

**DISEÑO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA EMPLEANDO ALTERNADORES DE
AUTOMÓVIL**

**GINNY MARINELLA NIÑO BÁEZ
JORGE LUIS PLATA NARANJO
CRISTIAN DAVID CAMPUZANO FLORIAN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2015**

**DISEÑO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA EMPLEANDO ALTERNADORES DE
AUTOMÓVIL**

**GINNY MARINELLA NIÑO BÁEZ
JORGE LUIS PLATA NARANJO
CRISTIAN DAVID CAMPUZANO FLORIAN**

**Trabajo para optar al título de
Ingenieros Electricistas**

**Director
HERMANN RAÚL VARGAS TORRES
Dr. Ingeniero Electricista**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2015

AGRADECIMIENTOS

Después del transcurso de más de seis años de carrera universitaria, no se pueden excluir unas cortas pero sinceras palabras de agradecimiento. En primer lugar al Señor Jesucristo quien es el Dios a quien debemos todo, y es el que indiscutiblemente nos ha concedido inteligencia, fuerza, firmeza, motivación y amor, a mis compañeros y a mí durante toda nuestra vida universitaria. Y quien en esta última instancia, nos brinda el favor de haber escrito satisfactoriamente este libro para la obtención del título profesional. Gracias Jesús. Gracias a mi madre Enith María Florián Villalobos, quien desde antes de tener entendimiento ha sido un apoyo incondicional, la cual en medio de las limitaciones económicas, físicas e intelectuales, se esforzó y trabajó durante toda mi vida para que yo lograra alcanzar esta meta. Gracias Madre. Gracias a la Universidad Industrial de Santander dentro de la cual puede desarrollarme como persona, intelectualmente, socialmente y humanamente, gracias por brindarme sus instalaciones y sus recursos. Doy gracias a la escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones y a todo el cuerpo docente y administrativo que lo conforma, pues en cada etapa de mi proceso de formación intervinieron de forma constructiva. Gracias. Gracias a Bienestar Universitario, a la sección de Comedores, Salud y Combos saludables, pues representaron una gran ayuda económica, sin la cual habría sido muy difícil llegar a este nivel. Quiero agradecer a todos mis compañeros, con quienes tuve el privilegio de compartir, pues también aprendí muchas cosas de ellos tanto en la parte académica, pero también en el aspecto humano. Y por supuesto gracias a mis dos compañeros Ginny Marinella Niño Báez y Jorge Luis Plata Naranjo, quienes fueron de gran ayuda en la elaboración de este Libro.

Cristian David Campuzano Florián

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mis amados Padres, Jaime Plata y Rosa María Naranjo, quienes me apoyaron incondicionalmente durante toda mi formación como profesional, porque sabiamente me guiaron y me dieron el ejemplo y los valores para seguir por este camino de bien. A todos aquellos docentes que de alguna u otra manera brindaron su conocimiento, experiencia y consejería en pos de mi crecimiento personal e intelectual: Dr. Gabriel Ordoñez Plata, Dr. Herman Raúl Vargas, Dr. Julio Rujeles Jones, Dr. Gerardo Latorre Bayona, Msc. Julio Augusto Gelvez Figueredo, Msc. Julio Cesar Chacon, Msc. Raul Omar Vila Casado.

Jorge Luis Plata Naranjo

AGRADECIMIENTOS

Después de dedicar varios años de mi vida a prepararme profesionalmente quiero dar las gracias a las personas que de una u otra forma me ayudaron a cumplir esta meta.

A Dios por todo el amor y compañía que me brindó día a día en el transcurso de mi vida universitaria y la fortaleza que me regaló en los momentos difíciles para continuar con este sueño de ser ingeniera electricista.

A mi mamá Fanny Báez Lizarazo por todo el apoyo emocional, sentimental y económico que me entregó incondicionalmente. Por ser esa gran madre ejemplo de vida, amor, fortaleza y perseverancia, quien me inculcó los valores que hoy en día hacen de mí una gran mujer, por enseñarme a soñar sin límites y a volar muy alto a pesar de los obstáculos.

A mis tíos Raúl y Mireya y a mis primas Paola y Daniela, por apoyarme en cada momento y hacerme sentir parte de su familia.

A mi amiga Ingrid Vanessa Africano Rodríguez, a quien estimo mucho, por sus valiosos consejos que me ayudaron a crecer espiritual y emocionalmente.

Al profesor Hermann Raúl Vargas Torres quien no sólo nos digirió en la elaboración de este trabajo de grado, sino que también nos motivó a seguir con los estudios para crecer profesionalmente.

A mis amigos Joan, Wilson, Tino, Esteban, Ana, Churco, Yuri, Carlos y Cristian porque sin ustedes no hubiese sido tan agradable este caminar en la universidad, gracias.

A los docentes de la Universidad Industrial de Santander, quienes entregaron sus conocimientos para mi realización como profesional.

A todas aquellas personas que con una simple sonrisa o una palabra de aliento me hicieron recordar que la vida realmente vale la pena y que cuando logras algo que ha sido muy difícil de conseguir, los triunfos se saborean de una forma más agradable.

Gracias a todos!

Ginny Marinella Niño Báez

CONTENIDO

	Pág
INTRODUCCIÓN	21
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
2 JUSTIFICACIÓN.....	23
3 OBJETIVOS	24
3.1 Objetivo general	24
3.1.1 Objetivos específicos	24
4 MARCO TEÓRICO	25
4.1 SISTEMAS DE POTENCIA.....	25
4.2 GENERACIÓN DE ENERGÍA	26
4.3 CONTROL PAR - VELOCIDAD.....	26
4.4 CONTROL DE CAMPO	27
4.5 TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA	27
4.6 CORTE Y SECCIONAMIENTO.....	28
4.7 CONSUMO DE ENERGÍA	28
5 ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DE POTENCIA	29
5.1 DIAGRAMA UNIFILAR	29
5.2 SIMULACIONES EN POWER-WORLD.....	32
6 ESPECIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE POTENCIA.....	40
6.1 ALTERNADORES	40
6.1.1 Regulación de tensión.....	44

6.1.2	Control de frecuencia	44
6.2	MOTORES DE INDUCCIÓN.....	45
6.3	VARIADORES DE VELOCIDAD	48
6.4	SISTEMAS DE REDUCCIÓN DE VELOCIDAD	50
6.5	TARJETAS NI USB-6009.....	51
6.6	PINZAS AMPERMÉTRICAS.....	52
6.7	CUCHILLAS ELÉCTRICAS.....	53
6.8	PLATINA DE COBRE	54
6.9	NÚCLEOS Y CONDUCTOR ESMALTADO	61
6.9.1	Líneas de transmisión. Después de enrollar las bobinas en los núcleos se tiene	62
6.9.2	Cargas inductivas. Como se mencionó anteriormente, la carga inductiva tiene.....	72
6.10	BOMBILLOS HALÓGENOS.....	75
6.11	CIRCUITOS DE PROTECCIÓN.....	82
6.12	LISTADO DE ELEMENTOS Y COSTOS	83
7	GUÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE POTENCIA	85
7.1	GENERACIÓN.....	85
7.2	TRANSPORTE.....	101
7.3	CARGAS.....	103
7.3.1	Carga resistiva. La carga resistiva está conformada por luminarias halógenas	105
7.3.2	Carga inductiva. Al igual que en el módulo de línea, el de carga inductiva está	106
7.4	CABLEADO DEL SISTEMA DE POTENCIA.....	107
7.4.1	Conexión entre el sistema de control de campo y el alternador. La conexión.....	107
7.4.2	Conexión entre el alternador y la barra de generación. Este acople se debe	108
7.4.3	Conexión del variador de velocidad a la red. La conexión general para la energía.....	109

7.4.4	Conexión variador-motor. Esta conexión debe soportar la transferencia de energía	110
7.4.5	Conexión del sistema de control de potencia al variador. El sistema de control	111
7.4.6	Cableado la barra principal del módulo de generación. La conexión del barraje	112
7.4.7	Cableado del módulo de barra de carga. El conexionado de este módulo es similar	115
7.4.8	Cableado del módulo de línea de transmisión. El diagrama esquemático de la.....	115
7.4.9	Cableado del módulo de carga inductiva. El cableado interno de este módulo.....	117
7.4.10	Conexión en el módulo de carga resistiva. La conexión de este módulo es similar	117
8	CARACTERIZACIÓN DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	119
8.1	INDUCTANCIA PROPIA DE CADA FASE A DIFERENTES CORRIENTES.....	126
8.1.1	Línea de 10-8 para una frecuencia de 360 Hz. Se presenta en esta parte los.....	127
8.1.2	Línea de 15-12 para una frecuencia de 360 Hz. Se presenta en esta parte los.....	130
8.1.3	Línea de 18-14 para una frecuencia de 360 Hz. Se presenta en esta parte los.....	133
8.2	INDUCTANCIA PROPIA DE CADA FASE A DIFERENTES FRECUENCIAS.....	136
8.2.1	Línea de 10-8 para una corriente de 10 A. Se presenta en esta parte los resultados	137
8.2.2	Línea de 15-12 para una corriente de 10 A. Se presenta en esta parte los	139
8.2.3	Línea de 18-14 para una corriente de 10 A. Se presenta en esta parte los	142
8.3	TENSIÓN INDUCIDA EN LAS FASES A DIFERENTES CORRIENTES	146
8.3.1	Línea de 10-8 para una frecuencia de 360 Hz.....	147
8.3.2	Línea de 15-12 para una frecuencia de 360 Hz. Se presenta en esta parte los.....	149
8.3.3	Línea de 18-14 para una frecuencia de 360 Hz. Se presenta en esta parte los.....	153
8.4	TENSIÓN INDUCIDA EN LAS FASES A DIFERENTES FRECUENCIAS	156
8.4.1	Línea de 10-8 para una corriente de 10 A. Se presenta en esta parte los resultados	156
8.4.2	Línea de 15-12 para una corriente de 10 A. Se presenta en esta parte los que	159
8.4.3	Línea de 18-14 para una corriente de 10 A. Se presenta en esta parte los	162

8.5	OPERACIÓN TRIFÁSICA DE LAS LÍNEAS A DIFERENTES FRECUENCIAS	166
8.6	INDUCTANCIA DE LA LÍNEA EN FUNCIÓN DE LA GEOMETRÍA.....	167
8.7	IMPEDANCIA DE SECUENCIA CERO	173
9	CONCLUSIONES.....	180
10	RECOMENDACIONES.....	182
11	OBSERVACIONES.....	183
	BIBLIOGRAFÍA.....	184

**ANEXOS [EN ARCHIVO INDEPENDIENTE PUEDEN CONSULTARSE EN BIBLIOTECA
UIS- SALA BASE DE DATOS]**

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Sistema eléctrico de potencia.	25
Figura 2. Diagrama unifilar del sistema de potencia.	30
Figura 3. Simulación de la operación a 30% de plena carga o menor sin demanda reactiva.	33
Figura 4. Simulación de la operación a 30% de plena carga o menor con potencia reactiva para un FP=0,977.	34
Figura 5. Simulación de la operación 50 % de plena carga con potencia reactiva para un FP=0,964.	35
Figura 6. Simulación de la operación para un 90 % de Plena carga con potencia reactiva para un FP=0,965.	36
Figura 7. Simulación de la operación a un 75% de Plena carga con potencia reactiva para un FP= 0,825.	37
Figura 8. Simulación de la operación a plena carga con potencia reactiva para un FP= 0,7.	38
Figura 9. Alternador Ford 12 V Delco Remy con regulador externo.	40
Figura 10. Estator de un alternador.	42
Figura 11. Capacidad del alambre magneto según el calibre.	43
Figura 12. Motor de inducción marca Siemens de la línea 1LA7	45
Figura 13. Variador de velocidad V20.	49
Figura 14. Diámetros de las poleas.	50
Figura 15. Sistema de reducción de velocidad $r= 8,708$	50
Figura 16. Tarjeta NI USB-6009.	51
Figura 17. Pinza amperométrica UNI-T 204.	52
Figura 18. Cuchilla eléctrica trifásica.	53
Figura 19. Barraje de cobre de 23cm de longitud, con soporte y aisladores.	54
Figura 20. Terminal tipo ojo.	55
Figura 21. Caja para el barraje de generación.	56
Figura 22. Cajas para las barras en el sistema de potencia.	57
Figura 23. Detalle de la caja para los barrajes de generación y carga.	58
Figura 24. Imagen superior de la caja para el barraje de generación.	59
Figura 25. Imagen superior de la caja para el barraje de carga.	59
Figura 26. Terminales tipo banana hembra.	60
Figura 27. Terminales tipo banana macho.	60
Figura 28. Medidas de los núcleos de ferrita.	61
Figura 29. Núcleo con bobinas en las tres columnas.	62
Figura 30. Circuito magnético equivalente.	62
Figura 31. Circuito magnético equivalente para la bobina lateral.	63
Figura 32. Circuito magnético equivalente para la bobina central.	63
Figura 33. Representación de las longitudes para el cálculo de reluctancias.	64
Figura 34. Medidas del núcleo.	66
Figura 35. Caja para las líneas de transmisión.	69
Figura 36. Cajas para las líneas en el sistema de potencia.	70
Figura 37. Detalle de la caja para las líneas de transmisión.	71
Figura 38. Imagen superior de la caja para las líneas de transmisión.	71

