. Diagrama de Bloques del generador asíncrono	81
Figura 93. Curva característica del generador asíncrono "Tpar_velocidad"	82
Figura 94. Circuito equivalente del generador síncrono para la práctica	83
Figura 95. Proceso para el cálculo de la tensión de fase	84
Figura 96. Proceso para el cálculo de la velocidad del generador	84
Figura 97. Por trigonometría se obtiene la tensión de línea con carga en retraso.....	85
Figura 98. Proceso para el cálculo del ángulo theta de la corriente I_A	85
Figura 99. Proceso para el cálculo de tensión de fase y tensión de línea con carga en retraso .	86
Figura 100. Por trigonometría se obtiene la tensión de línea con carga unitaria.....	86
Figura 101. Proceso para el cálculo de tensión de fase y tensión de línea con carga unitaria. ...	86
Figura 102. Por trigonometría se obtiene la tensión de línea con factor de potencia en adelanto	87
Figura 103. Proceso para el cálculo de la tensión de fase y tensión de línea con carga en adelanto	87
Figura 104. Proceso para el cálculo de la potencia de salida.....	87
Figura 105. Proceso para el cálculo de la potencia de entrada	88
Figura 106. Proceso para el cálculo del rendimiento del generador	88
Figura 107. Proceso para el cálculo del par (T) del generador.....	88
Figura 108. Proceso para el cálculo del par de inducción (T inducción) del generador.....	89
Figura 109. Proceso para el cálculo de la variación de voltaje con las diferentes cargas.....	89
Figura 110. Proceso de transformación del ángulo theta de grados a radianes.	90
Figura 111. Proceso para el cálculo de la corriente con variación de 21 dígitos para la curva de la gráfica.	90
Figura 112. Proceso para el cálculo de tensión con carga en adelanto para la curva característica.	91
Figura 113. Proceso para el cálculo de tensión con carga en retraso para la curva característica.	91
Figura 114. Diagrama de bloques del generador síncrono para el ensayo con cargas en adelanto y retraso.	92
Figura 115. Pantalla frontal del laboratorio del generador síncrono.	93
Figura 116. Circuito equivalente del motor síncrono.....	94
Figura 117. Proceso para el cálculo de la potencia de entrada de motor síncrono.....	95
Figura 118. Proceso para el cálculo de la corriente de fase I_A	95
Figura 119. Proceso para el cálculo del ángulo theta de la corriente I_A	95
Figura 120. Proceso para el cálculo de la tensión E_A del circuito equivalente.....	96
Figura 121. Proceso para el cálculo de la tensión E_A cuando aumenta el flujo en un 25%.....	96
Figura 122. Proceso para el cálculo del factor de potencia aumentado el 25% del flujo.	97

Figura 123. Proceso para el cálculo de la corriente y ángulo cuando se aumenta el flujo el 25 %.....	97
Figura 124. Proceso para calcular la corriente de fase con variación de valores para la curva característica de los motores síncronos.....	98
Figura 125. Proceso para el cálculo de la tensión EA con variación de valores para la gráfica. .	98
Figura 126. Proceso para el cálculo del ángulo de la tensión con valores absolutos para la gráfica.....	99
Figura 127. Proceso para el cálculo del fasor Ea para la gráfica.	99
Figura 128. Proceso para el cálculo de la corriente con variación de valores para la gráfica....	99
Figura 129. Diagrama de bloques para curva en V del motor síncrono.....	100
Figura 130. Pantalla frontal del laboratorio virtual del Motor Síncrono.	101
Figura 131. Circuito equivalente del transformador trifásico para el ensayo en vacío.	102
Figura 132. Proceso para el cálculo de ángulo de la corriente en vacío del transformador trifásico.....	103
Figura 133. Proceso para el cálculo de la rama paralela del transformador.	103
Figura 134. Circuito equivalente del transformador referido al lado del primario.	104
Figura 135. Circuito equivalente del transformador trifásico para el ensayo en cortocircuito.	104
Figura 136. Proceso para el cálculo del ángulo de la corriente en cortocircuito.....	105
Figura 137. Proceso para el cálculo de la rama serie del transformador.....	105
Figura 138. Circuito equivalente del transformador referido al lado del secundario.....	106
Figura 139. Proceso para el cálculo de la corriente y en ángulo cuando el factor de potencia esta en retraso (-0.8).....	106
Figura 140. Proceso para el cálculo del voltaje con el factor de potencia en retraso.	107
Figura 141. Proceso para el cálculo de la regulación de voltaje con factor de potencia en retraso.	107
Figura 142. Proceso para el cálculo de la corriente con el factor de potencia Unitario (1).....	108
Figura 143. Proceso para el cálculo de la tensión con el factor de potencia unitario.	109
Figura 144. Proceso para el cálculo de la regulación de la tensión con el factor de potencia unitario.	109
Figura 145. Proceso para el cálculo de la corriente con el factor de potencia en adelanto (+).	110
Figura 146. Proceso para el cálculo de la tensión con el factor de potencia en adelanto.....	110
Figura 147. Proceso para el cálculo de la regulación de tensión con el factor de potencia en adelanto.	111
Figura 148. Proceso para el cálculo de la corriente con variación de valores para gráfica.	111
Figura 149. Proceso para el cálculo de las corrientes en retraso, unitario y adelanto con variación de valores para la curva.....	112
Figura 150. Proceso para el cálculo de la tensión con factor de potencia en retraso con variación de valores para la curva.....	112
Figura 151. Proceso para el cálculo de tensión con el factor de potencia unitario con variación de valores para la curva.	113
Figura 152. Proceso para el cálculo de tensión con factor de potencia en adelanto con variación de valores para la curva.	113
Figura 153. Diagrama de Bloques del Transformador trifásico para ensayos con diferentes cargas.	114

Figura 154. Pantalla frontal del laboratorio virtual del transformador.	115
Figura 155. Circuito equivalente del Motor Asíncrono	123
Figura 156 Pantalla frontal del laboratorio motor asíncrono con el programa corriendo	123
Figura 158. Circuito equivalente del Generador Asíncrono	126
Figura 159 Pantalla frontal del laboratorio generador asíncrono con el programa corriendo.	126
Figura 160. Circuito equivalente del generador síncrono	128
Figura 161 Pantalla frontal del laboratorio generador síncrono con el programa corriendo.	129
Figura 162. Circuito equivalente del motor síncrono.....	131
Figura 163 Pantalla frontal del laboratorio motor síncrono con el programa corriendo.	132
Figura 164. Circuito equivalente del transformador trifásico	135
Figura 165 Pantalla frontal del laboratorio del transformador trifásico con el programa corriendo.	135

a.-TÍTULO

Desarrollo de un laboratorio virtual para prácticas de Máquinas Eléctricas

b. RESUMEN

En el presente trabajo se recopiló información de contenidos teóricos de máquinas eléctricas de corriente alterna que se imparte en la carrera de Ingeniería de Electromecánica en la Universidad Nacional de Loja, una vez establecida una base de contenidos y obtenida la información necesaria se procede a hacer una selección de prácticas que se va a desarrollar en laboratorio virtual. Con las prácticas identificadas se continúa con la obtención del modelo matemático de cada una de las prácticas establecidas para la implementación del laboratorio virtual de máquinas eléctricas en el software LabVIEW. Con el modelo matemático de cada práctica se continúa con el diseño del laboratorio virtual de máquinas eléctricas realizando la conexión de los diagramas de bloque en el software LabVIEW, finalmente se procede a construir la pantalla frontal de cada práctica virtual.

En lo referente a las máquinas asíncronas se graficó la curva característica par-velocidad del motor asíncrono, la cual está basada en el par o torque mecánico y la variación de la velocidad de sincronismo. Se puede observar diferentes comportamientos de la curva cuando variamos la resistencia del rotor.

Para el generador asíncrono se realizó la curva con los mismos ensayos haciendo referencia al deslizamiento negativo, cuando la velocidad de sincronismo es mayor a la velocidad del rotor el deslizamiento es negativo, por lo tanto la máquina asíncrona funciona como generador.

Para las máquinas síncronas la gráfica que realizamos para el generador síncrono es la de voltaje en los terminales con la corriente de línea a diferentes cargas, con el factor de potencia en retraso y con el factor de potencia en adelanto. La grafica que se realizó para el motor síncrono es la curva de Morday o curva en V, la cual está establecida por la corriente de campo y la corriente de fase en la curva podemos identificar cuando la máquina está consumiendo o suministrando potencia reactiva.

Para las máquinas estáticas se procede de una manera similar a la de los motores asíncronos, las gráficas para el transformador trifásico son de regulación de voltaje respecto de la carga.

b. - Abstract.

The present work was compiled information that contained theoretical of electrical machines taught in the University National of Loja the career of electromechanical.

Whit the practice defined follow whit the models mathematic of every practice to implementation of the virtual laboratory, the follow is like design of diagrams a blocks in the software LabVIEW. Finish builds the frontal screen the every virtual practice.

To machines asynchronies graph is the curve characteristic torque-speed of synchronies, the base of graph essential in the variations the speed of synchronies. If resistor variations of rotor the results are different graph. To generator asynchronies is similar whit motors only different is in the glide which is negative.

To machines synchronies was make one graph of generator synchronies the terminal voltage whit line current which the factory power they are thus delayed. To motor synchronies the graph is curve in V or curve of Morday that definitions is only line current and phase current.

To machines static or more now in the word three phase transformer is similar like the asynchronies motors of the calculations is equal the base of graph is the voltage regulations when variations load, can maybe whit the factory power advancement, unit and delay.

C.- INTRODUCCIÓN

Una máquina eléctrica puede convertir energía mecánica en energía eléctrica o energía eléctrica en energía mecánica, sus estudios tienen inicio a finales del siglo XIX, es hasta ese entonces que se estandarizan internacionalmente las unidades eléctricas y llegan a ser utilizadas por los ingenieros en todo el mundo.

En nuestro país actualmente el estudio de las máquinas eléctricas se ha ido profundizando por el simple hecho de que estamos rodeados de máquinas eléctricas. En el hogar los motores eléctricos hacen funcionar a los refrigeradores, aspiradoras, equipos de aire acondicionado y muchos otros aparatos similares. En los talleres los motores suministran la fuerza motriz para casi todas las herramientas en consecuencia los generadores son necesarios para suministrar la energía que utilizan todos estos motores.

En la producción de energía eléctrica los generadores y transformadores son elementos fundamentales y necesarios para la conversión de energía, elevación o reducción y transmisión de energía eléctrica de un punto a otro.

Con estos antecedentes la carrera de Ingeniería en Electromecánica de la Universidad Nacional de Loja ve necesario impartir conocimientos profundizados al estudio de funcionamiento y comportamiento de la Máquinas Eléctricas.

La presente tesis se enfocara al estudio de las Máquinas Asíncronas, Síncronas y Estáticas.

Objetivo general

Desarrollar un laboratorio virtual que permita realizar prácticas de máquinas eléctricas a los estudiantes de la U.N.L. de la carrera de Ingeniería Electromecánica fomentando así una mejor comprensión de la teoría aplicada a la práctica.

Objetivos específicos

- Caracterizar Máquinas Eléctricas de corriente alterna utilizados para la explicación de contenidos teóricos en la carrera de Ingeniería en Electromecánica.
- Obtener modelos matemáticos de Máquinas Eléctricas de corriente alterna.

- Diseño de las prácticas a desarrollar en el laboratorio virtual según los modelos matemáticos antes obtenidos.
- Implementar el Laboratorio Virtual de Máquinas Eléctricas de corriente alterna.

d.- REVISIÓN DE LITERATURA

d.1 CAPÍTULO I: MODELADO MATEMÁTICO DE MÁQUINAS ASÍNCRONAS DE CORRIENTE ALTERNA

También son conocidas como máquinas de inducción, su estator está formado por un paquete de chapas aisladas montado en una carcasa con una serie de ranuras en su periferia donde se encuentran los hilos conductores que forman parte del bobinado del estator, formando tres bobinas que corresponden a cada una de las tres fases. El rotor lo forman un apilamiento de chapas que forman un cilindro junto con el eje del motor, pero según se distribuya el inducido se distinguen dos tipos:

Rotor Bobinado, en las ranuras de las chapas del rotor hay unos devanados iguales que los del estator formados por un gran número de espiras; los extremos de las bobinas están conectadas a tres anillos que se conectan al exterior mediante el contacto de tres escobillas.

Rotor de Jaula de Ardilla, en las ranuras del exterior están colocados los conductores que forman una serie de barras formando un cilindro cortocircuitadas en cada extremo en forma de jaula de ardilla. (ROMAN, 2000)

d.1.1 MOTOR Y GENERADOR ASÍNCRONOS

Las máquinas de inducción trifásicas comprenden tanto motores como generadores.

Motor, máquina que produce energía mecánica por transformación de la energía eléctrica.

Los motores de inducción (o motores asíncronos) trifásicos son los más utilizados en la industria. Funcionan a velocidad esencialmente constante desde cero hasta plena carga, la velocidad depende de la frecuencia, por lo que los motores no se adaptan con facilidad al control de velocidad.

D.1.1.1 CIRCUITO EQUIVALENTE Y MODELADO MATEMÁTICO DEL MOTOR ASÍNCRONO (O MOTOR DE INDUCCIÓN).

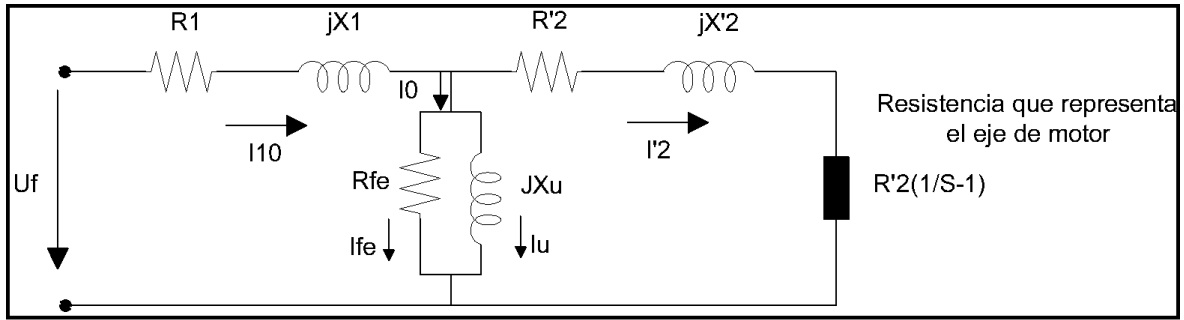


Figura 1. Circuito equivalente del motor asíncrono

d.1.1.2 ENSAYO EN VACÍO:

Para realizar el ensayo en vacío de un motor de inducción o motor Asíncrono partimos de las siguientes consideraciones:

- Se supone para el circuito equivalente que la conexión del motor se encuentra en (Y-Y) estrella – estrella, y si está en triángulo- triángulo simplemente se realiza la transformación apropiada.
- La tensión de línea va a ser igual

$$U_L = \frac{U_F}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

En el ensayo en vacío se calcula los datos del núcleo magnético del motor (la parte en paralelo del circuito equivalente)

$$P_O = 3U_L * I * \cos \varphi \quad (2)$$

Utilizamos el subíndice (o) para el ensayo en vacío

$$P_O = 3 \frac{U_F}{\sqrt{3}} * I_{I0} * \cos \varphi_{I0} \quad (3)$$

Multiplicando y dividiendo para $\sqrt{3}$ tenemos:

$$P_O = \sqrt{3} * U_F * I_{I0} * \cos \varphi_{I0} \quad (4)$$

Despejando obtenemos el ángulo:

$$\cos \varphi_{I0} = \frac{P_O}{\sqrt{3} * U_F * I_{I0}} \quad (5)$$

El deslizamiento para ensayo en vacío tiende a cero (0) porque la velocidad del campo inductivo es casi igual a la velocidad del rotor.

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (6)$$

$$n_1 \approx n \quad (7)$$

Por lo tanto

$$S = 0 \quad (8)$$

La resistencia que se la representa como el eje del motor va a tender al infinito

$$R'_2 \left(\frac{1}{S} - 1 \right) \quad (9)$$

$$R'_2 = \infty \quad (10)$$

Se deduce que la resistencia que representa el eje del motor es puramente resistiva (es decir una resistencia muy grande)

Ahora se establece el circuito equivalente en vacío despreciando las pérdidas resistivas del cobre en el primario por ser muy pequeñas:

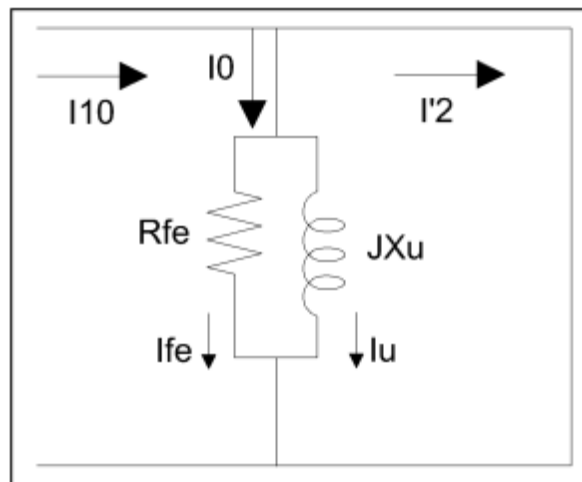


Figura 2.corrientes según la ley de Kirchhoff

Se deduce las corrientes según la ley de Kirchhoff

$$I_{10} = I_0 + I'_2 \quad (11)$$

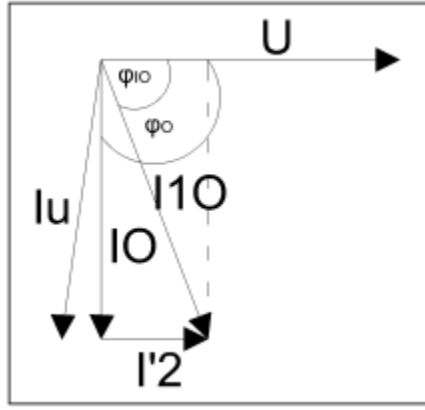


Figura 3. triángulos vectoriales de corrientes

Con triángulos vectoriales se deducen las corrientes usando trigonometría básica

$$I_{CU} = I_O \sin \varphi_O = I_{IO} \sin \varphi_{IO} \quad (12)$$

De la ley de OHM tenemos

$$U = X * I \quad (13)$$

$$X_{CU} = \frac{U_L}{I_{CU}} = \frac{\frac{U_{nom}}{\sqrt{3}}}{I_{IO} \sin \varphi_{IO}} \quad (14)$$

Calculamos la potencia según la ley de OHM

$$P_{fe} = 3 * R_{fe} * I_{fe}^2 = 3 * R_{fe} * \left(\frac{\frac{U_L}{\sqrt{3}}}{R_{fe}} \right)^2 = \frac{U_L^2}{R_{fe}} \quad (15)$$

Despejando obtenemos la resistencia del hierro de la parte en paralelo

$$R_{fe} = \frac{U_L^2}{P_{fe}} \quad (16)$$

Potencia en vacío

$$P_O = P_{fe} + P_{cu1} + P_{fw} \quad (17)$$

De donde

$$P_{fe} = P_O - P_{cu1} - P_{fw} \quad (18)$$

$$P_{cu1} = 3 * R_I * I_{IO}^2 \quad (19)$$

d.1.1.3 ENSAYO EN CORTOCIRCUITO:

Con el desarrollo del ensayo en cortocircuito obtenemos la resistencia e impedancias del cable considerando un circuito serie.

Utilizando la potencia de cortocircuito obtenemos el ángulo de cortocircuito

$$P_{CC} = \sqrt{3} * U_{CC} * I_{CC} * \cos \varphi_{CC} \quad (20)$$

$$\cos \varphi_{CC} = \frac{P_{CC}}{\sqrt{3} * U_{CC} * I_{CC}} \quad (21)$$

Con la ley de ohm podemos encontrar la impedancia

$$U = Z * I \quad (22)$$

Para la impedancia de corto la obtenemos de la siguiente manera

$$Z_{CC} = \frac{U_{CC}}{I_{CC}} = \frac{\frac{U_{CC}}{\sqrt{3}}}{I_{CC}} \quad (23)$$

De donde podemos utilizar trigonometría para obtener las resistencias e impedancias faltantes

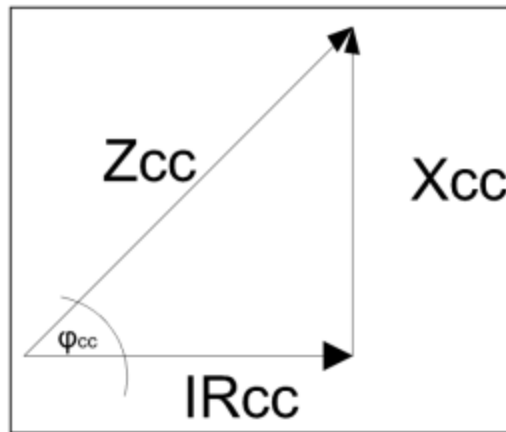


Figura 4-vectores de reactancia e impedancia

$$R_{CC} = Z_{CC} \cos \varphi_{CC} \quad (24)$$

$$X_{CC} = R_{CC} \sin \varphi_{CC} \quad (25)$$

Y como están en serie las resistencias se suman y la suma representa la resistencia de cortocircuito

$$R_{CC} = R_1 + R'_2 \quad (26)$$

$$R'_2 = R_{cc} - R_1 \quad (27)$$

Y para las impedancias:

$$\frac{X_{cc}}{2} = X_1 = X'_2 \quad (28)$$

Una vez obtenidas las características del motor asíncrono mediante el ensayo en vacío (o circuito abierto) y el de corto-circuito (o circuito bloqueado) podemos graficar la curva Par-Velocidad del motor asíncrono.

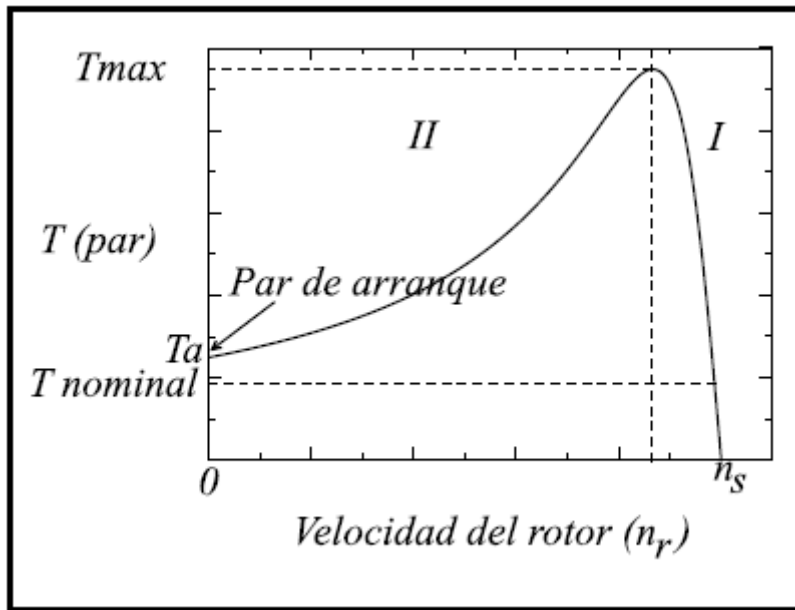


Figura 5. Motor asíncrono gráfica característica Par-Velocidad (Alexandre Wagemakers, Francisco J. Escribano, 2008)

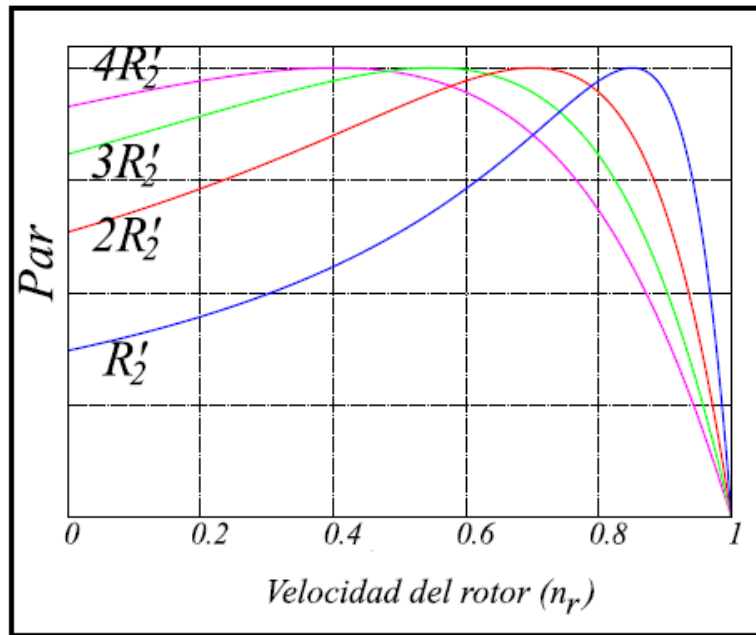


Figura 6. Curva par-velocidad variando la carga en el rotor R'_2 (Alexandre Wagemakers, Francisco J. Escribano, 2008)

d.1.2 CIRCUITO EQUIVALENTE Y MODELADO MATEMÁTICO DEL GENERADOR ASÍNCRONO.

Generador, máquina que produce energía eléctrica por transformación de la energía mecánica.

En este régimen de funcionamiento la velocidad (n) del motor es superior a la de sincronismo n_1 , lo que quiere decir que el deslizamiento (s) es negativo. Por lo tanto, funcionando como generador la velocidad de la máquina es del mismo sentido que la de sincronismo y de mayor que ésta.

Al ser el deslizamiento negativo se obtiene que R'_c como $R'_2 + R'_c = R'_2/s$ sean negativos. Esto da lugar a que la potencia mecánica interna P_m y la potencia del entrehierro P_a sean negativas; lo cual significa que el sentido de estas potencias es el opuesto del funcionamiento del motor. En consecuencia es un generador de inducción, la máquina absorbe potencia mecánica en su eje para convertirla en potencia eléctrica (potencia activa) que se suministra a la red conectada al estator. (Pozuela, 2008)

El circuito equivalente de un generador asíncrono o de inducción, es similar al circuito equivalente de un transformador, donde el devanado del circuito del rotor opera a una

frecuencia variable debido al deslizamiento de la máquina, vista por el estator de la máquina varíe en función del deslizamiento.

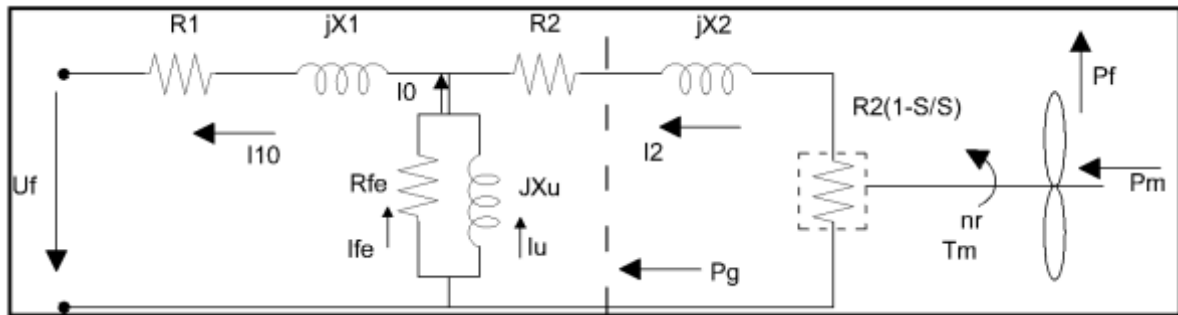


Figura 7. Circuito equivalente generador asíncrono

Dónde:

R_1, R_2 = resistencias de los devanados del estator y rotor por fase

X_1, X_2 = Reactancias de dispersión del devanado del estator y rotor por fase

X_m = Reactancia cíclica o de magnetización por fase.

R_c = Resistencia de pérdida del entrehierro por fase

E_1 = Voltaje en el entrehierro por fase

V_L = Voltaje terminal por fase

I_1, I_2 = Corrientes de los devanados del estator y rotor por fase

$I_g = I_{RC} + I_m$ = Corriente en el entrehierro de la máquina.

P_f = Potencia de pérdidas por fricción por fase

P_g = Potencia promedio que cruza el entrehierro por fase

T_m = Torque mecánico de entradas por fase

n_r = Velocidad del rotor

Partiendo de la consideración que la velocidad de nominal del motor va a ser superior a la velocidad de sincronía, el deslizamiento es:

$$s = \frac{(n_s - n)}{n_s} \quad (29)$$

$$s = (-) \text{ negativo}$$

Por lo tanto el valor de R_2 en el circuito equivalente también es negativo:

$$R_2 = \frac{(1 - s)}{s} \quad (30)$$

$$\frac{R_2}{s} = (-) \text{ negativo}$$

La resistencia negativa indica que la potencia fluye del rotor al estator y no al contrario, teniendo en cuenta esto realizamos los siguientes cálculos:

La resistencia neta de la rama es:

$$R_n = -\frac{R_2}{s} + R_2 \quad (31)$$

La impedancia de la rama es:

$$Z = \sqrt{R_n^2} + jx_2^2 \quad (32)$$

La corriente se la puede encontrar de la siguiente manera

$$I_2 = \frac{U_f}{Z} \quad (33)$$

La potencia activa suministra al rotor es:

$$P_r = I_2 * \frac{R_2}{s} \quad (34)$$

$$P_r = (-) \text{ negativa}$$

Esta potencia negativa indica que fluye la potencia del rotor al estator

Las pérdidas eléctricas $I^2 * R$ en el rotor son:

$$P_{jr} = I_2^2 * r_2 \quad (35)$$

La entrada de potencia mecánica al eje es igual a P_r más las pérdidas eléctricas P_{jr} en el rotor:

$$P_m = P_r + P_{jr} \quad (36)$$

Pérdidas eléctricas $I^2 * R$ en el estator son:

$$P_{js} = I_1^2 * r_1 \quad (37)$$

Las pérdidas en el hierro más las pérdidas por fricción de rodamiento y por fricción del aire son:

$$P_f + P_v = \frac{U_f^2}{R_m} \quad (38)$$

La potencia activa suministrada a la línea que alimenta el motor es:

$P_e = \text{potencia activa suministrada del rotor al estator menos las pérdidas}$

$$P_e = P_r - P_{js} - P_f - P_v \quad (39)$$

$$P_{e \text{ para las 3 fases}} = * 3$$

La potencia reactiva absorbida por la reactancia de dispersión es:

$$Q_1 = I_1^2 * jx_1 \quad (40)$$

La potencia reactiva absorbida por la reactancia de magnetizante es:

$$Q_2 = \frac{U_f^2}{jx_2} \quad (41)$$

La potencia reactiva total absorbida por el motor es:

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (42)$$

La potencia aparente en las terminales del generador

$$S = \sqrt{P_e^2 + Q^2} \quad (43)$$

La corriente de línea I_p es:

$$I_p = \frac{S}{U_f} \quad (44)$$

El factor de potencia en los terminales es:

$$\cos \theta = \frac{P_e}{S} \quad (45)$$

La eficiencia del generador asíncrono es:

$$\eta = \frac{\text{potencia eléctrica útil}}{\text{entrada mecánica}}$$

$$\eta = \frac{P_e}{P_m} \quad (46)$$

Los caballos necesarios para impulsar el generador son:

$$P_m = \frac{3 * P_e}{746} \quad (47)$$

El par o momento de torsión ejercido por el motor impulsor es:

$$T = \frac{9.55 * P}{n} \quad (48)$$

Teniendo en cuenta que la diferencia entre el motor y el generador asíncrono que radica en el deslizamiento (velocidad del rotor mayor a la velocidad de sincronismo) podemos deducir la gráfica de par-velocidad del generador de inducción.

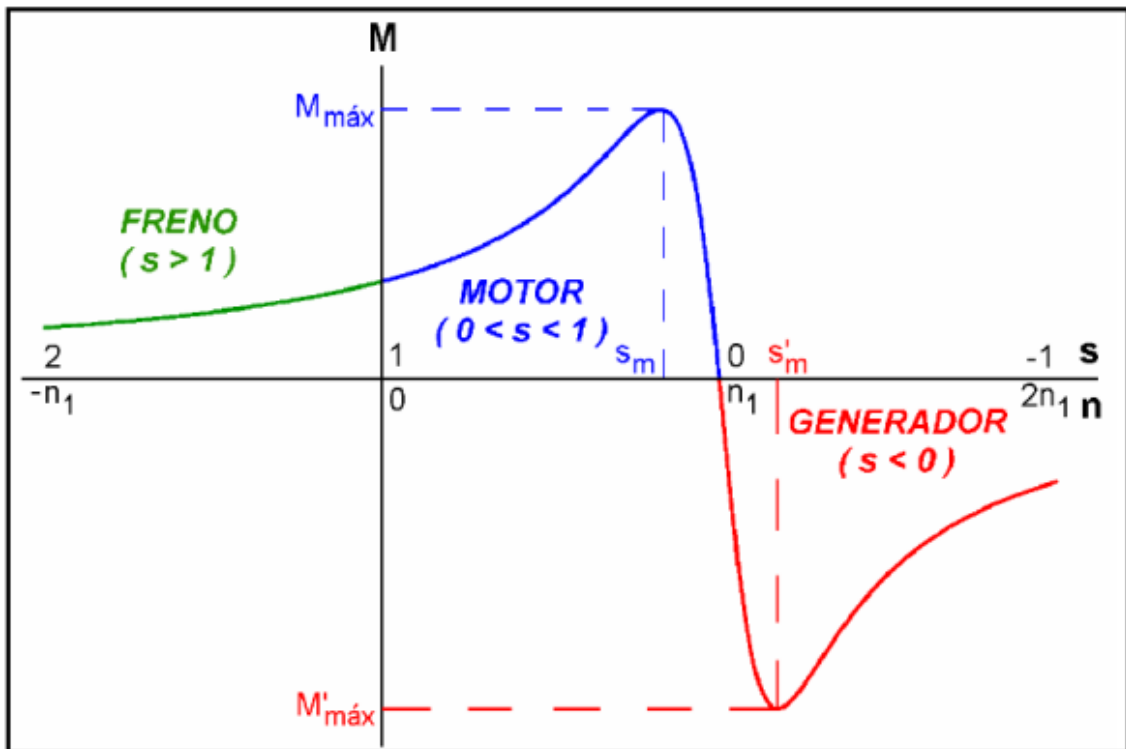


Figura 8. Curva característica Par-Velocidad de las máquinas asíncronas (generador con deslizamiento negativo) (Chapman, 2005)

d.2 CAPÍTULO II: MODELADO MATEMÁTICO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS DE CORRIENTE ALTERNA

El nombre de Máquina Síncrona viene como consecuencia del imperativo de funcionar, únicamente, a la velocidad de sincronismo, que como sabemos, viene definida por la frecuencia de las corrientes del estator y por el número de polos de la máquina.

d.2.1 GENERADOR Y MOTOR SÍNCRONO

Como la generalidad de las máquinas rotativas, consta de una parte fija (estator) y una móvil (rotor), constituyendo el circuito magnético de la máquina.

Igualmente se dispone de dos circuitos situados sobre el estator y rotor de la máquina, relacionados a través del circuito magnético, siendo su característica principal que el devanado inducido se encuentra alojado en el ranurado del estator y el circuito inductor, alimentado por corriente continua, en el rotor. En máquinas de pequeña potencia, esta distribución suele estar invertida, estando el circuito inducido en el rotor y el inductor del estator.

La utilización de la máquina síncrona como generador de corriente alterna está generalizada, siendo el elemento convertido de uso, prácticamente exclusivo, en los centros de producción de energía eléctrica.

Los generadores síncronos trifásicos son la fuente principal de energía eléctrica que consumimos. Estas máquinas son los convertidores de energía más grandes del mundo. (Wildi, 2007)

Cuando el generador o alternador trabaja en vacío no hay caída de tensión de salida U coincide con la fem E_v

d.2.1.1 CIRCUITO EQUIVALENTE Y MODELADO MATEMÁTICO DEL GENERADOR SÍNCRONO

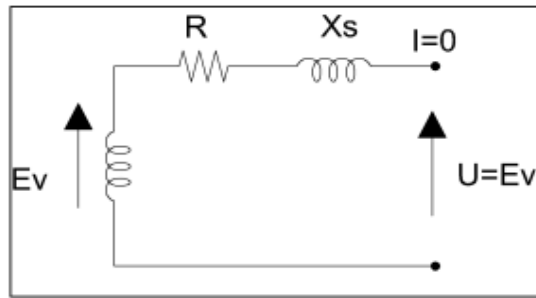


Figura 9.circuito equivalente generador síncrono

$$E_v = K * N * \Phi \quad (49)$$

$$\Phi = f(I_e) \quad (50)$$

De donde:

$N = rpm$

$\Phi = \text{flujo del inductor}$

$I_e = \text{corriente de excitación}$

$K = \text{constante de proporcionalidad.}$

d.2.1.1.1 Circuito equivalente con diferentes cargas:

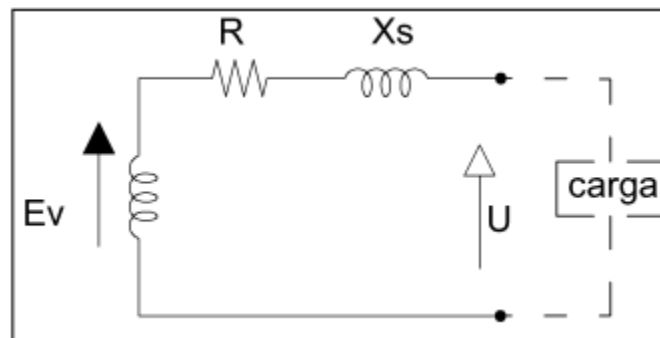


Figura 10. Circuito equivalente del generador síncrono con carga

$$U = E_v - RI - jX_s I \quad (51)$$

De donde:

$R = \text{resistencia por fase}$

$X_s = \text{reactancia sincrónica por fase}$

$E_v = \text{tensión en vacío por fase}$

$U = \text{tensión en carga por fase}$

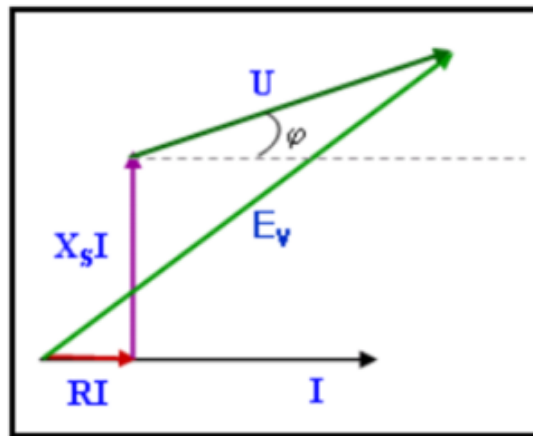


Figura 11. Vectores del generador síncrono con carga

d.2.1.1.1.1 Carga Resistiva.

Cuando el generador alimenta una carga resistiva el factor de potencia es unitario se observa que el voltaje interno generado E_v es diferente en los terminales del generador, esto sucede por las caídas de voltaje internas.

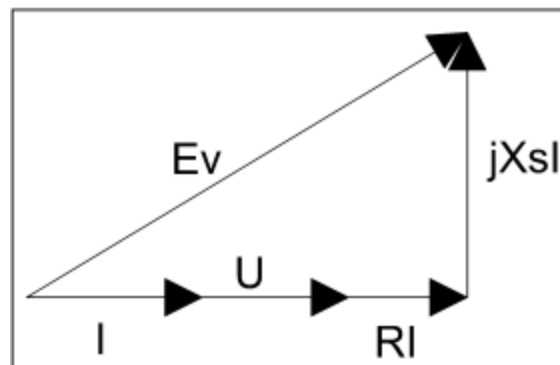


Figura 12. Generador síncrono carga resistiva

d.2.1.1.1.2 Carga inductiva.

Cuando se conecta una carga inductiva que origina un factor de potencia en atraso, es necesario un voltaje interno generado más grande, para cierto voltaje de fase y corriente de armadura. Para esto se requiere una corriente de campo más grande para obtener el mismo voltaje en las terminales de la carga.