Figura 39. Caja para la carga inductiva.....	74
Figura 40. Imagen superior de la caja para la carga inductiva.	74
Figura 41. Bombillo halógeno 24 V y 100 W.	75
Figura 42. Casquillo para bombillo halógeno.	75
Figura 43. Caja para la carga resistiva.....	76
Figura 44. Imagen superior de la caja para la carga resistiva.	77
Figura 45. Combinación de carga.	78
Figura 46. Circuito de carga con resistencias en paralelo y bobinas en serie.	81
Figura 47. Circuito de carga con cuatro deltas en paralelo.	82
Figura 48. Circuito de protección y tarjeta NI USB-6009.....	83
Figura 49. Estructura de soporte del módulo de generación.	85
Figura 50. Sistema de fijación del alternador sobre la estructura de soporte.	86
Figura 51. Puntos de fijación del alternador.	87
Figura 52. Sistema de soporte para el motor.	88
Figura 53. Puntos de sujeción del motor sobre la estructura de soporte.	90
Figura 54. Soporte para el variador de velocidad.....	91
Figura 55. Puntos de fijación del variador de velocidad	91
Figura 56. Caja metálica.	92
Figura 57. Tarjeta NI USB6009 y circuito de protección dentro de la caja metálica.	92
Figura 58. Espacio designado para el barraje principal.....	93
Figura 59. Posición y orientación del barraje sobre la estructura de soporte.	93
Figura 60. Espacio para el sistema de control de campo.	94
Figura 61. Orientación del sistema de control de campo.	94
Figura 62. Bandeja porta cables.	95
Figura 63. Acople motor alternador.....	96
Figura 64. Acople motor alternador, alineación horizontal de los ejes.	97
Figura 65. Módulo de generación con todos sus componentes.	97
Figura 66. Módulo de línea de transmisión.	101
Figura 67. Espacio para la ubicación del núcleo ferromagnético.	102
Figura 68. Amarre del núcleo de ferrita a la caja.....	102
Figura 69. Cuchillas fijas a la base de madera.....	103
Figura 70. Módulo de carga resistiva compuesto por bombillos halógenos.	104
Figura 71. Módulo de carga inductiva compuesto por núcleos y bobinas.	104
Figura 72. Módulo de carga resistiva.	105
Figura 73. Modo de conexión de los bombillos al módulo.	105
Figura 74. Módulo de carga inductiva.	106
Figura 75. Detalle del amarre de los núcleos a la base del módulo.	106
Figura 76. Conexión entre el control de campo y alternador.	107
Figura 77. Conexión entre el alternador y la barra de generación.....	109
Figura 78. Conexión del variador de velocidad a la red.	110
Figura 79. Conexión entre el variador y el motor.	111
Figura 80. Conexión sistema de control al variador.	112

Figura 81. Conexión entre la barra y cuchillas de protección.	113
Figura 82. Punto de conexión para sistemas adicionales de corte y/o protección.....	114
Figura 83. Detalle de la conexión interna de la barra de carga.	115
Figura 84. Puntos de conexión para sistemas adicionales de corte y/o protección.....	116
Figura 85. Detalle de la conexión interna del módulo de línea.	116
Figura 86. Detalle de la conexión interna del módulo de carga inductiva.	117
Figura 87. Detalle de la conexión interna del módulo de carga resistiva.	118
Figura 88. Línea de transmisión 10-8.	120
Figura 89. Línea de transmisión 15-12.....	122
Figura 90. Línea de transmisión 18-14.....	124
Figura 91. Línea de transmisión trifásica y equivalente monofásico de línea corta.	125
Figura 92. Esquema de prueba para determinar la inductancia.	126
Figura 93. Línea 10-8 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs corriente de fase A.....	128
Figura 94. Línea 10-8 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs corriente de fase B.....	129
Figura 95. Línea 10-8 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs corriente de fase C.	130
Figura 96. Línea 15-12 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs corriente de fase A.....	131
Figura 97. Línea 15-12 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs corriente de fase B.....	132
Figura 98. Línea 15-12 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs corriente de fase C.....	133
Figura 99. Línea 18-14 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs corriente de fase A.....	134
Figura 100. Línea 18-14 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs corriente de fase B.....	135
Figura 101. Línea 18-14 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs corriente de fase C.....	136
Figura 102. Línea 10-8 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs frecuencia de fase A.	137
Figura 103. Línea 10-8 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs frecuencia de fase B.	138
Figura 104. Línea 10-8 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs frecuencia de fase C.	139
Figura 105. Línea 15-12 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs frecuencia de fase A.	140
Figura 106. Línea 15-12 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs frecuencia de fase B.	141
Figura 107. Línea 15-12 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs frecuencia de fase C.	142
Figura 108. Línea 18-14 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs frecuencia de fase A.	143
Figura 109. Línea 18-14 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs frecuencia de fase B.	144
Figura 110. Línea 18-14 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs frecuencia de fase C.	145
Figura 111. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 360 Hz.	147
Figura 112. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 360 Hz.	148
Figura 113. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 360 Hz.	149
Figura 114. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 360 Hz.	150
Figura 115. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 360 Hz.	151
Figura 116. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 360 Hz.	152
Figura 117. Línea 18-14 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 360 Hz.	153
Figura 118. Línea 18-14 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 360 Hz.	154
Figura 119. Línea 18-14 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 360 Hz.	155
Figura 120. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 10 A.	157
Figura 121. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 10 A.	158
Figura 122. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 10 A.	159

Figura 123. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 10 A.	160
Figura 124. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 10 A.	161
Figura 125. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 10 A.	162
Figura 126. Línea 18-14. Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 10 A.	163
Figura 127. Línea 18-14 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 10 A.	164
Figura 128. Línea 18-14 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 10 A.	165
Figura 129. Conexión de las bobinas para el cálculo de Z0.	173
Figura 130. Impedancias de secuencia cero para la línea 10-8 a corriente 10 A.	174
Figura 131. Impedancias de secuencia cero para la línea 15-12 corriente 10 A.	175
Figura 132. Impedancias de secuencia cero para la línea 18-14 a corriente 10 A.	176
Figura 133. Impedancias de secuencia cero para la línea 10-8 a frecuencia 360 Hz.	177
Figura 134. Impedancias de secuencia cero para la línea 15-12 a frecuencia 360 Hz.	178
Figura 135. Impedancias de secuencia cero para la línea 18-14 a frecuencia 360 Hz.	179

LISTA DE TABLAS

Pág

Tabla 1. Parámetros de funcionamiento del sistema.....	31
Tabla 2. Valor de inductancia y reactancia de las líneas de transmisión.....	32
Tabla 3. Operación del sistema a 30% de plena carga o menor sin demanda reactiva (FP=1).....	34
Tabla 4. Operación a 30% de plena carga o menor con demanda de potencia reactiva (FP=0,977).....	35
Tabla 5. Operación del sistema a 50 % de plena carga con demanda de potencia reactiva.....	36
Tabla 6. Operación del sistema para un 90 % de Plena carga con reactiva.....	37
Tabla 7. Operación a un 75% de Plena carga con $fp=0,825$	38
Tabla 8. Operación del sistema en PowerWorld a plena carga con un $fp= 0,7$	39
Tabla 9. Prueba de tensión versus velocidad.....	41
Tabla 10. Especificaciones del variador de velocidad V20.....	49
Tabla 11. Especificaciones de la pinza amperométrica UNI-T 204.....	53
Tabla 12. Cálculos de número de espiras y resistencias por fase.....	66
Tabla 13. Resultados de los cálculos de inductancia en cada fase.....	68
Tabla 14. Resultados de la carga inductiva de 15 espiras.....	72
Tabla 15. Resultados de la carga inductiva de 10 espiras.....	73
Tabla 16. Resultados de cálculos para resistencias y bobinas en serie.....	80
Tabla 17. Resultados de cálculos para resistencias en paralelo y bobinas en serie.....	81
Tabla 18. Listado y costos de elementos.....	83
Tabla 19. Referencia de la tornillería en la estructura de soporte.....	98
Tabla 20. Resultados del número de espiras y resistencias en cada fase de la Línea 1.....	119
Tabla 21. Resultados del número de espiras y resistencias en cada fase de la línea 2.....	121
Tabla 22. Resultados del número de espiras y resistencias en cada fase de la Línea 3.....	123
Tabla 23. Línea 10-8. Inductancia propia para la fase A a 360 Hz.....	128
Tabla 24. Línea 10-8. Inductancia propia para la fase B a 360 Hz.....	128
Tabla 25. Línea 10-8. Inductancia propia para la fase C a 360 Hz.....	129
Tabla 27. Línea 15-12. Inductancia propia para la fase B a 360 Hz.....	131
Tabla 28. Línea 15-12. Inductancia propia para la fase C a 360 Hz.....	132
Tabla 29. Línea 18-14. Inductancia propia para la fase A a 360 Hz.....	133
Tabla 30. Línea 18-14. Inductancia propia para la fase B a 360 Hz.....	134
Tabla 31. Línea 18-14. Inductancia propia para la fase C a 360 Hz.....	135
Tabla 32. Línea 10-8. Inductancia propia para la fase A a 10 A.....	137
Tabla 33. Línea 10-8. Inductancia propia para la fase B a 10 A.....	138
Tabla 34. Línea 10-8 Inductancia propia para la fase C a 10 A. a.....	139
Tabla 35. Línea 15-12 Inductancia propia para la fase A a 10 A.....	140
Tabla 36. Línea 15-12 Inductancia propia para la fase B a 10 A.....	141
Tabla 37. Línea 15-12 Inductancia propia para la fase C a 10 A.....	142

Tabla 38. Línea 18-14 Inductancia propia para la fase A a 10 A.....	143
Tabla 39. Línea 18-14 Inductancia propia para la fase B a 10 A.....	144
Tabla 40. Línea 18-14 Inductancia propia para la fase C a 10 A.....	145
Tabla 41. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 360 Hz.	147
Tabla 42. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 360 Hz.	148
Tabla 43. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 360 Hz.	149
Tabla 44. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 360 Hz.....	150
Tabla 45. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 360 Hz.....	151
Tabla 46. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 360 Hz.	152
Tabla 47. Línea 18-14 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 360 Hz.....	153
Tabla 48. Línea 18-14 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 360 Hz.....	154
Tabla 49. Línea 18-14 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 360 Hz.	155
Tabla 50. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 10 A. a) Medida, b) Incertidumbre... 156	156
Tabla 51. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 10 A.	157
Tabla 52. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 10 A.	158
Tabla 53. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 10 A.	159
Tabla 54. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 10 A.	160
Tabla 55. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 10 A.	161
Tabla 56. Línea 18-14 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 10 A.	162
Tabla 57. Línea 18-14 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 10 A.	163
Tabla 58. Línea 18-14 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 10 A.	164
Tabla 59. Línea de 10-8 Conexión trifásica en estrella a 10 A.	166
Tabla 60. Línea de 15-12 Conexión trifásica en estrella a 10 A.	166
Tabla 61. Línea de 18-14 Conexión trifásica en estrella a 10 A.	167
Tabla 62. Impedancias de secuencia cero para la línea 10-8 a corriente 10 A.	174
Tabla 63. Impedancias de secuencia cero para la línea 15-12 a corriente 10 A.	174
Tabla 64. Impedancias de secuencia cero para la línea 18-14 a corriente 10 A.	175
Tabla 65. Impedancias de secuencia cero para la línea 10-8 a frecuencia 360 Hz.....	176
Tabla 66. Impedancias de secuencia cero para la línea 15-12 a frecuencia 360 Hz.	177
Tabla 67. Impedancias de secuencia cero para la línea 18-14 a frecuencia 360 Hz.	178

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Archivo DWG Medidas_estructura_metálica.

ANEXO B. Archivo DWG Imágenes_para_cajas_de_madera.

ANEXO C. Archivo DWG Medidas_cajas_de_madera.

ANEXO D. Archivo DWG Sistema_2D.

ANEXO E. Archivo DWG Vistas_módulo_de_generación

ANEXO F. Archivo DWG Tornillería_módulo_de_generación

ANEXO G. Archivo PWD Sistema_de_potencia

NOTA: LOS ANEXOS DE ESTE PROYECTO PUEDEN CONSULTARSE EN LA SALA BASE DE DATOS BIBLIOTECA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA EMPLEANDO ALTERNADORES DE AUTOMÓVIL*

AUTORES: GINNY MARINELLA NIÑO BAEZ**
JORGE LUIS PLATA NARANJO**
CRISTIAN DAVID CAMPUZANO FLORIÁN**

PALABRAS CLAVE: Sistema de potencia, líneas de transmisión, red, generación, PowerWorld.

DESCRIPCIÓN

El trabajo que es objeto de exposición en este libro, consiste en el diseño de un sistema de potencia básico (SEPB), el cual tiene tres barras de generación y dos de carga. Este trabajo abarca la especificación de la parte eléctrica de la red, la cotización de los elementos que satisfacen sus características de operación y brinda una guía para su construcción.

Una vez se implemente el sistema eléctrico que se diseñó y se opere, se podrán tratar variedad de temas que competen al área de la Ingeniería Eléctrica. Por ello, este proyecto representa un aporte al desarrollo del proceso de formación que brinda la Escuela. Distintas áreas de la carrera tienen espacio en este proyecto, asignaturas tales como Sistemas de potencia, Líneas de transmisión, Máquinas eléctricas y Protecciones, entre otras.

El diseño del sistema de potencia, se comprobó por simulaciones a través la herramienta software PowerWorld. Se caracterizaron también, tres líneas de transmisión con un acople en núcleo de ferrita. A partir de la información que se obtuvo se indican los cambios que se deben realizar en las líneas, para que sus valores se ajusten a los que se muestran en la simulación.

Se llevó a cabo, la elección y cotización de todo lo que se requiere adquirir para implementar el SEPB. Se describen así las maquinas, los aparatos electrónicos, circuitos, tarjetas, elementos de conexión y se realiza el diseño de la estructuras de soporte para los elementos. Para finalizar se dan especificaciones de la forma como funcionará la red y se brinda toda la información que se requiere para montar el sistema y acoplarlo.

* Trabajo de grado

** Facultad de ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director: Dr. Hermann Raúl Vargas Torres.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF AN ELECTRIC POWER SYSTEM USING CAR ALTERNATORS*

AUTHORS: GINNY MARINELLA NIÑO BAEZ**
JORGE LUIS PLATA NARANJO**
CRISTIAN DAVID CAMPUZANO FLORIÁN**

KEY WORDS: Power System, Transmission lines, network, generation, PowerWorld.

DESCRIPTION

The work that is exposed in this book is about the design of a simple electric grid, which is composed of three generation bars and two of charge. This work includes the specification of the electric component of the network, the quotation of the items that satisfy their operating characteristics and provides guidance for its construction.

Once the electrical system designed is implemented, and has begun to operate, it may be possible to discuss several issues that concern the area of Electrical Engineering. Therefore, this project represents a major contribution to the development of the training process provided by the academy. Different career areas take place in this project, subjects such as power systems, transmission lines, electrical machines and protections.

The design of the power system was verified by simulations through the PowerWorld software tool. Three transmission lines with a coupling in a ferrite core were also characterized. From the information obtained from the lines measurements, changes must be made on the lines, in order to set their values to those shown in the simulation.

The choice and quotation of all that is required to implement the network was made. Machines, electronic devices, circuits, cards, connection elements are well described and the design of the support structures is performed. Further, specifications of how network works and all the information required to install and couple the system is given.

* Grade work

** Departament of Physical-Mechanical Engineerings. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Advisor: Dr. Hermann Raúl Vargas Torres.

INTRODUCCIÓN

Desde que se descubrió, la electricidad tomó gran importancia en el desarrollo de la humanidad. Encontrar nuevas fuentes de energía y manejarlas de forma adecuada es primordial para garantizar la calidad de vida del ser humano.

El proceso que consiste en llevar la energía eléctrica a los consumidores requiere de sistemas de potencia cada vez más complejos, que necesitan de personas calificadas para realizar el análisis de su operación en condiciones normales y anormales, para garantizar la confiabilidad, seguridad y flexibilidad. De esta forma se reducen los costos de construcción, operación y mantenimiento.

El diseño del sistema estará conformado por tres estaciones generadoras y dos de carga y tendrá las especificaciones necesarias que le permitirán, después de ser implementado en otro trabajo de grado, servir como herramienta de laboratorio en las asignaturas de Sistemas de Potencia, Protecciones Eléctricas, Máquinas Eléctricas I, II y Mediciones. También se construirán tres tipos de líneas de transmisión con las características del diseño. La Figura 1 presenta el diagrama unifilar del sistema propuesto.

Por medio de este trabajo se obtuvo el diseño de un sistema eléctrico de potencia para uso en el Laboratorio de Máquinas y se construyeron tres tipos de líneas de transmisión. El diseño del sistema se realizó con base en la documentación, el conocimiento propio y con la ayuda de software como PowerWorld y AutoCAD. El objeto de estudio es la operación de la red en estado estable.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Debido a que es importante para la Universidad y para la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, estar en un alto nivel en la investigación y al tanto de los últimos avances tecnológicos en el área de la generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica, se hace necesario contar con recursos de laboratorio actualizados y que estén acordes con las exigencias actuales, de un mercado y un sistema eléctrico nacional en constante expansión. Todo esto con el fin de facilitar el aprendizaje, la investigación y la reafirmación del conocimiento por parte de la comunidad estudiantil, en el área de la producción de la energía eléctrica.

Actualmente la E3T, cuenta con diversos recursos en cada uno de sus laboratorios (Laboratorio de Alta Tensión, Comunicaciones, Instrumentación, Circuitos y Medidas Eléctricas, Electrónica de Potencia, Maquinas Eléctricas) con los que los estudiantes de Ingeniería Eléctrica e Ingeniería Electrónica, a lo largo de su formación, tiene la oportunidad de afianzar los conceptos presentados en el aula de clase. Sin embargo no existe un recurso, que integre en un solo conjunto funcional, cada una de las etapas de la producción de la energía eléctrica, (generación, transmisión y distribución).

2 JUSTIFICACIÓN

Actualmente la universidad no tiene una herramienta de laboratorio, que les permita a sus estudiantes de Ingeniería Eléctrica, el manejo de un sistema de potencia de manera práctica, y no sólo teórica. A pesar de que se utiliza software para simulación, el hecho de contar con una herramienta que permita tomar medidas y hacer operaciones reales, será un elemento significativo en el avance del proceso de aprendizaje. El diseño de esta herramienta será el primer paso para que la Escuela pueda intervenir directamente en el proceso de aprendizaje-enseñanza del estudiante en las áreas de sistemas de potencia, máquinas, protecciones y mediciones eléctricas, en un futuro. Además, podrá servir como base para posteriores trabajos de grado donde se amplíen los alcances logrados y así abarcar más áreas de la ingeniería.

3 OBJETIVOS

De acuerdo con la visión que se tiene para este trabajo de grado se proponen los objetivos que se plantean a continuación.

3.1 Objetivo general

Diseñar y especificar un sistema eléctrico de potencia utilizando alternadores.

3.1.1 Objetivos específicos

- Diseñar un sistema con tres estaciones de generación, dos de carga y seis líneas de transmisión.
- Hacer un diseño estructural de la disposición de los elementos del sistema sobre el área de trabajo.
- Elaborar un listado de los elementos y equipos necesarios producto del diseño del sistema propuesto.
- Construir y caracterizar un modelo a escala de tres líneas de transmisión a 24 V, 10 A y frecuencias de 60 a 360 Hz.
- Documentar resultados y establecer especificaciones de operación del sistema en estado estable.

4 MARCO TEÓRICO

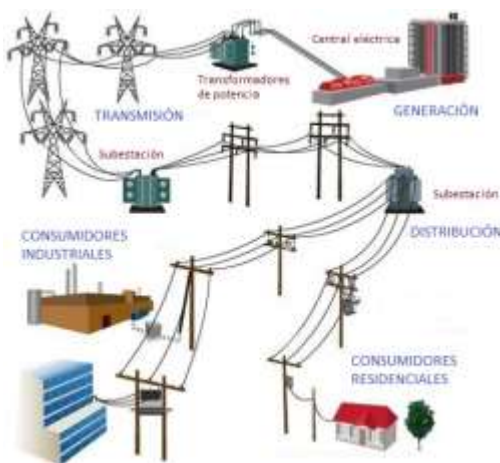
Es importante reconocer en primera medida, cuales son los conceptos fundamentales de un sistema de potencia. A lo largo de este capítulo se desarrollan algunos conceptos básicos que son necesarios para la contextualización del diseño del Sistema de Potencia.

4.1 SISTEMAS DE POTENCIA

Un sistema eléctrico de potencia es aquel mediante el cual se genera y transporta la energía eléctrica demandada en diferentes sectores de un país o ciudad, garantizando distintos estándares de calidad, confiabilidad, seguridad y economía.

Está compuesto por los siguientes subsistemas: generación, transporte, transformación, distribución y consumo de energía eléctrica, como se muestra en la Figura 1.¹

Figura 1. Sistema eléctrico de potencia.



Fuente: AMPELOS ENTERPRISE CO.,LTD. Transmision y Distribucion de Energia.²

¹ DUNCAN GLOBER, J. y MULUCUTLA S., Sarma. Sistemas de Potencia Análisis y Diseño, 3ed. Buenos Aires, Thomson, 2003. pp. 5-23, 208-225, 356-380.

² AMPELOS ENTERPRISE CO.,LTD. Transmision y Distribucion de Energia. [en línea] Ampelos Enterprise Co.,Ltd. [Seul: Corea] Ampelos Enterprise Co., Ltd., 2013. [Citado: 2 abril 2015] Disponible en Internet: http://www.ampelos.asia/ampelos/ampelos_ES/menu02/business03.html

El sistema de potencia de este trabajo de grado consta de tres estaciones de generación, dos barrajes de carga y seis líneas de transmisión.

4.2 GENERACIÓN DE ENERGÍA

El proceso de generación consiste en transformar diversas formas de energía que se hallan en los recursos naturales como el aire, el agua, las altas presiones y temperaturas para obtener energía eléctrica.

En una planta de generación se debe, además de producir energía, controlar los parámetros que caracterizan la calidad del suministro energético. Variables como el nivel de tensión, la frecuencia, las potencias activa y reactiva, las cuales se deben regular de forma continua según la red de potencia lo requiera y los estándares de calidad lo exijan.

En este trabajo se utilizan alternadores de automóvil para realizar el proceso de generación. Estos están debidamente acoplados a motores de inducción, los cuales entregan la energía mecánica que será transformada en energía eléctrica. Los acoples se realizan con sistemas de poleas y correas de radios determinados, para obtener una relación de transformación que permite proporcionar la velocidad adecuada para que los alternadores trabajen en sus valores nominales.

4.3 CONTROL PAR - VELOCIDAD

Con el objetivo de garantizar la potencia mecánica se realiza un control de la relación par-velocidad. La forma más conveniente de llevar a cabo este proceso es mediante variadores de velocidad electrónicos cuyos límites de operación se ajusten a los valores nominales de

los motores³. Los dispositivos se deben adecuar para realizar un control de velocidad por tensión a través de tarjetas de adquisición de datos NI USB-6009.

Estas tarjetas permiten operar los variadores desde los computadores. Tienen funcionalidad DAH (Data Acquisition Hardware) básica, para gran variedad de aplicaciones como registro de datos, medidas portátiles y experimentos académicos de laboratorio. Se deben implementar con un circuito especial de protección para las salidas de tensión analógicas cuando se desea efectuar este tipo de control. Esta interfaz se puede accionar mediante software como LabView.

4.4 CONTROL DE CAMPO

Para que los alternadores empiecen a generar energía, es necesario excitar con corriente continua el devanado del rotor. Al aumentar o disminuir esta corriente, varía la tensión en los terminales del estator y la velocidad [2]. En los sistemas de potencia se debe mantener la tensión constante en las cargas, por lo cual se realiza el control de campo. Para este trabajo se utiliza una fuente de continua, pero en posteriores trabajos de grado será posible auto excitar el campo del alternador o diseñar un circuito que permita hacer este control de forma automática.

4.5 TRANSMISIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA

La operación eléctrica de una línea de transmisión se estudia a través de modelos analíticos de longitud corta, mediana y larga.⁴ En este trabajo de grado las líneas se diseñan con base en el modelo de línea corta, el cual se representa mediante una impedancia serie, conformada por una resistencia y una reactancia de tipo inductiva. El diseño está orientado

³ MORA, Jesus Fraile. *Máquinas Eléctricas*, 5ta. ed. España: McGraw-Hill, 2003, pp. 1-39, 386-387, 658-681.

⁴ GRAINGER. Jhon. J y STEVENSON, William. D. *Análisis de Sistemas de Potencia*. México: McGraw-Hill, 1996, pp. 151, 183-201.

a establecer un acople electromagnético entre las fases propias de la línea y utiliza un núcleo de ferrita con arrollamientos en las tres columnas para representar cada una de las fases.

4.6 CORTE Y SECCIONAMIENTO

Para dar seguridad a los sistemas de potencia se utilizan protecciones eléctricas que actúan cuando se presentan fallas, malas conexiones o cualquier otro tipo de problema que pueda causar daños a los elementos que lo componen.

Cuando se necesita realizar el mantenimiento de los equipos, se hace el corte y seccionamiento en el circuito en cuestión, así es posible hacer maniobras de forma segura. Para ello se utilizan los disyuntores y seccionadores. En este diseño se emplean cuchillas eléctricas trifásicas para realizar el corte y seccionamiento de las unidades de generación, líneas de transmisión y cargas.

4.7 CONSUMO DE ENERGÍA

El consumo de energía se da por cargas lineales o no lineales. Las cargas lineales se clasifican en resistivas, inductivas y capacitivas. La componente resistiva es una representación de la cantidad de potencia activa que consume un dispositivo, la inductiva da una idea del valor de reactiva que este absorbe y la capacitiva de la cantidad de reactiva que el mismo genera; en un sistema de potencia solo se considera este tipo de cargas y se desprecia el efecto de cualquier carga no lineal.

En este texto se muestra el diseño de un banco de bobinas que representa la carga inductiva y un banco de bombillos, la carga resistiva.

5 ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DE POTENCIA

El diseño del sistema de potencia se centró en las siguientes etapas:

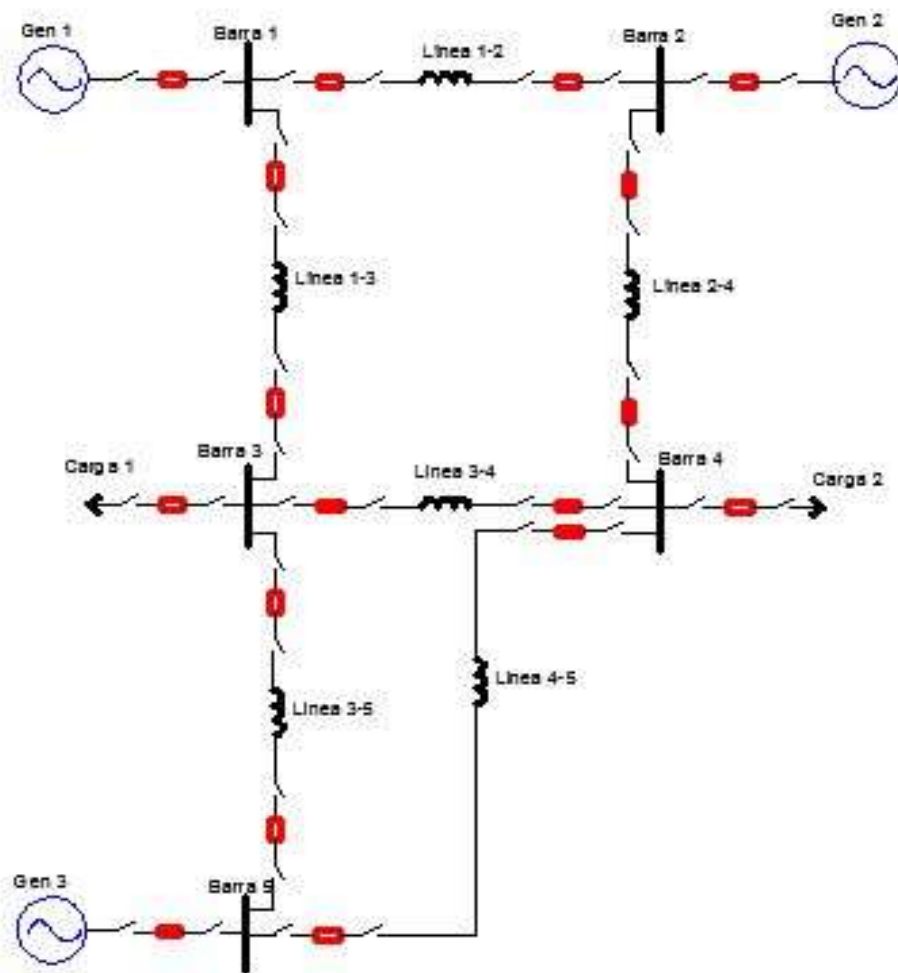
1. Diagrama unifilar.
2. Selección de dispositivos.
3. Ubicación de los elementos del sistema.

En este capítulo se trata lo concerniente al primer numeral, los temas que se refieren a los otros dos numerales se desarrollan en los capítulos siguientes.

5.1 DIAGRAMA UNIFILAR

Con el fin de tener un sistema sencillo en construcción pero con todas las ventajas para el estudio de un sistema de potencia real, se realizó el diseño eléctrico de la red con tres barras de generación y dos de carga. La Figura 2 muestra el diagrama unifilar del sistema.

Figura 2. Diagrama unifilar del sistema de potencia.



Los parámetros que especifican los límites de funcionamiento del sistema son los que se presentan en la tabla 1:

Tabla 1. Parámetros de funcionamiento del sistema.

Tensión [Vrms]	24
Corriente [Arms]	20
Frecuencia [Hz]	360

Tensión: La tensión para la cual operará el sistema es el máximo valor que se presentó en las pruebas de vacío hechas al alternador (Tabla 9), además de tener en cuenta el valor de operación de las cargas que existen en el mercado. Este corresponde a 24 V.