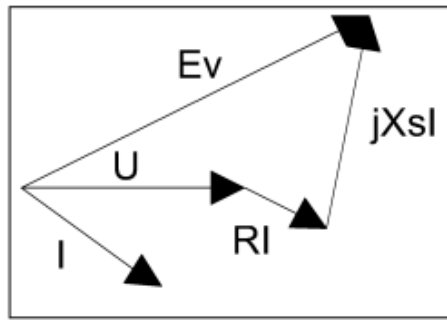


Figura 13. Generador síncrono carga inductiva

d.2.1.1.1.3 Carga capacitiva.

Cuando se tiene alimentada una carga capacitiva que origina un factor de potencia en adelanto, es necesario un voltaje interno generado menor; para lograr un voltaje interno menor disminuye de excitación del devanado de campo.

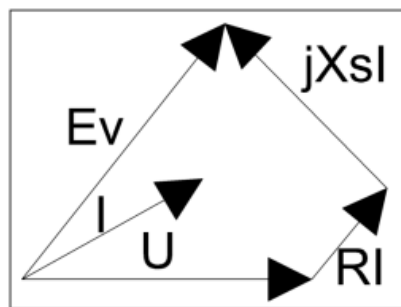


Figura 14. Generador síncrono carga capacitiva

d.2.1.2 ENSAYO EN VACÍO:

Ensayo en vacío, para obtener la característica en vacío

$$E_v = f(I_e)$$

(52)

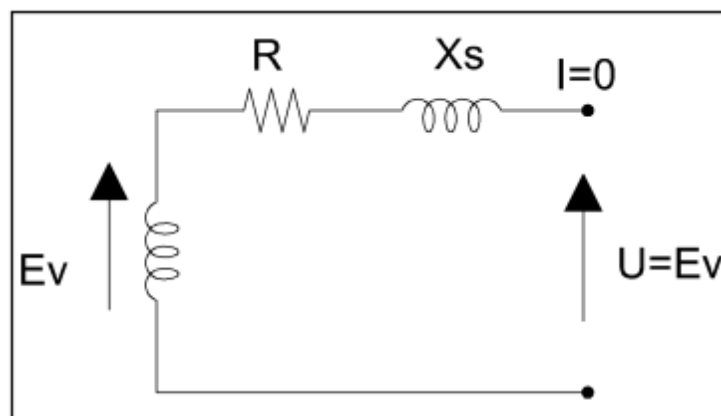


Figura 15. Circuito equivalente del generador síncrono, ensayo en vacío

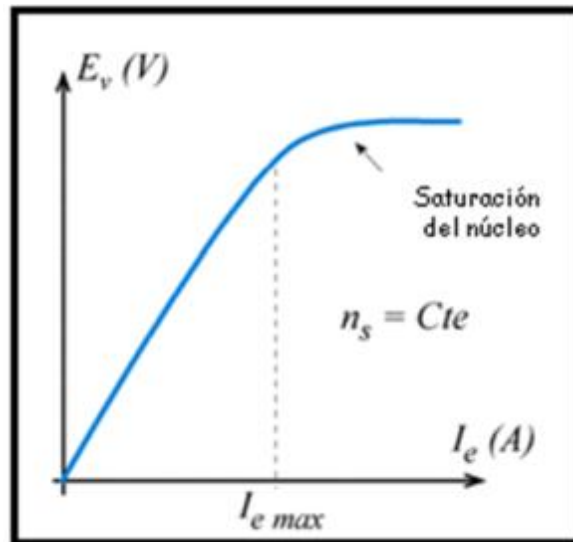


Figura 16. Curva del generador síncrono, ensayo en vacío

d.2.1.3 ENSAYO EN CORTOCIRCUITO:

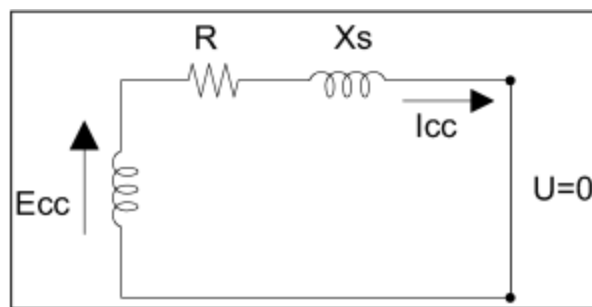


Figura 17. Circuito equivalente del generador síncrono, ensayo en cortocircuito

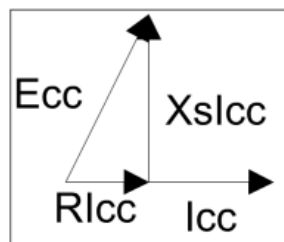


Figura 18. Vectores del generador síncrono, ensayo cortocircuito

$$U = E_v - RI - jX_S \quad (53)$$

$$0 = E_v - RI_{cc} - jX_S I_{cc}$$

$$E_{cc} = RI_{cc} + jX_S I_{cc} \quad (54)$$

(55)

$$E_{rr} = \sqrt{(R^2 + X_S^2)} I_{rr}$$

E_{CC} fem creada por I_e

$$I_{CC} = f(I_e) \quad (56)$$

$$Z_S = \sqrt{(R^2 + X_S^2)} = \frac{E_{CC}}{I_{CC}} \quad (57)$$

$$X_S = \sqrt{(Z_S^2 - R^2)} \quad (58)$$

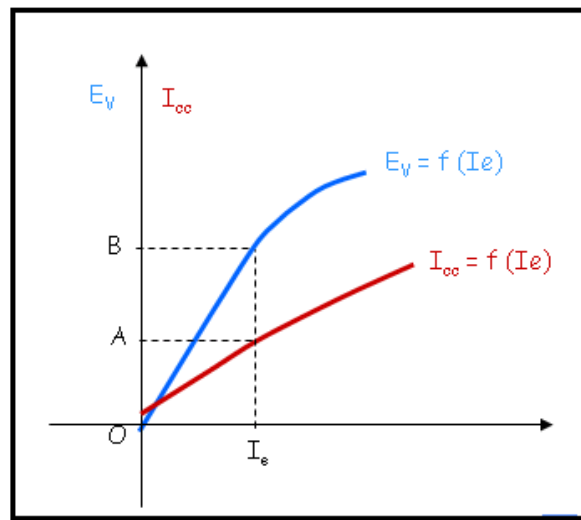


Figura 19. Curvas del generador síncrono, ensayo en cortocircuito

d.2.1.3.1 Diagrama de potencias:

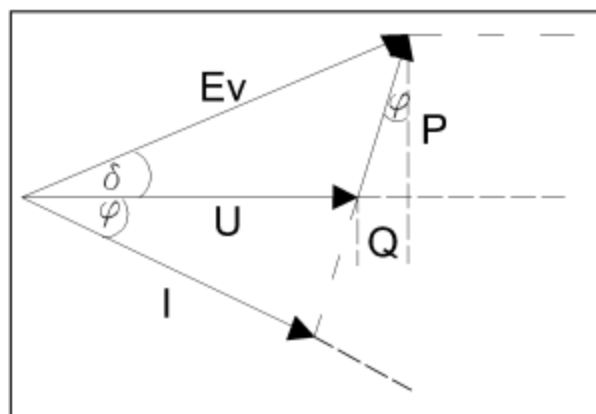


Figura 20. Generador síncrono vectores de potencia

$$KP = \frac{X_S UI \cos \varphi}{U} \quad (59)$$

$$KQ = \frac{X_S UI \sin \varphi}{U} \quad (60)$$

$$P = U I \cos \varphi \quad (61)$$

$$X_S I \cos \varphi = E_V \sin \delta \quad (62)$$

$$I \cos \varphi = \frac{E_V \sin \delta}{X_S} \quad (63)$$

$$P = \frac{E_V U \sin \delta}{X_S} = P_{max} \sin \delta \quad (64)$$

d.2.2 CIRCUITO EQUIVALENTE Y MODELO MATEMÁTICO DEL MOTOR SÍNCRONO.

Como el nombre lo dice, los motores síncronos funcionan en sincronismo con el campo rotatorio. Por consiguiente, la velocidad de rotación está asociada con la frecuencia de la fuente. Como la frecuencia es fija, la velocidad del motor permanece constante, independientemente de la carga o voltaje la línea trifásica.

Un motor síncrono puede arrancar por sí mismo, en consecuencia, el rotor casi siempre está equipado con devanado jaula de ardilla para que pueda arrancar como motor de inducción. (Wildi, 2007)

Un motor síncrono es igual en todos los aspectos a un generador sincrónico, excepto en que la dirección del flujo de potencia en la máquina es invertida. Puesto que la dirección del flujo de potencia en la máquina esta invertida, cabe esperar que también se invierta la dirección del flujo de la corriente en el estator del motor, de donde:

$$U = E + R_S I + j X_S I \quad (65)$$

$$E = U - R_S I - j X_S I \quad (66)$$

En esta ecuación se puede evidenciar que es exactamente igual a la del generador, excepto que se cambia el signo del término de la corriente. (Chapman, 2005)

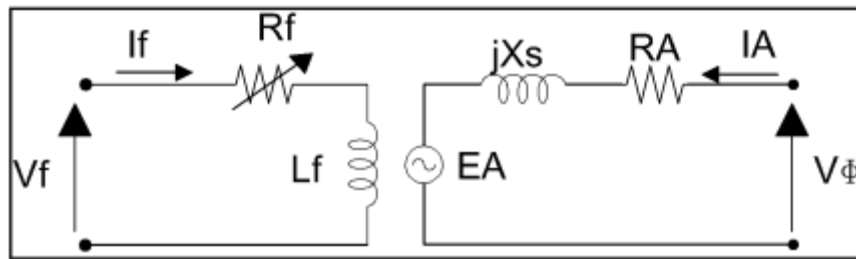


Figura 21. Circuito equivalente del motor síncrono

Diagrama fasorial del motor síncrono

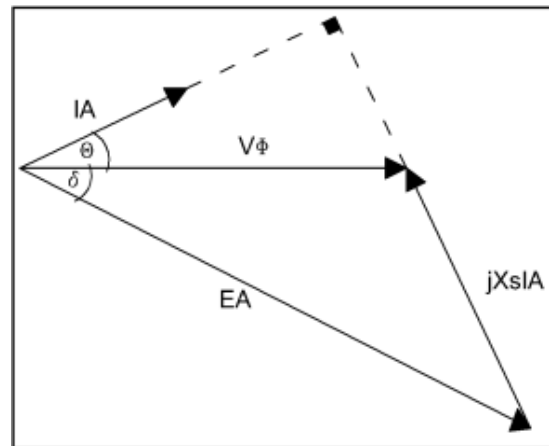


Figura 22. Motor síncrono, diagrama fasorial

d.2.2.1. Carga inductiva:

Cuando se incrementa la corriente de campo, el voltaje interno generado en el devanado de la armadura también se incrementa y la corriente de armadura primero disminuye posteriormente va aumentando, con un voltaje interno generado en el devanado armadura bajo, la corriente de armadura está en retraso; por lo que el motor es una carga inductiva en esta situación se dice que está subexcitado.

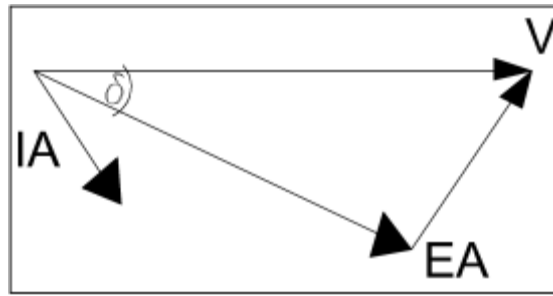


Figura 23. Motor síncrono, carga inductiva

d.2.2.2 Carga Resistiva.

Conforme se va aumentando la corriente de campo, la corriente de armadura se alinea con el voltaje en terminales en este momento el motor es una carga puramente resistiva.

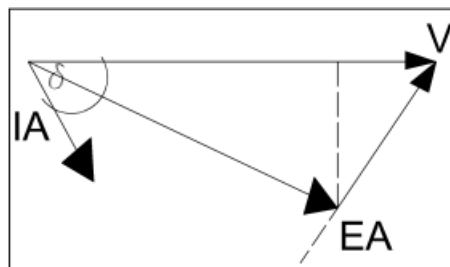


Figura 24. Motor síncrono, carga resistiva

d.2.2.3 Carga capacitiva

Si incrementamos más la corriente de campo, la corriente de armadura ahora estará adelante del voltaje en los terminales, se vuelve una carga capacitiva, en esta condición se dice que esta sobreexcitado.

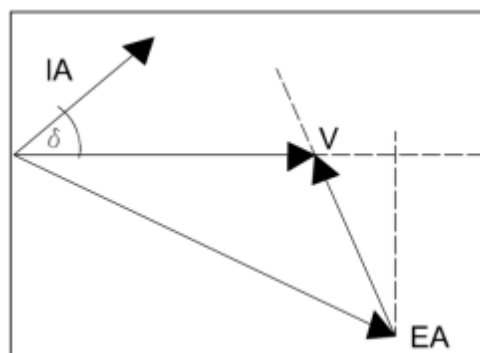


Figura 25. Motor síncrono, carga capacitiva

Una de las gráficas características de los motores síncronos es la llamada gráfica en V llamada así por la forma, se muestra la gráfica de la corriente de campo (I_F) y la corriente del inducido (I_A).

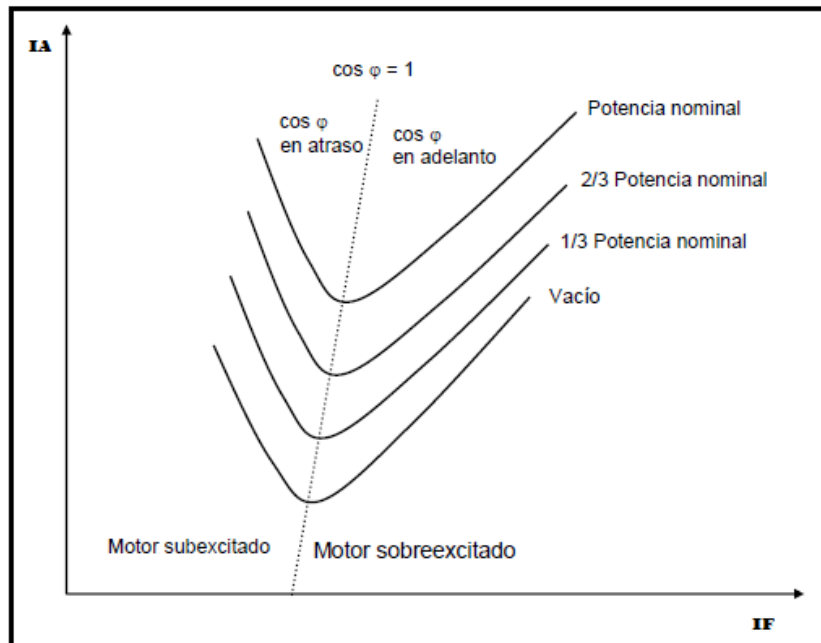


Figura 26. Curva en V del motor síncrono (Chapman, 2005)

d.3 CAPÍTULO III: MÁQUINAS ESTÁTICAS

A los transformadores se los conoce comúnmente como máquinas estáticas que se lo puede definir como:

“Máquina que Transfiere energía eléctrica de un circuito a otro sin cambio de frecuencia, lo hace bajo el principio de inducción electromecánica y tiene circuitos eléctricos aislados entre sí que son eslabonados por un circuito magnético común” (Wildi, 2007)

d.3.1 EL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

El transformador trifásico es un dispositivo que se encarga de “transformar la tensión de corriente alterna que tiene la entrada en otra diferente a la salida.

Cuando dos bobinas de alambre son acopladas inductivamente, el flujo pasa a través de una y entonces también pasa total o parcialmente a través de la otra. Esto significa que las bobinas tienen un circuito magnético en común.

Si el flujo lo crea una corriente variante, entonces el flujo magnético cambiará, bajo esta condición se creará un voltaje inducido en la segunda bobina. El voltaje secundario inducido se debe al cambio de flujo a través de la bobina, este cambio lo ocasiona, en primer lugar, la corriente que cambia en la primera bobina o primaria. (HARPER, 1977)

En resumen el transformador, es un aparato estático de inducción electromecánica destinado a transformar un sistema de corrientes variables en otro o varios sistemas de corrientes, cuyas tensiones e intensidades son generalmente diferentes, aunque de la misma frecuencia.

d.3.2 MODELADO MATEMÁTICO Y CIRCUITO EQUIVALENTE DEL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

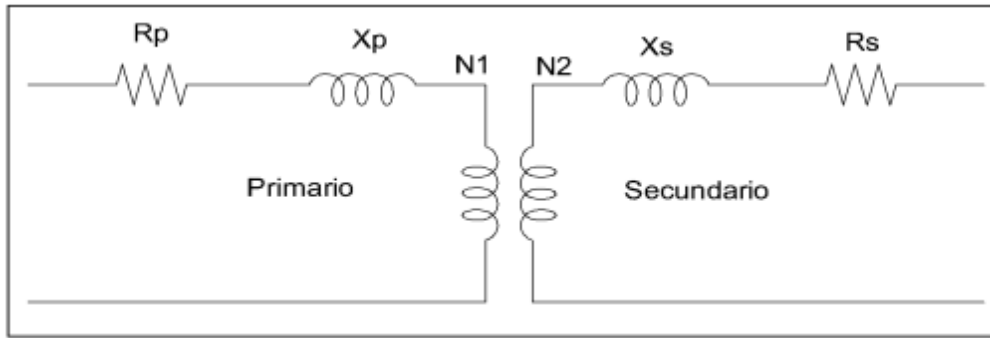


Figura 27. Circuito equivalente del transformador trifásico

De donde:

R_p = resistencia del devanado primario

x_p = reactancia del devanado primario

N_1 = número de espiras del primario

R_s = resistencia del devanado secundario

X_s = reactancia del devanado secundario

N_2 = número de espiras del secundario

Reduciendo los primarios los valores de la resistencia y reactancia del secundario, tenemos el siguiente circuito equivalente:

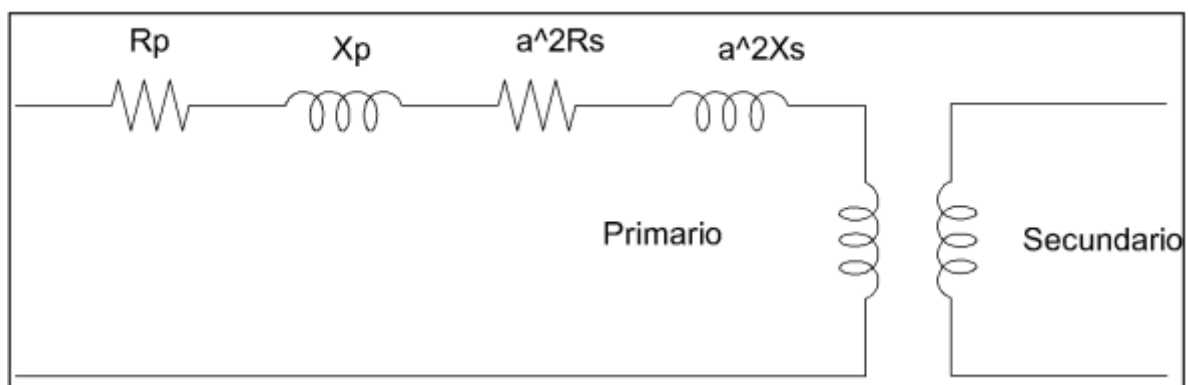


Figura 28. Transformador reduciendo los valores del primario referido al secundario

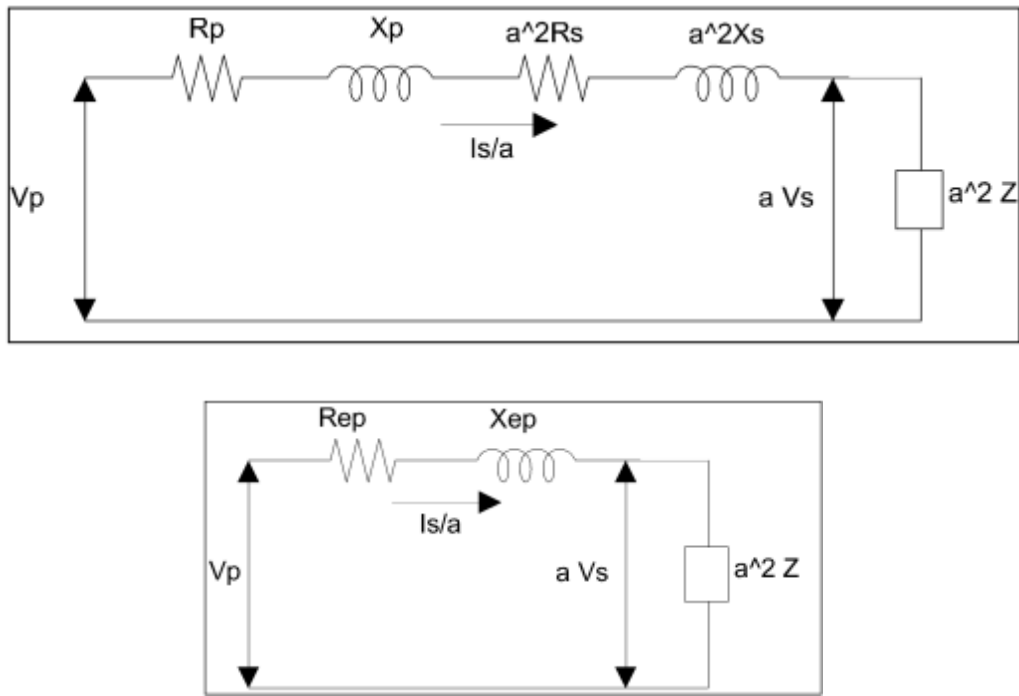


Figura 29. Transformador, reduciendo el circuito en referencia al secundario

Para determinar la magnitud de voltaje E_p tenemos:

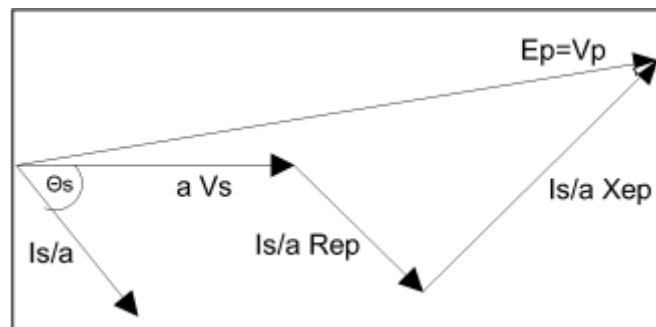


Figura 30. Transformador, vectores representado el primario referido del secundario

$E_s = \text{magnitud del voltaje}$

$a = \text{relación de transformación}$

$$a = \frac{N_1}{N_2} \quad (67)$$

$$E_s = V_p = \sqrt{\left(aV_s \cos \theta_p + \frac{I_s}{a} R_{ep}\right)^2 + \left(aV_s \sin \theta_p + \frac{I_s}{a} X_{es}\right)^2} \quad (68)$$

d.3.2.1.1 Con factor de potencia unitario:

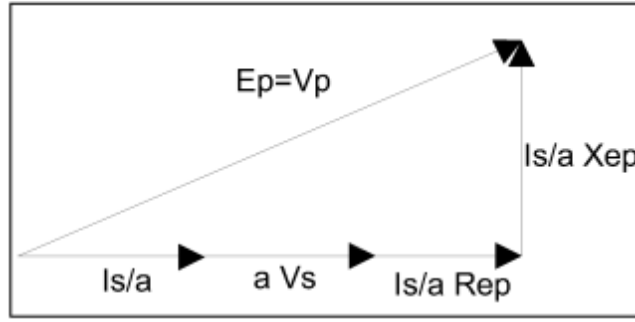


Figura 31. Transformador, gráfica vectorial con factor de potencia unitario

$$E_s = V_p = \sqrt{\left(aV_s + \frac{I_s}{a}R_{ep}\right)^2 + \left(\frac{I_s}{a}X_{ep}\right)^2} \quad (69)$$

d.3.2.1.2 Con el factor de potencia en adelanto:

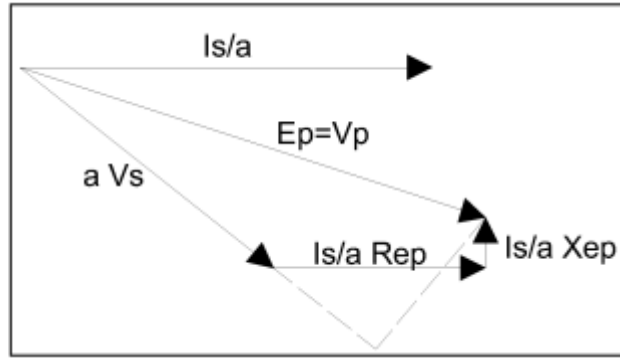


Figura 32. Transformador, gráfica vectorial con factor de potencia en adelanto

$$E_s = V_p = \sqrt{\left(aV_s + \frac{I_s}{a}R_{ep} \cos \theta_p - \frac{I_s}{a}X_{ep} \sin \theta_p\right)^2 + \left(\frac{I_s}{a}R_{ep} \sin \theta_p + \frac{I_s}{a}X_{ep} \cos \theta_p\right)^2} \quad (70)$$

O cambiando los ejes de referencia:

$$E_s = V_p = \sqrt{\left(\frac{I_s}{a} \cos \theta_p + \frac{I_s}{a}X_{ep}\right)^2 + \left(aV_s \sin \theta_p - \frac{I_s}{a}X_{ep}\right)^2} \quad (71)$$

Refiriendo los valores del primario al secundario se tendrá el circuito equivalente:

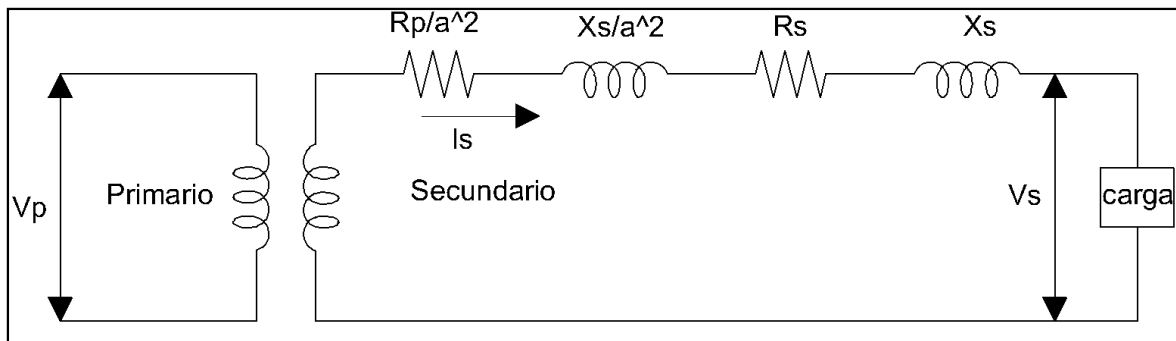


Figura 33. Transformador, refiriendo los valores del primario al secundario

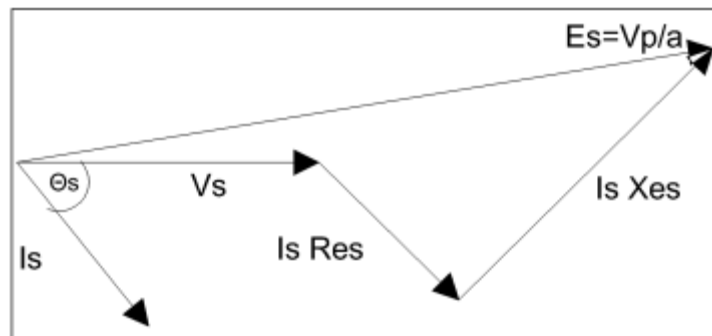


Figura 34. Transformadores, vectores refiriendo los valores del primario al secundario

$E_s = \text{magnitud del voltaje}$

$a = \text{relación de transformación}$

$$a = \frac{N_1}{N_2}$$

$$E_s = \frac{V_p}{a} = \sqrt{(V_s \cos \theta_s + I_s R_{es})^2 + (V_s \sin \theta_s + I_s X_{es})^2} \quad (72)$$

d.3.2.2.1 Si el factor de potencia es unitario:

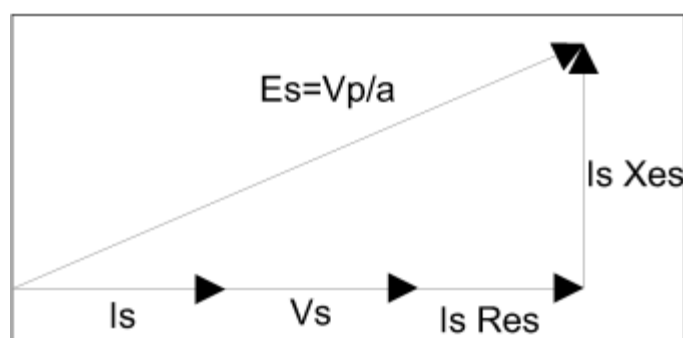


Figura 35. Transformador, gráfica vectorial con factor de potencia unitario

$$E_s = \frac{V_p}{a} = \sqrt{(V_s + I_s R_{es})^2 + (I_s X_{es})^2} \quad (73)$$

d.3.2.2.2 Con el factor de potencia en adelanto:

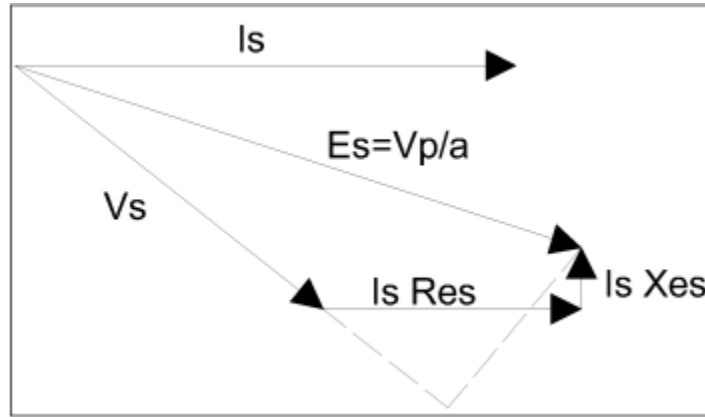


Figura 36. Transformador, gráfica vectorial con factor de potencia en adelanto

$$E_s = \frac{V_p}{a} = \sqrt{(V_s + I_s R_{es} \cos \theta_s - I_s X_{es} \sin \theta_s)^2 + (I_s R_{es} \sin \theta_s + I_s X_{es} \cos \theta_s)^2} \quad (74)$$

cambiando los ejes de referencia:

$$E_s = \frac{V_p}{a} = \sqrt{(I_s \cos \theta_s + I_s X_{es})^2 + (V_s \sin \theta_s - I_s X_{es})^2} \quad (75)$$

d.3.3. TIPOS DE CONEXIONES DEL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

d.3.3.1. DELTA – DELTA

La conexión delta-delta de transformadores se usa generalmente en sistemas cuyos voltajes no son muy elevados, especialmente en aquellos casos en que se debe mantener la continuidad de un sistema, esta conexión se emplea tanto para elevar la tensión como para reducirla.

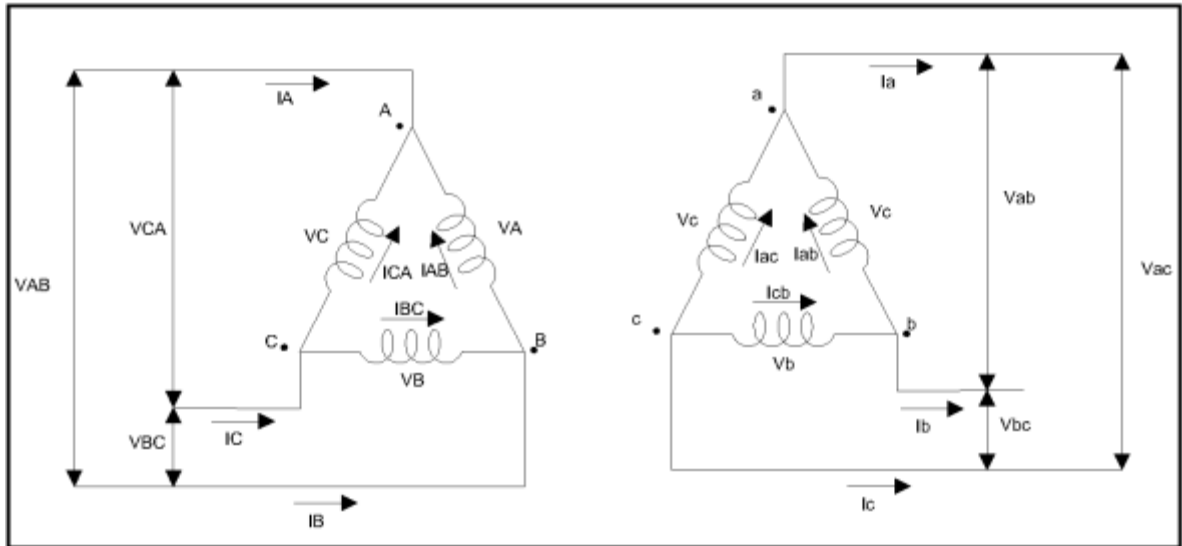


Figura 37. Conexión delta-delta

$$\begin{aligned}
 V_{AB} &= V_A & V_{ab} &= V_a \\
 V_{BC} &= V_B & V_{bc} &= V_b \\
 V_{CA} &= V_C & V_{ca} &= V_c
 \end{aligned}
 \tag{76}$$

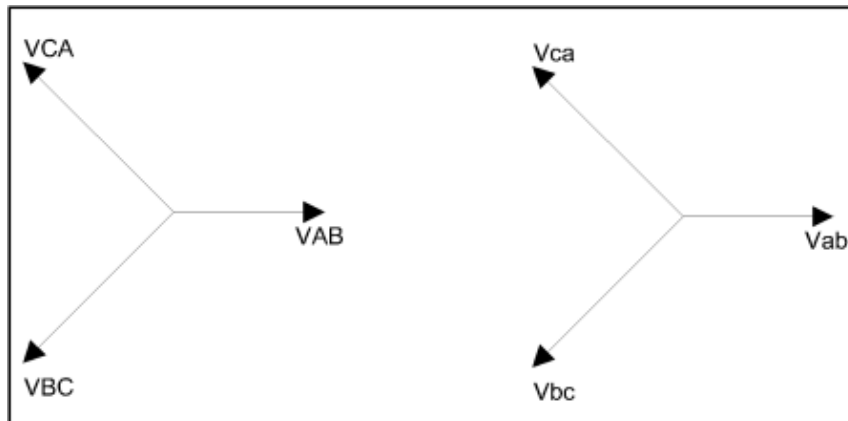


Figura 38. Vectores de tensiones de la conexión delta-delta

De donde:

V_A y V_a son voltajes primario y secundario del transformador A

V_B y V_b son voltajes primario y secundario del transformador B

V_C y V_c son voltajes primario y secundario del transformador C

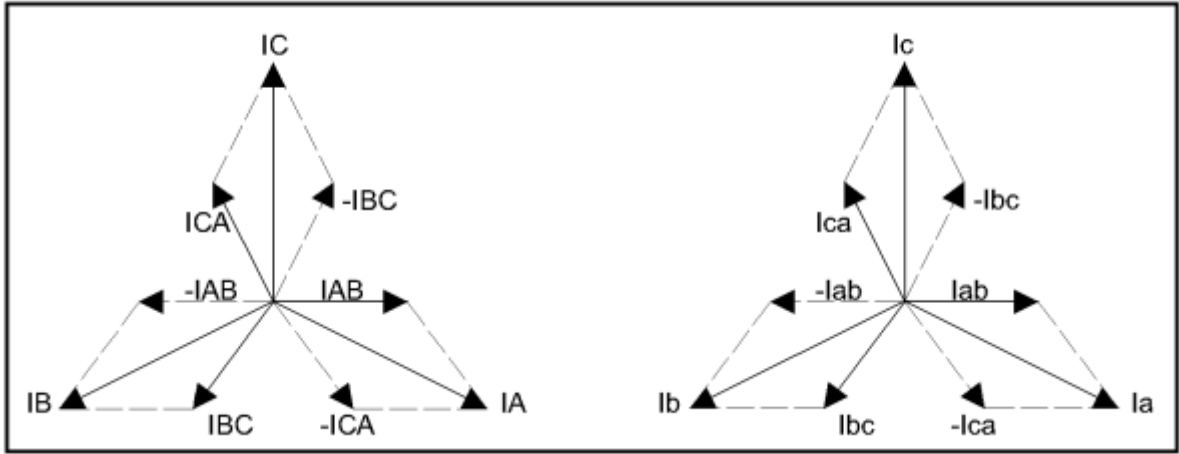


Figura 39. Vectores de corriente conexión delta-delta

$$\begin{aligned}
 I_A &= I_{AB} - I_{CA} & I_a &= I_{ab} - I_{ca} \\
 I_B &= I_{BC} - I_{AB} & I_b &= I_{bc} - I_{ab} \\
 I_C &= I_{CA} - I_{BC} & I_c &= I_{ca} - I_{bc}
 \end{aligned} \tag{77}$$

De donde:

I_A, I_B y I_C representa las corrientes de línea en el primario

I_a, I_b y I_c representa las corrientes de línea en el secundario

Si consideramos un orden de fase abc y las corrientes balanceadas, el valor de la corriente se la obtiene por la ley de cosenos:

$$I_A = \sqrt{I_{AB}^2 + I_{BC}^2 - 2I_{AB}I_{BC} \cos 120^\circ} \tag{78}$$

$$I_{AB} = I_{BC} \tag{79}$$

$$I_A = \sqrt{I_{AB}^2 + 2I_{AB}^2 \left(\frac{1}{2}\right)} \tag{80}$$

$$I_A = \sqrt{3}I_{AB} \angle -30^\circ$$

$$I_B = \sqrt{3I_{BC}^2} \angle -30^\circ \quad (81)$$

$$I_C = \sqrt{3I_{CA}^2} \angle -30^\circ \quad (82)$$

Y de la misma manera para el lado del secundario

$$I_a = \sqrt{3I_{ab}^2} \angle -30^\circ \quad (83)$$

$$I_b = \sqrt{3I_{bc}^2} \angle -30^\circ \quad (84)$$

$$I_c = \sqrt{3I_{ca}^2} \angle -30^\circ \quad (85)$$

La relación de transformación es:

$$\frac{V_A}{V_a} = \frac{V_{AB}}{V_{ab}} = a \quad (86)$$

d.3.3.2. ESTRELLA – ESTRELLA

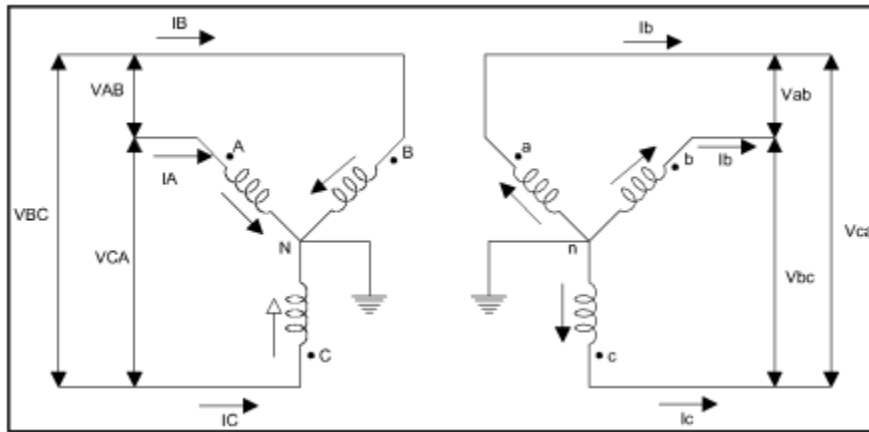


Figura 40. Conexión estrella-estrella

Las relaciones fundamentales para esta conexión son las siguientes:

$$I_A = I_{AN} \quad I_{an} = I_a$$

$$I_B = I_{BN} \quad I_{bn} = I_b$$

$$I_C = I_{CN} \quad I_{cn} = I_c \quad (87)$$

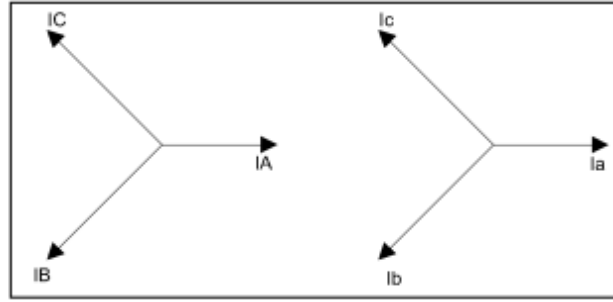


Figura 41. Vectores de corrientes de la conexión estrella-estrella

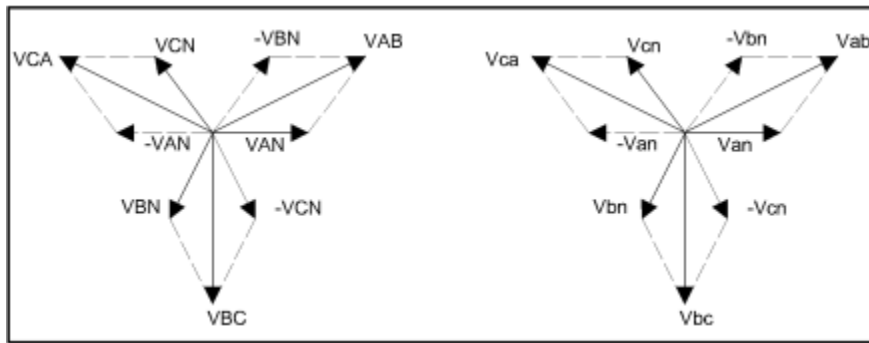


Figura 42. Vectores de tensión conexión estrella-estrella

$$\begin{aligned} V_{AB} &= V_{AN} - V_{BN} & V_{ab} &= V_{an} - V_{bn} \\ V_{BC} &= V_{BN} - V_{CN} & V_{bc} &= V_{bn} - V_{cn} \\ V_{CA} &= V_{CN} - V_{AN} & V_{ca} &= V_{cn} - V_{an} \end{aligned} \quad (88)$$

El valor de los voltajes entre las líneas considerando un orden de fases abc y las conexiones balanceadas, se obtiene de forma semejante que las corrientes para la conexión delta-delta.

$$V_{AB} = \sqrt{V_{AB}^2 + V_{BC}^2 - 2V_{AB}V_{BC} \cos 120^\circ} \quad (89)$$

$$V_{AB} = \sqrt{2V_{AN}^2 + 2V_{AN}^2 \left(\frac{1}{2}\right)}$$

$$V_{AB} = \sqrt{3V_{AN}^2} \angle 30^\circ \quad (90)$$

$$V_{BC} = \sqrt{3V_{BN}^2} \angle 30^\circ \quad (91)$$

$$V_{CA} = \sqrt{3V_{CN}^2} \angle 30^\circ \quad (92)$$

Y de manera igual para el lado del secundario:

$$V_{ab} = \sqrt{3V_{an}^2} \angle 30^\circ \quad (93)$$

$$V_{bc} = \sqrt{3V_{bn}^2} \angle 30^\circ \quad (94)$$

$$V_{ca} = \sqrt{3V_{cn}^2} \angle 30^\circ \quad (95)$$

La relación de transformación es:

$$\frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{\sqrt{3V_{AN}^2}}{\sqrt{3V_{an}^2}} = \frac{V_{AN}}{V_{an}} = a \quad (96)$$

d.3.3.2 DELTA – ESTRELLA

La conexión delta-estrella es una de las más empleadas, se utiliza en sistemas de potencia para elevar los voltajes de generación o de transmisión, en sistemas de distribución (a 4 hilos) para alimentación de fuerza y alumbrado. (HARPER, 1977)

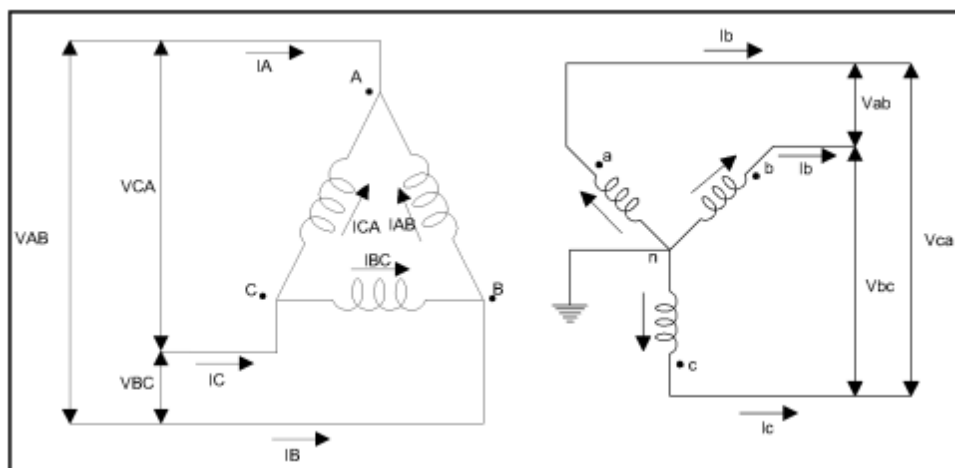


Figura 43. Conexión delta-estrella

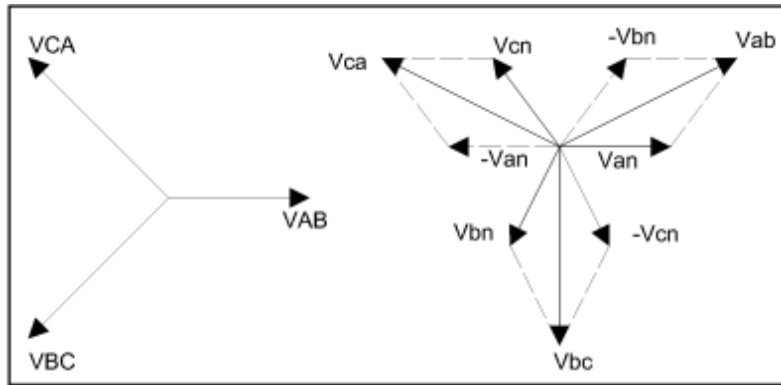


Figura 44. Vectores de tensión conexión delta-estrella

$$V_{AB} = V_A \quad V_{ab} = \sqrt{3V_{an}} \angle 30^\circ \quad (97)$$

$$V_{BC} = V_B \quad V_{bc} = \sqrt{3V_{bn}} \angle 30^\circ \quad (98)$$

$$V_{CA} = V_C \quad V_{ca} = \sqrt{3V_{cn}} \angle 30^\circ \quad (99)$$

El desfaseamiento entre los voltajes del primario y secundario se puede observar en el siguiente diagrama:

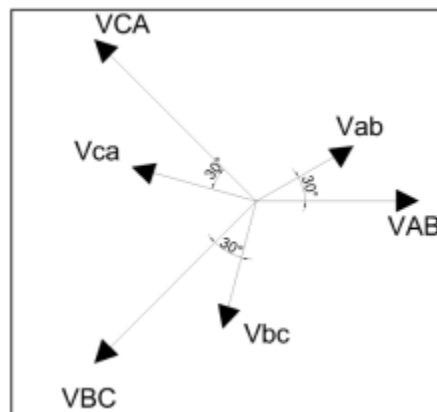


Figura 45. Desfase de tensiones conexión delta-estrella

El diagrama para las corrientes:

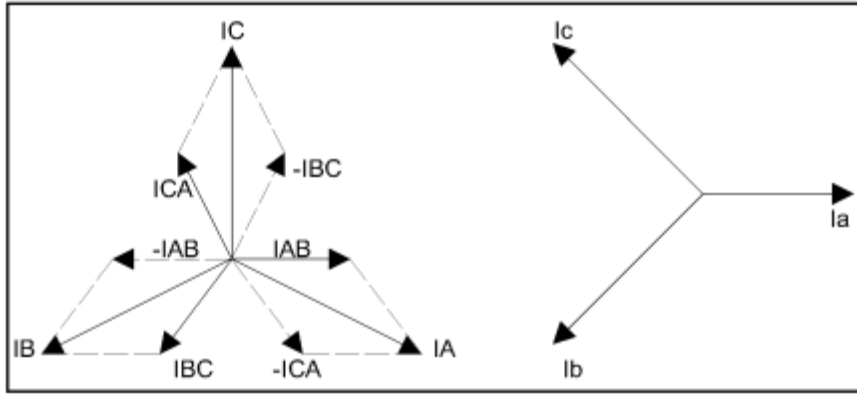


Figura 46. Vectores de corrientes conexión delta-estrella

$$I_A = \sqrt{3}I_{AB} \angle -30^\circ \quad I_{an} = I_a \quad (100)$$

$$I_B = \sqrt{3}I_{BC} \angle -30^\circ \quad I_{bn} = I_b \quad (101)$$

$$I_C = \sqrt{3}I_{CA} \angle -30^\circ \quad I_{cn} = I_c \quad (102)$$

El desfaseamiento entre las corrientes primaria y secundaria se puede observar en el siguiente diagrama:

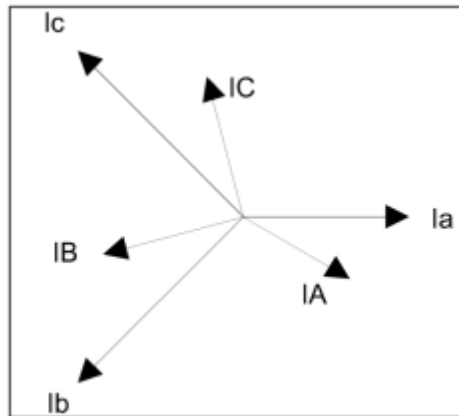


Figura 47. Desfase de corrientes conexión delta-estrella

La relación de transformación es:

$$\frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{V_{AB}}{\sqrt{3}V_{an}} = a \quad (103)$$

d.3.3.2 ESTRELLA – DELTA

La conexión estrella-delta es contraria a la conexión delta-estrella, por ejemplo para elevar la potencia se emplea la conexión delta-estrella y para reducirlos se utiliza estrella-delta. Este sistema es poco usual salvo en algunas ocasiones para distribución (a 3 hilos). (HARPER, 1977)

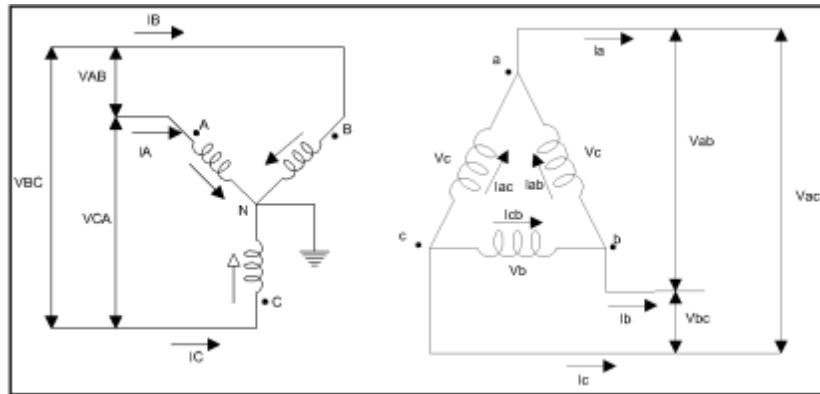


Figura 48. Conexión estrella-delta

$$V_{AB} = \sqrt{3V_{AN}} \angle 30^\circ \quad V_{ab} = V_a \quad (104)$$

$$V_{BC} = \sqrt{3V_{BN}} \angle 30^\circ \quad V_{bc} = V_b \quad (105)$$

$$V_{CA} = \sqrt{3V_{CN}} \angle 30^\circ \quad V_{ca} = V_c \quad (106)$$

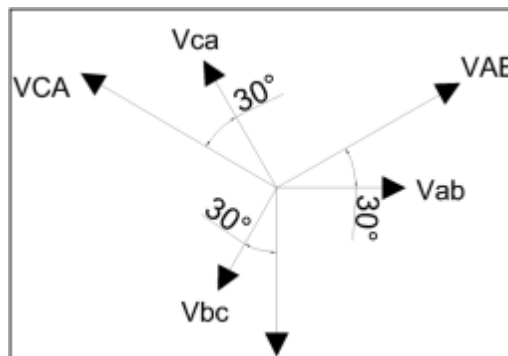


Figura 49. Desfase de tensiones estrella-delta

Las relaciones para la corriente son:

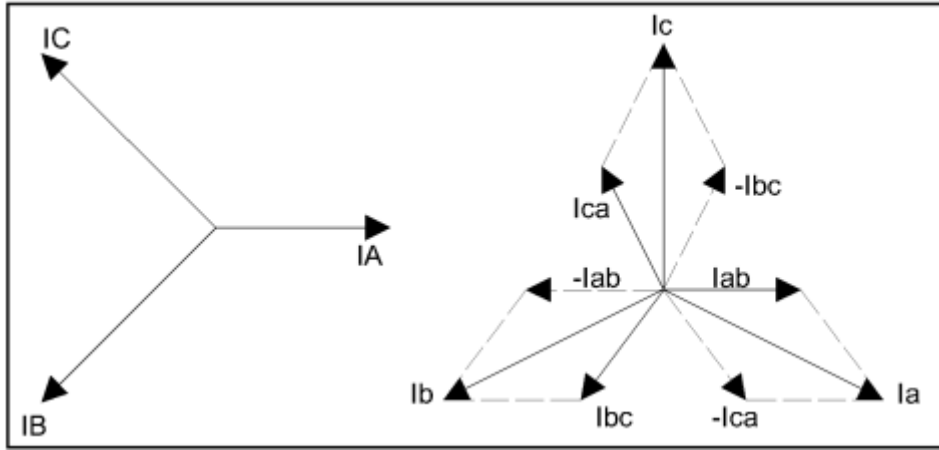


Figura 50. Vectores de corrientes conexión estrella-delta

$$I_A = I_{AN} \quad I_a = \sqrt{3}I_{ab} \angle 30^\circ \quad (107)$$

$$I_B = I_{BN} \quad I_b = \sqrt{3}I_{cb} \angle -30^\circ \quad (108)$$

$$I_C = I_{CN} \quad I_c = \sqrt{3}I_{ac} \angle -30^\circ \quad (109)$$

Se puede observar en el siguiente diagrama fasorial el desfase entre las corrientes del primario y secundario:

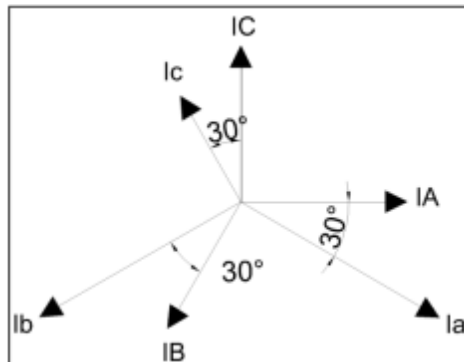


Figura 51. Desfase de corrientes conexión estrella-delta

La relación de transformación es:

$$\frac{V_{AB}}{V_{ab}} = \frac{\sqrt{3}V_{AN}}{V_{an}} = a \quad (110)$$

d.3.4. ENSAYOS DEL TRANSFORMADOR TRIFÁSICO

Es posible determinar muchos parámetros del transformador con la prueba de vacío y prueba de cortocircuito.

d.3.4. 1. ENSAYO EN VACÍO DE UN TRANSFORMADOR.

Para este ensayo se considera únicamente el transformador de dos arrollamientos. Se aplica la tensión nominal V_1 en cualquiera de los arrollamientos del transformador, con el otro arrollamiento abierto, y se toman las lecturas de la potencia de entrada en vacío P_o y la corriente en vacío I_o . Usualmente la tensión nominal se aplica al arrollamiento de baja tensión. (MICHAEL LIWSCHITZ-GARIK CLYDE C. WHIPPLE, 1976)

Circuito para la prueba en vacío:

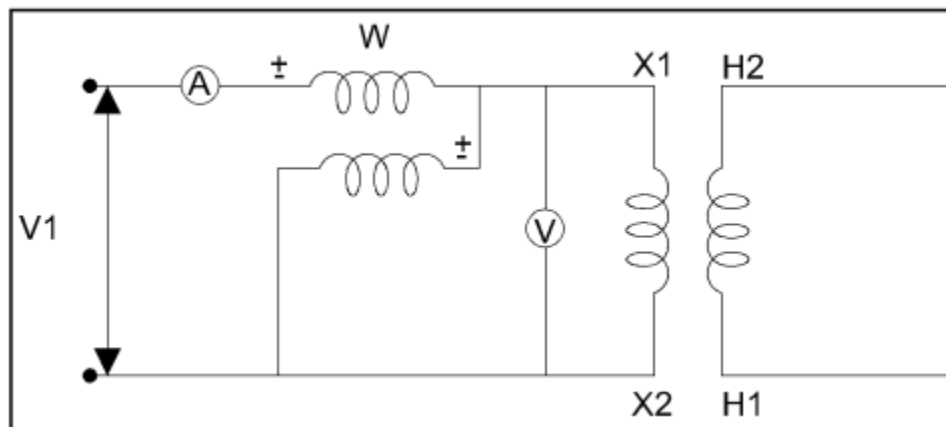


Figura 52. Circuito de conexión del transformador, ensayo en vacío

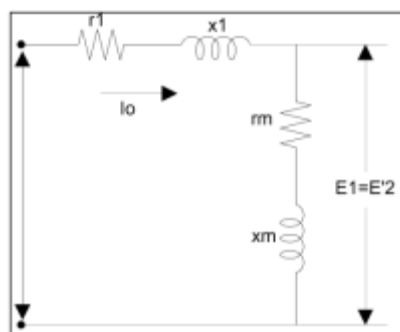


Figura 53. Circuito equivalente del transformador, ensayo en vacío

En vacío la impedancia de la carga es infinita de donde reducimos al siguiente Circuito equivalente para la condición en vacío:

Dados los valores V_1, P_o, I_o y r_1 pueden determinarse los parámetros r_m y x_m las pérdidas en el núcleo P_{h+f} son aproximadamente igual a las pérdidas en vacío P_o ya que las pérdidas en el cobre $I_o r_1^2$ debido a la corriente de vacío que por lo general son muy pequeñas.

$$E'_2 = E_1 = V_1 - I_o Z_1 \quad (111)$$

$$E_1 \approx V_1 \pm I_o x_1 \quad (112)$$

De donde:

x_1 = es la reacctancia de dispersión del arrollamiento primario

r_m = la resistencia del flujo principal

g_m = conductancia del flujo ptincipal

Ya que E_1 es la tensión a través de la impedancia del flujo principal Z_m y r_m es pequeña en comparación con x_m .

$$x_m \approx \frac{E_1}{I_o} \quad (113)$$

$$r_m = \frac{g_m}{g_m^2 + b_m^2} \approx \frac{g_m}{b_m^2} \approx g_m x_m^2 \quad (114)$$

$$g_m = \frac{P_{h+f}}{E_1^2} \approx \frac{P_o}{V_1^2} \quad (115)$$

Los parámetros determinados de las lecturas en vacío están en función del arrollamiento en el que se toman las medidas.

d.3.4. 2 ENSAYO EN CORTOCIRCUITO DE UN TRANSFORMADOR.

En este ensayo usualmente se aplica una tensión reducida al arrollamiento, usualmente es el arrollamiento de alta tensión y con el otro arrollamiento puesto en cortocircuito sólidamente:

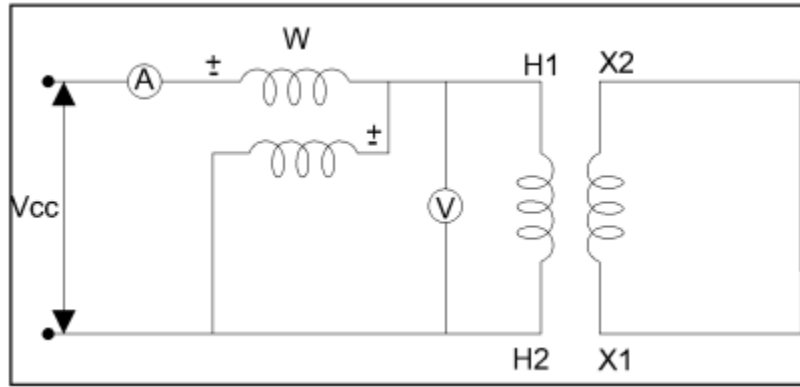


Figura 54. Circuito de conexión del transformador, ensayo en cortocircuito

De donde:

V_{cc} = tensión reducida comunmente llamada tensión de impedancia

I_{cc} = corriente de cortocircuito usualmente la corriente a plena carga

P_{cc} = potencia de cortocircuito

Para las condiciones de cortocircuito tenemos:

$$V_2 = 0$$

$(r'_2 + jx'_2)$ Es pequeña en comparación con x_m

Fluirá muy poca corriente a través de la rama magnetizante, por lo tanto el flujo principal y las perdidas en el hierro son muy pequeños, y la potencia P_{cc} consiste esencialmente de las pérdidas del cobre en ambos arrollamientos.

La potencia de cortocircuito P_{cc} es la pérdida total en el cobre del transformador. P_{cc} puede ser mayor que las pérdidas óhmicas en el cobre, con este concepto deducimos las siguientes fórmulas:

$$Z_e = \frac{V_{cc}}{I_{cc}} \quad (116)$$

$$R_e = \frac{P_{cc}}{(I_{cc})^2} \quad (117)$$

$$X_e = \sqrt{Z_e^2 - R_e^2} \quad (118)$$

De donde:

$Z_e = \text{impedancia equivalente}$

$R_e = \text{resistencia equivalente}$

$X_e = \text{reactancia equivalente de dispersión}$

Suponemos lo siguiente:

$$x_1 = x_2' = \frac{X_e}{2} \quad (119)$$

$$R_e = r_1 + r_2' \quad (120)$$

e.- MATERIALES Y MÉTODOS

e.1 Materiales

Libros de máquinas eléctricas

- Libro Stephen J. Chapman 4e
- Libro George Thaler y Milton Wilcox
- Libro Alexandre Wagemakes y Francisco J. Escribano
- Libro de Gilberto Enrique Harper

Libro de Instrumentación Virtual LabVIEW

- Libro Antoni Mánuel y Domingo Biel
- Libro Joaquim Olivé, Jordi Prat y Frances J. Sánchez

e.2 Métodos

E2.1 (CONSTRUCCIÓN DE LAS PRÁCTICAS DE MÁQUINAS ELÉCTRICAS EN LABVIEW)

E.2.1.1 MÁQUINAS ASÍNCRONAS

E.2.1.1.1 MOTOR ASÍNCRONO

e.2.1.1.1.2 Práctica 1.-

Determinar las características de la rama paralela del motor asíncrono partiendo de los valores del ensayo en vacío.

Datos del circuito equivalente:

$$P_{mec} = 13CV$$

$$V_L = 380V$$

$$f = 50\text{ HZ}$$

$$p = 6\text{ polos}$$

$$P_{fw} = 275W$$

Datos para el ensayo en vacío:

$$V_0 = 380V$$

$$I_{10} = 3A$$

$$P_0 = 700W$$

- la conexión del motor es en triángulo, con $R_1 = 1.5 \Omega$

Circuito equivalente del motor asíncrono.

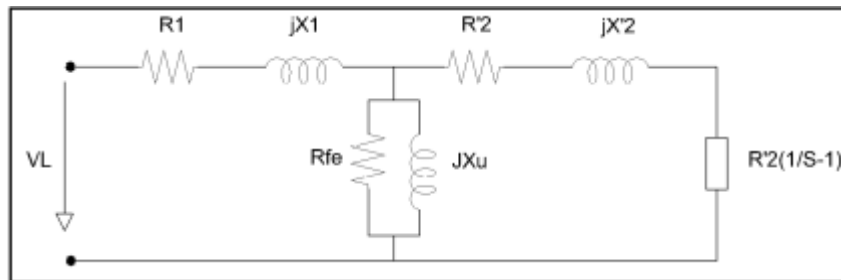


Figura 55. Circuito equivalente del motor asíncrono.

Para resolver la práctica suponemos la conexión en estrella (Y).

$$R_1 = \frac{1.5}{3} = 0.5 \Omega \text{ valor en estrella}$$

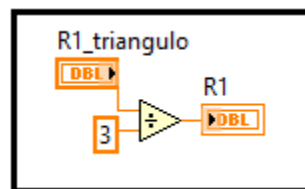


Figura 56. Resistencia Triángulo a resistencia estrella

d.2.1.1.1.2.1 Ensayo en vacío:

De la ecuación 4 obtenemos el Angulo θ_{10}

$$P_0 = \sqrt{3} * U_F * I_{10} * \cos \varphi_{10}$$

$$\cos \varphi_{10} = \frac{P_0}{\sqrt{3} * U_F * I_{10}}$$

$$\cos \varphi_{10} = \frac{700W}{\sqrt{3} * 380V * 3A}$$

$$\varphi_{10} = 69^\circ 23'$$

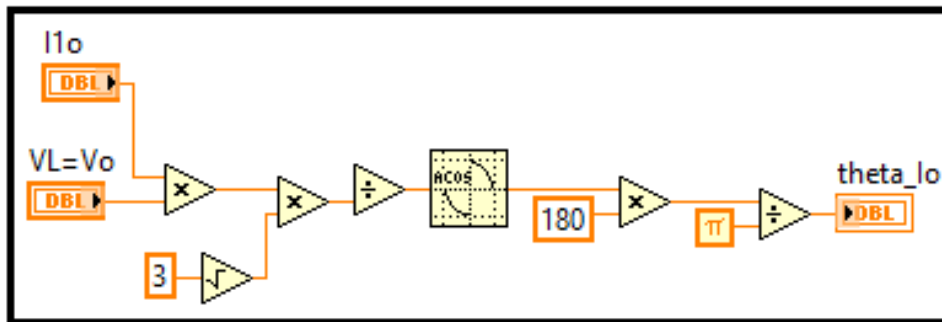


Figura 57. Cálculo del Ángulo theta de vacío

El deslizamiento va ser $S = 0$ por la ecuación 6 y 7

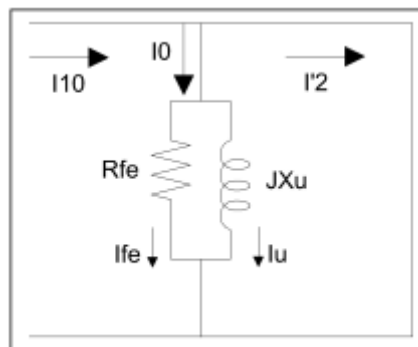
$$S = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

$$n_1 \approx n$$

Se desprecian las pérdidas del cobre del primario y secundario porque la resistencia del rotor tiende al infinito es decir es muy grande (resistiva pura) en comparación con la resistencia del cobre, obtenemos el siguiente circuito resultante:

$$R'_2 \left(\frac{1}{0} - 1 \right)$$

$$R'_2 = \infty$$



De donde se obtiene los parámetros de la rama paralela, utilizamos las ecuaciones:

$$I_{10} = I_0 + I'_2$$

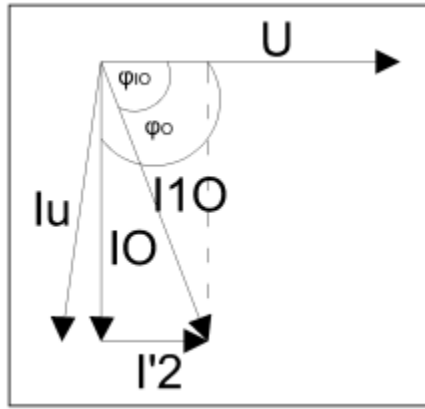


Figura 58. Deducción trigonométrica de corrientes.

$$I_{cu} = I_0 \sin \varphi_0 = I_{10} \sin \varphi_{10}$$

$$U = X \cdot I$$

$$X_{cu} = \frac{U_L}{I_{cu}} = \frac{\frac{U_{nom}}{\sqrt{3}}}{I_{10} \sin \varphi_{10}}$$

$$X_{cu} = \frac{\frac{380V}{\sqrt{3}}}{3A \sin 69^\circ 23'} = 78.21 \, \Omega$$

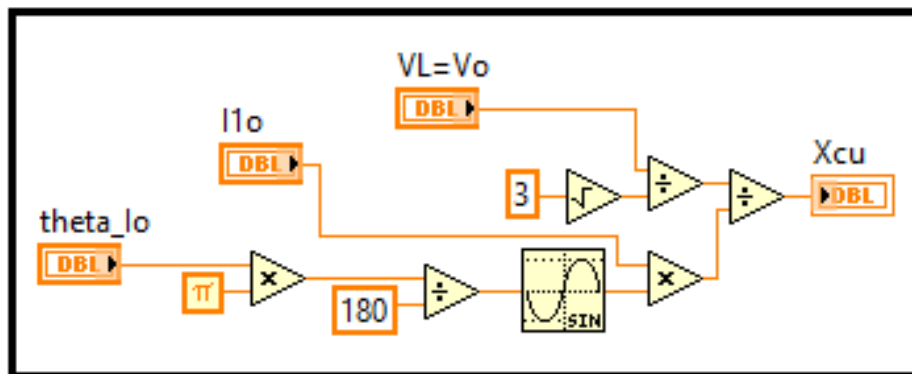


Figura 59. Proceso para el Cálculo de la Reactancia de Magnetización

Por la ley de ohm podemos obtener R_{fe} :

$$R_{fe} = \frac{U_I^2}{P_{fe}}$$

$$P_{fe} = P_0 - P_{cu1} - P_{fw}$$

Para las pérdidas del cobre en el primario obtenemos:

$$P_{cu1} = 3 * R_I - I_{I0}^2$$

$$P_{cu1} = 3 * 0.5\Omega * 3^2 A = 13.5W$$

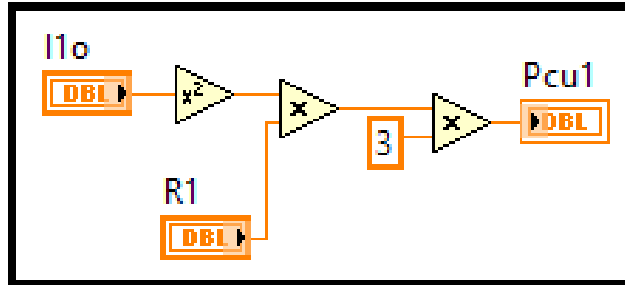


Figura 60. Proceso para el cálculo de Potencia en el núcleo magnético, parte imaginaria

$$P_{fe} = 700W - 13.5W - 275W = 411.5W$$

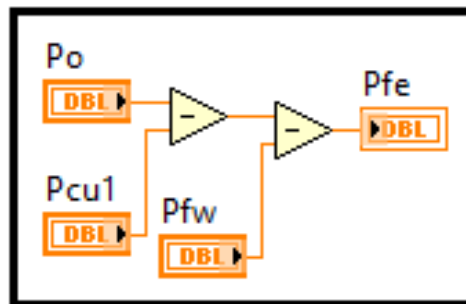


Figura 61. Proceso para el cálculo de la Potencia del núcleo, parte real

$$R_{fe} = \frac{380^2 V}{411.5W} = 350.1\Omega$$

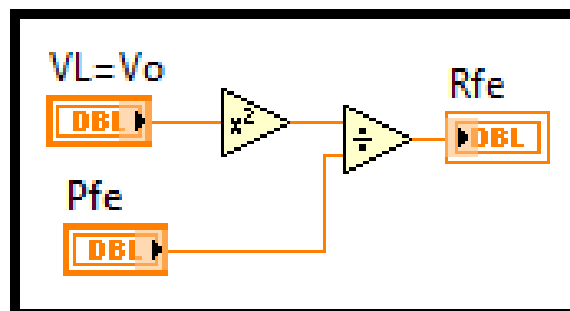


Figura 62. Proceso para el cálculo de la resistencia del núcleo magnético

d.2.1.1.1.3 Ensayo en cortocircuito:

Con los datos para el ensayo en cortocircuito podemos obtener los valores característicos de la rama serie del motor de inducción:

Datos para el ensayo en cortocircuito:

$$V_{CC} = 100V$$

$$I_{CC} = 20A$$

$$P_{CC} = 1200W$$

Circuito equivalente resultante para el ensayo en corto circuito.

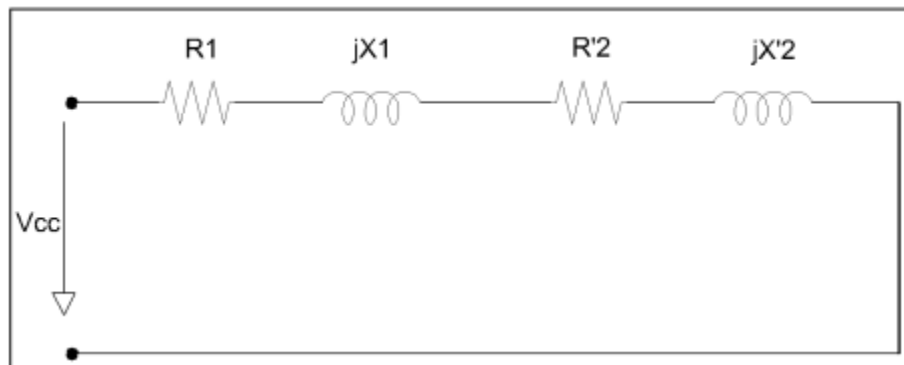


Figura 63. Circuito equivalente para el ensayo en cortocircuito.

Utilizamos la ecuación 20, 21 para obtener el Angulo φ_{CC} para el triángulo de vectores y determinar los valores de la rama serie:

$$P_{CC} = \sqrt{3} * U_{CC} * I_{CC} * \cos \varphi_{CC}$$

$$\cos \varphi_{CC} = \frac{P_{CC}}{\sqrt{3} * U_{CC} * I_{CC}}$$

$$\varphi_{CC} = \frac{1200W}{\sqrt{3} * 100V * 20A} \cos^{-1} = 69^{\circ}73$$

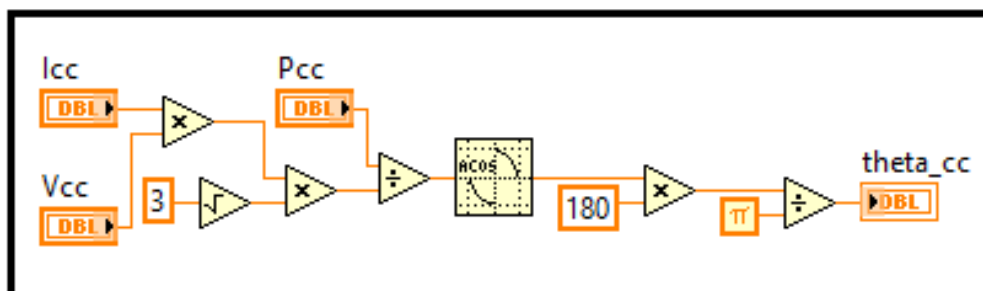


Figura 64. Proceso para el cálculo de theta en cortocircuito

Con la ecuación 22 y 23 obtenemos la impedancia equivalente para cortocircuito Z_{CC} :

$$U = Z * I$$

$$Z_{CC} = \frac{U_{CC}}{I_{CC}} = \frac{\frac{U_{CC}}{\sqrt{3}}}{I_{CC}}$$

$$Z_{CC} = \frac{\frac{100V}{\sqrt{3}}}{20A} = 2.88\Omega$$

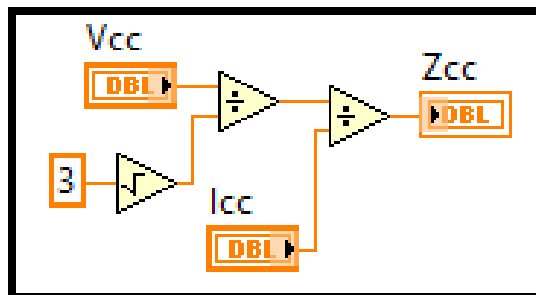


Figura 65. Proceso para el cálculo de la Impedancia en cortocircuito

Con el triángulo vectorial podemos obtener la resistencia y reactancia del ensayo en cortocircuito:

$$R_{CC} = Z_{CC} \cos \varphi_{CC}$$

$$R_{CC} = 288\Omega \cos 69^{\circ}73' = 1\Omega$$

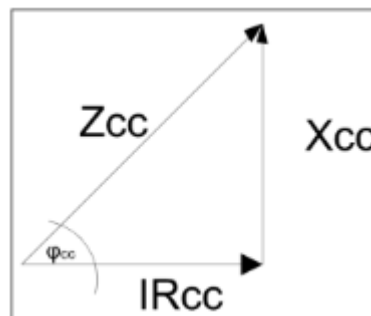


Figura 66. Por trigonometría se encuentra la resistencia y reactancia de cortocircuito.

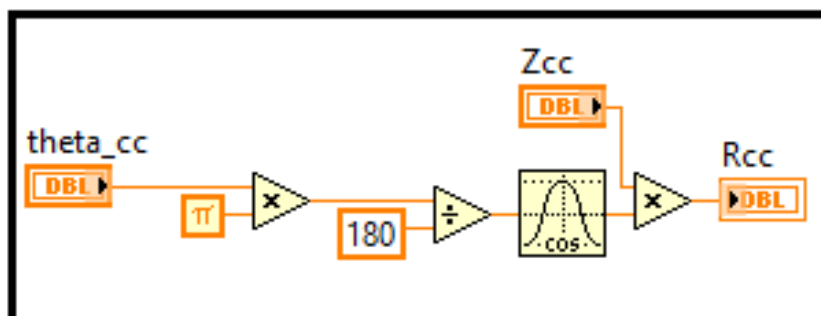


Figura 67. Proceso para el cálculo de la resistencia equivalente del ensayo en cortocircuito

$$X_{CC} = R_{CC} \sin \varphi_{CC}$$

$$X_{CC} = 1\Omega \sin 69^{\circ}73' = 2.7\Omega$$

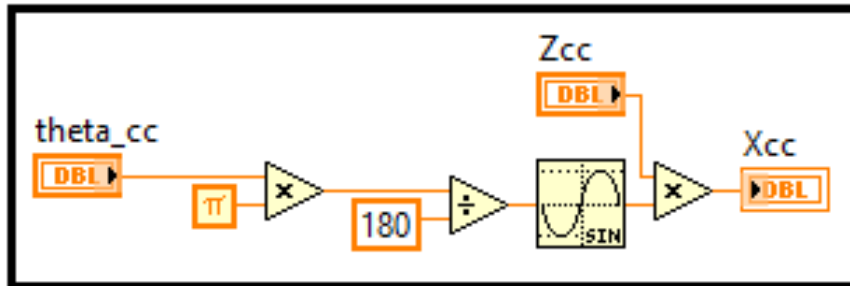


Figura 68. Proceso para el cálculo de la reactancia equivalente en el ensayo de cortocircuito

Con las ecuaciones 26 y 28 obtenemos los valores de la rama serie del circuito equivalente del motor asíncrono:

$$R_{CC} = R_1 + R'_2$$

$$R'_2 = R_{CC} - R_1 = 1\Omega - 0.5\Omega = 0.5\Omega$$

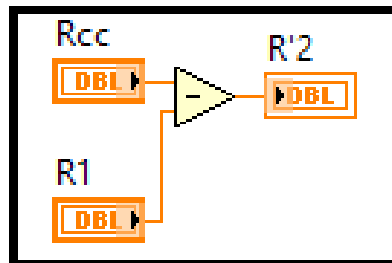


Figura 69. Proceso para el cálculo de la resistencia de estator

$$\frac{X_{CC}}{2} = X_1 = X'_2$$

$$X_1 = X'_2 = \frac{2.7\Omega}{2} = 1.35\Omega$$

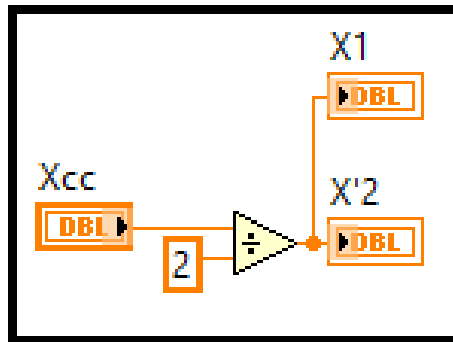


Figura 70. Proceso para el cálculo de Reactancia del Inducido y Reactancia del estator

d.2.1.1.4 Ensayo para la curva Tpar-Velocidad de sincronismo del motor de inducción.