Corriente: La corriente base del sistema se seleccionó en un valor de 20 A con el fin de garantizar la operación en estado estable sin producir calentamiento en el conductor de la máquina. El calibre y tipo de conductor se especifican en la sección 4.1. Esta corriente equivale aproximadamente a un 50% de la corriente de plena carga que puede suministrar el alternador.

Frecuencia: La frecuencia con la que el sistema opera es de 360 Hz, ya que este es el valor de frecuencia para el cual el alternador alcanza 24 V.

Líneas: Para el sistema se especifican tres tipos de líneas. Los cálculos de los valores de inductancias se encuentran en el Capítulo 6. Allí se aclara la necesidad de reducir el número de vueltas de las bobinas con el fin de alcanzar valores de reactancias que sean apropiados para que el sistema de potencia opere. Sin aplicar esta estrategia se presentan caídas de tensión muy altas entre las líneas a una frecuencia de 360 Hz y no es posible abastecer la demanda total de la carga.

Posteriormente se hace el diseño del sistema con un sólo tipo de línea y se comprueba su correcta operación. En la Tabla 2 se presenta el valor de inductancia que se obtuvo al

reducir el número de vueltas según se especifica en la sección 4.10.1. Los valores en pu que se requieren para las simulaciones, se calculan con las siguientes bases:

$$SB = 100VA$$

$$VB = 24 V$$

$$IB = 20 A$$

$$ZB = 5,76 \Omega$$

$$f = 360 Hz$$

Tabla 2. Valor de inductancia y reactancia de las líneas de transmisión.

Inductancia de línea [H]	Reactancia de línea [Ω]	Rpu	Xlpu
2,364E-05	0,0535	6,61E-05	0,0093

5.2 SIMULACIONES EN POWER-WORLD

El diseño del sistema se comprobó con el software de simulación PowerWorld [1], este programa permitió simular el sistema en los diferentes estados de operación. En el Anexo G se presenta el montaje del sistema en este programa. En esta sección se presentan los resultados para tres tipos de cargas que se aproximan a los valores de plena carga, 50% y 30% de cargabilidad. Los porcentajes que se mencionan se basan en una potencia de plena carga de 2494VA, esto para una corriente de salida de 20 A en operación nominal para cada alternador. Uno de los objetivos es el de poder observar la regulación de las líneas. Es preciso aclarar que los valores que se presentan en las simulaciones corresponden a los valores reales multiplicados por un factor de mil. Se realizó de esta manera ya que PowerWorld no permite hacer simulaciones con especificaciones de tensiones y potencias en el orden de los volts. Por ejemplo, una corriente de 1000 A dentro de las simulaciones,

corresponde a una corriente de 1 A para el sistema real y una potencia de 500 MW corresponde a 0,5 W.

❖ **Estado de operación: 30 % de plena carga o menor sin demanda reactiva.**

Cuando se tiene una demanda de potencia en cada carga inferior a 300 VA se puede considerar un estado de operación a un 30 % aproximadamente de la potencia nominal del sistema. En este estado las tensiones permanecen en un valor de 1 pu. En la figura 3 y la tabla 3, se presentan los valores de operación.

Figura 3. Simulación de la operación a 30% de plena carga o menor sin demanda reactiva.

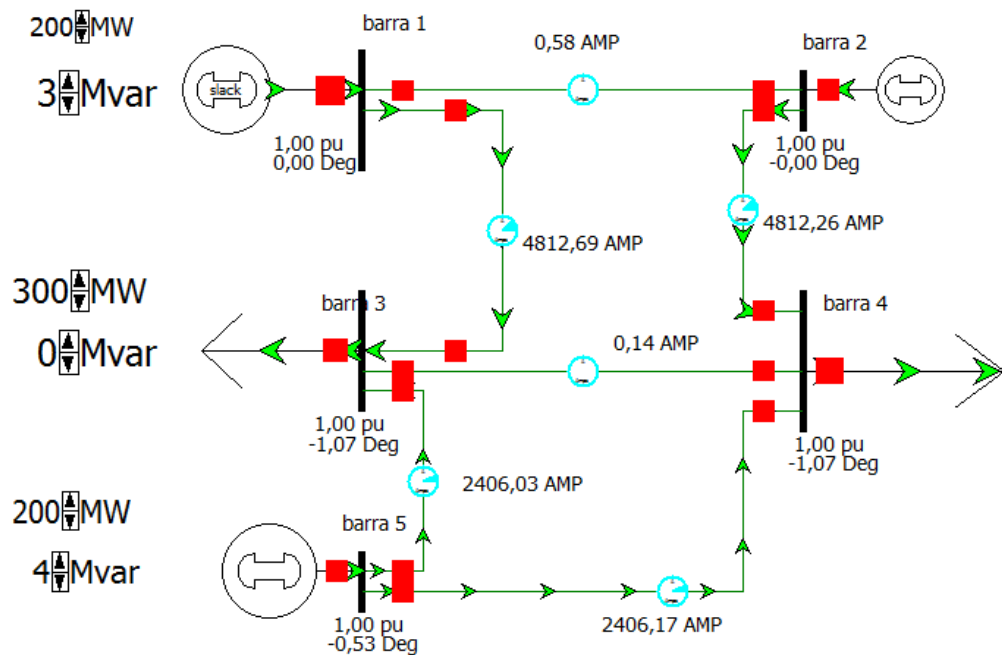


Tabla 3. Operación del sistema a 30% de plena carga o menor sin demanda reactiva (FP=1).

Name	Volt (PU)	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
barra 1	1,000	24,000	0,000			200,070	2,670
barra 2	1,000	24,000	0,000			200,000	2,670
barra 3	1,000	23,995	-1,070	300,000	0,000		
barra 4	1,000	23,995	-1,070	300,000	0,000		
barra 5	1,000	24,000	-0,530			200,000	3,970

❖ **Estado de operación: 30% de plena carga o menor sin demanda de potencia reactiva**

Cuando la potencia activa no supera los 300 W y existe una demanda de reactiva no muy elevada. En este caso se observa una leve caída de tensión, pero no resulta significativa y los alternadores deben entregar potencia reactiva. En la Figura 4 y la Tabla 4, se presentan los valores de operación.

Figura 4. Simulación de la operación a 30% de plena carga o menor con potencia reactiva para un FP=0,977.

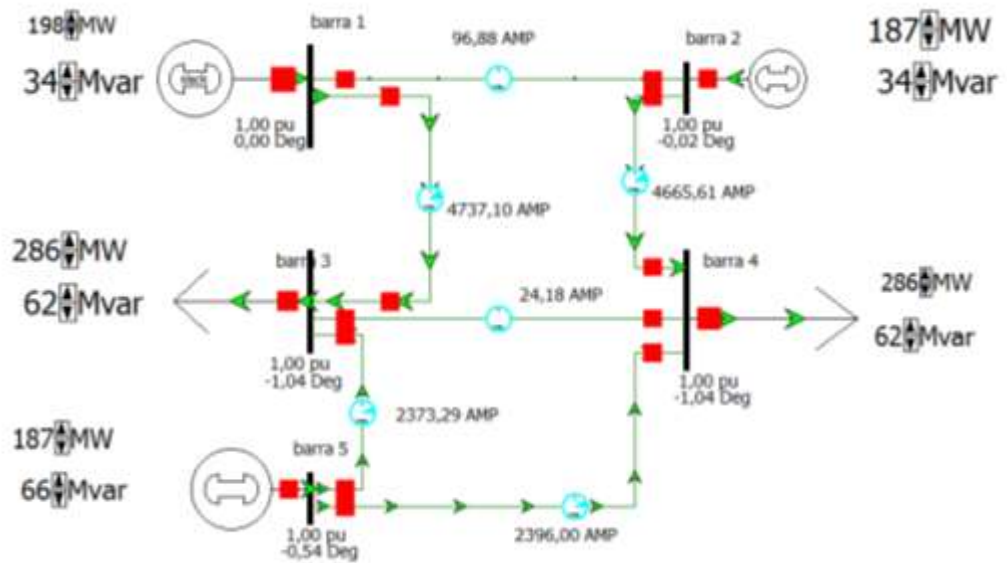


Tabla 4. Operación a 30% de plena carga o menor con demanda de potencia reactiva (FP=0,977).

Name	Volt (PU)	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
barra 1	1,000	24,000	0,000			198,060	33,530
barra 2	1,000	24,000	-0,020			187,000	33,550
barra 3	0,997	23,926	-1,040	286,000	62,000		
barra 4	0,997	23,926	-1,040	286,000	62,000		
barra 5	1,000	24,000	-0,540			187,000	65,850

❖ Estado de operación: 50 % de plena carga con demanda de potencia reactiva FP= 0,964

Para demandas alrededor de 600 VA se considera una exigencia al 50% de plena carga. Se observan unas leves caídas de tensión, que no resultan significativas. No obstante, cada alternador debe suministrar cierta cantidad de potencia reactiva. En la Figura 5 y la Tabla 5, se presentan los valores de operación.

Figura 5. Simulación de la operación 50 % de plena carga con potencia reactiva para un FP=0,964.

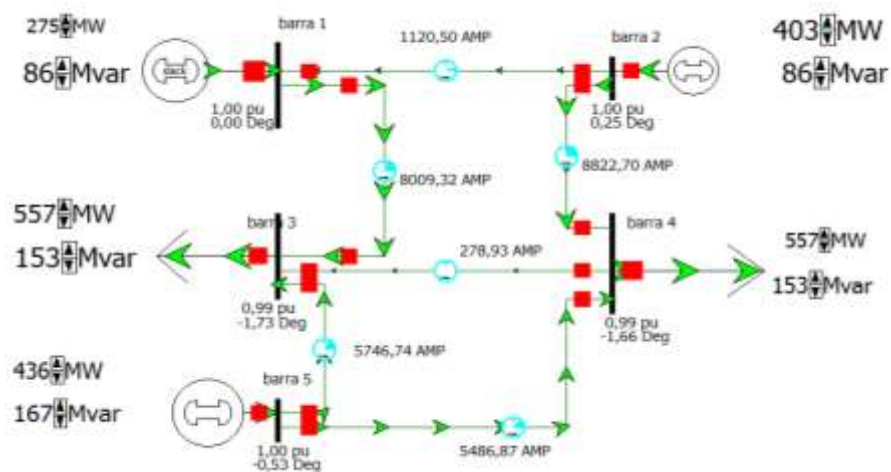


Tabla 5. Operación del sistema a 50 % de plena carga con demanda de potencia reactiva.

Name	Volt (PU)	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
barra 1	1,000	24,000	0,000			275,240	85,790
barra 2	1,000	24,000	0,250			403,000	86,200
barra 3	0,992	23,815	-1,730	557,000	153,000		
barra 4	0,992	23,815	-1,660	557,000	153,000		
barra 5	1,000	24,000	-0,530			436,000	167,180

❖ **Estado de operación un 90 % de Plena carga con demanda reactiva FP= 0,965**

Para este estado de operación existen unas caídas de tensión mayores en las barras de carga, y se observa como cada alternador debe suministrar una cantidad importante de potencia reactiva. En la figura 6 y la tabla 6, se presentan los valores de operación.

Figura 6. Simulación de la operación para un 90 % de Plena carga con potencia reactiva para un FP=0,965.

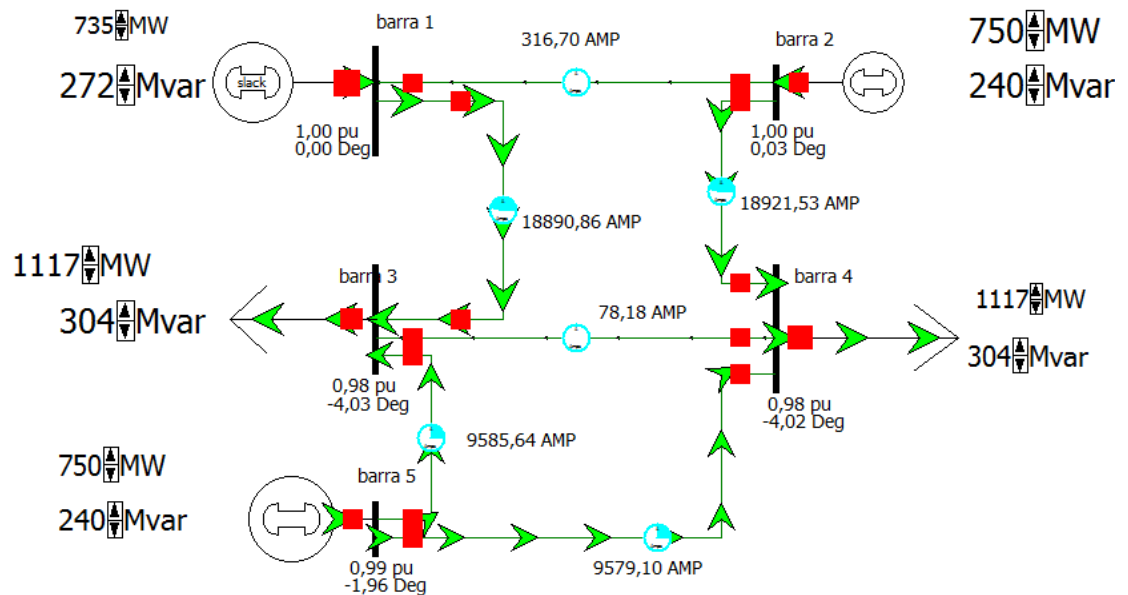


Tabla 6. Operación del sistema para un 90 % de Plena carga con reactiva.

Name	Volt (PU)	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
barra 1	1,000	24,000	0,000			735,030	272,410
barra 2	0,999	23,974	0,030			750,000	240,000
barra 3	0,978	23,465	-4,030	1117,000	304,000		
barra 4	0,977	23,458	-4,020	1117,000	304,000		
barra 5	0,988	23,723	-1,960			750,000	240,000

❖ **Estado de operación para un 90 % de Plena carga con factor de potencia máximo según las cargas reales FP= 0,825**

Este es el estado de operación que tiene el peor factor de potencia posible de obtener con la configuración de carga que se describe en las tablas 16 y 17. En la figura 7 y la tabla 7, se presentan los valores de operación.

Figura 7. Simulación de la operación a un 75% de Plena carga con potencia reactiva para un FP= 0,825.