- Con los valores obtenidos del ensayo de vacío y cortocircuito podemos realizar el cálculo para la gráfica par-velocidad del motor asíncrono:

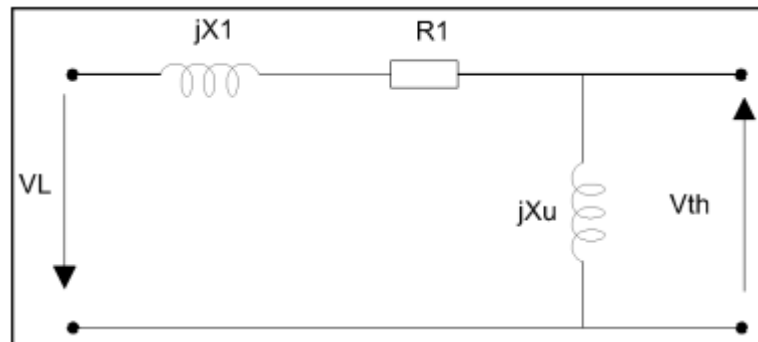


Figura 71. Circuito equivalente para determinar el voltaje de Thevenin.

Datos para la gráfica:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1000 - 960}{1000} = 0.04 * 100\% = 4\%$$

$$n_s = \frac{120 * fe}{p} = \frac{120 * 50Hz}{6} = 1000rpm$$

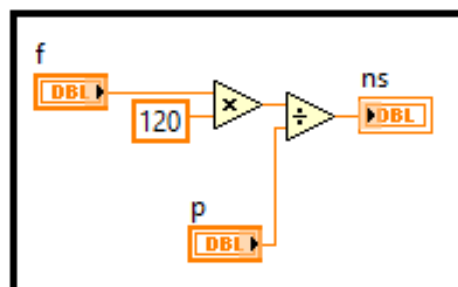


Figura 72. Proceso para el cálculo de la velocidad de sincronismo

$$n = 960rpm$$

$$\omega_{sin} = n * \frac{2\pi}{60s} = 960 * \frac{2\pi}{60s} = 100.5$$

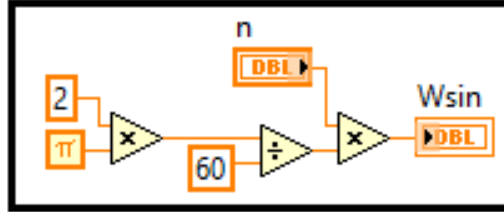


Figura 73. Proceso para el cálculo de la velocidad del rotor en (radianes)

Obtenemos los valores de Thevenin:

$$V_{th} = \frac{X_u}{\sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_u)^2}} = \frac{78.21\Omega}{\sqrt{0.5^2\Omega + (1.35\Omega + 78.21\Omega)^2}} = 215.66V$$

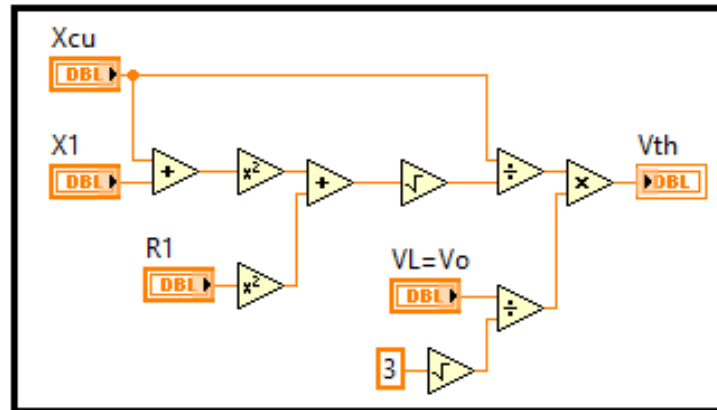


Figura 74. Proceso para el cálculo de la tensión de Thevenin

Se reduce el circuito para obtener la impedancia de Thevenin (Z_{th}):

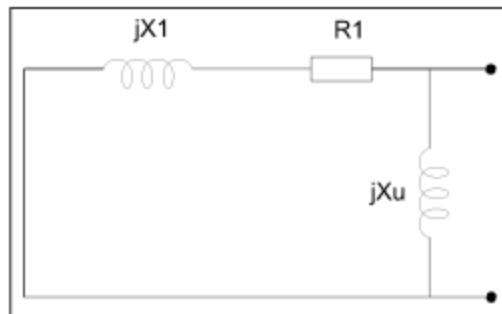


Figura 75. Circuito reducido para determinar la impedancia de Thevenin.

$$Z_{th} = \frac{jX_u(R_1 + jX_1)}{R_1 + j(X_1 + X_u)}$$

$$Z_{th} = \frac{(0 * R_1) - (iX_u)(iX_1) + (0)[iX_1] + (iX_u)(R_1)}{R_1 + j(X_1 + X_u)}$$

$$Z_{th} = \frac{(0 * 0.5\Omega) - (78.21\Omega)(i1.35\Omega) + (0)[i0.5\Omega] + (78.21\Omega)(0.5\Omega)}{0.5\Omega + j(1.35\Omega + 78.21\Omega)}$$

$$Z_{th} = \frac{-(78.21 * 1.35)i^2 + (78.21 * 0.5)i}{0.5 + j(1.35 + 78.21)}$$

$$Z_{th} = \frac{-105.58 + j39.105}{0.5 + j79.56}$$

$$Z_{th} = \frac{(-105.58)(0.5) + (39.105 * 79.56)}{(0.5)^2 + (79.56)^2} + \frac{(39.105)(0.5) - (105.58)(79.56)}{(0.5)^2 + (79.56)^2}$$

$$Z_{th} = 0.4831 + j1.33 = 1.41|70^\circ 03'$$

$$R_{th} = 0.4831\Omega$$

$$X_{th} = 1.33\Omega$$

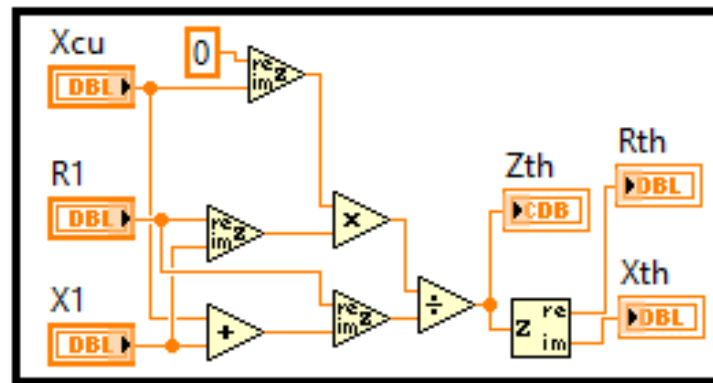


Figura 76. Proceso para el cálculo de la impedancia de Thevenin como su resistencia y reactancia

Con los valores de Thevenin podemos calcular el par de arranque (T_A), el de par de inducción (T_{ind}) y el par máximo (T_{MAX}):

$$T_A = \frac{3 * V_{th}^2 * R'_2}{wsin[(R_{th} + R'_2)^2 + (X_{th} + X'_2)^2]}$$

$$T_A = \frac{3 * 215.66^2 V * 0.5 \Omega}{100.5 [(0.4831 \Omega + 0.5 \Omega)^2 + (1.33 \Omega + 1.35 \Omega)^2]} = 85.18 N.m$$

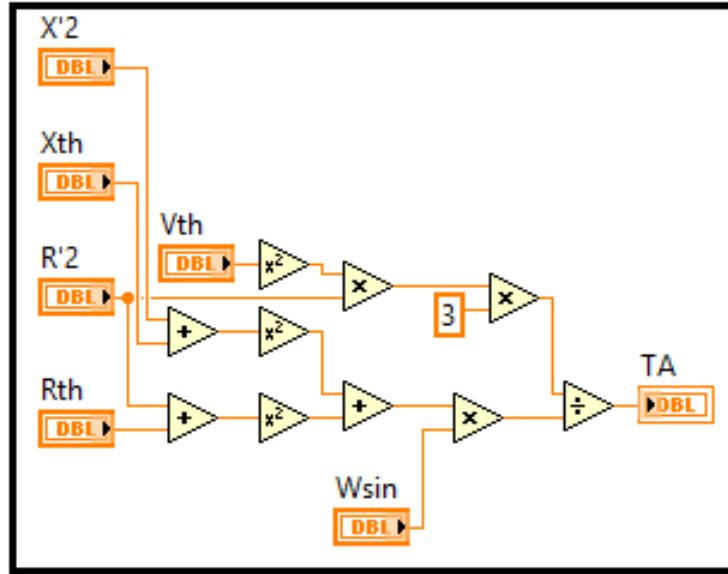


Figura 77. Proceso para el cálculo del Par de Arranque

$$T_{ind} = \frac{3V_{th}^2 \frac{R'_2}{S}}{wsin \left[\left(R_{th} + \frac{R'_2}{S} \right)^2 + (X_{th} + X'_2)^2 \right]}$$

$$T_{ind} = \frac{3(215.66)^2 V \frac{0.5 \Omega}{0.04}}{100.5 \left[\left(0.483 V + \frac{0.5 \Omega}{0.04} \right)^2 + (1.33 \Omega + 1.35 \Omega)^2 \right]} = 98.74 N.m$$

$$T_{max} = \frac{3 * V_{th}^2}{2wsin \left[R_{th} + \sqrt{(R_{th})^2 + (X_{th} + X'_2)^2} \right]}$$

$$T_{max} = \frac{3 * 215.66^2 V}{2(100.5) \left[0.4831 \Omega + \sqrt{(0.483 \Omega)^2 + (1.33 \Omega + 1.35 \Omega)^2} \right]} = 216.5 N.m$$

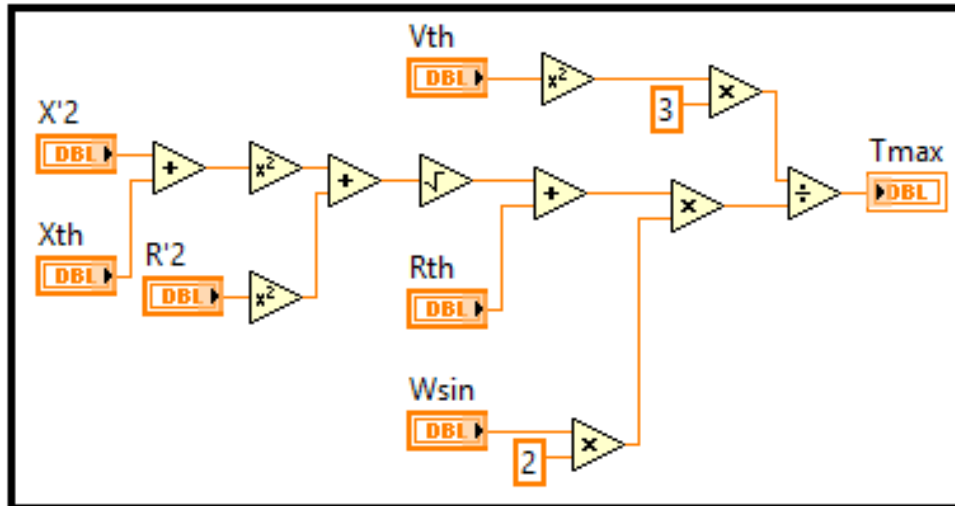


Figura 78. Proceso para el cálculo del Par-máximo

Ecuaciones necesarias para la gráfica (par-velocidad) en el programa labVIEW:

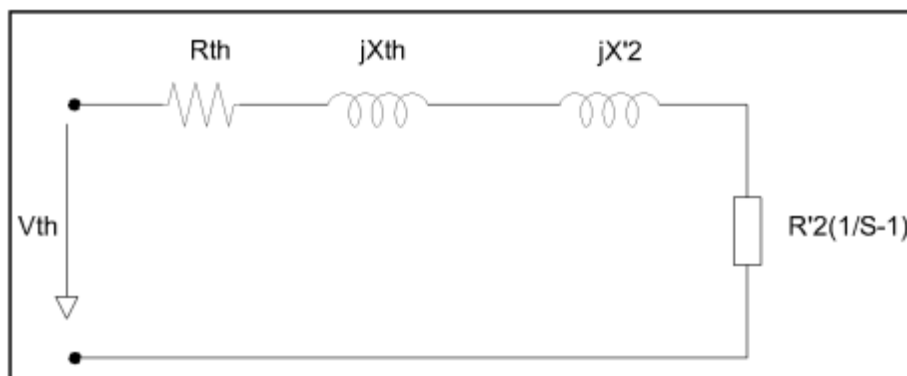


Figura 79. Circuito equivalente con todos los valores característicos determinados por Thevenin.

- Al vector deslizamiento (S) de le dará 50 valores para graficar pero el primero será 0.001 para evitar errores de cálculo si partimos de cero

$$S = \frac{(0:1:50)}{50}$$

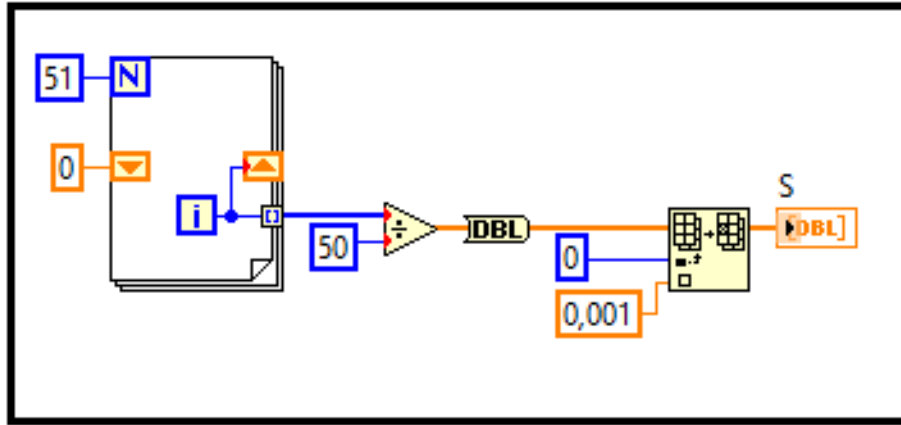


Figura 80. Proceso para calcular el deslizamiento con variaciones de cincuenta valores

$$n_m = (1 - S_{1...50})n_s$$

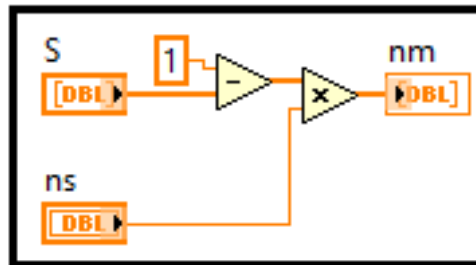


Figura 81. Proceso para el cálculo de la velocidad de rotor

Ecuación para calcular la curva par-velocidad de sincronismo, introduciendo el vector $S_{1...50}$ para la variación de valores en el eje X.

$$T_{1...50} = \frac{3V_{th}^2 \left(\frac{R'_2}{S_{1...50}} \right)}{w_{sin} \left[\left(\frac{R_{th} * R'_2}{S_{1...50}} \right)^2 + (X_{th} + X'_2)^2 \right]}$$

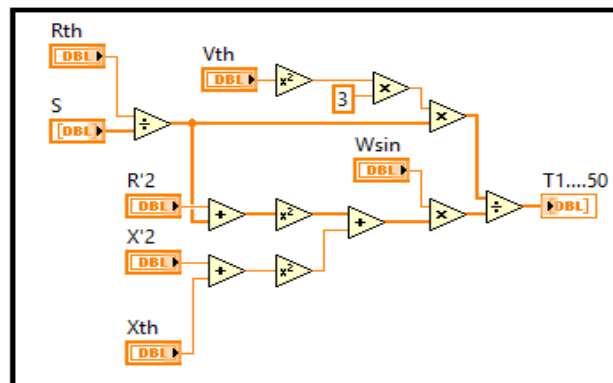


Figura 82. Proceso para el cálculo de la curva par-velocidad de sincronismo.

Tablero principal del motor asíncrono con los ensayos de vacío, cortocircuito y gráfica de par de inducción-velocidad de sincronismo.

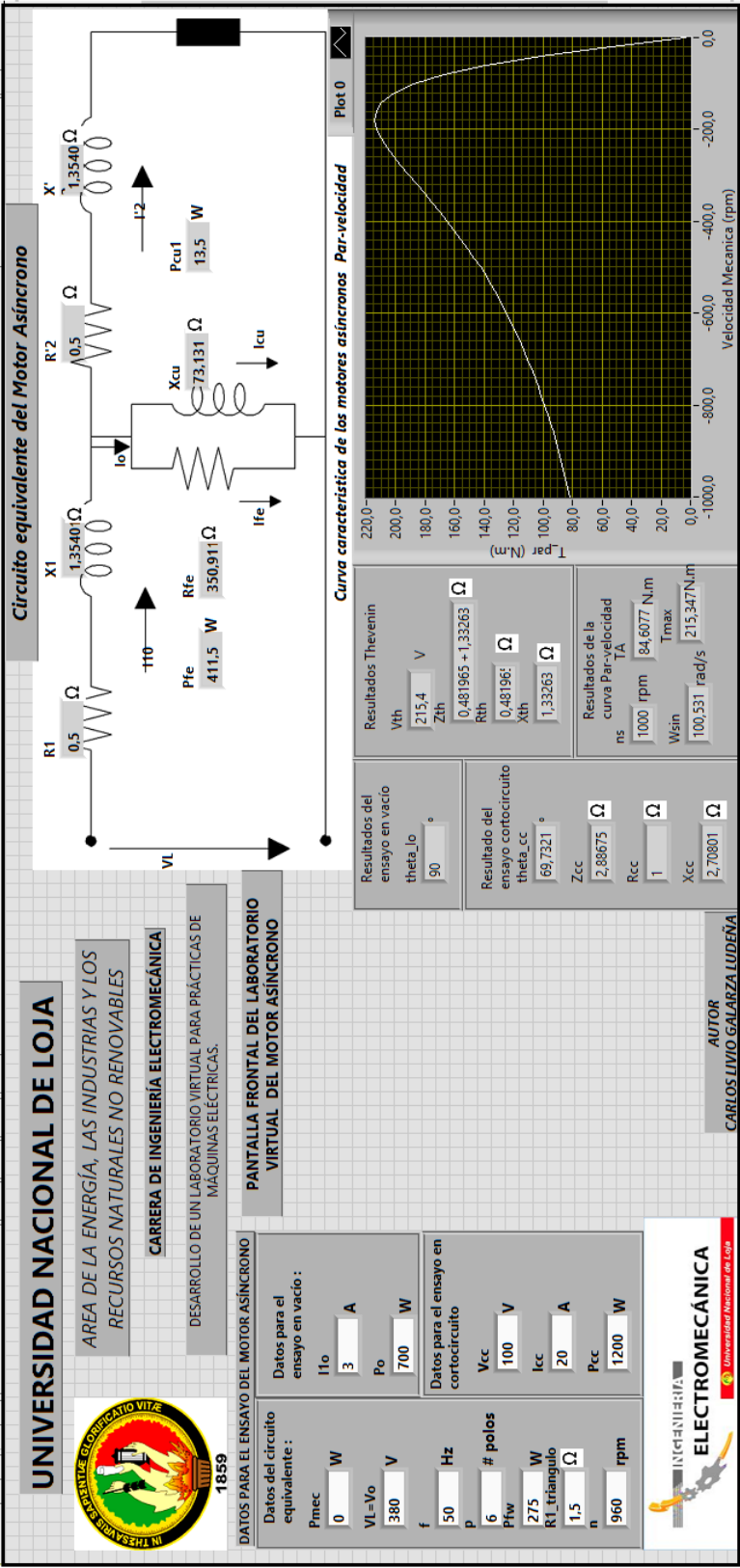


Figura 83. Panel Frontal del laboratorio Virtual del Motor Asíncrono

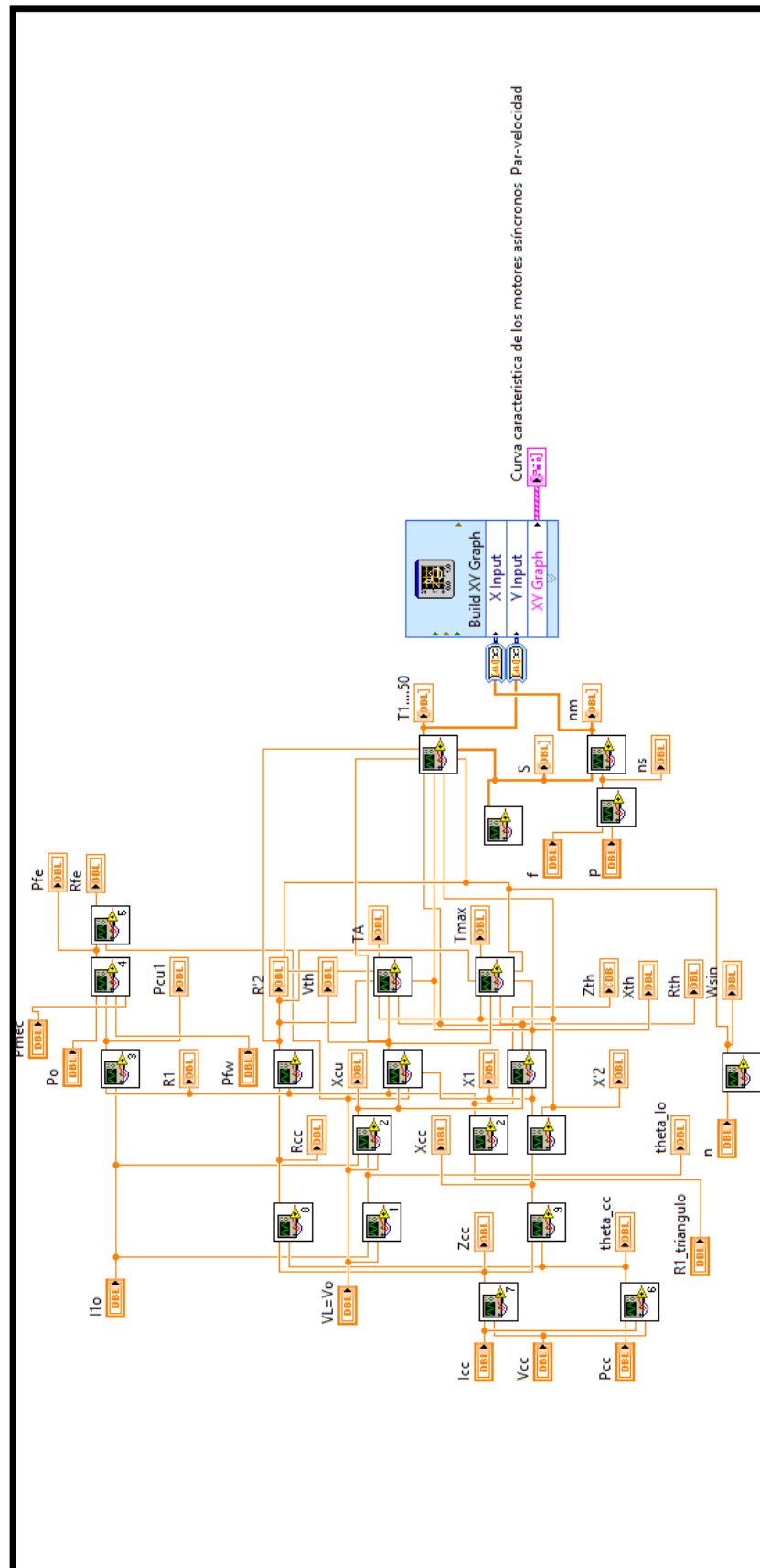


Figura 84. Diagrama de Bloques del laboratorio Virtual del Motor Asíncrono

Resultado del programa labVIEW “curva característica del motor asíncrono o inducción
“Tpar-Velocidad sincronismo”

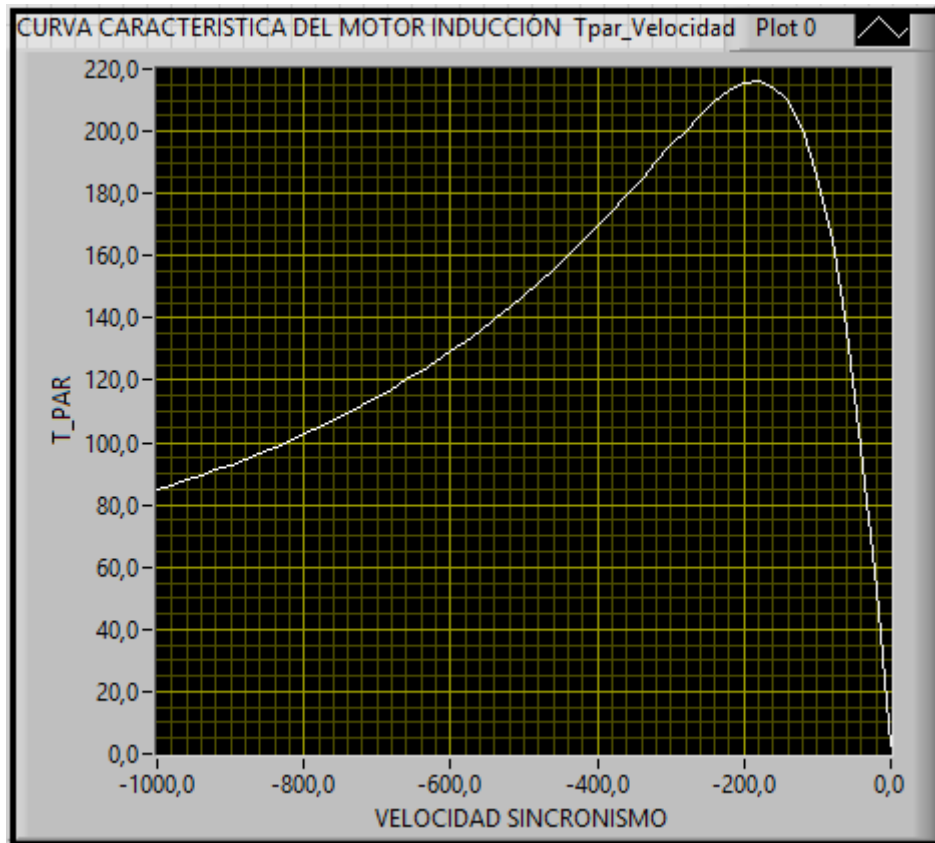


Figura 85. Curva del motor Asíncrono par-velocidad

d.2.1.1.2 GENERADOR ASÍNCRONO

d.2.1.1.2.1. práctica 2.-

d.2.1.1.2.1.1 Ensayo para la curva Tpar-velocidad de sincronismo del generador de inducción.

Para graficar la curva Par Velocidad del Generador con los mismos valores del motor asíncrono lo realizamos teniendo en cuenta el deslizamiento (S):

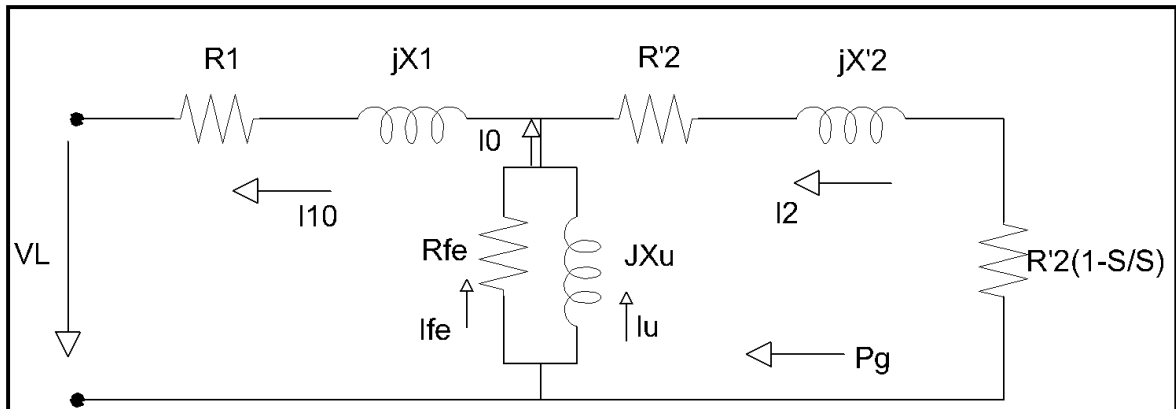


Figura 86. Circuito equivalente al generador asíncrono

En el estudio de la máquina asíncrona como generador se basa especialmente en el deslizamiento, el deslizamiento del generador es negativo porque la velocidad del rotor es mayor a la velocidad del sincronismo:

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{960 - 1000}{960} = -0.04$$

$$\omega_s = n \frac{2\pi}{60} = (1000) \frac{2\pi}{60} = 104.7$$

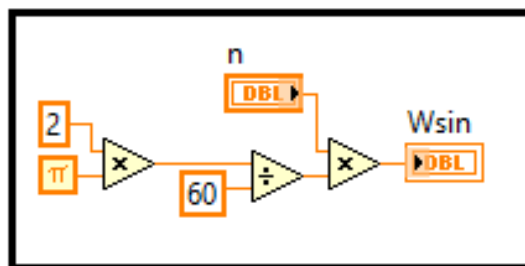


Figura 87. Proceso para el cálculo de la velocidad de sincronismo del generador

$$T_{ind} = \frac{3V_{th}^2 \frac{R'_2}{S}}{wsin \left[\left(R_{th} + \frac{R'_2}{S} \right)^2 + (X_{th} + X'_2)^2 \right]}$$

$$T_{ind} = \frac{3(215.66)^2 \frac{0.5\Omega}{-0.04}}{104.7 \left[\left(0.483\Omega + \frac{0.5\Omega}{-0.04} \right)^2 + (1.33\Omega + 1.35\Omega)^2 \right]} = -101.62\Omega$$

Teniendo la variación de la velocidad de sincronismo y el deslizamiento podemos graficar la curva par-velocidad:

$$(-)S = \frac{(0:1:50)}{50}$$

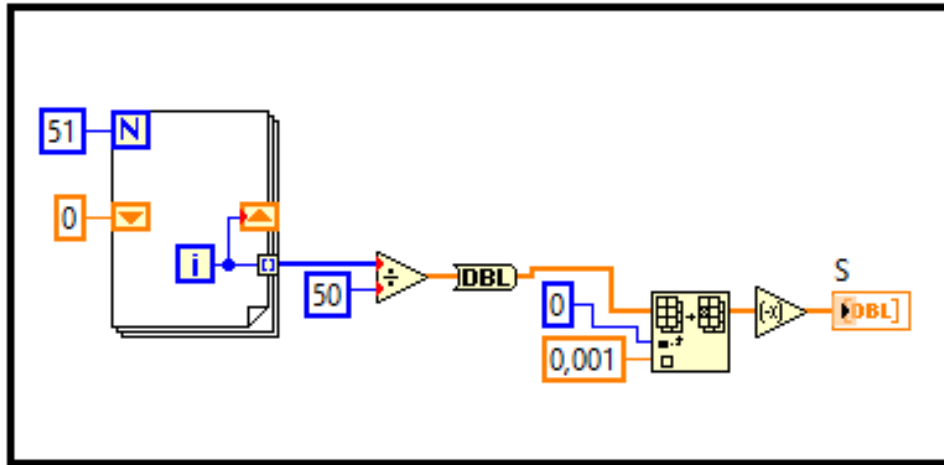


Figura 88. Proceso para el cálculo del deslizamiento del generador

$$n_m = 1 - (-S_{1.....50})n_s$$

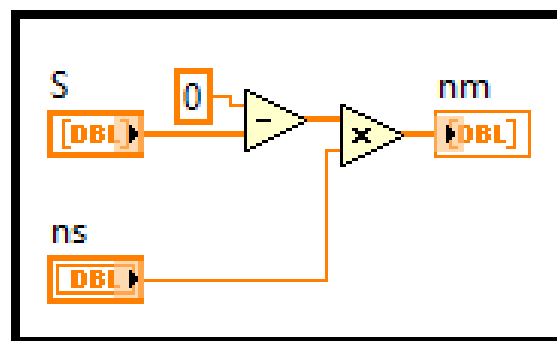


Figura 89. Proceso para el cálculo de la velocidad del rotor

$$T_{1...50} = \frac{3V_{th}^2 \left(\frac{R'_2}{-S_{1...50}} \right)}{w_{sin} \left[\left(\frac{R_{th} * R'_2}{-S_{1...50}} \right)^2 + (X_{th} + X'_2)^2 \right]}$$

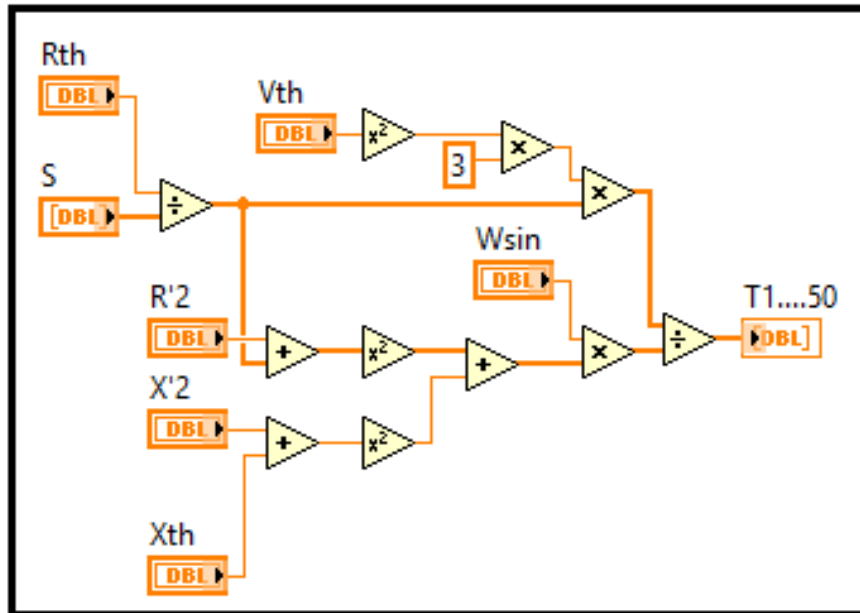
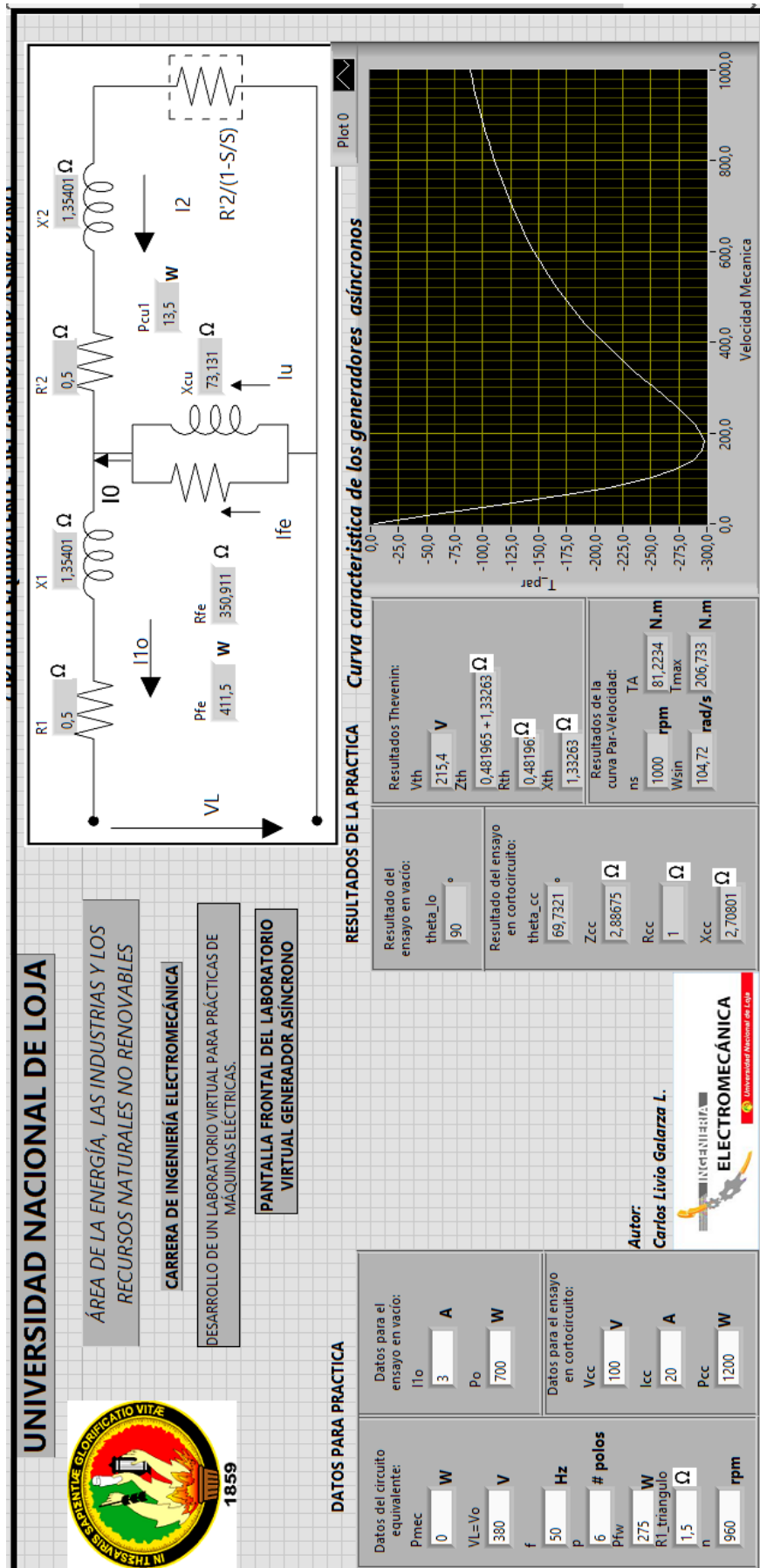


Figura 90. Proceso para el cálculo de la curva (T-Par) del generador

Tablero principal del generador de inducción para la gráfica Tpar-velocidad de sincronismo.



RESULTADOS DE LA PRACTICA

Resultados Thevenin:		Resultados de la curva Par-Velocidad:	
V _{th}	215,4 V	ns	1000 rpm
Z _{th}	0,481965 + j1,33263 Ω	W _{sin}	104,72 rad/s
R _{th}	0,48196 Ω	T _{max}	206,733 N.m
X _{th}	1,33263 Ω		

Curva característica de los generadores asíncronos



Plot 0

Figura 91. Pantalla frontal del laboratorio de generador asíncrono

Conexión total de la gráfica curva Tpar-velocidad del generador de inducción.

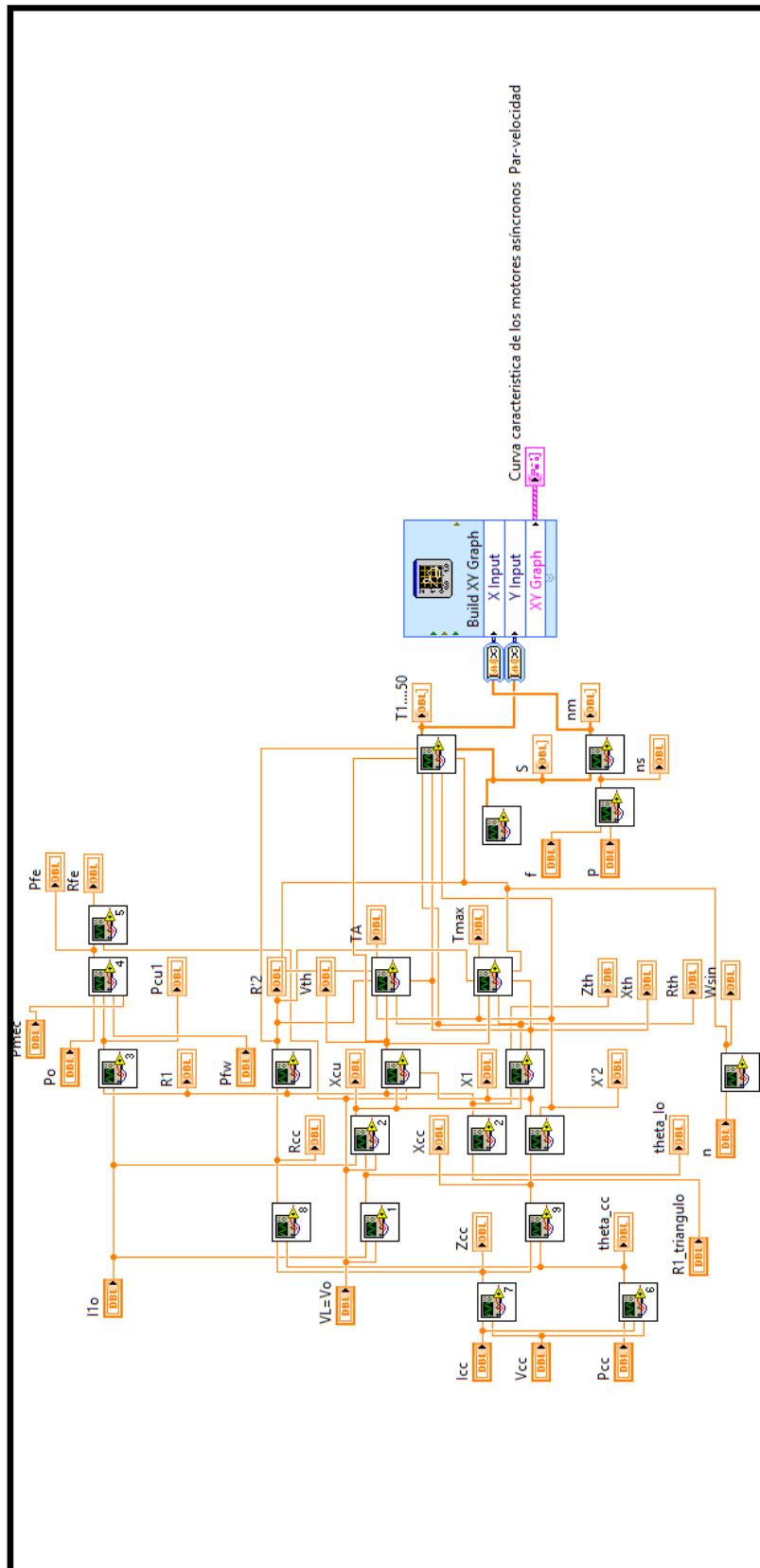


Figura 92. Diagrama de Bloques del generador asíncrono

Curva característica del generador de inducción “Tpar-velocidad sincronismo”

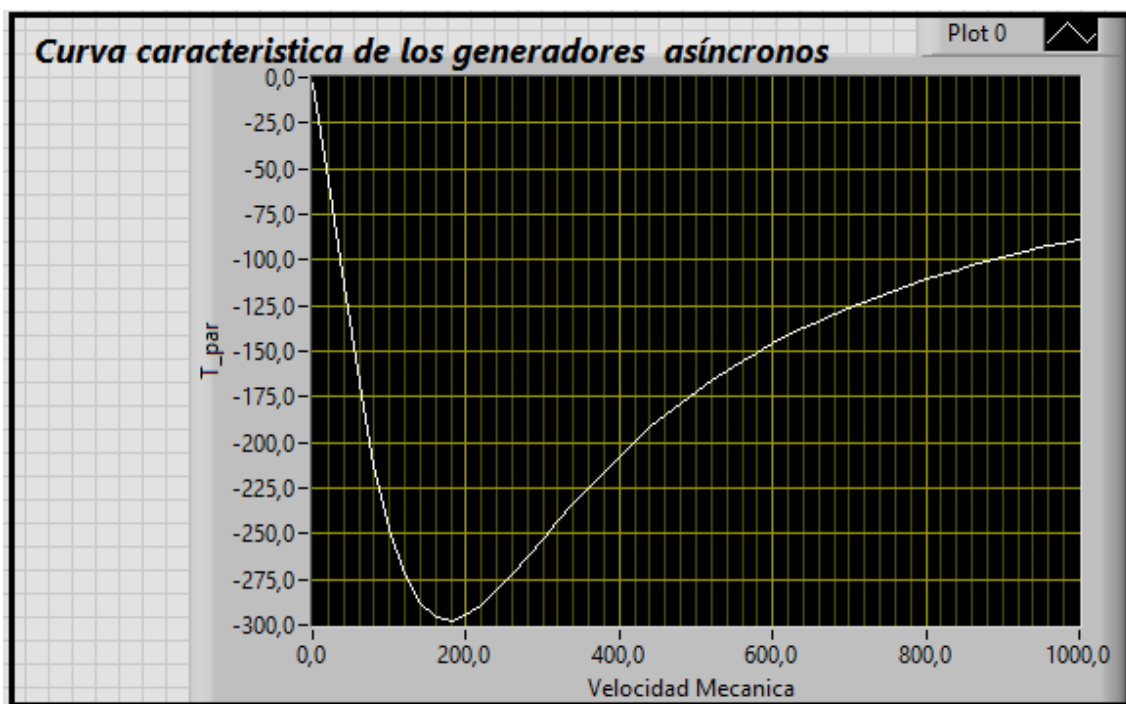


Figura 93. Curva característica del generador asíncrono "Tpar_velocidad"

D.2.1.2.MÁQUINAS SÍNCRONAS

D.2.1.2.1. GENERADOR SÍNCRONO

d.2.1.2.1.1. Práctica 3.-

Considerando que el generador está operando en vacío realizar la gráfica de características de los terminales y corriente de línea conforme varía la corriente de su inducido desde vacío hasta plena carga con un factor de potencia en adelanto 0.8 y en retraso 0.8 suponer que la corriente de campo permanece constante:

Datos:

$p = 6$ número de pares de polos

$V_0 = 480V$

$f = 50Hz$

Conexión Y

$R = 1\Omega$

$I_A = 60A$

$\cos \varphi = 0.8$

$P_{fri} = 1.5 kW$

$P_{nucleo} = 1.0 kW$

Circuito equivalente del generador síncrono para la práctica:

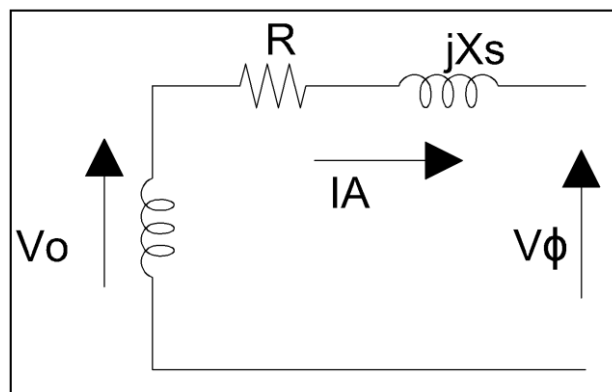


Figura 94. Circuito equivalente del generador síncrono para la práctica

Para obtener el voltaje de fase en vacío tenemos:

$$V_{\phi} = \frac{V_0}{\sqrt{3}} = \frac{480}{\sqrt{3}} = 277.12V$$

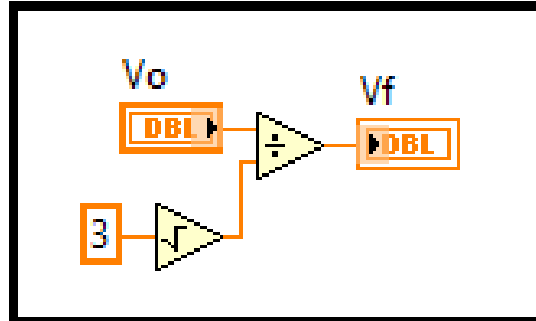


Figura 95. Proceso para el cálculo de la tensión de fase

El voltaje interno generador va ser igual al voltaje de fase:

$$V_{\phi} = \frac{V_0}{\sqrt{3}} = \frac{480}{\sqrt{3}} = 277.12V = E_A$$

Velocidad del generador va ser:

$$f_e = \frac{nm * p}{120}$$

$$nm = \frac{120 * f_e}{p} = \frac{120 * 50_{Hz}}{6} = 1000rpm * \frac{2\pi}{60} = 104.7 rad/s$$

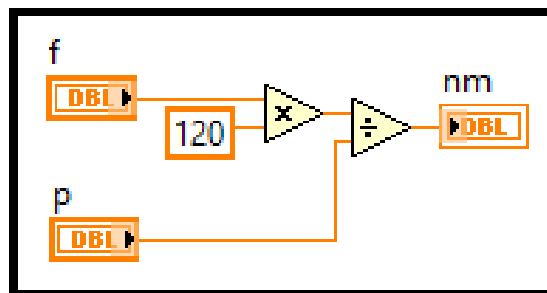


Figura 96. Proceso para el cálculo de la velocidad del generador

Con factor de potencia en retraso ($\cos \varphi = -0.8$) calculamos el voltaje de fase y el voltaje de línea:

$$\theta = -0.8 \cos^{-1} = -36^{\circ}86'$$

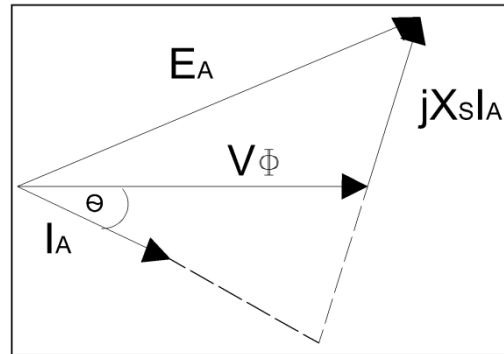


Figura 97. Por trigonometría se obtiene la tensión de línea con carga en retraso.

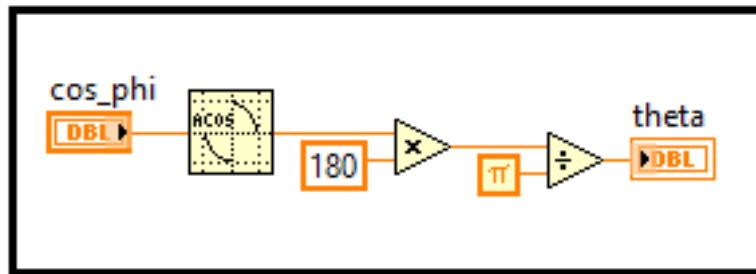


Figura 98. Proceso para el cálculo del ángulo theta de la corriente I_A

$$jX_S I_A = j(1.0)(60 \angle 36.86) = 60 \angle 53^{\circ}14$$

Despejamos el voltaje de fase V_{ϕ} :

$$E_A^2 = (V_{\phi} + X_S I_A \sin \theta)^2 + (X_S I_A \cos \theta)^2$$

Con el factor de potencia en retraso calculamos la tensión de fase y la tensión de línea:

$$V_{\phi} = \sqrt{E_A^2 - (X_S I_A \cos \theta)^2} - X_S I_A \sin \theta$$

$$V_{\phi} = \sqrt{277.12^2 V - (1 * 60 \cos 36^{\circ}86')^2} - 1 * 60 \sin 36^{\circ}86' = 236.93 V$$

$$V_{\phi} = \frac{V_L}{\sqrt{3}}$$

$$V_L = V_{\phi} * \sqrt{3} = 236.93 V * \sqrt{3} = 410.37 V$$

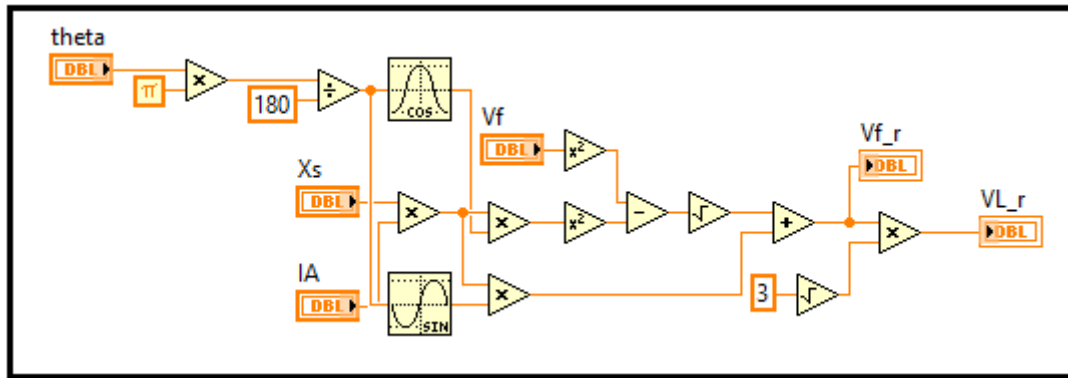


Figura 99. Proceso para el cálculo de tensión de fase y tensión de línea con carga en retraso

Con factor de potencia unitario calculamos el voltaje de fase y el voltaje de línea:

$$E_A^2 = (V_\Phi)^2 + (X_S I_A)^2$$

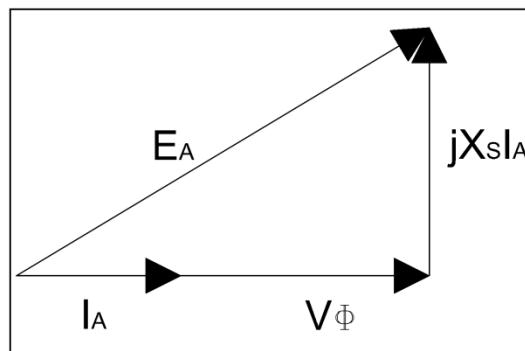


Figura 100. Por trigonometría se obtiene la tensión de línea con carga unitaria.

$$V_\Phi = \sqrt{E_A^2 - (X_S I_A)^2} = \sqrt{277.12_V^2 - (1_\Omega * 60_A)^2} = 270.4V$$

$$V_L = V_\Phi * \sqrt{3} = 270.4V * \sqrt{3} = 468.38V$$

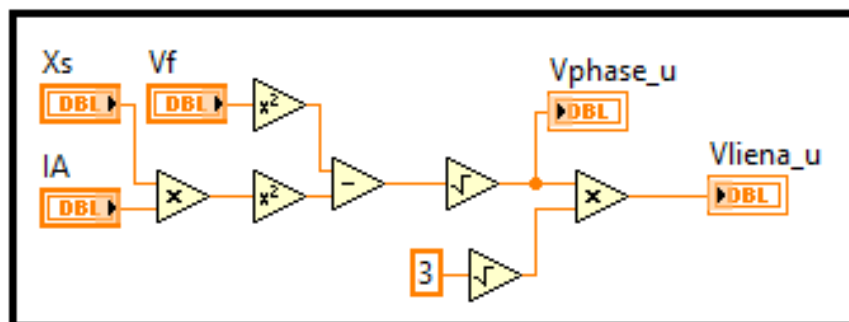


Figura 101. Proceso para el cálculo de tensión de fase y tensión de línea con carga unitaria.

Con factor de potencia en adelanto ($\cos \varphi = 0.8$) calculamos el voltaje de fase y el voltaje de línea:

$$V_{\phi} = \sqrt{E_A^2 - (X_S I_A \cos \theta)^2 + X_S I_A \sin \theta}$$

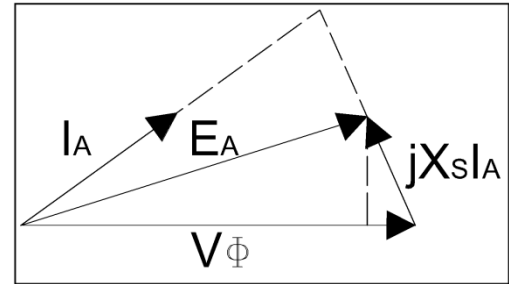


Figura 102. Por trigonometría se obtiene la tensión de línea con factor de potencia en adelanto

$$V_{\phi} = \sqrt{277.12^2 V - (1 * 60 \cos 36^{\circ}86')^2 + 1 * 60 \sin 36^{\circ}86'} = 308 V$$

$$V_L = V_{\phi} * \sqrt{3} = 308 V * \sqrt{3} = 533.47 V$$

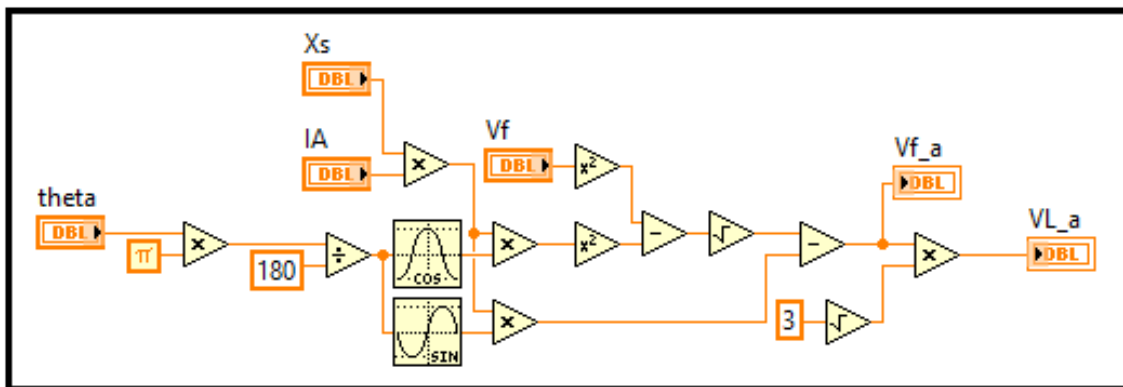


Figura 103. Proceso para el cálculo de la tensión de fase y tensión de línea con carga en adelanto

$$P_{salida} = 3V_{\phi} I_A \cos \theta = 3 * 236.9 * 60 \cos 36^{\circ}86' = 34.1 kW$$

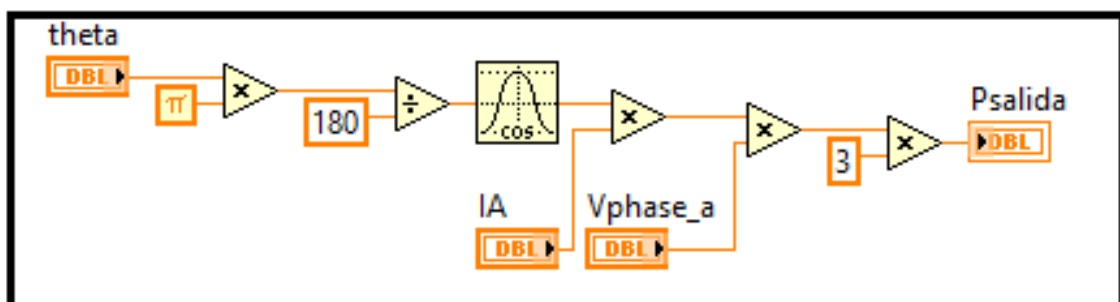


Figura 104. Proceso para el cálculo de la potencia de salida

$$P_{entrada} = P_{salida} + P_{eléctricas} + P_{núcleo} + P_{mecánicas}$$

$$P_{entrada} = 34.1 kW + 0 + 1.0 kW + 1.5 kW = 36.6 kW$$

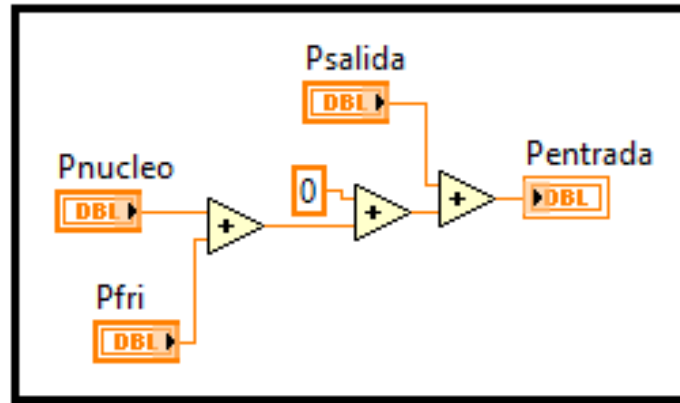


Figura 105. Proceso para el cálculo de la potencia de entrada

El rendimiento del generador lo obtenemos con las potencias:

$$\eta = \frac{P_{salida}}{P_{entrada}} * 100\% = \frac{34.1kw}{36.6kw} * 100\% = 93.2\%$$

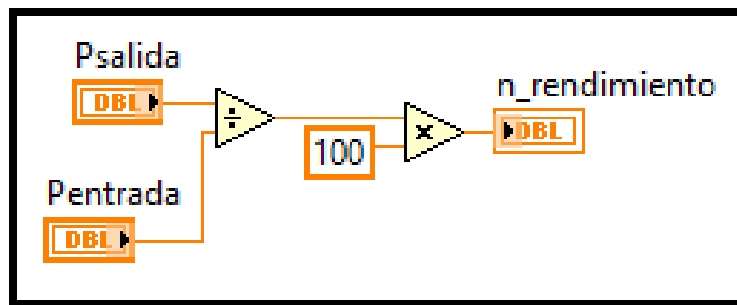


Figura 106. Proceso para el cálculo del rendimiento del generador

El par lo deducimos de la siguiente manera:

$$T = \frac{P_{entrada}}{nm} = \frac{36.6kW}{104.7 \frac{rad}{s}} = 349.5 N.m$$

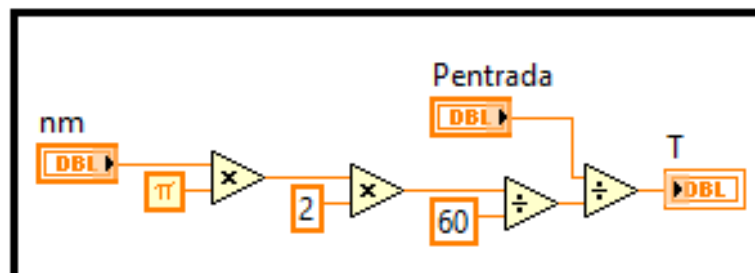


Figura 107. Proceso para el cálculo del par (T) del generador

$$T_{induc} = \frac{P_{salida}}{nm} = \frac{34.1kW}{104.7 \frac{rad}{s}} = 325.7 N.m$$

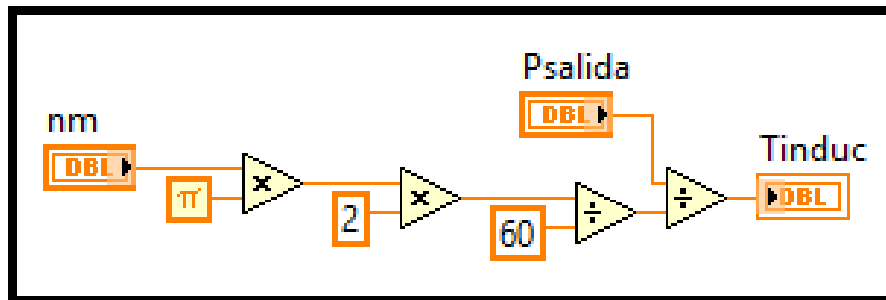


Figura 108. Proceso para el cálculo del par de inducción (T inducción) del generador

La variación de voltaje con las diferentes cargas:

Con el factor de potencia en retraso:

$$V_R = \frac{V_{\Phi} - V_{LR}}{V_{LR}} * 100\% = \frac{480V - 410.37V}{410.37V} * 100\% = 17.01\%$$

Con el factor de potencia Unitario:

$$V_R = \frac{V_{\Phi} - V_{LU}}{V_{LU}} * 100\% = \frac{480V - 468.38V}{468.38V} * 100\% = 2.56\%$$

Con el factor de potencia en adelante:

$$V_R = \frac{V_{\Phi} - V_{LA}}{V_{LA}} * 100\% = \frac{480V - 533.47V}{533.47V} * 100\% = -10.24\%$$

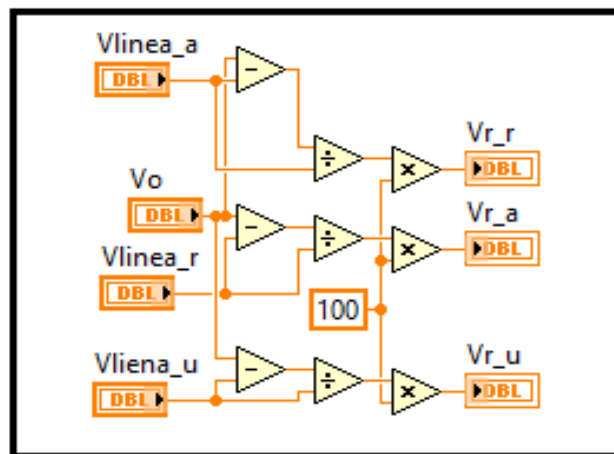


Figura 109. Proceso para el cálculo de la variación de voltaje con las diferentes cargas.

PARA LAS GRÁFICAS CARACTERÍSTICAS DE LOS TERMINALES DE TENSIÓN Y CORRIENTE DE LÍNEA (atraso y adelanto).

Con los valores obtenidos podemos graficar en labVIEW:

$$E_A = 277.12V$$

$$X_S = 1\Omega$$

$$\theta = 36.87 \left(\frac{\pi}{180} \right) = 0.6435$$

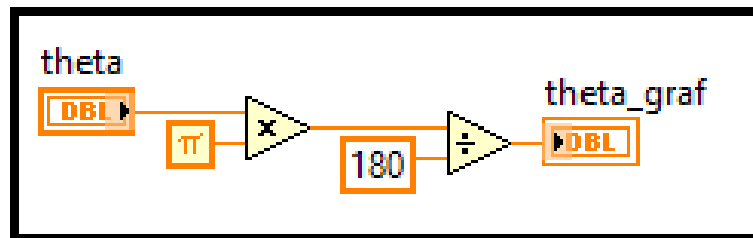


Figura 110. Proceso de transformación del ángulo theta de grados a radianes.

$$I_A = (0:1:20) * 60$$

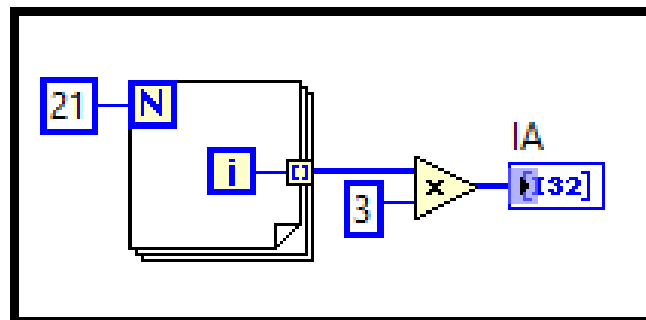


Figura 111. Proceso para el cálculo de la corriente con variación de 21 dígitos para la curva de la gráfica.

Para obtener los voltajes de fase y línea con carga en adelanto:

$$V_{\Phi 1..21} = \sqrt{E_A^2 - (X_S * I_{A1..21} * \cos \theta)^2 - (X_S * I_{A1..21} * \sin \theta)^2}$$

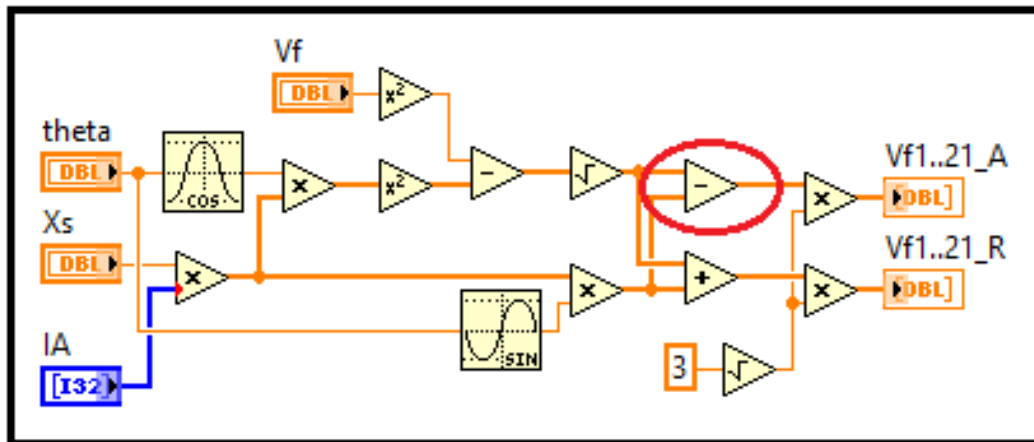


Figura 112. Proceso para el cálculo de tensión con carga en adelante para la curva característica.

Para obtener los voltajes de fase y línea con carga retraso:

$$V_{\phi 1..21} = \sqrt{E_A^2 - (X_S * I_{A1..21} * \cos \theta)^2 + (X_S * I_{A1..21} * \sin \theta)}$$

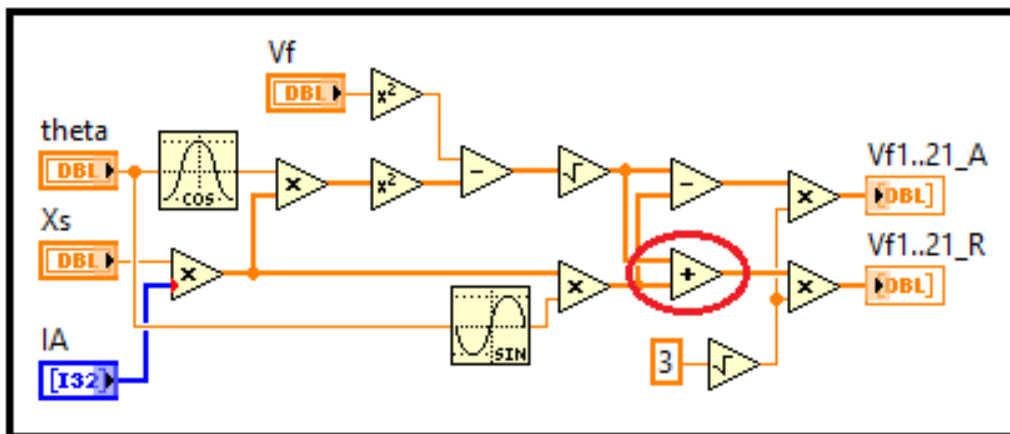


Figura 113. Proceso para el cálculo de tensión con carga en retraso para la curva característica.

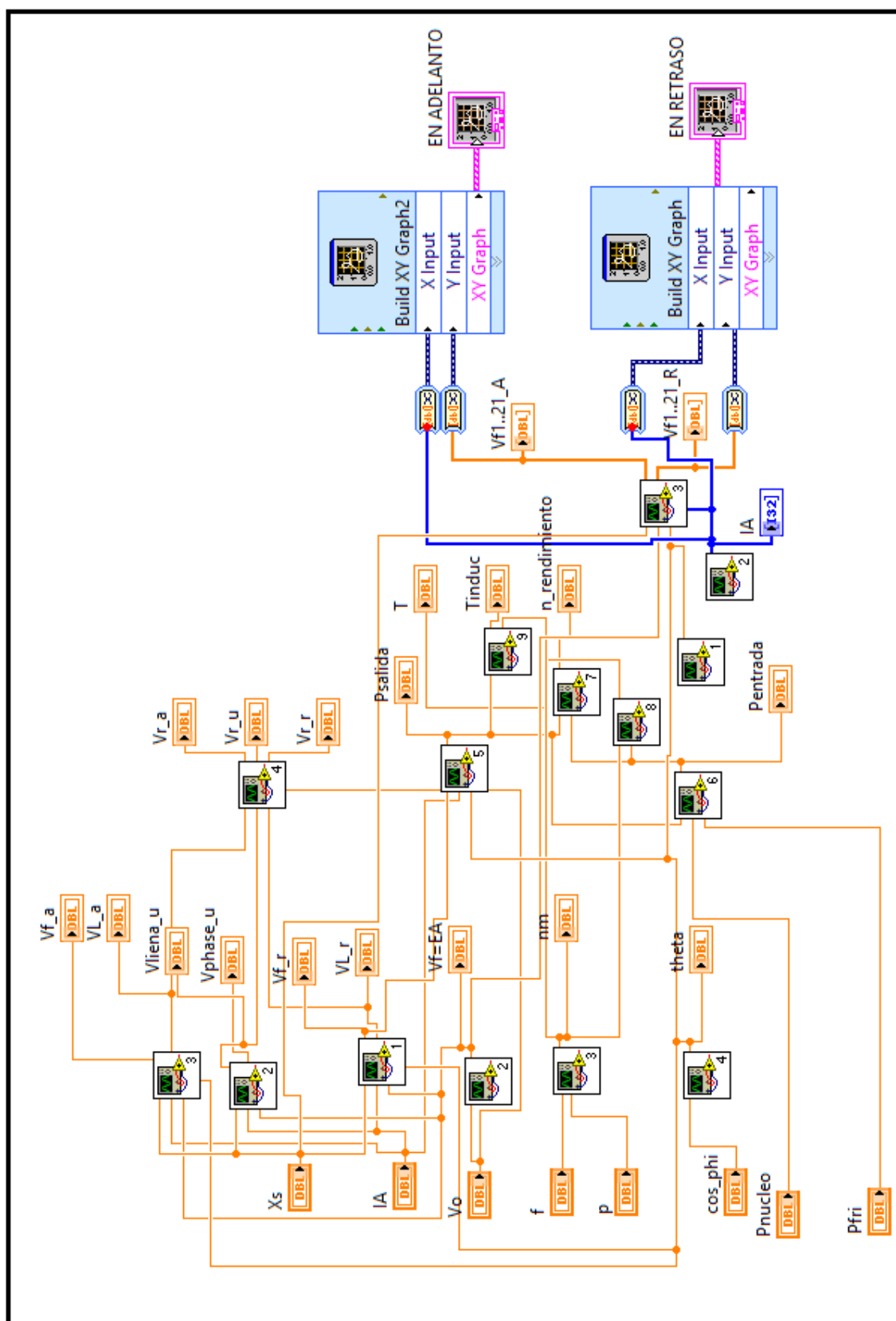


Figura 114. Diagrama de bloques del generador síncrono para el ensayo con cargas en adelanto y retraso.

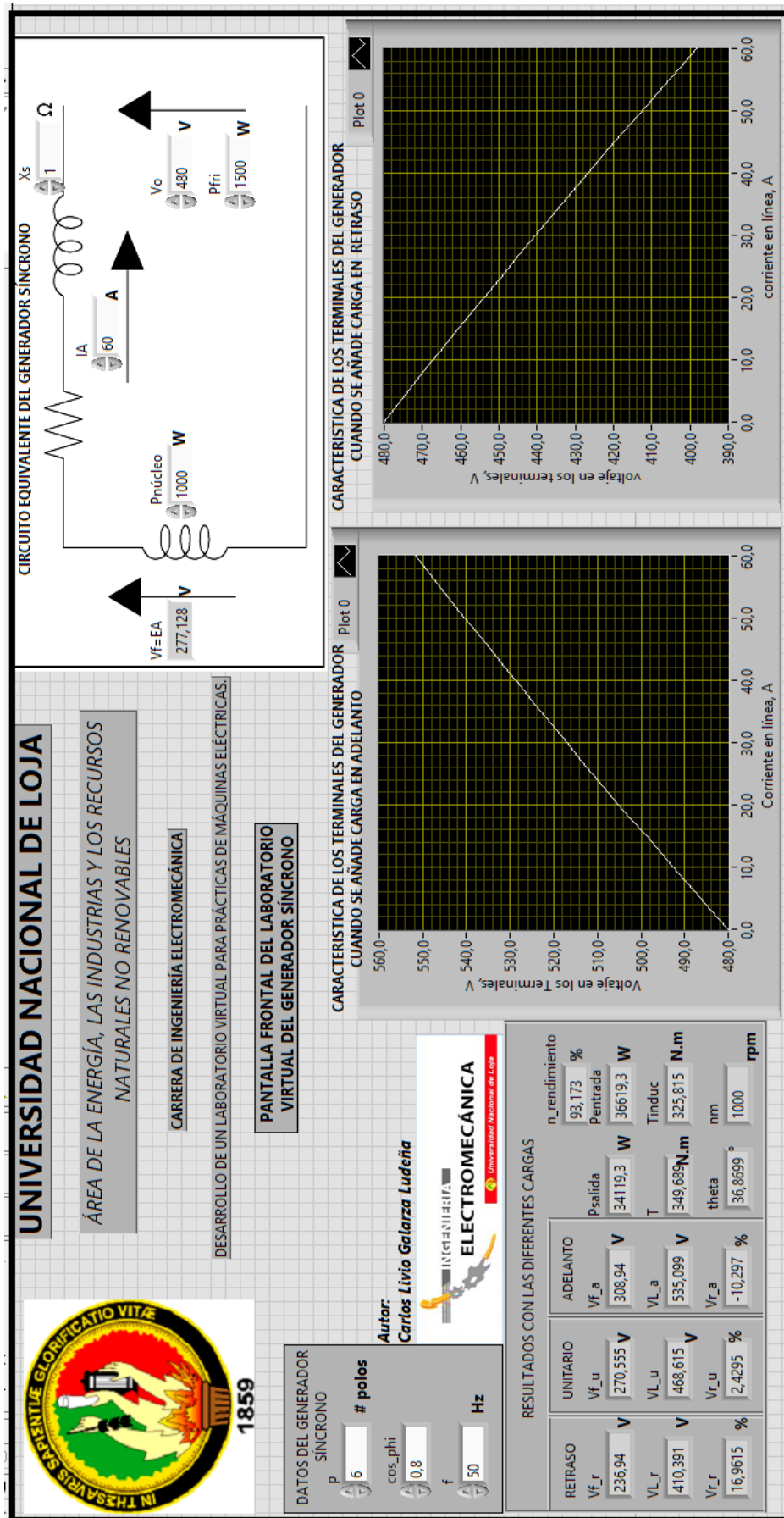


Figura 115. Pantalla frontal del laboratorio del generador síncrono.

d.2.1.2.2. MOTOR SÍNCRONO

d.2.1.2.2.1. Práctica 4.-

Obtener la gráfica curva en V del motor síncrono con los siguientes datos:

DATOS:

$$V = 208V$$

$$Q = 45kVA$$

$$\cos \Phi = 0.85 \text{ en retraso}$$

conexión en triángulo

$$X_S = 2.5\Omega$$

$$P_{salida} = 15 \text{ Hp} = 11.19kW$$

$$f = 60Hz$$

$$I_F = 4.0A$$

$$P_{mecánicas} = 1.5kW$$

$$P_{núcleo} = 1.0kW$$

$$P_{eléctricas} = 0$$

Circuito equivalente de la máquina síncrona funcionando como motor:

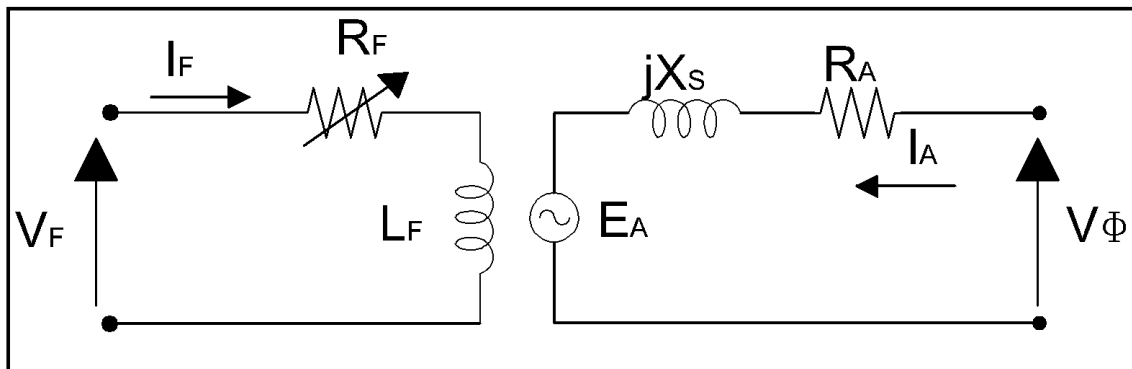


Figura 116. Circuito equivalente del motor síncrono.

$$P_{entrada} = P_{salida} + P_{mecánicas} + P_{núcleo} + P_{eléctricas}$$

$$P_{entrada} = 11.19kW + 1.5kW + 1kW + 0 = 13.69kW$$

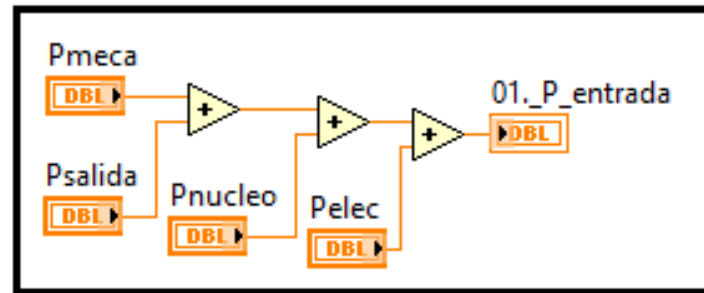


Figura 117. Proceso para el cálculo de la potencia de entrada de motor síncrono.

$$I_A = \frac{P_{entrada}}{3V_{\Phi} \cos \theta} = \frac{13.69kW}{3 * 208V * 0.85} = 25.81A$$

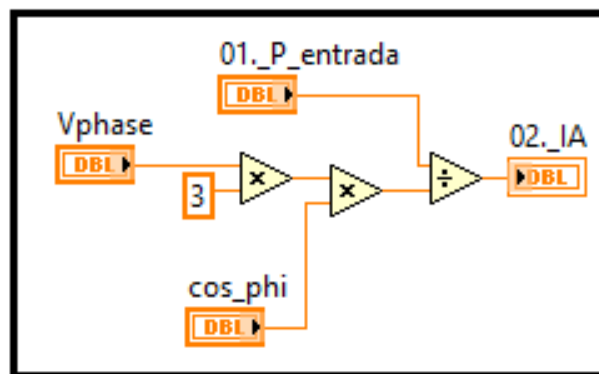


Figura 118. Proceso para el cálculo de la corriente de fase IA

$$\theta = 0.85 \cos^{-1} = -31^{\circ}78'$$

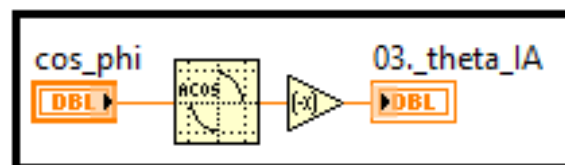


Figura 119. Proceso para el cálculo del ángulo theta de la corriente IA.

$$I_A = 25.81 \angle -31^{\circ}78'$$

Por la ley de Kirchhoff obtenemos el voltaje E_A :

$$E_A = V_{\Phi} - jX_S I_A$$

$$E_A = 208 \angle 0 - (j2.5)(25.81 \angle -31.78^\circ)$$

$$E_A = 208 \angle 0 - (2.5 \angle 90^\circ)(25.81 \angle -31.78^\circ)$$

$$E_A = 208 \angle 0 - 64.5 \angle 58.2^\circ$$

$$E_A = 208 + j0 - 33.98 + j54.81 = 174.02 - j54.81$$

$$E_A = 182.01 \angle -17.5^\circ$$

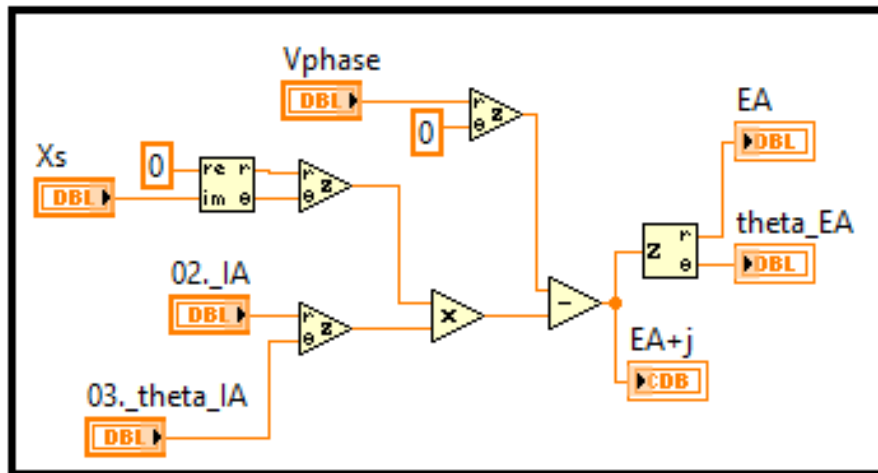


Figura 120. Proceso para el cálculo de la tensión EA del circuito equivalente.