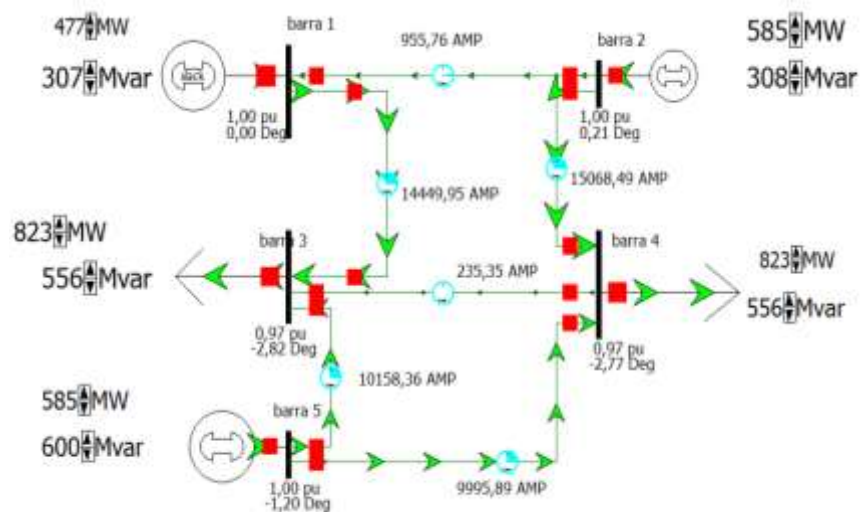


Tabla 7. Operación a un 75% de Plena carga con $fp=0,825$.

Name	Volt (PU)	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
barra 1	1,000	24,000	0,000			482,730	307,180
barra 2	1,000	24,000	0,190			582,000	308,100
barra 3	0,972	23,335	-2,830	823,000	556,000		
barra 4	0,972	23,335	-2,790	823,000	556,000		
barra 5	1,000	24,000	-1,230			582,000	599,660

❖ **Estado de operación: plena carga con demanda reactiva $fp= 0,7$**

Este es el estado de operación que se tiene cuando se conecta al sistema una carga que equivale a la máxima potencia aparente posible, según los parámetros de diseño dicha potencia para cada carga es de 1247,07 VA, y además con factor de potencia de 0,7. En la Figura 8 y la Tabla 8, se presentan los valores de operación.

Figura 8. Simulación de la operación a plena carga con potencia reactiva para un $FP= 0,7$.

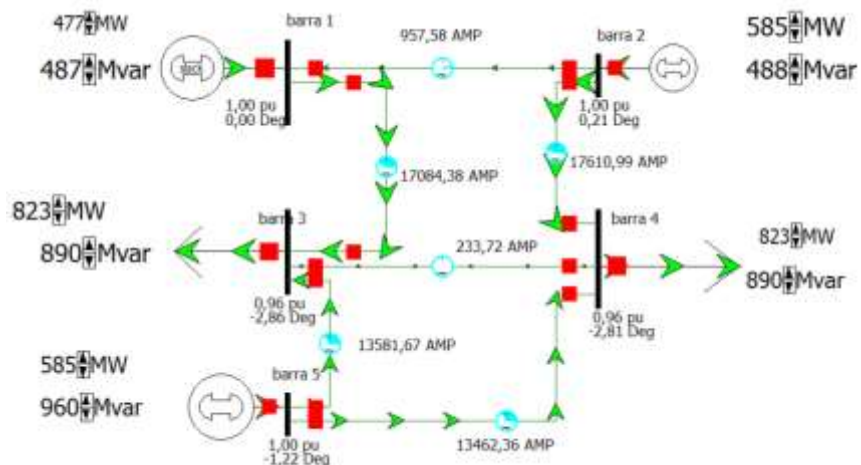


Tabla 8. Operación del sistema en PowerWorld a plena carga con un $fp= 0,7$.

Name	Volt (PU)	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
barra 1	1,000	24,000	0,000			477,110	487,350
barra 2	1,000	24,000	0,210			585,000	488,360
barra 3	0,956	22,933	-2,860	823,000	890,000		
barra 4	0,956	22,933	-2,810	823,000	890,000		
barra 5	1,000	24,000	-1,220			585,000	959,960

6 ESPECIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL SISTEMA DE POTENCIA

Se especifica en este capítulo cuales son los elementos que se seleccionaron con base en el diseño y las características de operación que se desea obtener.

6.1 ALTERNADORES

En la Figura 9 se muestra el alternador que se eligió, el cual está encargado de la producción de energía eléctrica y delimita las características de operación de la red. La tensión, la corriente y la frecuencia con la que el alternador es capaz de entregar potencia son los parámetros según los cuales el sistema opera. La referencia del alternador de diseño es la siguiente:

Ford 12 V 65 A Delco Remy

Figura 9. Alternador Ford 12 V Delco Remy con regulador externo.



Fuente: automotrizserva, Co., México.⁵

⁵ AUTOMOTRIZSERVA. Alternador delco 10si polea sencilla regulador integrado 12v 65. [en línea] [México. D.F] Automotrizserva, [Citado: 10 Abril 2015] Disponible en: <http://automotrizserva.com/assets/aplicacion.php?articulo=SV1325-AA0013>

Se selecciona y se propone en la implementación del sistema el uso de este alternador ya que permite obtener valores de operación en la red adecuados, es decir alcanza una tensión que es comercial, suministra una corriente adecuada para la operación, y además su valor es más económico al compararlo con otro tipo de máquinas síncronas.⁶ La señal con la que la red debe operar se obtiene de la entrada del rectificador trifásico. Dicho elemento no se debe retirar del alternador, pues aunque lo que se requiere es la señal trifásica, en futuras aplicaciones se pueden implementar líneas en DC o realizar algún otro tipo de aplicación en corriente continua.

De acuerdo con las pruebas hechas en vacío, el alternador puede alcanzar una tensión trifásica de 24 V r.m.s a una frecuencia de 360 Hz. Los resultados de esta prueba se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Prueba de tensión versus velocidad.

Excitación del alternador		Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]	Tensión AC de línea [V]
Tensión DC [V]	Corriente DC [A]			
5,2	2,92	604,7	60,47	5,84
5,4	3,01	1202,2	120,22	10,32
5,2	3,01	1803,5	180,35	15,38
5,4	3,02	2404,7	240,47	20,31
4,3	2,33	3003,4	300,34	22,71
3,3	1,98	3602,8	360,28	24,10
3,2	1,89	4004,5	400,45	25,17

Para la frecuencia de 400 Hz se presentan altas vibraciones, por lo cual se descartó este valor y se tomó el de 360 Hz para el diseño del sistema.

⁶Gualtieri Pablo. *J Motores de Arranque y Alternadores*. 1ra Edición. Buenos Aires: HASA, 2008, pp. 95-146.

El Alternador se especifica para una corriente nominal de 65 A DC. A partir de ese valor y con base en la ecuación (1) para el rectificador trifásico:

$$I_o = \frac{I_{dc}}{0,9549} \quad (1)$$

se tiene que:

$$I_o = \frac{65}{0,9549} = 68,06 \text{ A}$$

EL calibre del devanado del estator es clave para determinar la corriente con la que debe funcionar. Según observaciones realizadas a estatores de distintos alternadores, estos se realizan en su mayoría en calibre 14, un alternador de 65 amperios tiene por lo general dos salidas por cada fase como se observa en la figura 10:

Figura 10. Estator de un alternador.



Fuente: AUTO REFACCIONARIA ELECTRICA GUZMAN, S.A. DE C.V. México. D.F.⁷

⁷ AUTO REFACCIONARIA ELECTRICA GUZMAN, S.A. DE C.V. Estator Delco 24SI 145 A 12 V. [en línea] Auto refaccionaria electrica guzman, s.a. de c.v. México. D.F. [Citado 10 abril 2015]. Disponible en internet: http://www.aregsa.com/sitio/product_info.php?products_id=1797

La Figura 11 presenta la capacidad de corriente nominal del alambre magneto. Se observa que para un calibre 14 AWG, el conductor magneto tiene una capacidad de 21A r.m.s. Entonces, 21 A r.m.s equivale a 30 A pico, lo que es consistente con el resultado que se obtuvo para la corriente en alterna de un rectificador trifásico, descrito en la ecuación (2).

Figura 11. Capacidad del alambre magneto según el calibre.

Calibre AWG	Longitud por peso		Máxima tensión de embobinado (1)		Resistencia c.c. a 20 °C		Capacidad de corriente (2) A
	m/kg	ft/lb	kg	lb	Ω/km	Ω/kft	
8	13,3	19,8	50,2	111	2,060	4,543	83
9	16,8	25,0	39,8	87,7	2,599	5,731	66
10	21,1	31,5	31,6	69,6	3,278	7,226	52
11	26,6	39,6	25,0	55,1	4,135	9,117	41
12	33,6	49,9	19,8	43,7	5,213	11,49	33
13	42,2	62,7	15,8	34,8	6,562	14,47	26
14	53,1	79,1	12,5	27,5	8,283	18,26	21
15	66,9	99,5	9,91	21,8	10,44	23,02	16
15,5	75,0	111,6	8,83	19,5	11,71	25,82	15
16	84,4	125,6	7,84	17,3	13,19	29,08	13

Fuente: Procables S.A.S. CI. Colombia. Bogotá, D.C.⁸

Conforme a esta información y para garantizar la funcionalidad de la máquina sin sobrepasar su capacidad térmica, se establece 20 A como corriente nominal de operación. De esta manera, la potencia de trabajo en estado nominal de la máquina se obtiene al aplicar la ecuación (2):

$$S = \sqrt{3} V_L I_L \quad (2)$$

⁸ PROCABLES S.A.S. CI. Catálogo de Productos .PDF[en línea] ,Procables S.A.S. CI [Colombia] Procables S.A.S. CI. 2013[Citado: 15 de Abril 2015]. pp. 108. Disponible en Internet: http://www.procables.com.co/downloads/procables_catalogoproductos_2014_web.pdf

Al reemplazar se tiene que:

$$S = \sqrt{3} \times 24 \times 20 = 831,38 \text{ VA}$$

Una vez el sistema opere a condiciones nominales el devanado de los alternadores trabajará a un 50% de la corriente que puede soportar ya que el estator tiene dos salidas por cada fase. En este caso aunque el sistema se someta a leves sobrecargas estas no van a generar daños sobre el conductor de las máquinas.

6.1.1 Regulación de tensión

Se efectúa en la máquina un control de campo con el objeto de garantizar la tensión de 24 V a la frecuencia de trabajo del sistema. Este control se desarrolla en otro trabajo de grado asociado al mismo tema el cual se titula: “Control de campo de un alternador de automóvil”.

6.1.2 Control de frecuencia

El control de la frecuencia con la que el sistema opera se debe realizar con un variador de velocidad. Esta operación puede ser de forma manual o se podrá automatizar a través de la implementación de un programa ya hecho con tal objetivo. Dicho programa se describe en el trabajo de grado.⁹

⁹ BURGOS, Laura y SIERRA, Diego. E, “Sistema para evaluar el comportamiento de un alternador de automóvil en generación eólica”. Trabajo de grado Ingenieros Electricista y Electrónico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico- Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2015.

6.2 MOTORES DE INDUCCIÓN

El motor de inducción que se utiliza en el diseño puede suplir la carga del alternador. La Figura 12, muestra un motor de la línea 1LA7. Este dispositivo se selecciona para una demanda nominal de operación en el alternador de 831,38 W, se asume un factor de potencia igual a 1 la siguiente referencia para el motor:

Motor Siemens trifásico 2 HP 1.800 rpm 220/440 V

Tipo: 1LA7 096-4YB60 IE1 4 polos

El máximo par que el motor debe entregar, se relaciona de forma directa con la potencia activa neta que genera el alterador y las pérdidas mecánicas por fricción en el sistema de transmisión.¹⁰ Según las características con las que funciona el sistema, la máxima potencia activa que cada alternador debe entregar en régimen nominal es de 831,38W cuando el factor de potencia es 1. Este es el caso crítico de mayor exigencia de par mecánico en el eje del motor de inducción.

Figura 12. Motor de inducción marca Siemens de la línea 1LA7



Fuente: Catálogo Siemens abreviado D81.1.A • 2006.¹¹

¹⁰ ALEXANDER Charles. K. y SADIKU, Matthew. N. O. *Fundamentos de Circuitos Eléctricos*, 3ra. ed. México: McGraw-Hill, 2006, pp. 555-577.

¹¹ SIEMENS. Motores Trifásicos de baja tensión con rotor jaula 1LA7, 1LG4 y 1LA8. Catálogo.PDF. Siemens. [Citado: 15 abril 2015] Disponible en: <http://www.socetti.cl/catalogos/Catalogo%20Siemens%20Motores%201LA7%20-%201LG4.pdf>

El motor de inducción en operación nominal suministra una potencia en el eje de 2 HP el valor en vatios se obtiene al aplicar la ecuación (3):

$$P_n = 2 \text{ HP} \quad (3)$$

$$P_n = 2 * 746 \text{ W} = 1492 \text{ W}$$

La velocidad nominal del motor es $N_n = 1800 \text{ rpm}$. Con base en el valor de relación de transformación del sistema, de correa y poleas se calculó la velocidad con la que el eje del motor debe girar a la condición nominal de operación de la red:

La frecuencia del sistema es $f = 360 \text{ Hz}$, y al aplicar la ecuación (4):

$$n_s = \frac{120f}{p} \quad (4)$$

Se obtiene que la velocidad del alternador es $n_s = \frac{120*360}{12} = 3.600 \text{ rpm}$. Y para una relación de transformación del sistema mecánico de $r = 8,7086$.

Se obtiene la velocidad en el motor n_s' con la ecuación (5):

$$n_s' = \frac{n_s}{r} \quad (5)$$

$$ns' = \frac{3.600}{8,7086} = 413,38445 \text{ rpm}$$

f: frecuencia de la red

ns: velocidad síncrona para la operación del alternador a 360 Hz

ns': velocidad en el motor para que la red funcione a 360 Hz

r: relación de transformación mecánica en el sistema de transmisión.