Incrementamos el flujo de fase 25%, (E_A) también aumenta el 25%:

$$E_{A2} = 1.25(E_A) = 1.25(182.01) = 227.5V$$

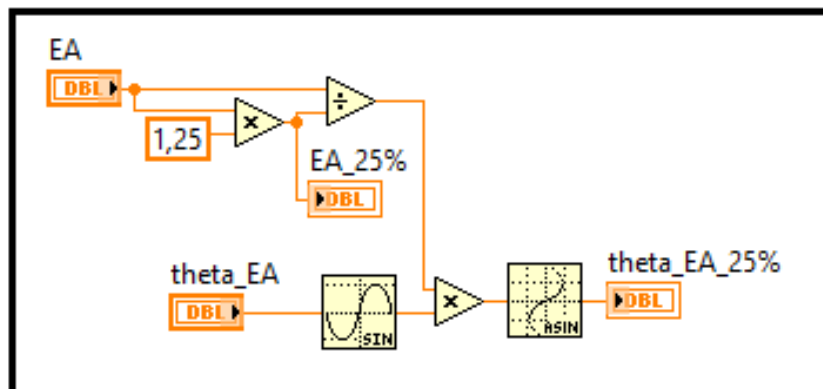


Figura 121. Proceso para el cálculo de la tensión EA cuando aumenta el flujo en un 25%.

Despejando de la siguiente igualdad obtenemos el ángulo θ_2 , el nuevo factor de potencia y la corriente I_{A2} .

$$E_A \sin \theta = E_{A2} \sin \theta_2$$

$$\theta_2 = \sin^{-1}\left(\frac{E_A}{E_{A2}} \sin \theta\right) = \sin^{-1}\left(\frac{182.01}{227.5} \sin -17.5'\right) = -13^\circ 67'$$

$$f_p = \cos 13^\circ 95' = 0.97166$$

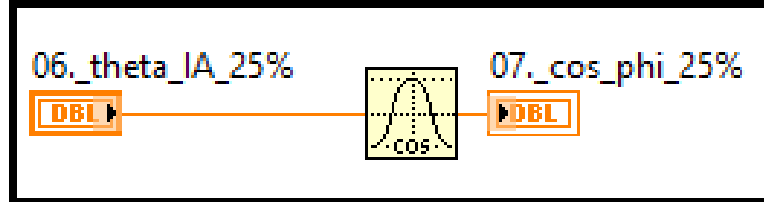


Figura 122. Proceso para el cálculo del factor de potencia aumentado el 25% del flujo.

$$\frac{E_{A2}}{E_A} = \frac{I_{A2}}{I_A}$$

$$E_{A2} = \frac{E_A}{I_A} I_{A2} = \frac{182.01}{4} I_{A2} = 45.5 I_{A2}$$

$$I_{A2} = \frac{V_\phi - E_{A2}}{jX_S} = \frac{208 \angle 0^\circ - 227.5 \angle -13^\circ 9}{2.5 \angle 90^\circ}$$

$$I_{A2} = \frac{(208 + j0) - (225.455 - j54.84)}{2.5 \angle 90^\circ} = \frac{56.33 \angle 76^\circ 76}{2.5 \angle 90^\circ}$$

$$I_{A2} = 22.532 \angle -13^\circ 24 \text{ A}$$

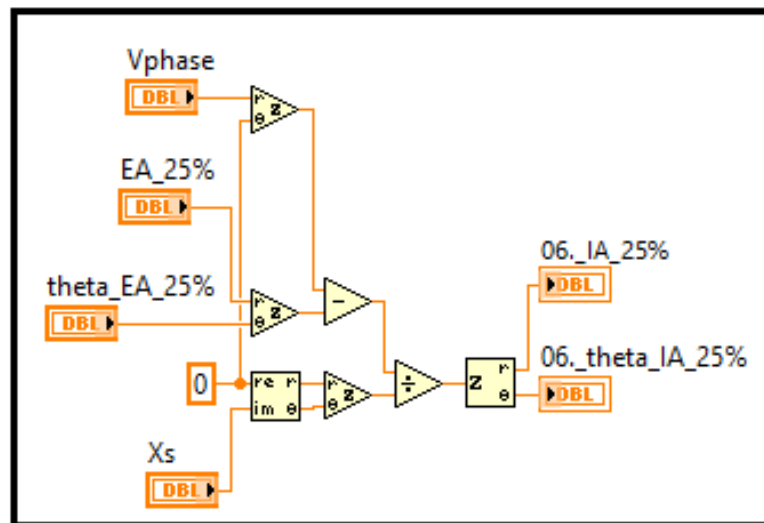


Figura 123. Proceso para el cálculo de la corriente y ángulo cuando se aumenta el flujo el 25 %.

$$f_p = \cos 13.2 = 0.9714 \text{ en adelante}$$

Una vez obtenidos los valores característicos del motor síncrono para la curva en “v” se procede de la siguiente manera:

i_f representa un vector que variará sus valores en el eje X para la curva de la gráfica

$$i_f = \frac{(38:1:58)}{10}$$

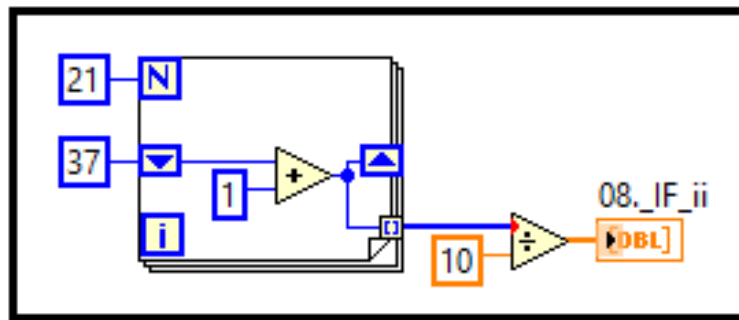


Figura 124. Proceso para calcular la corriente de fase con variación de valores para la curva característica de los motores síncronos.

$$e_a1 = E_A * ((\cos \theta_{EA}) + (j * \sin \theta_{EA}))$$

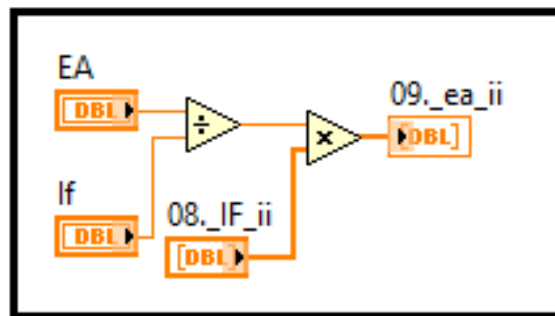


Figura 125. Proceso para el cálculo de la tensión EA con variación de valores para la gráfica.

$$\theta_{ii} = \sin^{-1} \left(\frac{abs * e_a1}{abs * e_a2} * \sin \theta_1 \right)$$

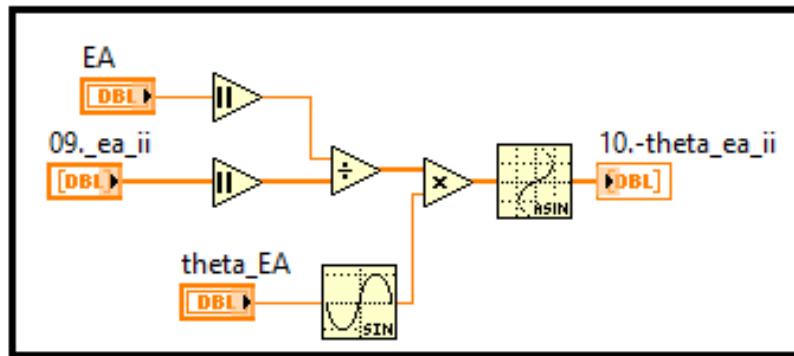


Figura 126. Proceso para el cálculo del ángulo de la tensión con valores absolutos para la gráfica.

$$f_{e_a2} = e_{a2} * ((\cos \theta_{ii}) + (\sin \theta_{ii}))$$

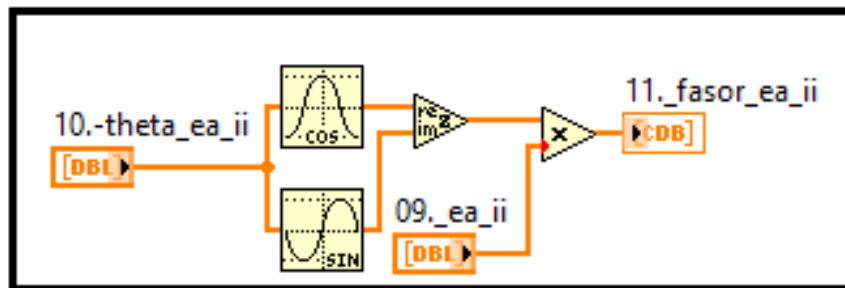


Figura 127. Proceso para el cálculo del fasor Ea para la gráfica.

$$i_{a_{ii}} = \frac{(V_f - f_{e_a2})}{jX_s}$$

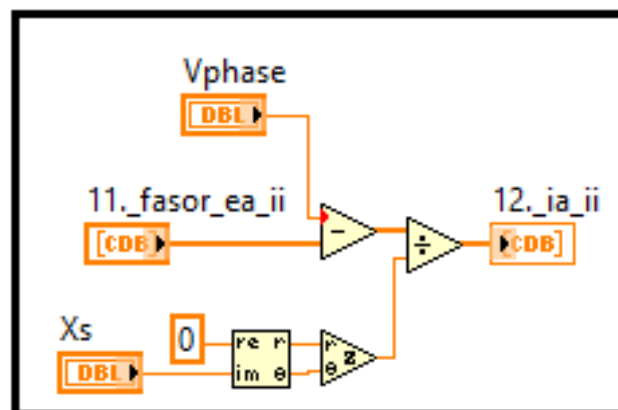


Figura 128. Proceso para el cálculo de la corriente con variación de valores para la gráfica.

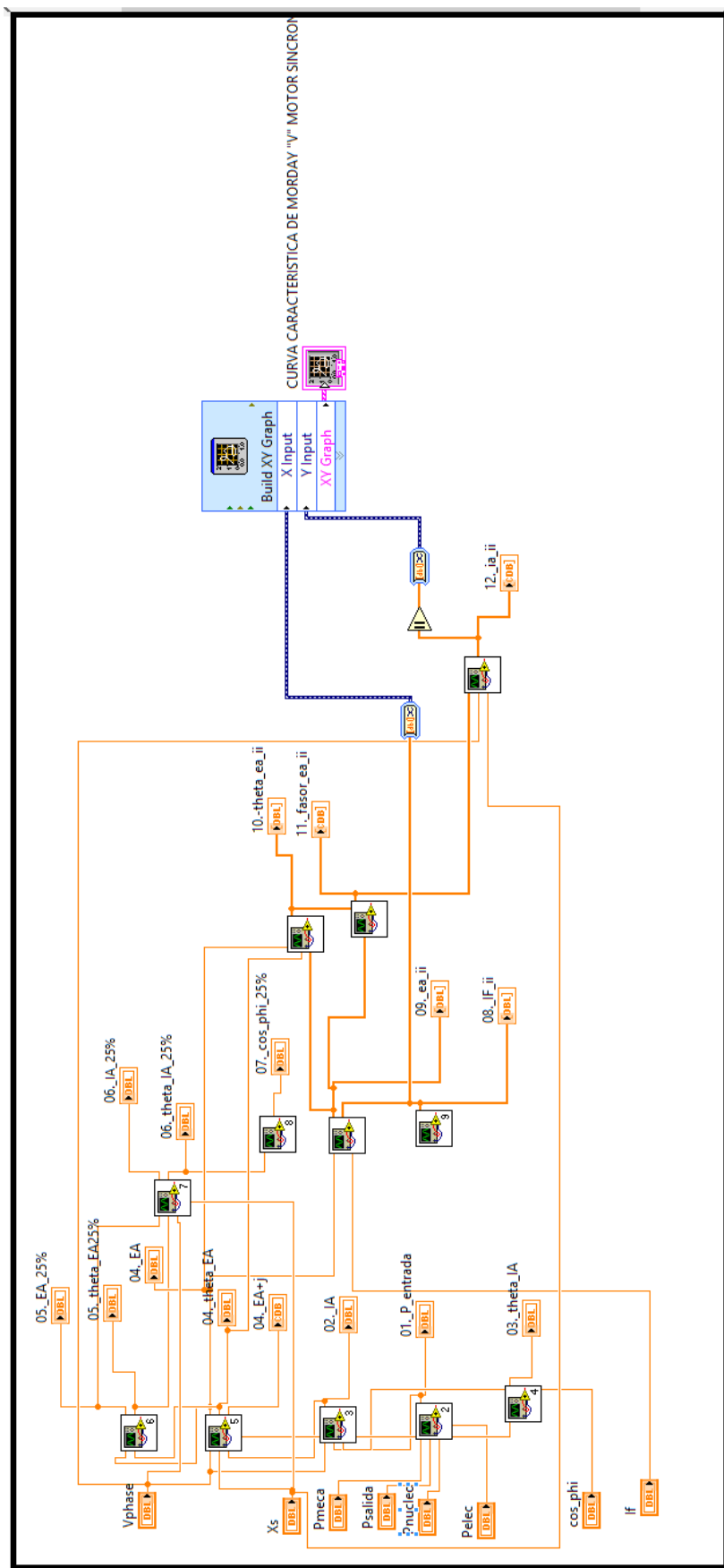


Figura 129. Diagrama de bloques para curva en V del motor síncrono.

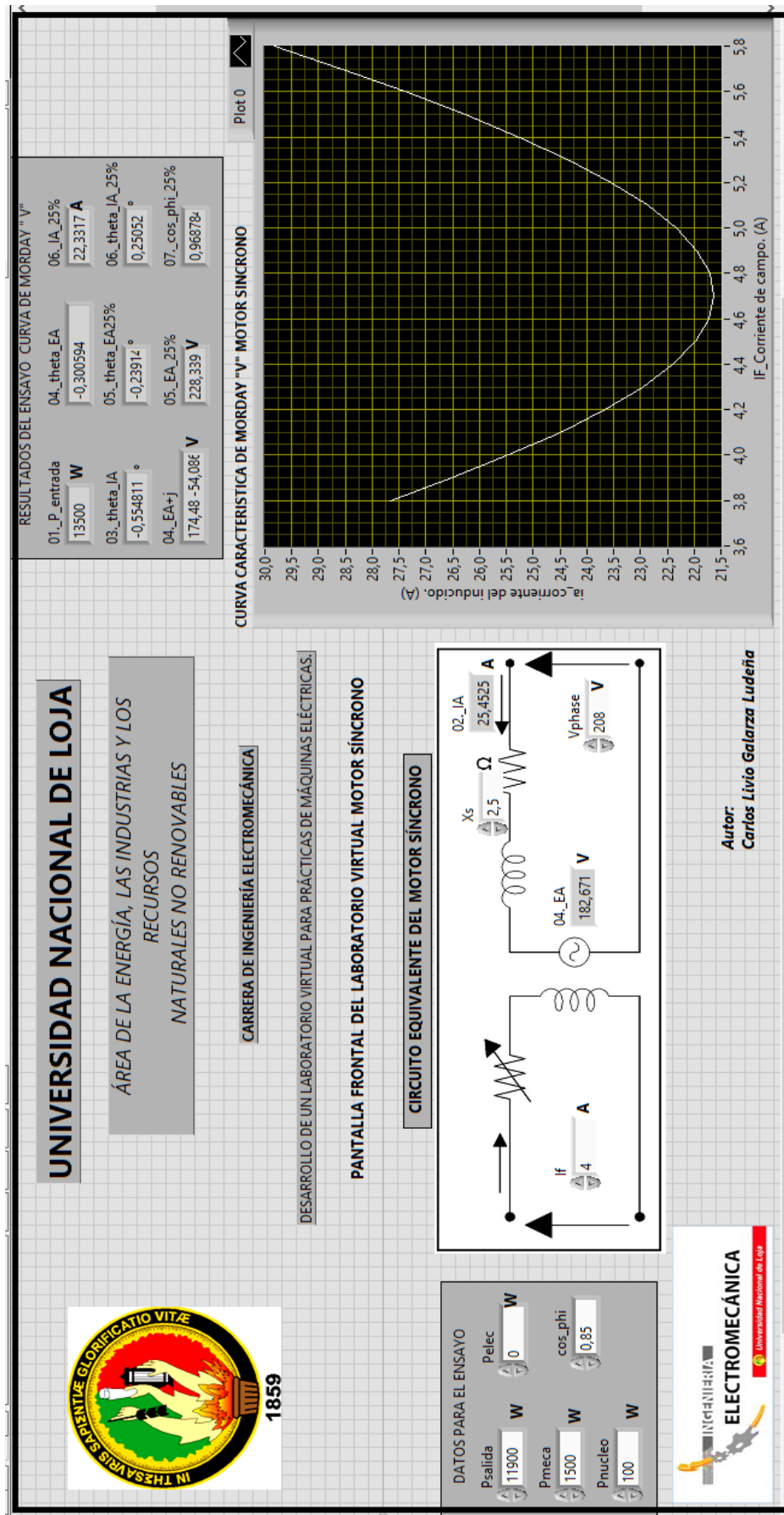


Figura 130. Pantalla frontal del laboratorio virtual del Motor Síncrono.

d.2.1.3. MÁQUINAS ESTÁTICAS

d.2.1.3.1. TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.

d.2.1.3.1.1. Práctica 5._

Para determinar los valores característicos del circuito equivalente de un transformador trifásico, partimos del ensayo de vacío o circuito abierto para la rama paralela del transformador, y del ensayo de cortocircuito o rotor bloqueado obtendremos las características de la rama serie.

Datos:

transformador de 15kVA, 2300/230

$$S_{nominal} = 15000 \text{ VA}$$

$$V_{nominal} = 230V$$

DATOS PARA EL ENSAYO EN VACÍO:

$$V_o = 2300V$$

$$I_o = 0.21A$$

$$P_o = 50W$$

$$a = 10 = \frac{N_1}{N_2}$$

Circuito equivalente para el ensayo de circuito abierto o ensayo de vacío:

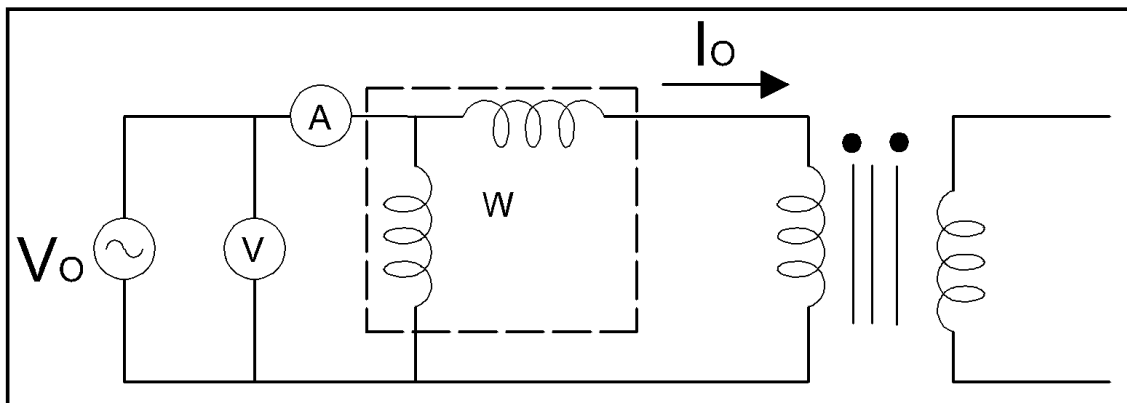


Figura 131. Circuito equivalente del transformador trifásico para el ensayo en vacío.

d.2.1.3.1.1.1. Ensayo en vacío o circuito abierto.

Referimos el transformador al lado del primario y obtenemos las características de la rama paralela:

$$\theta_o = \frac{P_o}{\sqrt{3} * V_o * I_o} \cos - 1 = \frac{50W}{\sqrt{3} * 2300V * 0.21A} \cos - 1 = 86^{\circ}57'$$

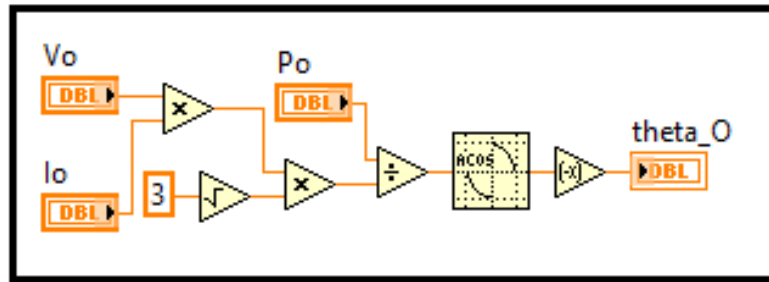


Figura 132. Proceso para el cálculo de ángulo de la corriente en vacío del transformador trifásico.

Para determinar la admitancia de la rama paralela del transformador se utiliza la ley ohm.

$$Y_E = \frac{I_o}{V_o} \angle -86^{\circ}57' = \frac{0.21}{\frac{2300}{\sqrt{3}}} \angle -86^{\circ}57' = 1.58 \times 10^{-4} \angle -86^{\circ}57' \Omega^{-1}$$

$$Y_E = 9.5 \times 10^{-6} - j1.57 \times 10^{-4}$$

$$R_N = \frac{1}{9.5 \times 10^{-6}} = 105.2 \text{ k}\Omega$$

$$X_M = \frac{1}{1.57 \times 10^{-4}} = 6.3 \text{ k}\Omega$$

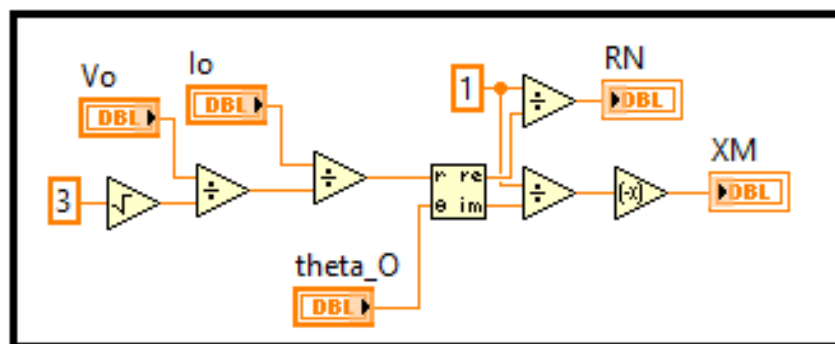


Figura 133. Proceso para el cálculo de la rama paralela del transformador.

Circuito equivalente del transformador referido al lado de primario:

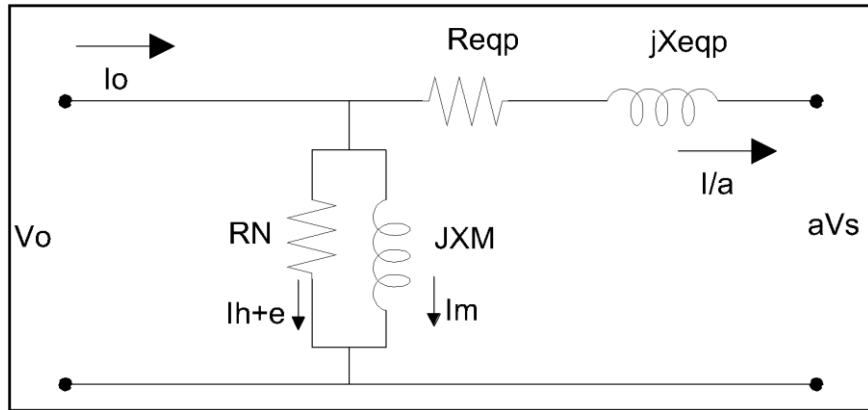


Figura 134. Circuito equivalente del transformador referido al lado del primario.

d.2.1.3.1.1.2. Ensayo en cortocircuito

DATOS PARA EL ENSAYO DE CORTOCIRCUITO:

$$V_{CC} = 47 \text{ V}$$

$$I_{CC} = 6.0 \text{ A}$$

$$P_{CC} = 160 \text{ W}$$

Circuito equivalente para el ensayo de cortocircuito:

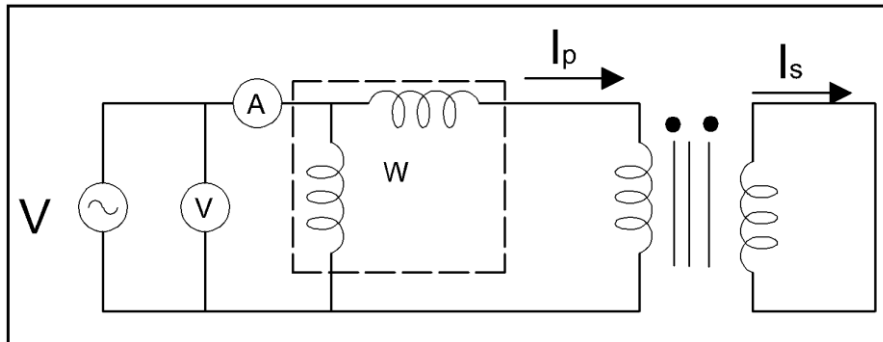


Figura 135. Circuito equivalente del transformador trifásico para el ensayo en cortocircuito.

Con el ensayo en cortocircuito obtendremos las características del transformador de la rama serie:

$$\theta_{CC} = \frac{P_{CC}}{\sqrt{3} * V_{CC} * I_{CC}} \cos - 1 = \frac{160W}{\sqrt{3} * 47V * 6A} \cos - 1 = 70^{\circ}87'$$

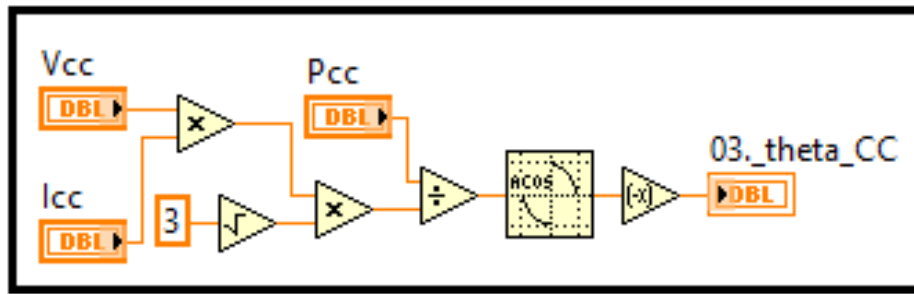


Figura 136. Proceso para el cálculo del ángulo de la corriente en cortocircuito.

$$Z_E = \frac{V_{CC}}{\frac{\sqrt{3}}{I_{CC}}} \angle -70^\circ 87' = \frac{47_V}{\frac{\sqrt{3}}{6_A}} \angle -70^\circ 87' = 4.53 \angle -70^\circ 87'$$

$$Z_E = 1.48 - j4.27 \Omega$$

$$R_{eq} = 1.48 \Omega$$

$$X_{eq} = 4.27 \Omega$$

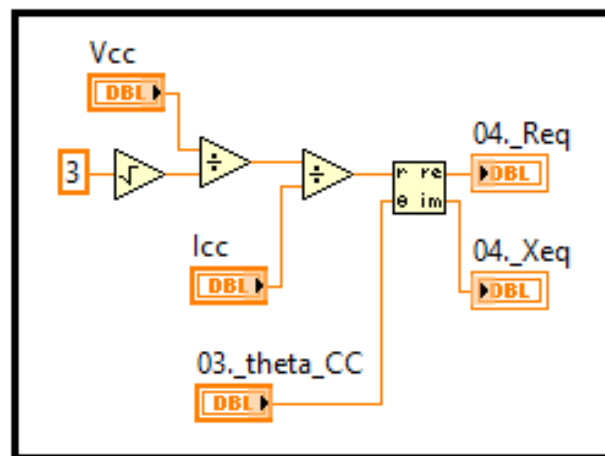


Figura 137. Proceso para el cálculo de la rama serie del transformador.

Como referimos al lado del secundario del transformador el valor final de las impedancias será:

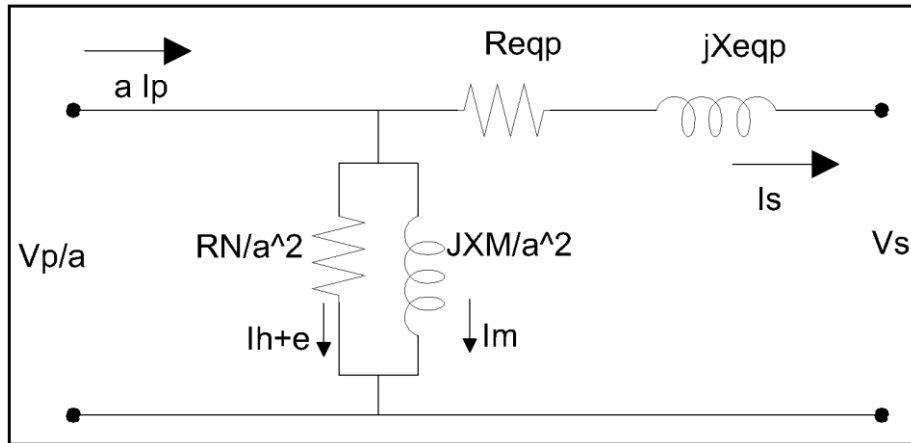


Figura 138. Circuito equivalente del transformador referido al lado del secundario.

$$R_{eq} = \frac{1.48 \, \Omega}{a^2} = 0.0148 \, \Omega$$

$$X_{eq} = \frac{4027 \, \Omega}{a^2} = 0.0427 \, \Omega$$

d.2.1.3.1.1.3. Ensayos con variación de la carga.

CON EL FACTOR DE POTENCIA EN RETRASO (-)

$$F_p = 0.8$$

$$\theta = \cos^{-1} 0.8 = -36^\circ 86$$

$$I_s = \frac{S_{nominal}}{V_{nominal}} = \frac{15000}{230} = 65.21 \, \angle -36^\circ 86$$

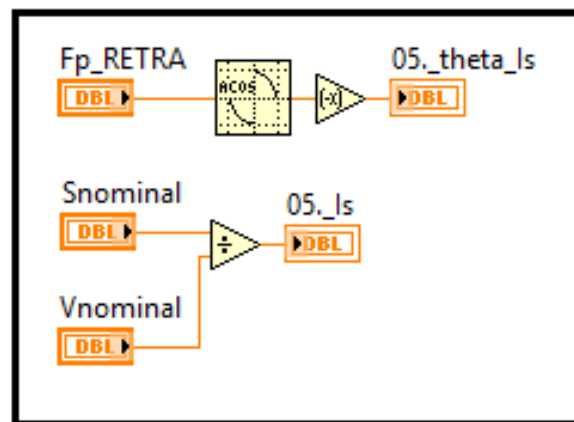


Figura 139. Proceso para el cálculo de la corriente y en ángulo cuando el factor de potencia esta en retraso (-0.8).

$$\frac{V_P}{a} = V_S + R_{eq}I_S + jX_{eq}I_S$$

$$\frac{V_P}{a} = 230 \angle 0^\circ + (0.0148)(65.21 \angle -36^\circ 86) + j(0.0427)(65.21 \angle -36^\circ 86)$$

$$\frac{V_P}{a} = 230 \angle 0^\circ + 0.96 \angle -36^\circ 86 + j2.78 \angle -36^\circ 86$$

$$\frac{V_P}{a} = (230 + j0) + (0.768 - j0.57) + (2.22 - j1.66) = 232.99 - j2.232$$

$$\frac{V_P}{a} = 232.99 \angle 0.^\circ 54'$$

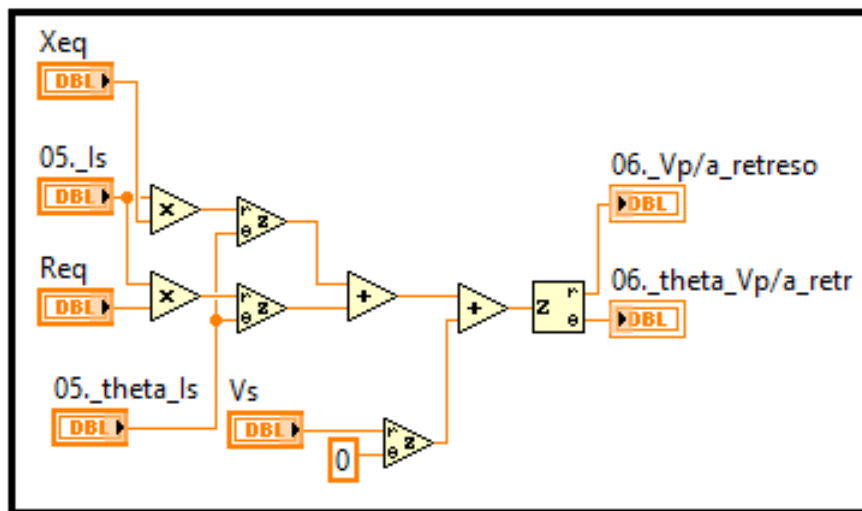


Figura 140. Proceso para el cálculo del voltaje con el factor de potencia en retraso.

Regulación de voltaje resultante es:

$$R_V = \frac{\frac{V_P}{a} - V_{S_{nominal}}}{V_{S_{nominal}}} * 100\% = \frac{232.99 - 230}{230} * 100\% = 1.26\%$$

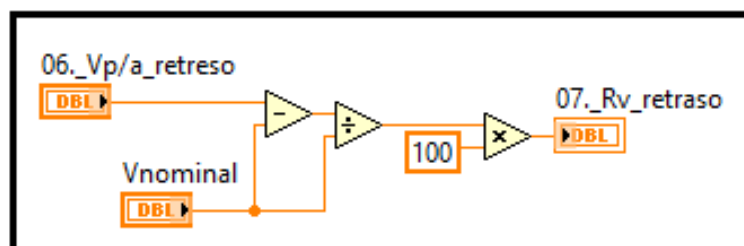


Figura 141. Proceso para el cálculo de la regulación de voltaje con factor de potencia en retraso.

CON FACTOR DE POTENCIA UNITARIO:

$$F_p = 1$$

$$\theta = \cos^{-1} 1 = 0$$

$$I_s = \frac{S_{nominal}}{V_{nominal}} = \frac{15000}{230} = 65.21 \angle 0^\circ$$

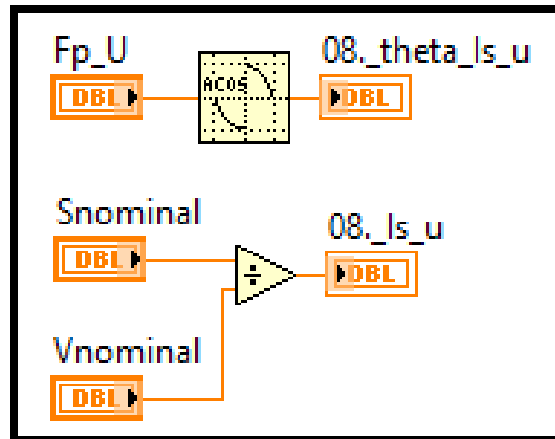


Figura 142. Proceso para el cálculo de la corriente con el factor de potencia Unitario (1).

$$\frac{V_P}{a} = V_S + R_{eq}I_S + jX_{eq}I_S$$

$$\frac{V_P}{a} = 230 \angle 0^\circ + (0.0148)(65.21 \angle 0^\circ) + j(0.0427)(65.21 \angle 0^\circ)$$

$$\frac{V_P}{a} = 230 \angle 0^\circ + 0.96 \angle 0^\circ + j2.78 \angle 90^\circ$$

$$\frac{V_P}{a} = (230 + j0) + (0.965 - j0) + (0 - j2.784) = 230.966 + j2.78677$$

$$\frac{V_P}{a} = 230.983 \angle 0^\circ 69' V$$

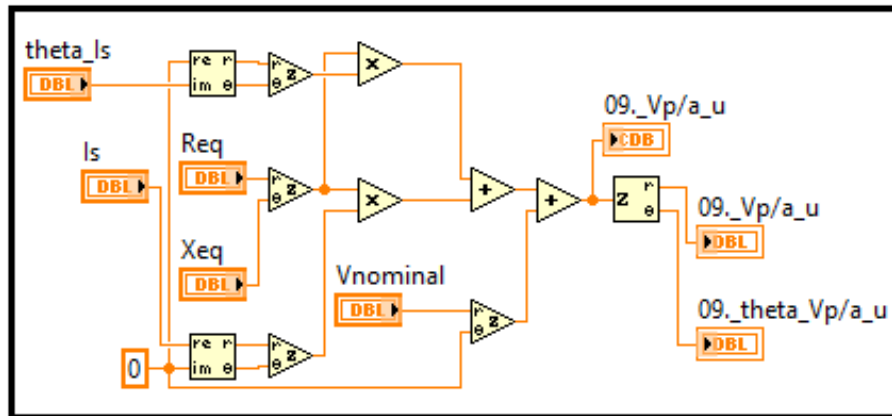


Figura 143. Proceso para el cálculo de la tensión con el factor de potencia unitario.

$$R_V = \frac{\frac{V_P}{a} - V_{S_{nominal}}}{V_{S_{nominal}}} * 100\% = \frac{230.99 - 230}{230} * 100\% = 0.43\%$$

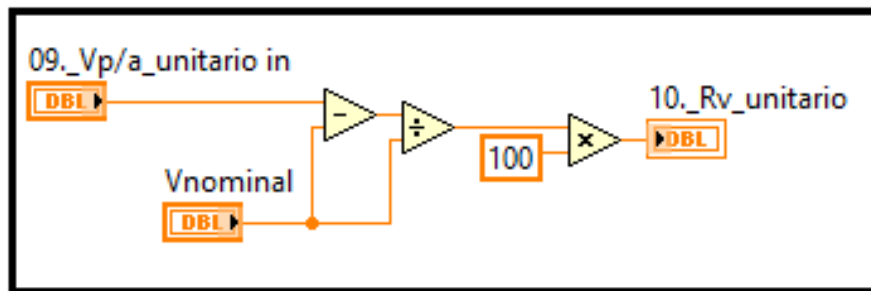


Figura 144. Proceso para el cálculo de la regulación de la tensión con el factor de potencia unitario.

CON EL FACTOR DE POTENCIA EN ADELANTO (+)

$$F_P = 0.8$$

$$\theta = \cos^{-1} 0.8 = 36.86$$

$$I_S = \frac{S_{nominal}}{V_{nominal}} = \frac{15000}{230} = 65.21 \angle 36.86$$

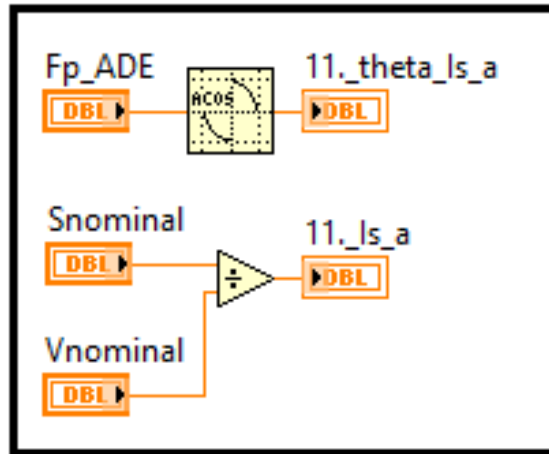


Figura 145. Proceso para el cálculo de la corriente con el factor de potencia en adelanto (+).

$$\frac{V_P}{a} = V_S + R_{eq}I_S + jX_{eq}I_S$$

$$\frac{V_P}{a} = 230 \angle 0^\circ + (0.0148)(65.21 \angle 36^\circ 86) + j(0.0427)(65.21 \angle 36^\circ 86)$$

$$\frac{V_P}{a} = 230 \angle 0^\circ + 0.96 \angle 36^\circ 86 + j2.78 \angle 126^\circ 86$$

$$\frac{V_P}{a} = (230 + j0) + (0.773 - j0.5788) - (1.66 + j2.224) = 229.683 - j1.6452$$

$$\frac{V_P}{a} = 229.691 \angle 0^\circ 82 V$$

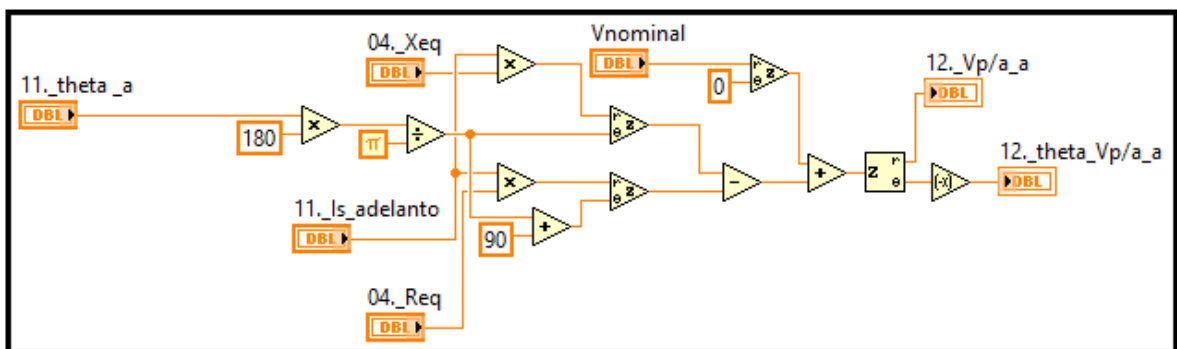


Figura 146. Proceso para el cálculo de la tensión con el factor de potencia en adelanto.

$$R_V = \frac{\frac{V_P}{a} - V_{S_{nominal}}}{V_{S_{nominal}}} * 100\% = \frac{229.691 - 230}{230} * 100\% = -0.1343 \%$$

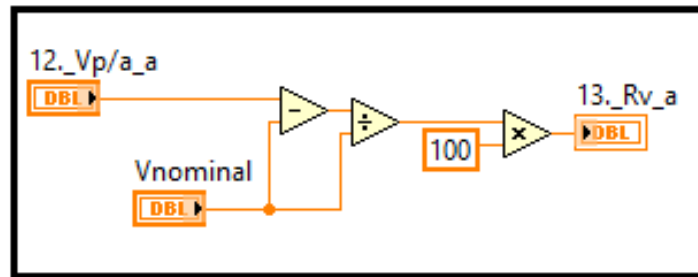


Figura 147. Proceso para el cálculo de la regulación de tensión con el factor de potencia en adelanto.

Vector que representa la corriente para la variación de valores en el eje X.

$$I_{amps} = 0:6.52:65.2$$

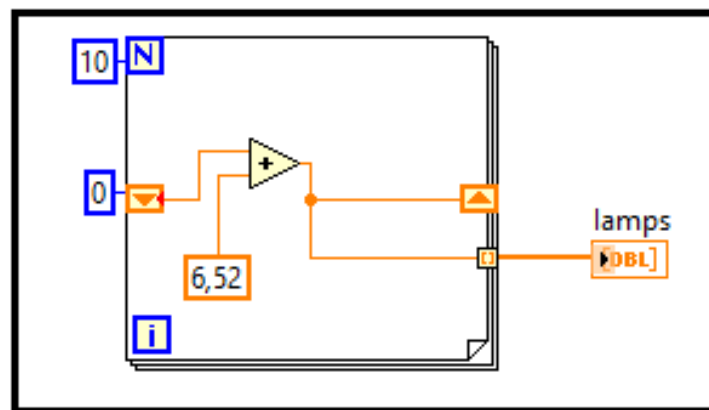


Figura 148. Proceso para el cálculo de la corriente con variación de valores para gráfica.

$$I_1 = I_{amps} * (0.8 - j0.6) \text{ en retraso}$$

$$I_2 = I_{amps} * (1) \text{ unitario}$$

$$I_3 = I_{amps} * (0.8 + j0.6) \text{ en adelanto}$$

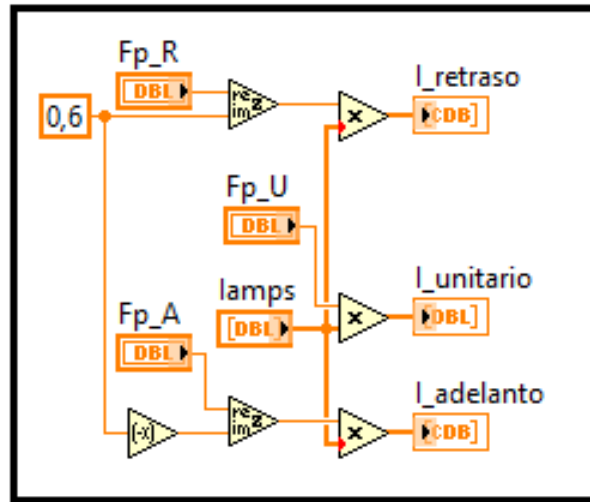


Figura 149. Proceso para el cálculo de las corrientes en retraso, unitario y adelanto con variación de valores para la curva.

En retraso:

$$V_{pa} = V_S + R_{eq} * I_1 + jX_{eq} * I_1$$

$$V_R = \frac{(abs * V_{pa} - V_S)}{V_S} * 100\%$$

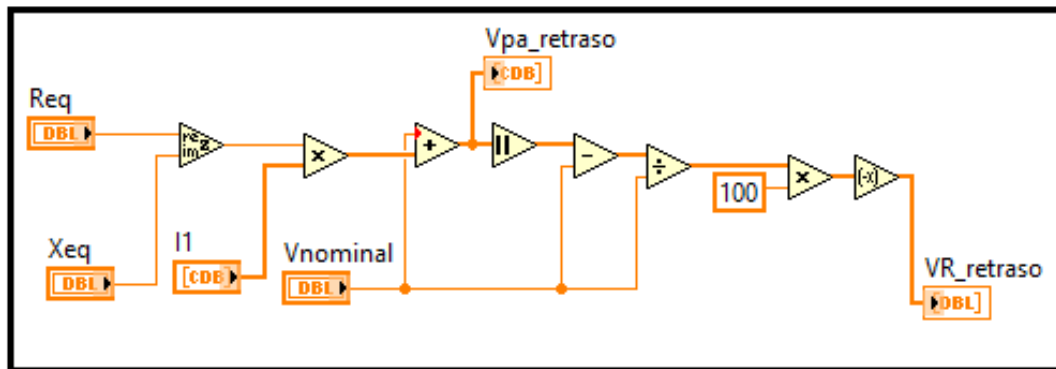


Figura 150. Proceso para el cálculo de la tensión con factor de potencia en retraso con variación de valores para la curva.

Unitario:

$$V_{pa} = V_S + R_{eq} * I_2 + jX_{eq} * I_2$$

$$V_R = \frac{(abs * V_{pa} - V_S)}{V_S} * 100\%$$

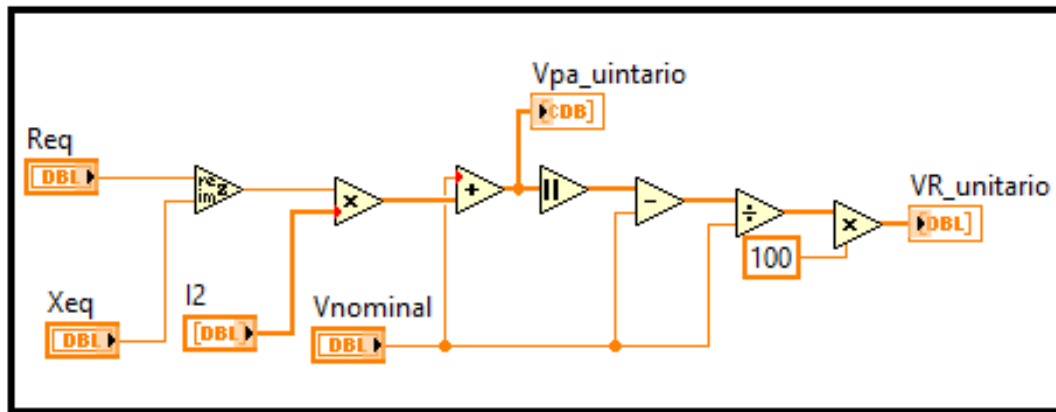


Figura 151. Proceso para el cálculo de tensión con el factor de potencia unitario con variación de valores para la curva.

Adelanto:

$$V_{pa} = V_s + R_{eq} * I_3 + jX_{eq} * I_3$$

$$V_R = \frac{(abs * V_{pa} - V_s)}{V_s} * 100\%$$

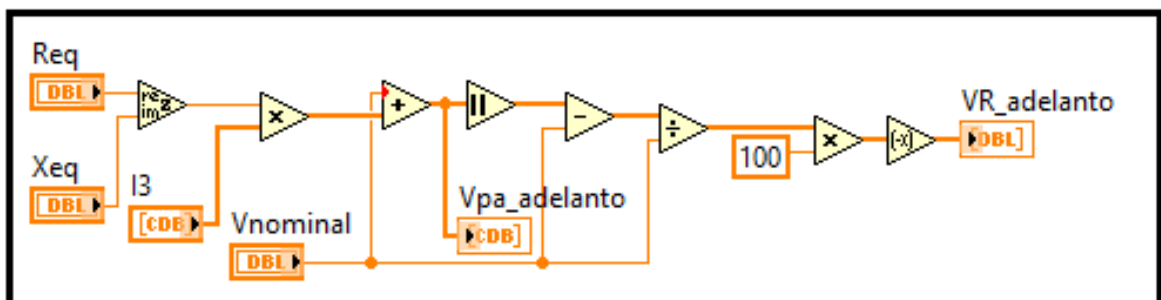


Figura 152. Proceso para el cálculo de tensión con factor de potencia en adelanto con variación de valores para la curva.

La conexión para graficar es la siguiente

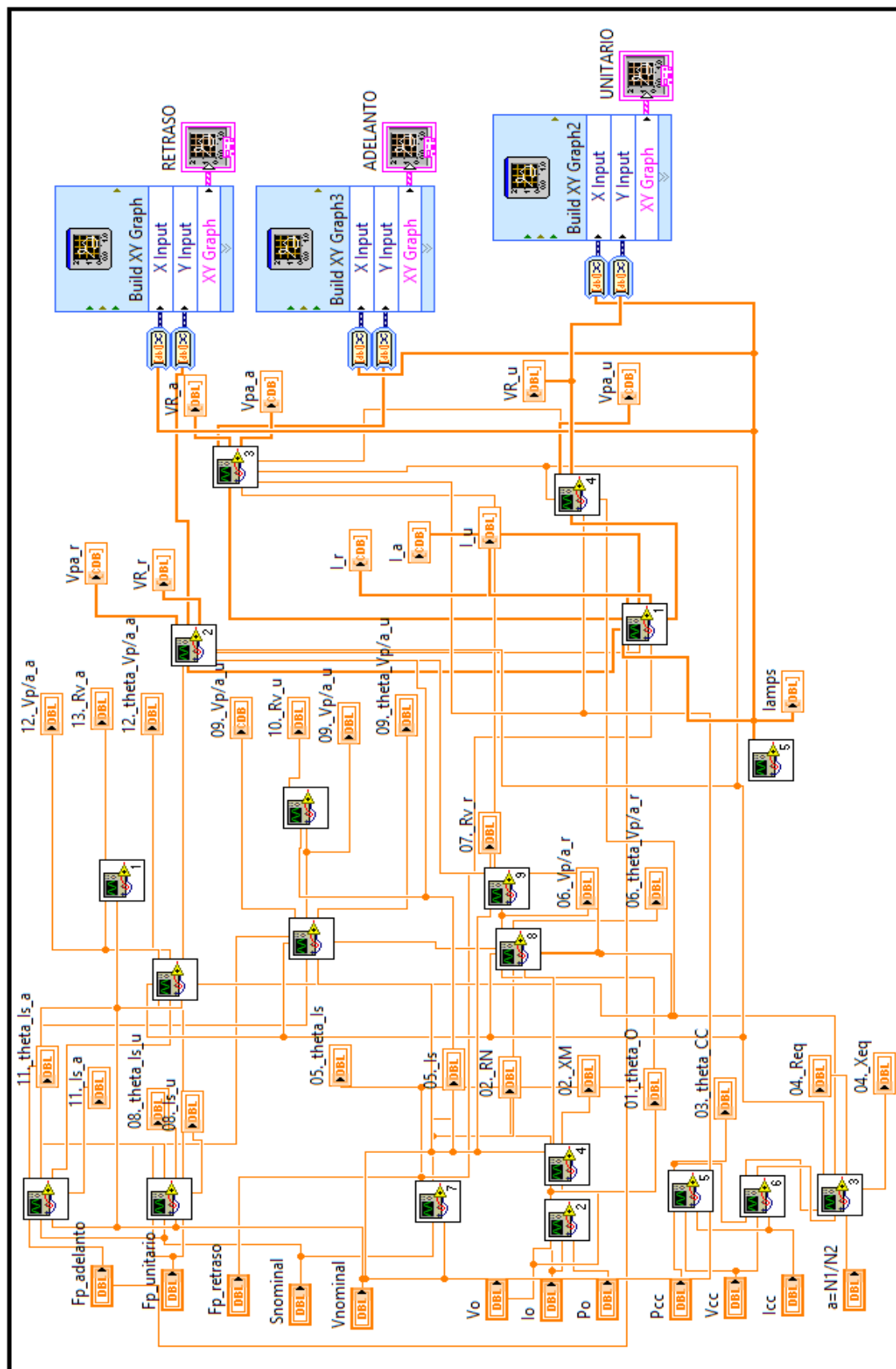


Figura 153. Diagrama de Bloques del Transformador trifásico para ensayos con diferentes cargas.

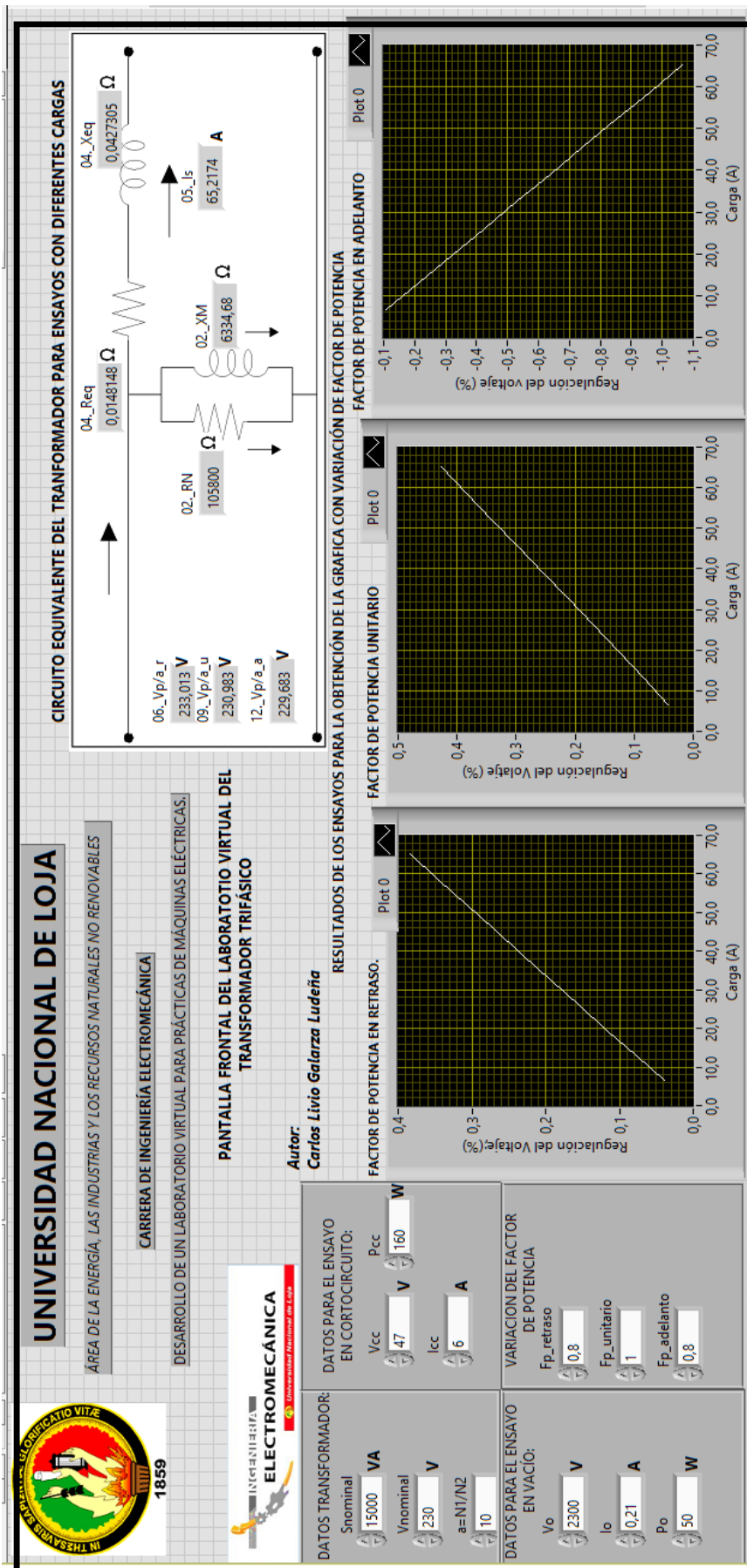


Figura 154. Pantalla frontal del laboratorio virtual del transformador.

f.- RESULTADOS

Los resultados obtenidos en la presente tesis son muy satisfactorios:

- Máquinas Asíncronas se realizó el ensayo de vacío y cortocircuito del motor asíncrono, así como la característica de la curva par-velocidad sincronismo, de la misma manera se procedió para el generador de inducción. En la curva par-velocidad de sincronismo para el generador como para el motor se puede observar el par de arranque, el par máximo, así como el comportamiento de la curva cuando se varia la resistencia del rotor aumentando al doble, triple, como varían sus resultados y sobretodo la figura de la gráfica.
- Máquinas Síncronas cuando funciona como generador se pudo analizar la curva característica de la tensión en los terminales respecto de la corriente de línea, cuando se añade carga con un factor de potencia en retraso se genera una caída de voltaje en los terminales y cuando el factor de potencia está en adelanto incrementa el voltaje en los terminales.
- En la parte del motor síncrono se realizó la curva característica en V o curva de Morday, donde se puede apreciar el comportamiento y sus principales características; está regida en la corriente de campo y la corriente de fase, cuando la curva es menor a la base mínima de la corriente de campo, la corriente del inducido está en retraso, por lo tanto el motor está consumiendo potencia reactiva y cuando la curva es mayor a la base mínima de la corriente de campo, la corriente del inducido esta en adelanto, por lo tanto el motor está suministrando potencia reactiva.
- Máquinas Estáticas, en el ensayo en vacío y cortocircuito, se pudo graficar la curva de regulación de voltaje con respecto de la carga, cuando la carga está en retraso la regulación del voltaje va ser mayor a cero por ende el voltaje interno referido al secundario va ser mayor al voltaje nominal. Cuando opera con factor de potencia unitario la regulación de voltaje va ser mayor que cero, pero la diferencia va ser muy pequeña por ende el voltaje interno referido al secundario también va ser ligeramente superior al nominal. Cuando el factor de potencia esta en adelanto la regulación de voltaje va a ser menor a cero por lo tanto el voltaje interno referido al secundario será menor al voltaje nominal.

g.- DISCUSIÓN

Como se explica en los objetivos del presente trabajo, se realizó una caracterización de los contenidos teóricos que se imparte en las aulas de la carrera de ingeniería en electromecánica, para así poder determinar las máquinas eléctricas estudiadas obtener las practicas más significativas. Luego de tener claro las máquinas eléctricas se procedió a determinar las prácticas a modelar de cada una. Con el modelo matemático listo se diseña el laboratorio virtual con la conexión de los diagramas de bloques en el software LabVIEW. Finalmente se construye el laboratorio virtual de máquinas eléctricas con pantallas frontales en cada una de las prácticas.

En lo referente a las máquinas asíncronas la curva par-velocidad de sincronismo tanto del motor como del generador fueron obtenidas con los ensayos de vacío y cortocircuito, la característica principal de está curva es el par de arranque, par máximo y a par a plena carga; cuando va variando la velocidad de sincronismo. Cuando aumentamos la resistencia del rotor al doble, triple o cuádruple del valor inicial se puede apreciar la variación tanto de la forma de la gráfica como también los resultados del par de arranque, máximo y a plena carga. Para el generador funciona de la misma manera únicamente teniendo en cuenta que el deslizamiento va ser negativo, por consecuencia la velocidad de sincronismo va ser mayor a la velocidad del rotor, entonces la curva de la máquina asíncrona cuando funciona en régimen de generador va ir hacia abajo. La precisión de la gráficas como de los resultados es muy alta ya que el programa utiliza todos los decimales en cada fórmula.

Para las máquinas síncronas en el generador se grafica la curva de voltaje en los terminales respecto de la carga, cuando el factor de potencia esta en retraso se origina una caída de voltaje en los terminales y el voltaje generado es muy grande. Cuando el factor de potencia está en adelante se origina un incremento de voltaje en los terminales. En estos ensayos se puede variar la frecuencia, el factor de potencia y estudiar los efectos que produce esos cambios, al igual que las máquinas asíncronas la precisión es muy buena ya que en el programa absorbe todas las décimas. Para el motor síncrono la gráfica característica es la curva en V o curva de Morday, donde se puede apreciar cuando la máquina está consumiendo o suministrando potencia reactiva, en esta curva se pueden variar los datos de potencia, resistencia y verificar en que afecta a la gráfica.

En las máquinas estáticas se grafica la curva de regulación de voltaje con respecto de la carga que se le aplique, cuando se aplica un factor de potencia en retraso la regulación de voltaje va ser mayor que el voltaje nominal, cuando se aplica un factor unitario la regulación de voltaje va ser ligeramente mayor que el voltaje nominal y cuando el factor de potencia está en adelanto la regulación de voltaje va ser menor que el voltaje nominal. En este ensayo también se pueden variar las cargas, resistencia, frecuencia, la relación de bobinas y así poder tener gráficas diferentes y estudiar el comportamiento a diferentes variaciones de datos. Al igual que en las anteriores prácticas el programa absorbe todos los valores, es decir trabaja con todas las décimas en cada respuesta por lo que el resultado va ser exacto y las gráficas precisas.

h.- CONCLUSIONES

- Se recopiló información que se utiliza para impartir en las materias de máquinas eléctricas en los diferentes módulos de la carrera de ingeniería electromecánica de la Universidad Nacional de Loja.
- Con la base de información se caracterizó las máquinas eléctricas que se utilizaron en el presente trabajo, se obtuvieron las prácticas en cada una de las máquinas asíncronas, síncronas y estáticas.
- Con las prácticas identificadas se dedujeron los modelos matemáticos de cada una de las prácticas se procedió al diseño de las conexiones del diagrama de bloques en el software LabVIEW.
- Con los diseños definidos se construyó el laboratorio virtual quedando definida la pantalla frontal para cada una de las prácticas: Motor y Generador Asíncrono curva par-velocidad de sincronismo, Generador síncrono la curva de voltaje en los terminales respecto de la corriente de línea, motor síncrono la curva en V o curva de Morday, y para el transformador se desarrolló la curva de regulación de voltaje respecto de la carga.
- El laboratorio quedó listo para realizar las prácticas, así como también una hoja de control o guía de cómo se debe utilizar el laboratorio en las diferentes prácticas y los resultados que se pueden obtener.

i.- RECOMENDACIONES

- En cada una de las prácticas se recomienda hacer variaciones a los datos y observar que sucede con la curva cuando se hace algún cambio, qué afectación hay, o cómo varían los resultados.
- Las prácticas realizadas servirán como base o guía para que en un futuro los estudiantes puedan derivar más prácticas diferentes a las presentadas en la presente tesis.
- También queda a consideración para que los futuros estudiantes o practicantes puedan mejorar el laboratorio haciéndolo más didáctico utilizando herramientas del mismo software LabVIEW.
- El laboratorio virtual para prácticas de máquinas eléctricas queda listo y disponible para que futuros estudiantes, docentes puedan aplicar el software en máquinas físicas y así poder operar de una forma remota.

j.- BIBLIOGRAFÍA

Alexandre Wagemakers, Francisco J. Escribano. 2008. *Introducción a la Teoría de las Máquinas Eléctricas*. España : Universidad Rey Juan Carlos , 2008.

ALVARADO, José y ROMERO, Edgar. 2009. *Energías Renovables*. Bogotá : CEAC, 2009.

CARRIÓN, Carlos. 2008. *Máquinas eléctricas*. México : Mc Graw-Hill, 2008.

Chamman, Stephen J. 2005. *Maquinas Electricas 4e*. Mexico : McGraw-Hill , 2005. ISBN: 0-07-246523-9.

HARPER, GILBERTO ENRIQUEZ. 1977. *CURSO DE TRANSFORMADORES Y MOTORES TRIFÁSICOS DE INDUCCIÓN* . MEXICO : LIMUSA, 1977.

MICHAEL LIWSCHITZ-GARIK CLYDE C. WHIPPLE. 1976. *MAQUINAS DE CORRIENTE ALTERNA* . MEXICO : COMPAÑIA EDITORIAL CONTINENTAL, S.A. , 1976. 4620.

Pozuela, Miguel Angel Rodriguez. 2008. *MAQUINAS ASÍNCRONAS* . España : Universidad de Cantabria , 2008.

RAMÍREZ, Patricio. 2012. *Transferencia de Calor*. Loja : UNL, 2012.

ROMAN, RAUL LEAÑO. 2000. *MAQUINAS DE CORRIENTE ALTERNA I*. LA PAZ- BOLIVIA : ELT 260, 2000.

Wildi, Theodore. 2007. *Maquinas Electricas y Sistema de Potencia* . Mexico : Person Prentice Hall, 2007. 970-26-0814-7.



k. ANEXOS

Laboratorio virtual de Máquinas Eléctricas

ORIENTACIÓN DE LA PRÁCTICA N°1

1. NOMBRE DE LA PRÁCTICA:

Ensayo en vacío, ensayo en cortocircuito y curva característica par-velocidad motor asíncronos.

2. OBJETIVOS:

- 1.-Determinar los valores característicos de la rama paralela del circuito equivalente el motor asíncrono a través del ensayo de vacío.
- 2.- Determinar los valores característicos de la rama serie del circuito equivalente del motor asíncrono por medio del ensayo en cortocircuito.
- 3.-Graficar y analizar la curva característica de los motores asíncronos “par-velocidad de sincronismo”.

3. PROCEDIMIENTO

Para los ensayos de vacío y cortocircuito es necesario introducir los siguientes valores como datos:

DATOS GENERALES DEL CIRCUITO:

- $P_{mec} = 0W$
- $V_L = V_o = 380V$
- $f = 50Hz$
- $p = 6$ pares de polos
- $P_{fw} = 275W$
- $R_{1_triangulo} = 1.5\Omega$
- $n = 960$ rpm

DATOS PARA EL ENSAYO EN VACÍO:

- $I_{1o} = 3A$
- $P_o = 700W$

DATOS PARA EL ENSAYO EN CORTOCIRCUITO:

- $V_{cc} = 100V$
- $I_{cc} = 20A$
- $P_{cc} = 1200W$

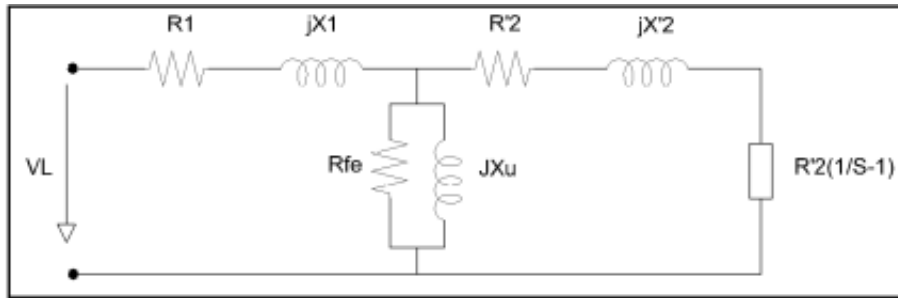


Figura 155. Circuito equivalente del Motor Asíncrono

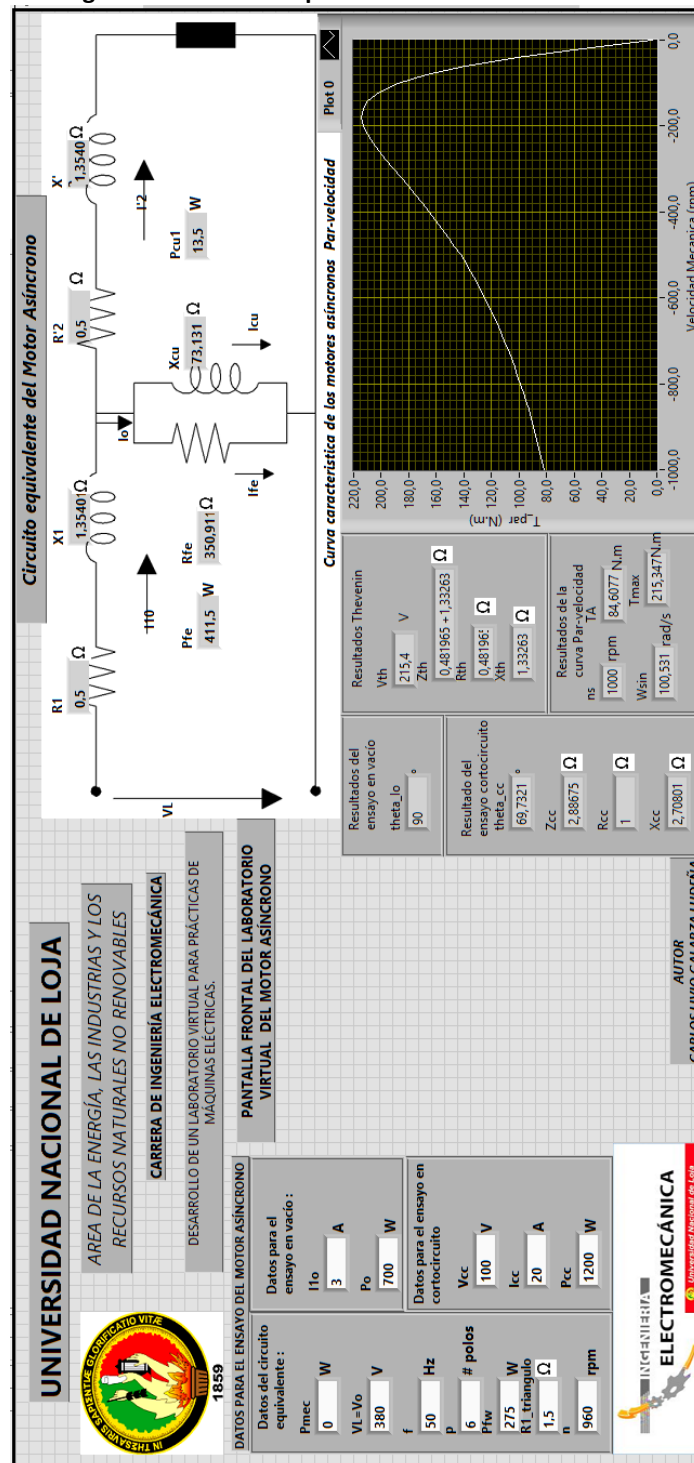


Figura 156 Pantalla frontal del laboratorio motor asíncrono con el programa corriendo

4. SISTEMA CATEGORIAL

- Ensayo en vacío y circuito equivalente del motor asíncrono.
- Circuito equivalente del motor asíncrono para el ensayo en cortocircuito.
- Consultar como se obtiene la tensión de Thevenin y la impedancia de Thevenin para el motor asíncrono.

5. PREGUNTAS DE CONTROL

- 5.1. ¿Qué sucede con la curva característica cuando se varia la resistencia del estator al doble, triple y cuádruple de su valor inicial?
- 5.2. ¿Qué sucede si cambiamos la frecuencia para el ensayo?
- 5.3. ¿Qué sucede si variamos los pares de polos a 8?

6. BIBLIOGRAFÍA

- Libro de Máquinas Eléctricas de Stephen Chapman tercera edición.
- Libro de Máquinas Asíncronas de Miguel Ángel Rodríguez.



Laboratorio virtual de Máquinas Eléctricas

ORIENTACIÓN DE LA PRÁCTICA N°2

1. NOMBRE DE LA PRÁCTICA:

Ensayo en vacío, ensayo en cortocircuito y curva característica par-velocidad generador asíncrono.

2. OBJETIVOS:

- 1.-Determinar los valores característicos de la rama paralela del circuito equivalente del generador asíncrono a través del ensayo de vacío.
- 2.- Determinar los valores característicos de la rama serie del circuito equivalente del generador asíncrono por medio del ensayo en cortocircuito.
- 3.-Graficar y analizar la curva característica de los generadores asíncronos “par-velocidad de sincronismo”.