En el estado de operación nominal se determina el par mecánico con la ecuación (6):

$$Tn' = \frac{P_{mecmotor} \text{nom}}{\omega n'} \quad (6)$$

ωn': Velocidad angular nominal del motor de inducción

De esta manera:

$$Tn' = \frac{1492 \text{ W}}{2\pi * \frac{1800}{60} \text{ rad/s}} = \frac{1492 \text{ N} * \text{m/s}}{188,4955 \text{ rad/s}} = 7,915 \text{ N} * \text{m}$$

Tn': Par nominal del motor de inducción

Con base en el valor de relación de transformación del sistema de correa y poleas se calculó el par necesario que el eje del motor debe entregar para la condición nominal de operación de la red, el par de trabajo es 2,5 veces el par nominal, sin embargo la velocidad de trabajo es 4,4 veces menor que la velocidad nominal, por esto se presume la no generación de efectos dañinos en los rodamientos del motor, se debe sin embargo, estudiar este asunto

como también el calentamiento que se puede presentar en la máquina producto de la corriente:

$$T' = \frac{P_{mecmotor}}{\omega'} = \frac{831,384 \text{ W}}{2\pi * \frac{413,38445 \text{ rad}}{60} \frac{\text{rad}}{\text{s}}} = \frac{831,384 \text{ N} * \frac{\text{m}}{\text{s}}}{43,2895 \frac{\text{rad}}{\text{s}}} = 19,2052 \text{ N} * \text{m}$$

T': Par necesario en el motor para que el alternador suministre una potencia de 831 W

Este valor no tiene en cuenta las pérdidas mecánicas en los ejes de cada máquina y en el sistema de transmisión. De esta forma se obtiene que en estado de operación a plena carga del sistema y para una frecuencia de 360 Hz en la red, el motor de inducción debe funcionar a una velocidad de 413,38 rpm y suministrar un par de 19,2052 N.m.

6.3 VARIADORES DE VELOCIDAD

El sistema debe operar para distintos valores de demanda, por tal motivo es necesario regular para cada estado de operación el valor de par mecánico que el motor ejerza sobre su eje. El variador de velocidad, elemento de la Figura 13, permitirá brindar diferentes valores de par en la salida del rotor para la velocidad de 413,38 rpm. De esta forma garantiza la operación de la red a 360 Hz para las diferentes demandas.

La referencia del variador de velocidad a utilizar es la que se muestra a continuación:

Variador de velocidad Sinamics V20 2 HP 220 V

Figura 13. Variador de velocidad V20.



Fuente: Overcontrols Automatización Industrial.¹²

Se tuvo en cuenta para la selección de este elemento, que los rangos de operación fueran compatibles con la tensión, corriente y potencia del motor de inducción. En la Tabla 10 se muestran los rangos con los que el variador puede operar. Para este variador el parámetro de potencia puede ser ajustado en KW o en HP.

Tabla 10. Especificaciones del variador de velocidad V20.¹³

ESPECIFICACIONES	Rango
Tensión [V]	10 a 2.000
Corriente [A]	0,01 a 10.000
Potencia [KW/HP]	0,01 a 2.000
Frecuencia [Hz]	12,00 a 599
Velocidad del motor [rpm]	0 a 40.000

¹² OVERCONTROLS AUTOMATIZACIÓN. Convertidor Sinamics V20. 1HP 0.75 KV.220V. [en línea] Overcontrols Automatización. [Perú], Industrial. [Citado: 15 abril 2015] Disponible en: http://www.overcontrols.com/ver_producto.php?ip=196&ipp=203

¹³ SIEMENS. Convertidor SINAMICS V20. [en línea] SIEMENS. Alemania. Co. 2012 – 2013 pp. 67-68 [Citado 15 de Abril 2015] Disponible en : https://cache.industry.siemens.com/dl/files/484/67267484/att_61462/v1/v20_OPI_es-SP_es-ES.pdf

6.4 SISTEMAS DE REDUCCIÓN DE VELOCIDAD

El sistema de reducción de velocidad, consiste de dos poleas con diferente diámetro unidas a través de una correa. En las figuras 14 y 15 se muestra el sistema cuya relación de transformación de velocidad es cercano a 9 unidades, esto permite alcanzar la velocidad a la que el alternador debe operar, en este caso 3600 rpm con un motor de inducción cuya velocidad nominal no alcance dicho valor, como se explica en la sección la velocidad en el motor es de 413,3845 rpm.

Figura 14. Diámetros de las poleas.

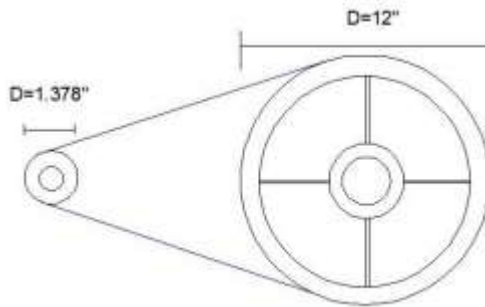
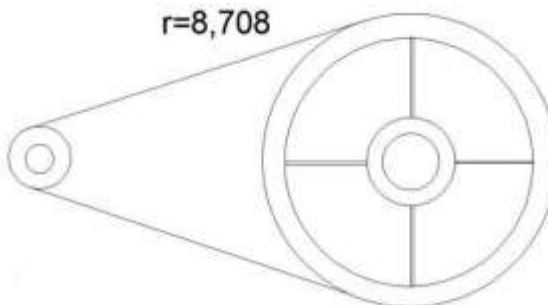


Figura 15. Sistema de reducción de velocidad $r= 8,708$.



6.5 TARJETAS NI USB-6009

Con el fin de controlar el sistema por medio de un computador, se utiliza una tarjeta de adquisición de datos, Figura 16, la cual se encarga de transferir las señales de control del computador al variador de velocidad. En el diseño se debe contemplar que el mando del variador de velocidad adjunto a cada primotor se debe realizar en forma remota, mediante una interface computador – variador de velocidad, compuesta por una tarjeta NI USB-6009 de National Instruments. La interfaz tendrá un circuito especial de protección para las salidas de tensión analógicas de la tarjeta NI que se utilizaran para efectuar un control por tensión del variador de velocidad. Esta interface se controla mediante una aplicación en LabView, que deberá tener los límites máximos y mínimos de velocidad que se permiten para la operación del primotor. Tanto el circuito de protección como el programa de control de velocidad se especifican en el trabajo de grado titulado: “Sistema para evaluar el comportamiento de un alternador de automóvil en generación eólica”.

Figura 16. Tarjeta NI USB-6009.



6.6 PINZAS AMPERMÉTRICAS

Los instrumentos de medición deben tener un rango de valores que coincidan con aquellos que se trabajan en el sistema de potencia, 24 V, 20 A y 360 Hz en alterna. Por ello se eligieron las pinzas amperométricas UNI-T 204 true rms, las cuales tienen una categoría II-600 V y III-300 V para seguridad de los usuarios. Este tipo de pinza se muestra en la Figura 17.

Figura 17. Pinza amperométrica UNI-T 204.



Fuente: Amazon.com.¹⁴

Los rangos de medición de la pinza amperométrica se presentan en la Tabla 11, donde se observa que cumplen con los valores mencionados anteriormente.

¹⁴AMAZON.es. Uni-T UT204 - Amperímetro/multímetro digital de pinzas (RMS, manual o automático, CC/CA, 400 amps) [en línea], Amazon.es. Co. 1996-2015 [Citado: 15 Abril 2015], Disponible en internet: <http://www.amazon.es/Uni-T-UT204-Amper%C3%ADmetro-mult%C3%ADmetro-autom%C3%A1tico/dp/B00H99QEV4>

Tabla 11. Especificaciones de la pinza amperométrica UNI-T 204

ESPECIFICACIONES	RANGO	PRECISIÓN
Corriente AC	40 A, 400 A	$\pm(2,5\%+5)$
Corriente DC	40 A, 400 A	$\pm(2\%+3)$
Tensión AC	4 V, 40 V, 400 V, 600 V	$\pm(1\%+5)$
Tensión DC	400 mV, 4 V, 40 V, 400 V, 600 V	$\pm(0,8\%+1)$
Resistencia	400 Ω , 4 k Ω , 40 k Ω , 400 k Ω , 4 M Ω , 40 M Ω	$\pm(1\%+2)$
Frecuencia	10 Hz~1 MHz	$\pm(0,1\%+3)$

Fuente: Uni-Trend.

6.7 CUCHILLAS ELÉCTRICAS

Para el seccionamiento en el sistema de potencia se eligieron las cuchillas eléctricas 3X60 A NEC, que permiten realizar el corte visible y aislar una línea de transmisión, un módulo de generación o una carga. La Figura 18 muestra una de ellas.

Figura 18. Cuchilla eléctrica trifásica.



Fuente: 3M división de productos eléctricos.¹⁵

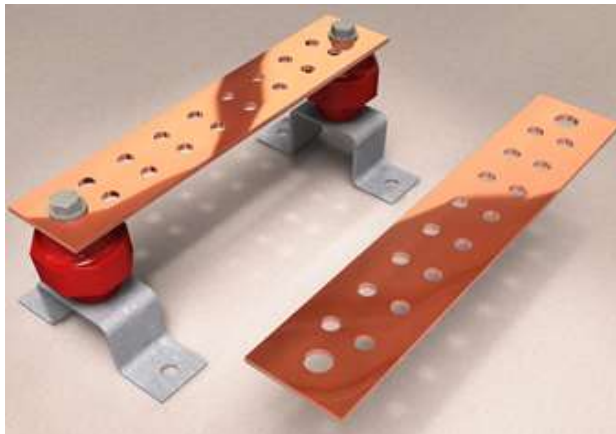
¹⁵ 3M DIVISIÓN DE PRODUCTOS ELÉCTRICOS. ¿Cuchilla o caja de interruptores? [en línea] [Texas] 3M División de Productos Eléctricos. [Citado: 15 Abril 2015] Disponible en: <http://www.tussolucioneselectricas.com/48/articulo/48>

6.8 PLATINA DE COBRE

Para todos las barras se eligieron platinas de cobre de 1/8 x 1/2" a 100 A. Aunque la mayor corriente en las simulaciones de PowerWorld es de 30 A en una barra, no se encontró en el mercado una platina con estas características, por lo cual se tomó la de menor corriente. El tener un valor más alto le da flexibilidad al sistema, lo cual permite cambios en futuros trabajos de grado.

Para el soporte de las barras se eligieron abrazaderas de acero inoxidable y aisladores de 25 mm como se observa en la Figura 19.

Figura 19. Barraje de cobre de 23cm de longitud, con soporte y aisladores.



Fuente: Storm Copper Components, Co., México.¹⁶

¹⁶ STORM COPPER COMPONENTS, CO., Barra de Tierra electric y Barra de Tierra de cobre Bus Bar [en línea] [Mexico. D.F.] Storm Copper Components, Co. 2011 – 2012. [Citado: 18 Marzo 2015] Disponible en Internet: <http://www.stormcopper.mx/barra-de-tierra-electrics.html>

Para la conexión de las barras a los terminales de las cajas, el conductor debe ser de cobre calibre número 10 AWG y en el extremo que va a la platina tener un terminal tipo ojo de diámetro 1/4" como se muestra Figura 20, lo cual facilita la unión con tornillos cobrizados de 1/4 x 1". Estos terminales deben ser de cobre estañado para que tengan alta resistencia a la corrosión.

Figura 20. Terminal tipo ojo.

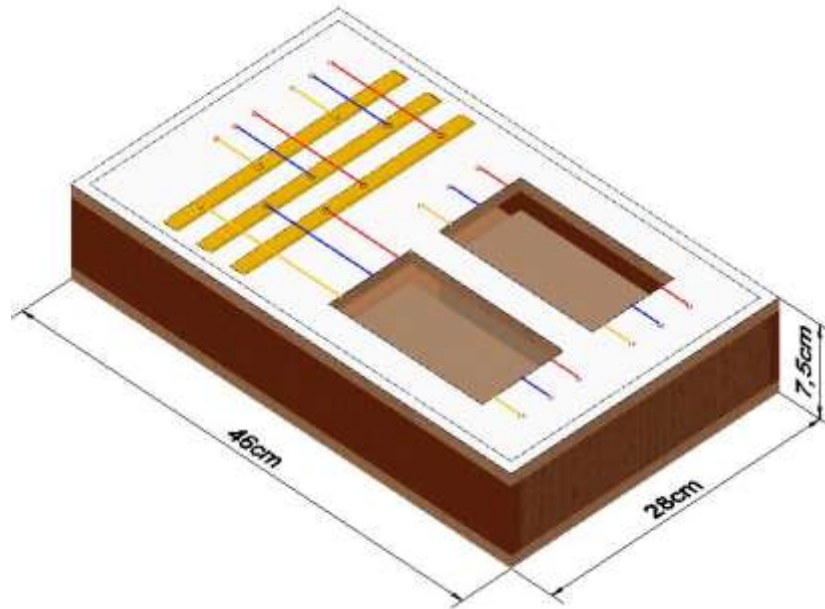


Fuente: El corralón del sur, Calta Olivia Argentina.¹⁷

La caja que contiene las barras del sistema de potencia se muestra en la Figura 21.

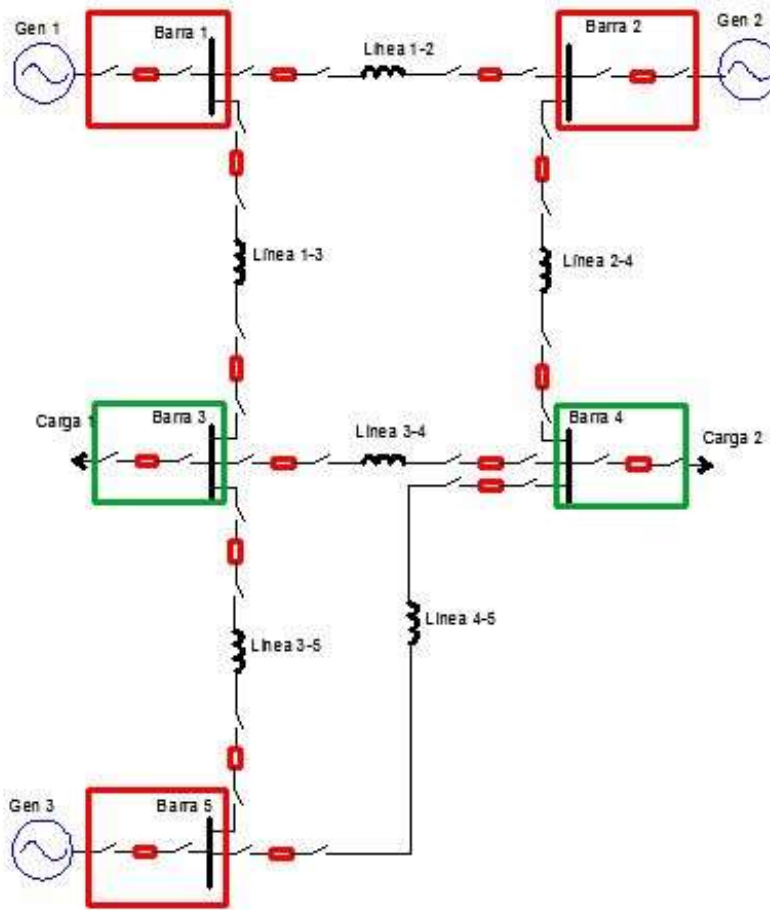
¹⁷ EL CORRALÓN DEL SUR. Terminal de Cobre Estañado. EL CORRALÓN DEL SUR [en línea] [Caleta Olivia; Argentina], El corralón del sur. [Citado: 15 Abril 2015] Disponible en:<http://www.elcorralondelsur.com.ar/busqueda.php?descripcion=&p=538>

Figura 21. Caja para el barraje de generación.



Esta caja también contiene las dos cuchillas para realizar el seccionamiento y aislar los alternadores en las barras 1,2 y 5 o la carga en las barras 3 y 4 como se observa en la Figura 22. Se dejaron terminales entre las cuchillas para la conexión de interruptores en posteriores trabajos de grado donde el objetivo sea el diseño de las protecciones del sistema. Por el momento se debe realizar un puente entre estos.

Figura 22. Cajas para las barras en el sistema de potencia.



En la parte interior se tienen tacos de madera para darle altura a las cuchillas y poder maniobrarlas con la tapa puesta. En la Figura 23 se muestra el interior de la caja.

Figura 23. Detalle de la caja para los barrajes de generación y carga.

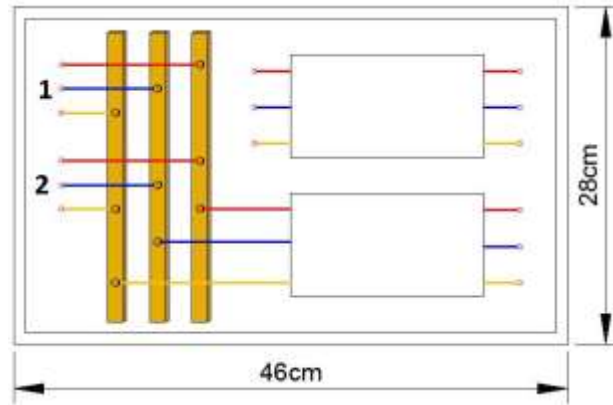


Al momento de la compra, la tapa debe quedar suelta para poder realizar las conexiones internas. Cada fase se debe conectar con amarillo, azul y rojo según corresponda para distinguirlas.

La parte superior de la caja tiene una imagen con el cableado interno que sirve como guía para los usuarios. Esta se debe imprimir en papel adhesivo a escala 1:1 del Anexo B para pegarlo posteriormente en la tapa.

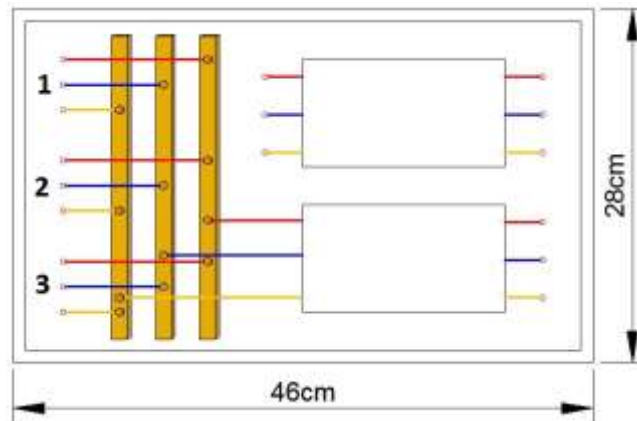
En la Figura 22 se observa que a los barrajes donde se conectan los alternadores le llegan dos líneas de transmisión, por lo tanto la imagen de la tapa es como se muestra en la Figura 24.

Figura 24. Imagen superior de la caja para el barraje de generación.



Al barraje donde se conectan las cargas le llegan tres líneas de transmisión según la Figura 22, por lo tanto la imagen de la tapa es como se muestra en la Figura 25.

Figura 25. Imagen superior de la caja para el barraje de carga.



Los terminales para las cajas son tipo banana hembra, Figura 26. Es necesario tener en cuenta que el tornillo debe pasar el grosor de la madera, 1 cm.

Figura 26. Terminales tipo banana hembra.



Fuente: Shoptronica.¹⁸

Los terminales tipo banana macho que se presentan en la Figura 27 se utilizan para los cables que conectan las cajas con cualquier otra parte del sistema. Estos son calibre número 10 AWG y el largo depende de las distancias entre los elementos que se van a interconectar.

Figura 27. Terminales tipo banana macho.



Fuente: Shoptronica.com, España.¹⁹

Las medidas de todas las cajas de madera mencionadas en este libro se encuentran en el Anexo C.

¹⁸ SHOPTRONICA. Bananas hembra 4mm de panel 25 A [en línea] [España] Shoptronica. [Citado: 18Marzo 2015] Disponible en internet <http://www.shoptronica.com/pinzas-de-cocodrilo-y-bananas/1438-bananas-hembra-4mm-de-panel-25a.html>

¹⁹ SHOPTRONICA. Bananas de 4mm aisladas contacto expandible.[en línea] [España] Shoptronica. [Citado: 18 Marzo 2015] Disponible en internet <http://www.shoptronica.com/pinzas-de-cocodrilo-y-bananas/1401-bananas-de-4mm-aisladas-contacto-expandible.html>

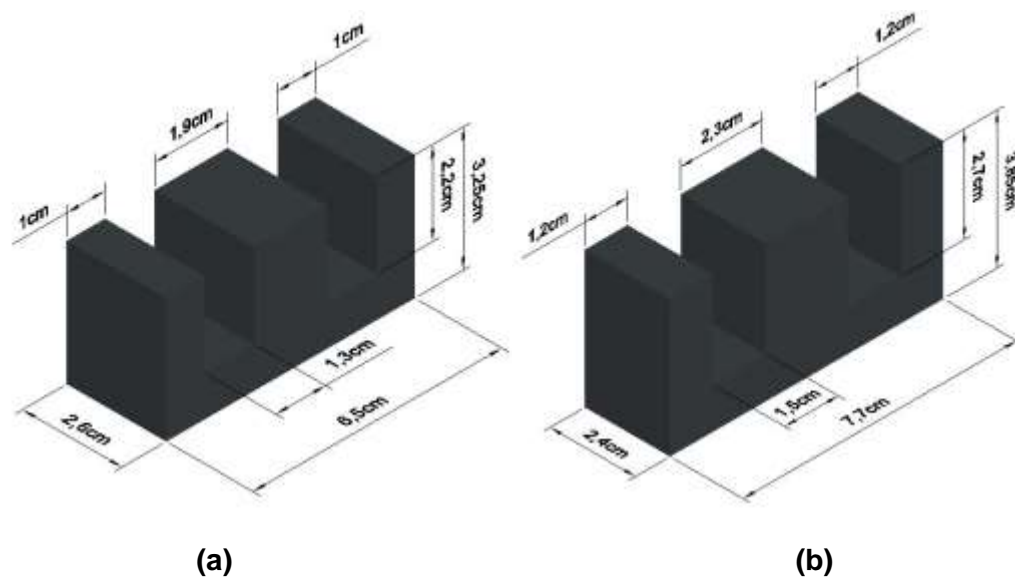
6.9 NÚCLEOS Y CONDUCTOR ESMALTADO

El diseño de las líneas de transmisión se realizó con el esquema de la Figura 29, con núcleos de tres columnas y bobinas enrolladas en cada una ellas para simular las tres fases. La carga inductiva se diseñó de forma similar, pero con una sola bobina en la columna central y un núcleo por fase.

Las medidas que se presentan en la Figura 28 fueron determinadas por los núcleos que se encontraron en el mercado. Estos están hechos de ferrita, con lo cual se tiene una permeabilidad alta.

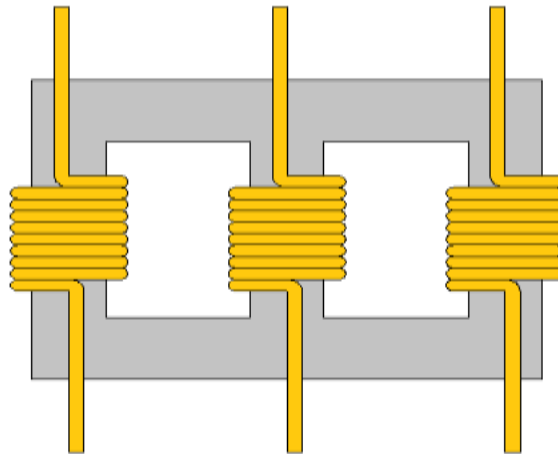
Para los arrollamientos se eligió un conductor de cobre esmaltado calibre número 10. De esta manera se garantiza que las líneas soporten la temperatura que se genera por el paso de la corriente y a la concentración de espiras. Para el mismo fin, también se considera viable utilizar un calibre menor (número 8). Sin embargo, el diseño hecho se realizó con calibre número 10.

Figura 28. Medidas de los núcleos de ferrita.



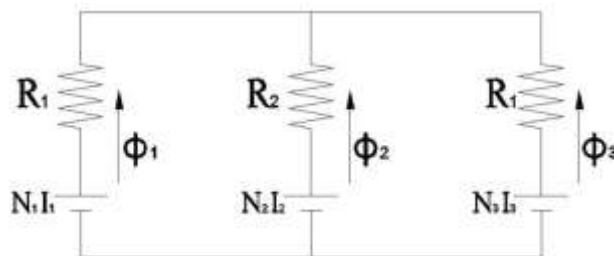
6.9.1 **Líneas de transmisión.** Después de enrollar las bobinas en los núcleos se tiene un esquema como el de la Figura 29. Dado que las columnas laterales de los núcleos no son iguales a la columna central, se realizó el cálculo para el número de espiras en la segunda bobina y se obtuvo una equivalencia entre ellas.

Figura 29. Núcleo con bobinas en las tres columnas.



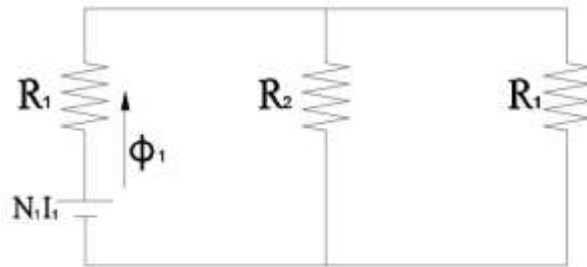
El circuito magnético de esta configuración se presenta en la Figura 30, donde R es la reluctancia magnética, N el número de espiras de las bobinas y ϕ el flujo magnético [2].

Figura 30. Circuito magnético equivalente.



Para el cálculo del flujo ϕ_1 se utilizó el circuito de la Figura 31, donde se tuvieron en cuenta sólo los efectos de la bobina 1 y se ignoraron las otras dos.

Figura 31. Circuito magnético equivalente para la bobina lateral.

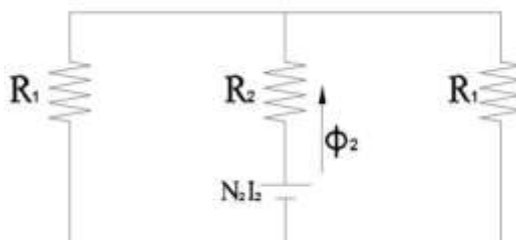


Al resolver el circuito de la figura anterior se obtuvo la siguiente ecuación:

$$\phi_1 = \frac{I_1 N_1}{R_1 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \quad (7)$$

Analógicamente se calculó el flujo ϕ_2 teniendo en cuenta sólo los efectos del segundo arrollamiento como se muestra en la Figura 32. Lo que se pretende es hallar de forma independiente una ecuación para la inductancia propia, tanto para los arrollamientos laterales como para el arrollamiento central.

Figura 32. Circuito magnético equivalente para la bobina central.



La ecuación (8) se obtuvo de la solución del circuito anterior.

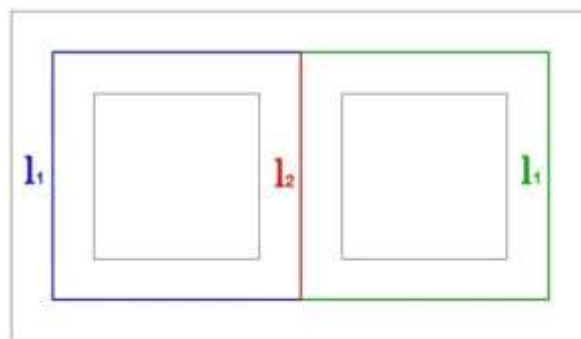
$$\Phi_2 = \frac{I_2 N_2}{R_2 + \frac{R_1}{2}} \quad (8)$$

Como $N_1=N_3$ entonces no fueron necesarios los cálculos para el arrollamiento 3 ya que los resultados son similares a los de la bobina 1.

Para la reluctancia R se utilizó la ecuación (9), donde μ es la permeabilidad magnética del material, A es el área del núcleo que arrolla la espira y l la longitud del núcleo. Las distancias necesarias para los cálculos de las reluctancias se muestran en la Figura 33.

$$R = \frac{l}{\mu A} \quad (9)$$

Figura 33. Representación de las longitudes para el cálculo de reluctancias.



Para la inductancia L se tenía la ecuación (10) donde I es la corriente que pasa por la bobina.

$$L = \frac{N\Phi}{I} \quad (10)$$

La inductancia de la bobina lateral debe ser igual a la inductancia de la bobina central, pues el objetivo es lograr el mayor balance posible, por lo tanto se obtuvo la siguiente igualdad:

$$L_1 = \frac{N_1\Phi_1}{I_1} = \frac{N_2\Phi_2}{I_2} = L_2 \quad (11)$$

Después de reemplazar los flujos de las ecuaciones (7) y (8) en la (11) se obtuvo una expresión para calcular el número de espiras en la bobina central dependiendo del número de vueltas en las bobinas laterales:

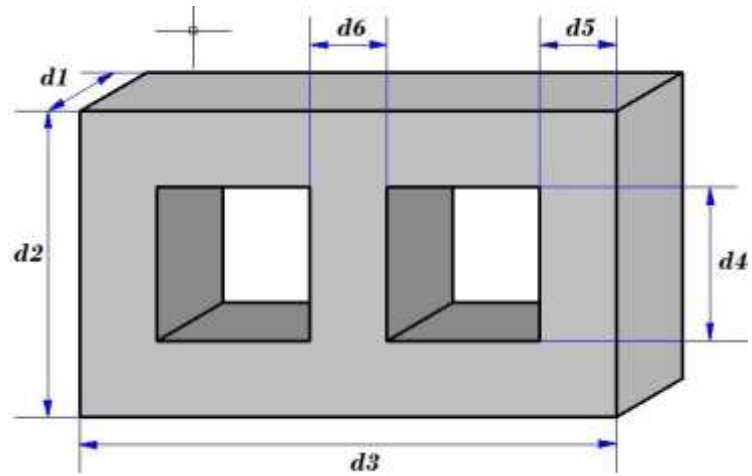
$$N_2 = N_1 \sqrt{\frac{l_1 A_2 + l_2 A_1}{2l_1 A_2}} \quad (12)$$

La resistencia R_e de cada línea se calculó con la ecuación (13), donde ρ es la resistividad del material ($\rho = 1,72E^{-08}$ para el cobre), l_c es la longitud del conductor y S es la sección transversal del conductor [3].

$$R_e = \frac{\rho l_c}{S} \quad (13)$$

Para realizar los cálculos de áreas y longitudes fueron necesarias las medidas que aparecen la Figura 34.