3. PROCEDIMIENTO

Para el ensayo del generador asíncrono se lo realiza de la misma manera como si fuera el motor asíncrono partiendo de la consideración que el deslizamiento va ser negativo debido que la velocidad de sincronismo es mayor a la velocidad del rotor. Se utilizan los mismos valores del motor:

DATOS GENERALES DEL CIRCUITO:

- $P_{mec} = 0W$
- $V_L = V_o = 380V$
- $f = 50Hz$
- $p = 6$ pares de polos
- $P_{fw} = 275W$
- $R_{1_triangulo} = 1.5\Omega$
- $n = 960$ rpm

DATOS PARA EL ENSAYO EN VACÍO:

- $I_{lo} = 3A$
- $P_o = 700W$

DATOS PARA EL ENSAYO EN CORTOCIRCUITO:

- $V_{cc} = 100V$
- $I_{cc} = 20A$
- $P_{cc} = 1200W$

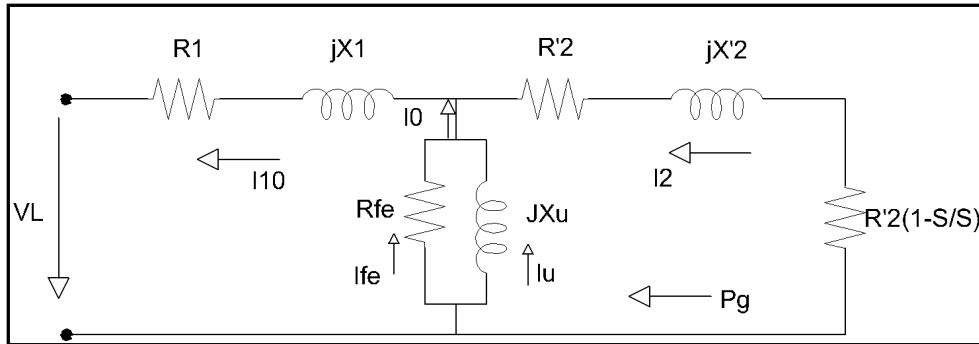


Figura 157. Circuito equivalente del Generador Asíncrono

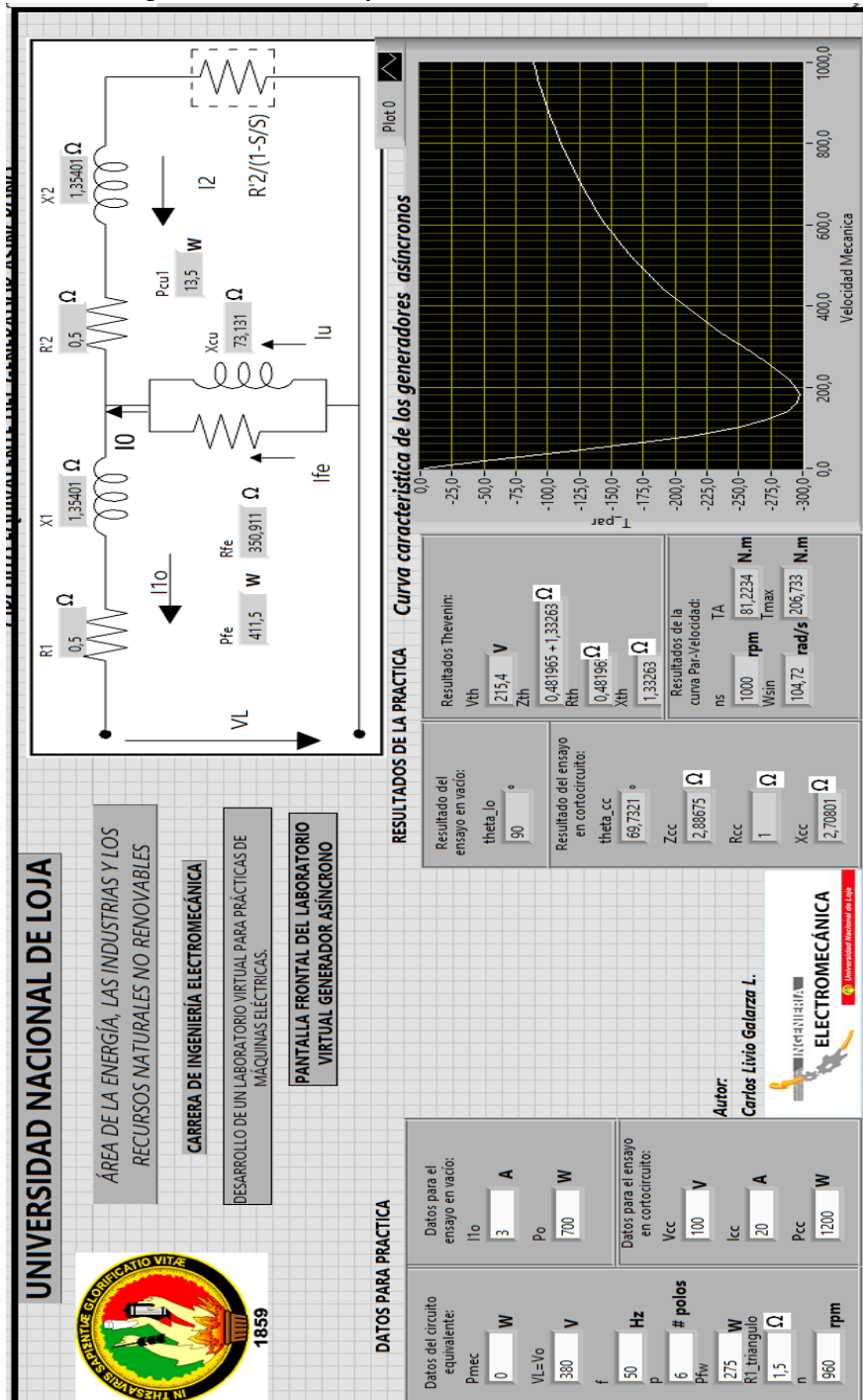


Figura 158 Pantalla frontal del laboratorio generador asíncrono con el programa corriendo.

4. SISTEMA CATEGORIAL

- Ensayo en vacío y circuito equivalente del generador asíncrono.
- Circuito equivalente del generador asíncrono para el ensayo en cortocircuito.
- Consultar como se obtiene la tensión de Thevenin y la impedancia de Thevenin para el generador asíncrono.
- Cuando cambia de régimen la máquina asíncrona.

5. PREGUNTAS DE CONTROL

- 5.1. ¿Qué sucede con la curva característica cuando se varia la resistencia del estator al doble, triple y cuádruple de su valor inicial?
- 5.2. ¿Qué sucede si cambiamos la frecuencia para el ensayo?
- 5.3. ¿Qué sucede si variamos los pares de polos a 8?

6. BIBLIOGRAFÍA

- Libro de Máquinas Eléctricas de Stephen Chapman tercera edición.
- Libro de Máquinas Asíncronas de Miguel Ángel Rodríguez.



Laboratorio virtual de Máquinas Eléctricas

ORIENTACIÓN DE LA PRÁCTICA N°3

1. NOMBRE DE LA PRÁCTICA:

Curva característica voltaje en los terminales respecto de la corriente de línea, considerando en vacío al generador síncrono.

2. OBJETIVOS:

1.- Considerando que el generador está operando en vacío realizar la gráfica de característica de los terminales y corriente de línea.

2.- Determinar las curvas conforme se varié la corriente del inducido desde vacío hasta plena carga con factor de potencia en retraso y adelanto.

3. PROCEDIMIENTO

Para el ensayo del generador síncrono suponer que la maquina está operando en vacío y que la corriente de campo permanece constante, se debe utilizar los siguientes datos:

DATOS GENERALES DEL CIRCUITO:

- $P_{fri} = 1.5\text{kW}$
- $V_o = 480\text{V}$
- $f = 50\text{Hz}$
- $p = 6$ pares de polos
- $X_s = 1\Omega$
- $I_A = 60\text{A}$
- $\cos \varphi = 0.8$
- $P_{núcleo} = 1.0\text{kW}$

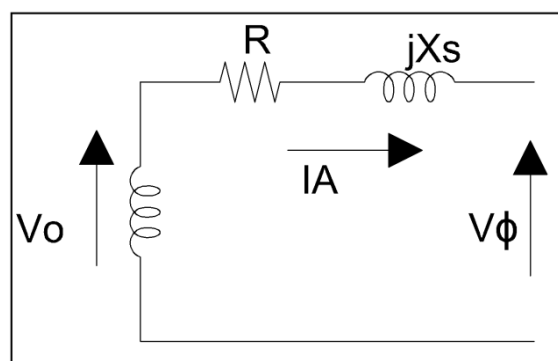


Figura 159. Circuito equivalente del generador síncrono

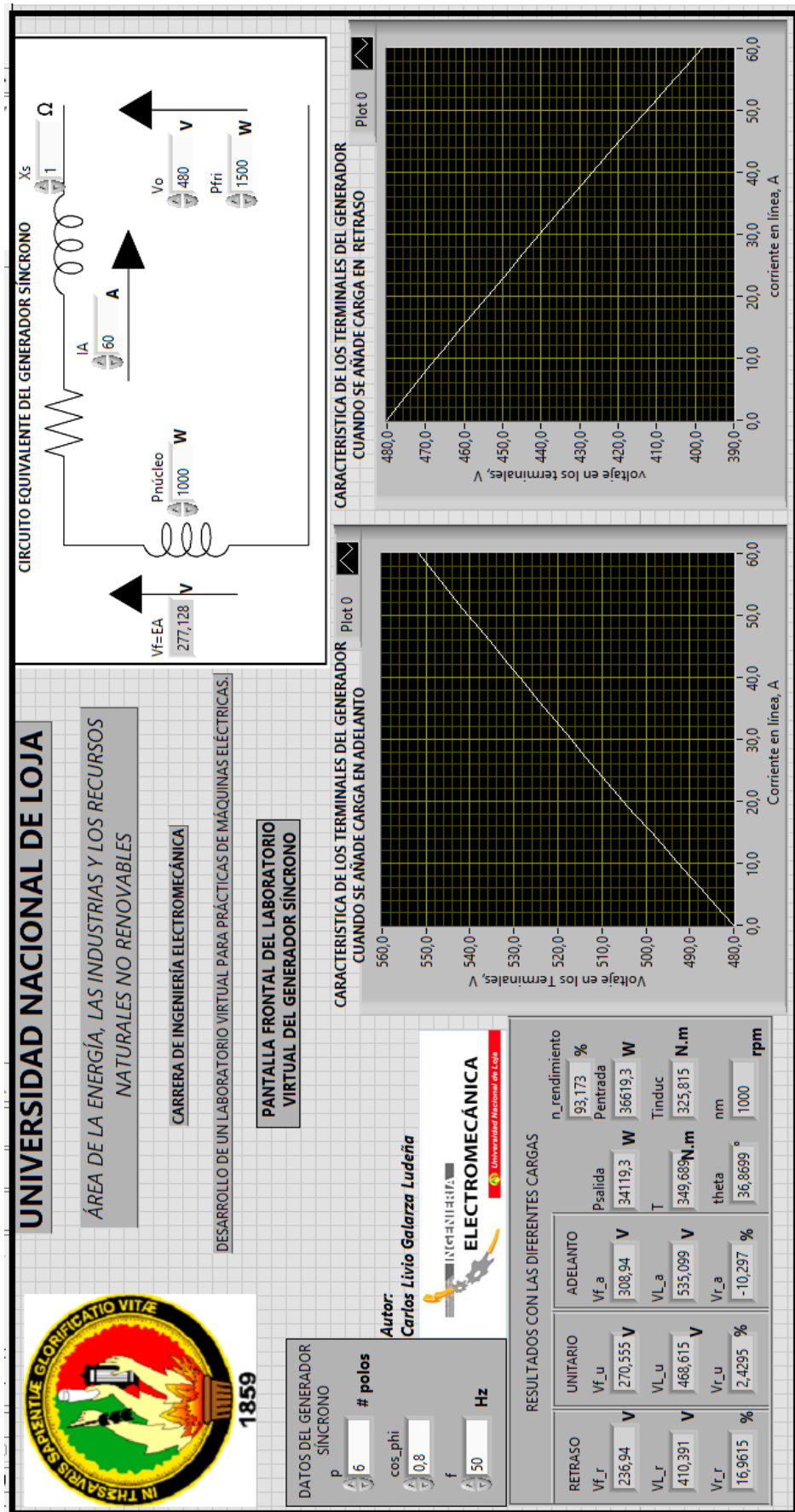


Figura 160 Pantalla frontal del laboratorio generador síncrono con el programa corriendo.

4. SISTEMA CATEGORIAL

- Ensayo en vacío y circuito equivalente del generador síncrono.
- Corriente de campo cuando es constante.

5. PREGUNTAS DE CONTROL

- 5.1. ¿Qué sucede con el voltaje generado cuando se opera con factor de potencia en retraso?
- 5.2. ¿Qué sucede con el voltaje generado cuando se opera con factor de potencia en adelanto?
- 5.3. ¿Qué sucede si aumenta el 10% el factor de potencia respecto del inicial?

6. BIBLIOGRAFÍA

- Libro de Máquinas Eléctricas y sistema de potencia de Theodore Wildi.
- Libro de curso de Máquinas síncronas de Gilberto Enríquez Harper.

Laboratorio virtual de Máquinas Eléctricas

ORIENTACIÓN DE LA PRÁCTICA N°4

1. NOMBRE DE LA PRÁCTICA:

Curva característica en V o Morday del motor síncrono.

2. OBJETIVOS:

- 1.-Determinar la gráfica característica del motor síncrono y definir su comportamiento a diferente corriente de campo.
- 2.- Determinar cuando el motor síncrono está consumiendo potencia reactiva.
- 3.- Determinar cuando el motor síncrono está suministrando potencia reactiva.

3. PROCEDIMIENTO

Teniendo en cuenta que la velocidad es constante en los motores síncronos ingresamos al programa los siguientes datos:

DATOS GENERALES DEL CIRCUITO:

- $P_{salida} = 11.9kW$
- $P_{meca} = 1.5kW$
- $P_{elec} = 0$
- $X_s = 2.5\Omega$
- $I_f = 4A$
- $\cos \varphi = 0.85$
- $P_{núcleo} = 1.0kW$
- $f = 60Hz$
- $V_{phase} = 208V$

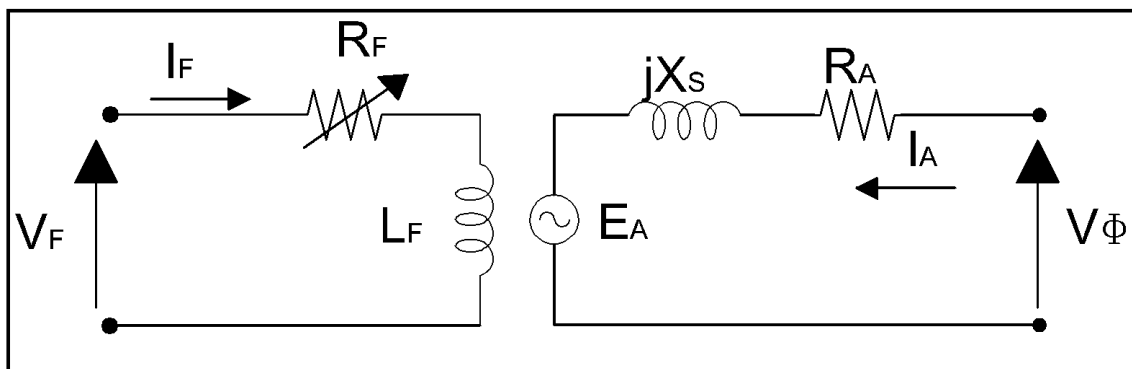


Figura 161. Circuito equivalente del motor síncrono

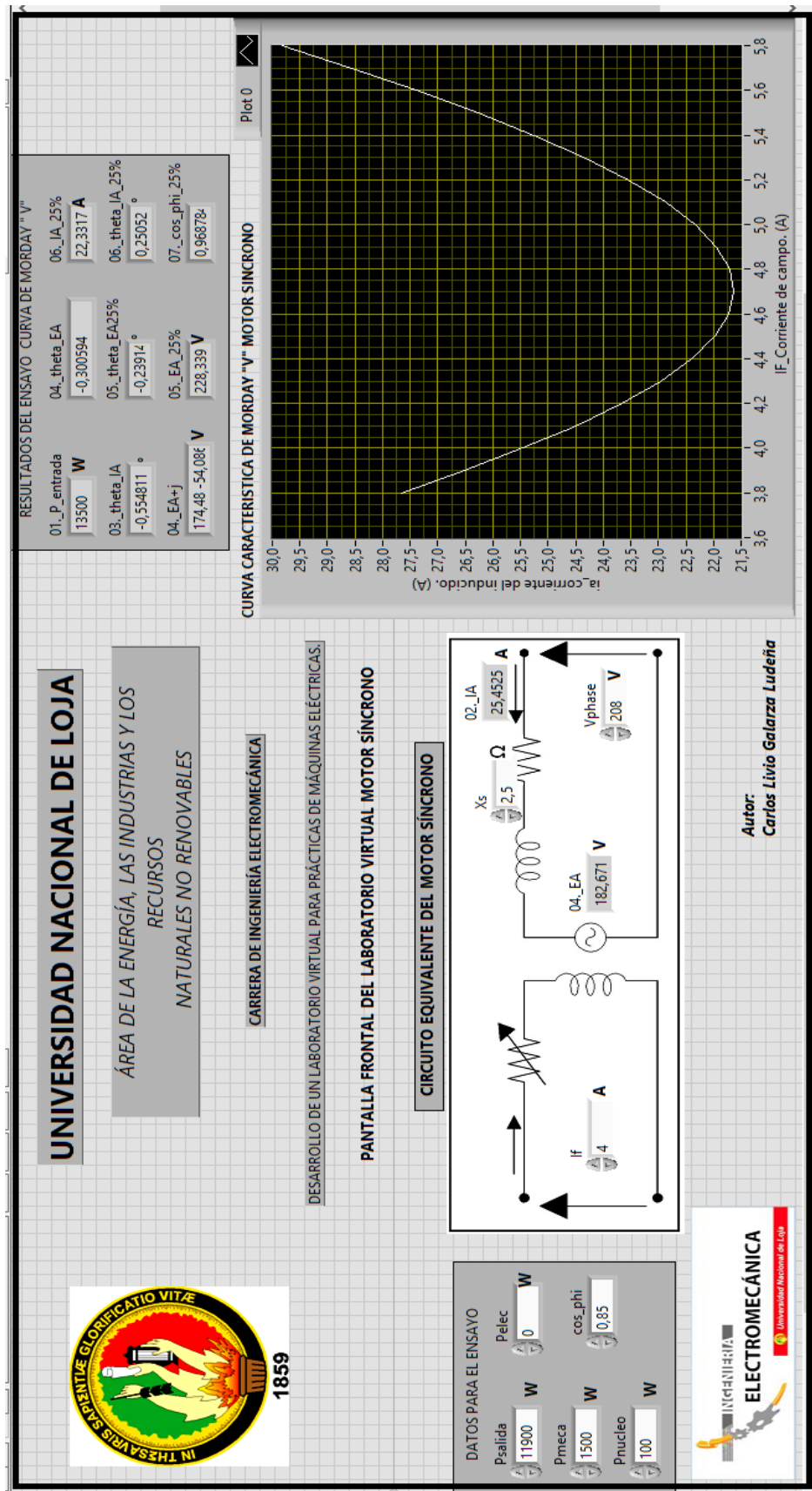


Figura 162 Pantalla frontal del laboratorio motor síncrono con el programa corriendo.

4. SISTEMA CATEGORIAL

- Curva de Morday
- Cuando la máquina síncrona consume potencia reactiva y cuando suministra potencia reactiva.

5. PREGUNTAS DE CONTROL

- 5.1. ¿Qué pasa en la gráfica cuando aumentamos la potencia mecánica?
- 5.2. ¿Cómo se puede controlar la potencia reactiva?
- 5.3. ¿Cuándo suministra potencia reactiva a qué asemeja su funcionamiento?

6. BIBLIOGRAFÍA

- Libro de Máquinas Eléctricas y sistema de potencia de Theodore Wildi.
- Libro de curso de Máquinas síncronas de Gilberto Enríquez Harper.



Laboratorio virtual de Máquinas Eléctricas

ORIENTACIÓN DE LA PRÁCTICA N°5

1. NOMBRE DE LA PRÁCTICA:

Curva característica de regulación del voltaje y corriente nominal con variaciones de carga, retraso, unitario y adelanto para el transformador trifásico.

2. OBJETIVOS:

1.- Determinar los valores característicos de la rama paralela del circuito equivalente del transformador a través del ensayo de vacío.

2.- Determinar los valores característicos de la rama serie del circuito equivalente del transformador por medio del ensayo en cortocircuito.

1.-Determinar y analizar la gráfica característica del transformador “regulación del voltaje con respecto de carga”.

2.-Analizar que sucede con el voltaje interno referido al secundario cuando se varía la carga en retraso, unitario y adelanto.

3. PROCEDIMIENTO

En el ensayo de la curva de regulación de voltaje y corriente se lo va realizar de una manera muy similar a la del motor asíncrono: utilizamos los siguientes datos para los ensayos:

DATOS GENERALES DEL CIRCUITO:

- $S_{nominal} = 15000VA$
- $V_{nominal} = 230V$

DATOS PARA EL ENSAYO EN VACÍO:

- $I_o = 0.21A$
- $P_o = 50W$
- $V_o = 2300V$
- $a = 10 = N_1/N_2$

DATOS PARA EL ENSAYO EN CORTOCIRCUITO:

- $V_{cc} = 47V$
- $I_{cc} = 6.0A$
- $P_{cc} = 160W$

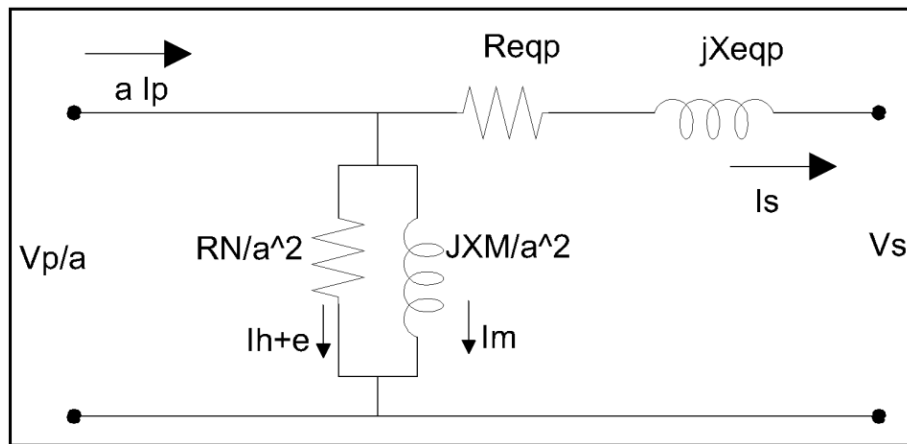


Figura 163. Circuito equivalente del transformador trifásico

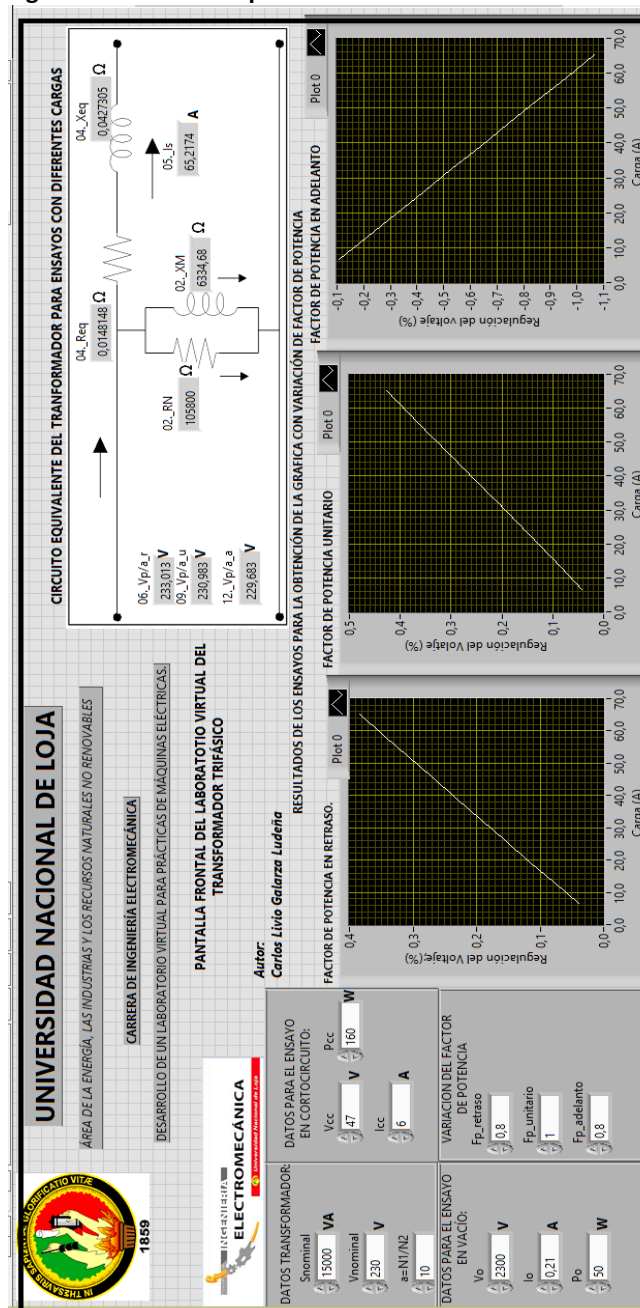


Figura 164 Pantalla frontal del laboratorio del transformador trifásico con el programa corriendo.

4. SISTEMA CATEGORIAL

- Transformadores trifásicos contenidos básicos
- Comportamientos del transformador a diferentes cargas: retraso, unitario y adelanto.
- Determinar el proceso como resolver las admitancias e impedancias.

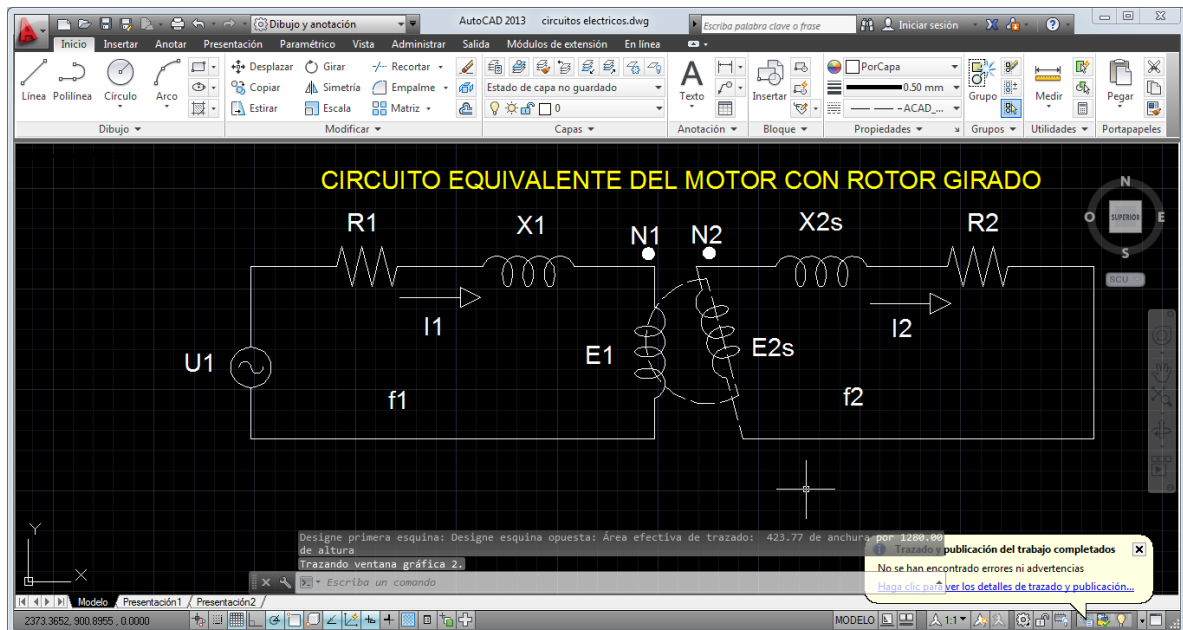
5. PREGUNTAS DE CONTROL

- 5.1. ¿Cuál es la diferencia porcentual del voltaje nominal a diferentes cargas?
- 5.2. ¿Cuál es la unidad de medida y símbolo de la admitancia?
- 5.3. ¿sí aumentamos el voltaje nominal que sucede con la regulación de voltaje?

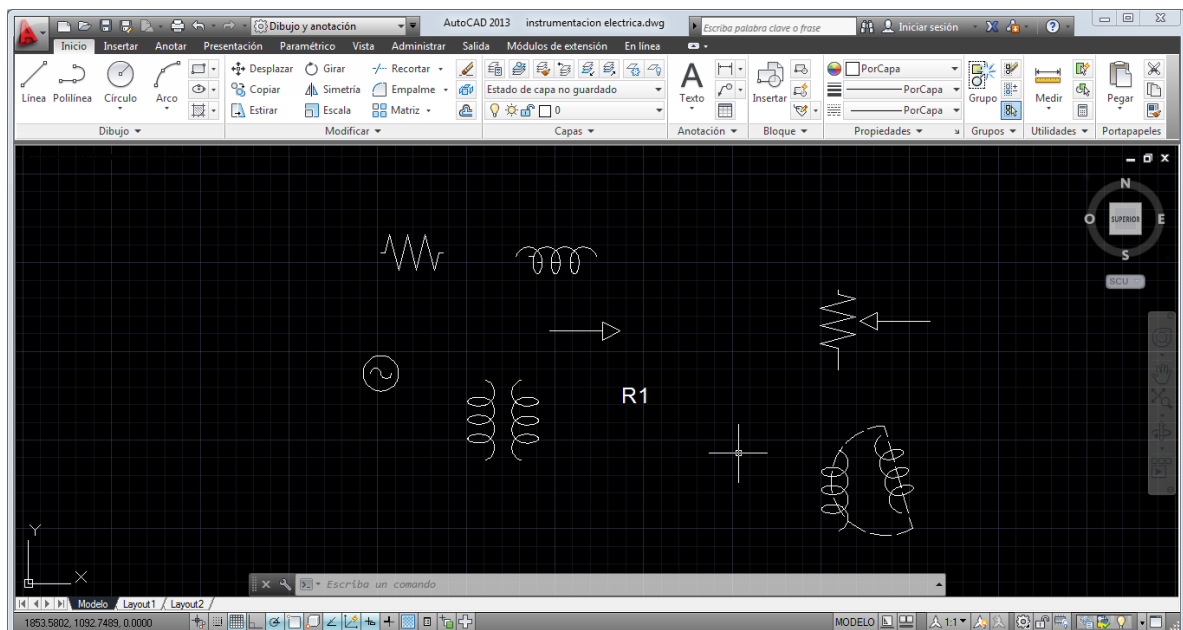
6. BIBLIOGRAFÍA

- Libro de introducción a las Máquinas Eléctricas de Alexander Wagemakers.
- Libro de curso de transformadores y motores trifásicos de inducción de Gilberto Enríquez Harper.
- Libro de Máquinas Eléctricas de Stephen Chapman tercera y cuarta generación.

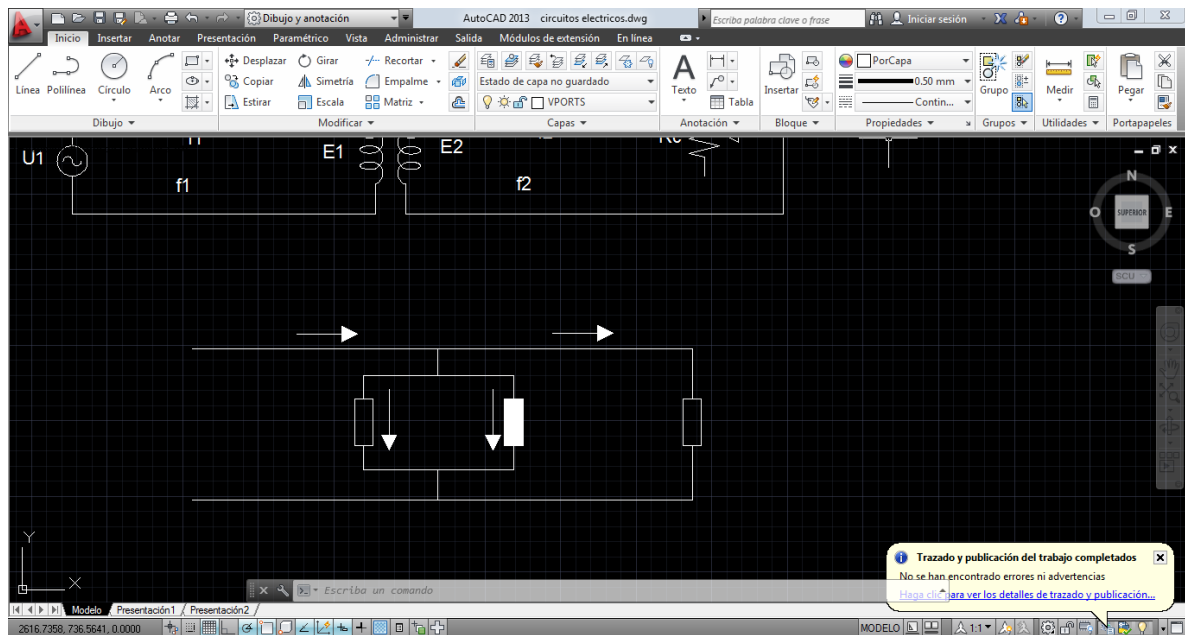
IMÁGENES DE LOS CIRCUITOS ELECTRICOS DESARROLADAS EN AUTCAD_2014 PARA LAS DIFERENTES PRACTICAS DE MAQUINAS ELECTRICAS



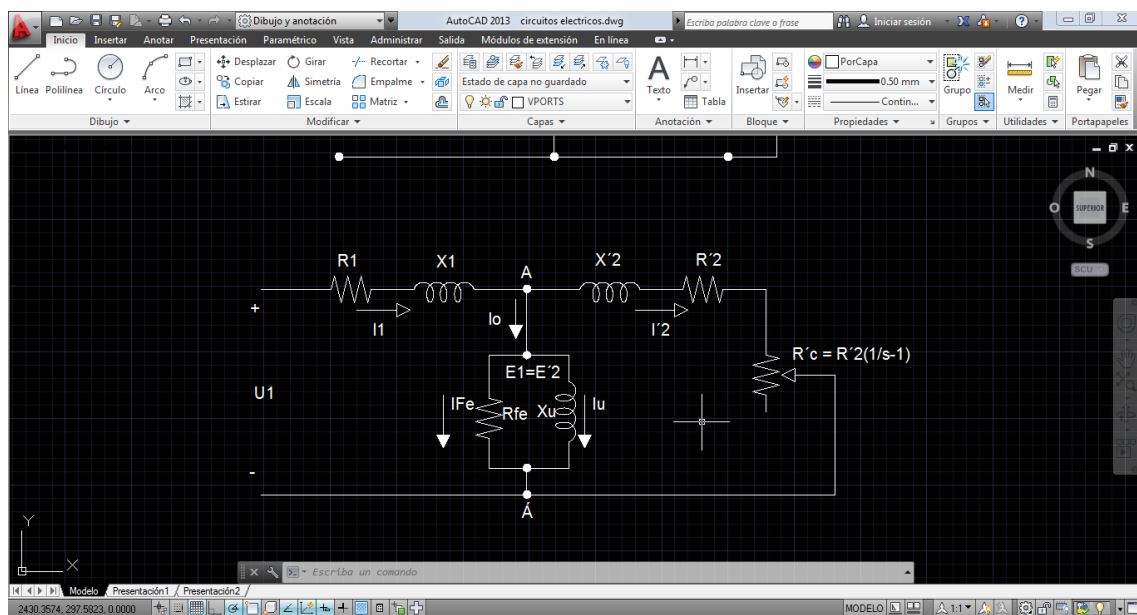
Desarrolló los circuitos equivalentes de todos los ensayos en AutoCAD 2014.



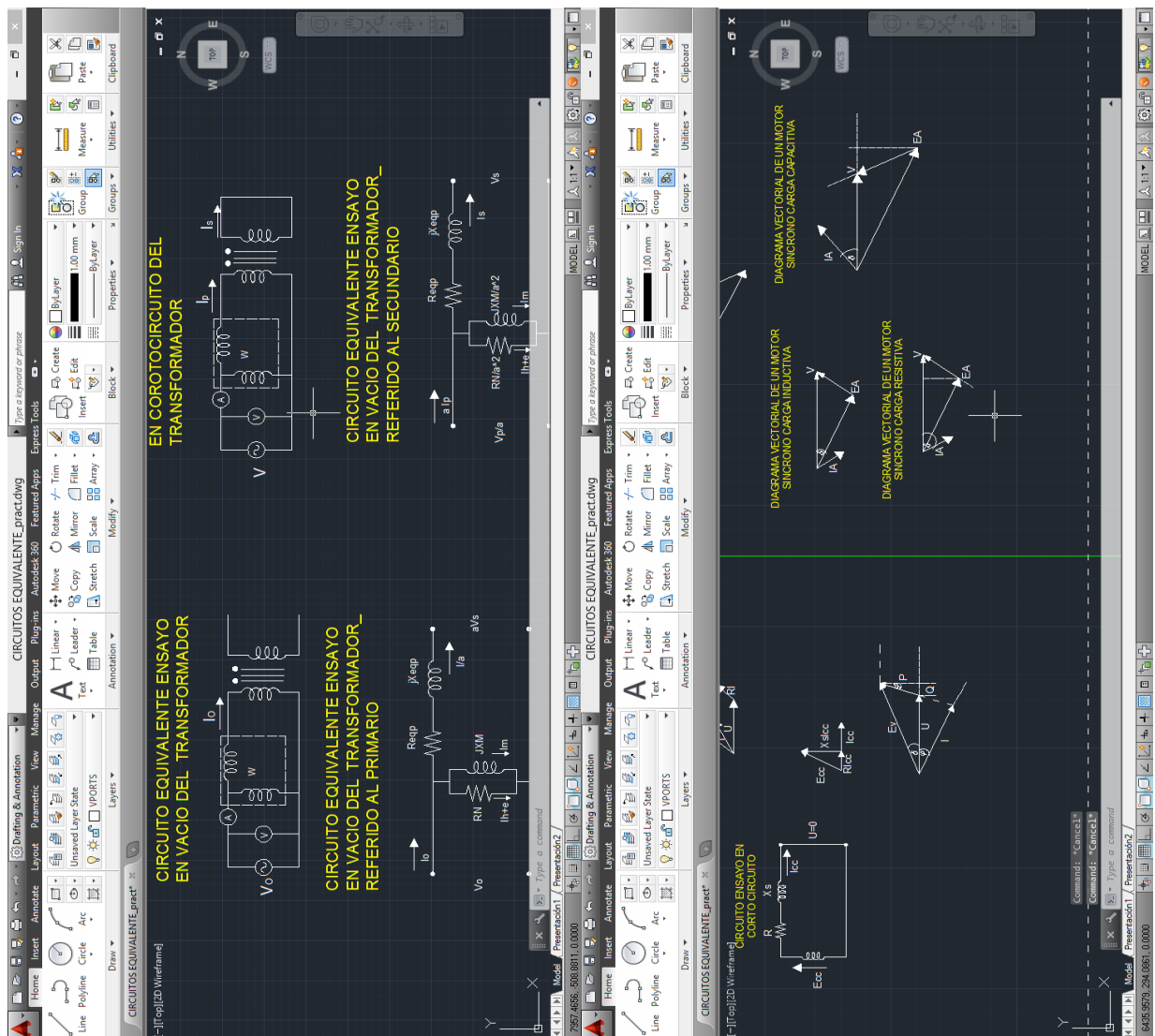
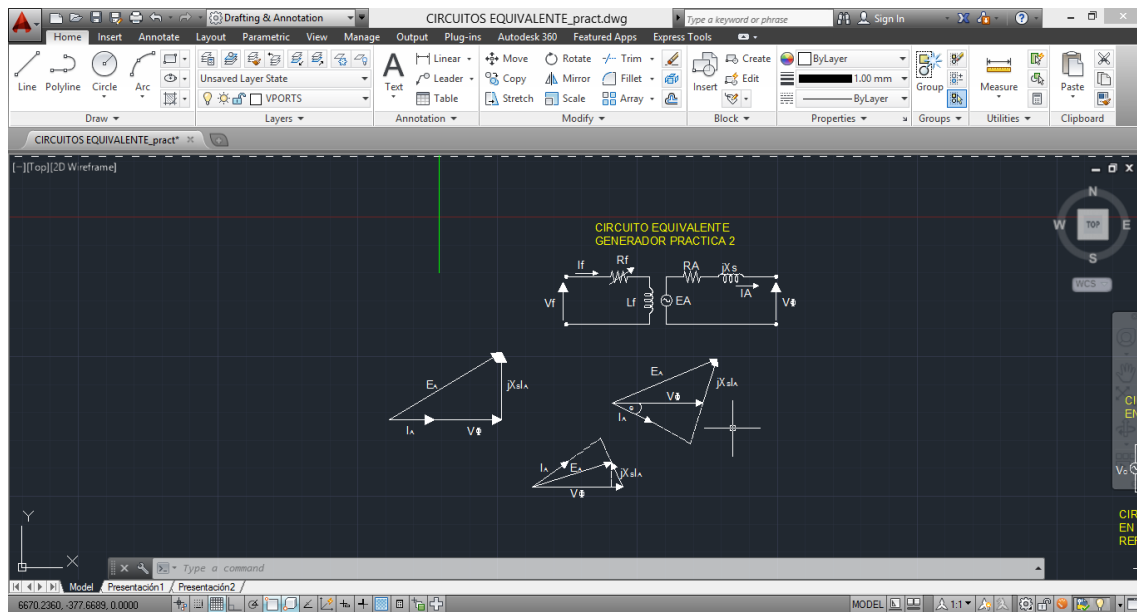
Desarrolló los circuitos equivalentes de todos los ensayos en AutoCAD 2014.



Captura de pantalla de cómo se graficó los circuitos equivalentes en AutoCAD 2014



Captura de pantalla de cómo se graficó los circuitos equivalentes en AutoCAD 2014



- Captura de pantalla durante el proceso de construcción de los circuitos equivalentes para las diferentes prácticas en el software AutoCAD 2014.