Figura 34. Medidas del núcleo.



Los resultados para las líneas de transmisión se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12. Cálculos de número de espiras y resistencias por fase.

LINEAS DE TRANSMISIÓN		
Distancia d1	2,6	[cm]
Distancia d2	6,5	[cm]
Distancia d3	6,5	[cm]
Distancia d4	4,4	[cm]
Distancia d5	1,0	[cm]
Distancia d6	1,9	[cm]
Longitud l1	10,95	[cm]
Longitud l2	5,45	[cm]
Área A1	2,60	[cm ²]
Área A2	4,94	[cm ²]

Número de espiras N1=N3	2	Vueltas
Número de espiras N2	2	Vueltas
Resistividad cobre ρ	1,72E-08	[$\Omega \cdot m$]
longitud del conductor lateral $l_{c1} = l_{c3}$	0,1162	[m]
longitud del conductor lateral l_{c2}	0,0981	[m]
Sección del conductor S	5,25E-06	[m ²]
Resistencia bobinas laterales $R_{e1} = R_{e3}$	3,805E-04	[Ω]
Resistencia bobinas laterales R_{e2}	3,214E-04	[Ω]

Después de tener el número de vueltas, se construyeron las tres bobinas y se pusieron sobre el núcleo de la Figura 28 (a). Seguidamente se realizaron mediciones de tensión a una frecuencia de 360 Hz y corriente de 10 A para calcular la inductancia de las líneas de transmisión. La corriente y la tensión se aplicaron y midieron en cada fase por aparte. El procedimiento experimental hecho, es análogo al que se describe en el capítulo 6.

La impedancia Z de la bobina se calculó con la ecuación (14), donde I es la corriente aplicada a la bobina y V es la tensión que se midió en los terminales del arrollamiento [6].

$$Z = \frac{V}{I} \quad (14)$$

El cálculo de la reactancia X se realizó con la siguiente expresión:

$$X = \sqrt{Z^2 - R_e^2} \quad (15)$$

Finalmente para obtener el valor de la inductancia L se utilizó la ecuación (16), donde f es la frecuencia de realización de las pruebas, 360Hz.

$$L = \frac{X}{2\pi f} \quad (16)$$

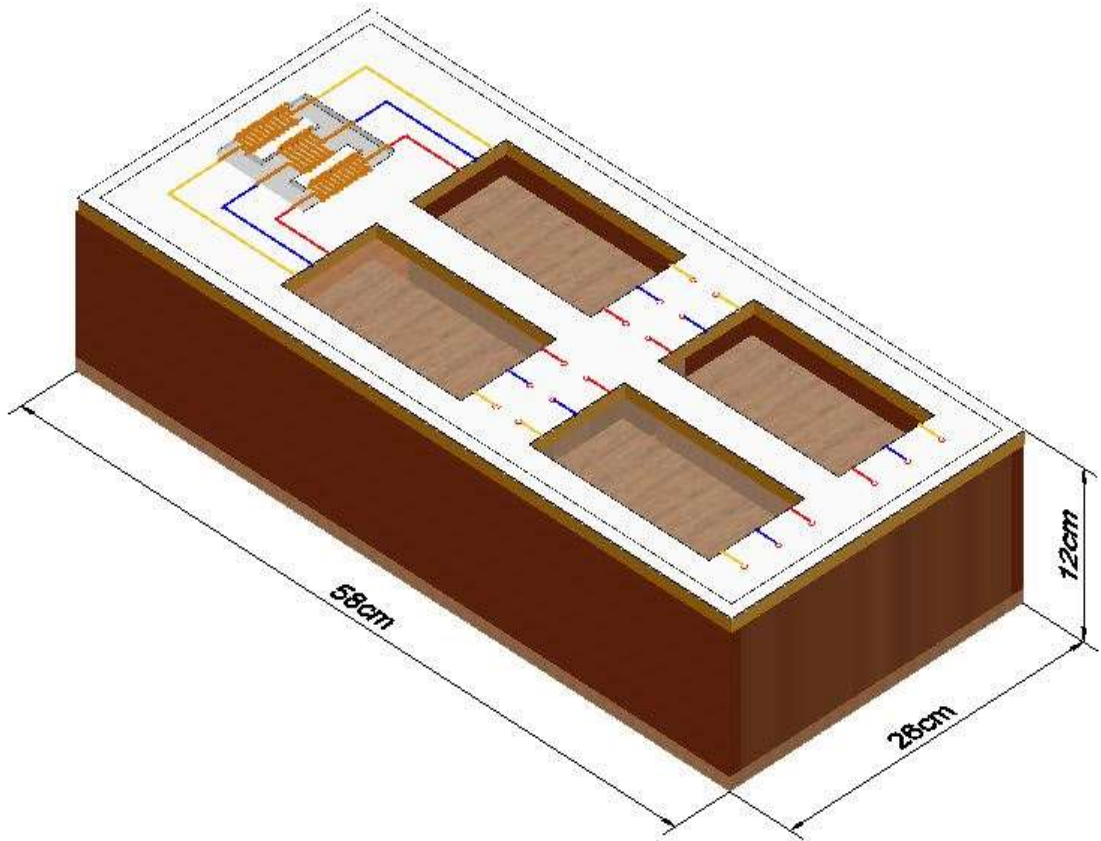
Tabla 13. Resultados de los cálculos de inductancia en cada fase.

Fase	V [V]	Z [Ω]	X [Ω]	L [H]
A	0,551	0,055	0,055	2,436E-05
B	0,511	0,051	0,051	2,259E-05
C	0,542	0,054	0,054	2,396E-05
PROMEDIO		0,053	0,053	2,364E-05

En la Tabla 13 se muestra un promedio de los valores, los cuales se utilizaron para realizar las simulaciones en PowerWorld.

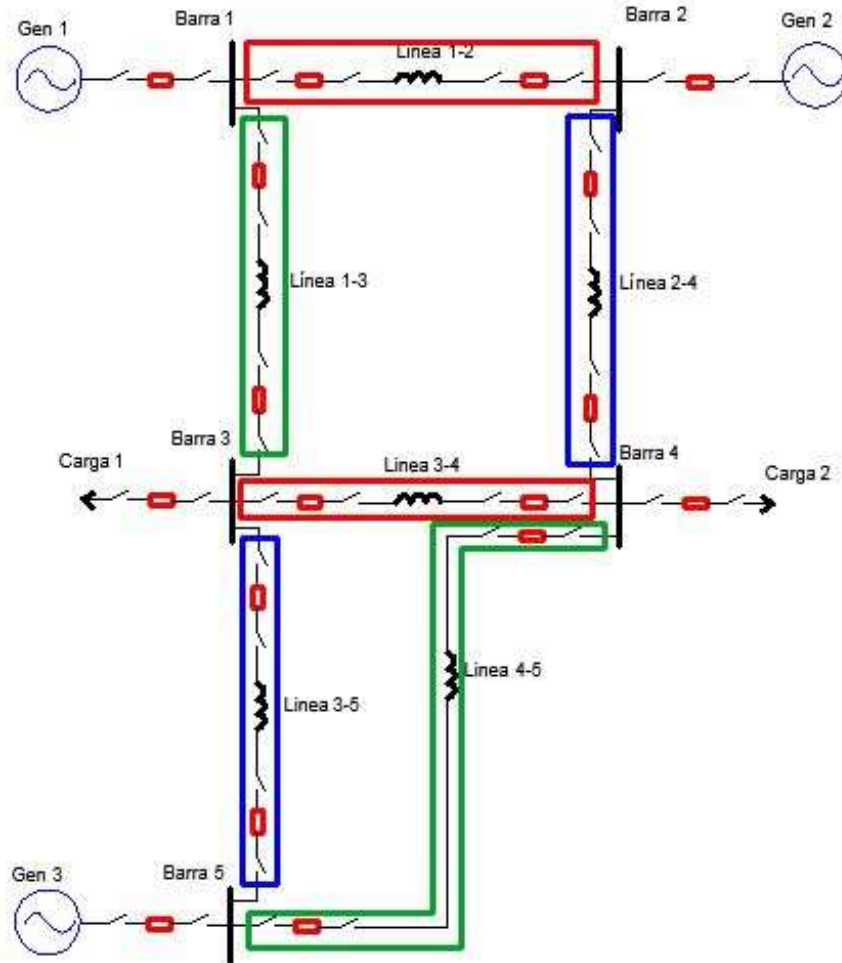
La caja que contiene las líneas de transmisión del sistema de potencia se muestra en la Figura 35.

Figura 35. Caja para las líneas de transmisión.



Esta caja también contiene las cuatro cuchillas a los extremos necesarias para aislar una línea de transmisión como se muestra en la Figura 36. En este caso también se dejaron terminales entre las cuchillas para la conexión de interruptores en posteriores trabajos de grado.

Figura 36. Cajas para las líneas en el sistema de potencia.



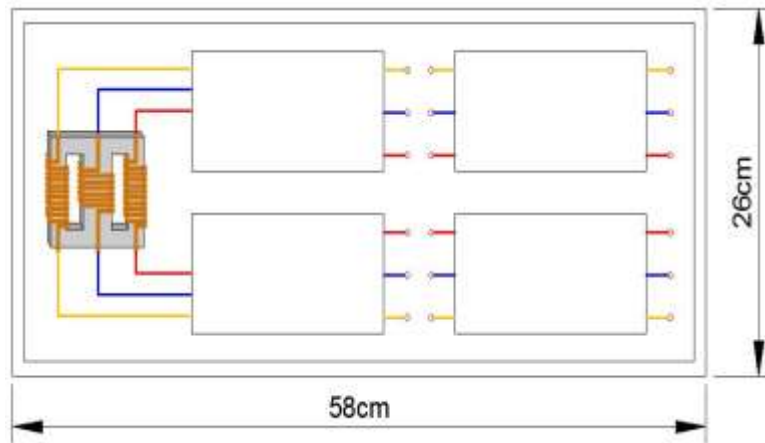
Igual que en la caja para los barrajes, ésta también tiene tacos de madera para darle altura a las cuchillas y facilitar su operación. En la Figura 37 se puede observar el interior de la caja.

Figura 37. Detalle de la caja para las líneas de transmisión.



La imagen de la parte superior de la caja se presenta en la Figura 38 y se debe imprimir en papel adhesivo a escala 1:1 del Anexo B para pegarlo posteriormente en la tapa.

Figura 38. Imagen superior de la caja para las líneas de transmisión.



6.9.2 Cargas inductivas. Como se mencionó anteriormente, la carga inductiva tiene un arrollamiento en la columna central con conductor esmaltado calibre número 10 y se utilizó el núcleo (a) de la Figura 28 para cada una de las fases.

La permeabilidad del material del núcleo cambia con la corriente, por tanto se construyeron dos bobinas con 15 y 10 vueltas, se tomaron los datos de tensión a frecuencia constante de 360 Hz y se realizaron los cálculos de inductancia L para cada una de ellas.

Los resultados de la carga se muestran en las tablas 14 y 15, para lo cual se tuvieron en cuenta las ecuaciones (14), (15) y (16). Allí se observa la variación de la inductancia al aumentar la corriente en la bobina.

Tabla 14. Resultados de la carga inductiva de 15 espiras.

Número de espiras N	15	Vueltas
Resistividad cobre ρ	1,72E-08	[Ω .m]
longitud del conductor lateral l_c	0,6838	[m]
Sección del conductor S	5,25E-06	[m ²]
Resistencia bobina central R_e	2,240E-03	[Ω]

I [A]	V [V]	Z [Ω]	X [Ω]	L [H]
2	2,886	1,4430	1,443	6,37E-04
4	4,990	1,2475	1,247	5,52E-04
6	5,850	0,9750	0,975	4,31E-04
8	6,330	0,7913	0,791	3,49E-04
10	6,690	0,6690	0,669	2,95E-04
12	6,980	0,5817	0,582	2,57E-04

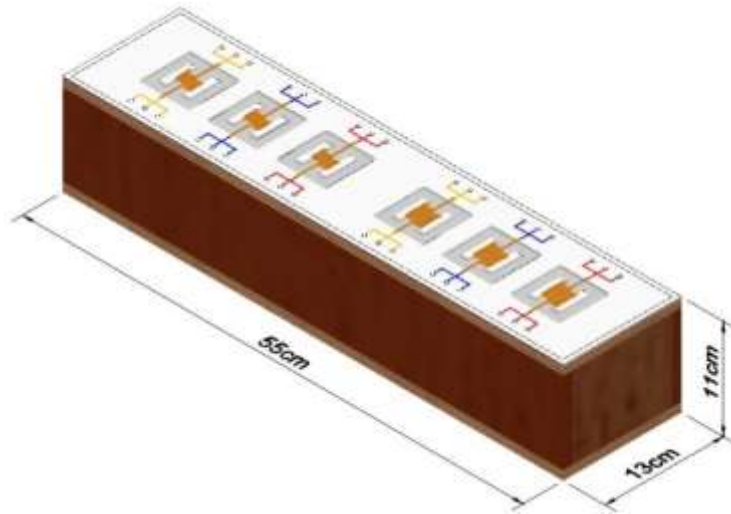
Tabla 15. Resultados de la carga inductiva de 10 espiras.

Número de espiras N	10	Vueltas
Resistividad cobre ρ	1,72E-08	[$\Omega \cdot m$]
longitud del conductor lateral l_c	0,4585	[m]
Sección del conductor S	5,25E-06	[m ²]
Resistencia bobina central R_e	1,502E-03	[Ω]

I [A]	V [V]	Z [Ω]	X [Ω]	L [H]
2	1,469	0,735	0,734	3,24E-04
4	2,681	0,670	0,670	2,96E-04
6	3,605	0,601	0,601	2,66E-04
8	4,150	0,519	0,519	2,29E-04
10	4,450	0,445	0,445	1,97E-04
12	4,710	0,393	0,392	1,74E-04

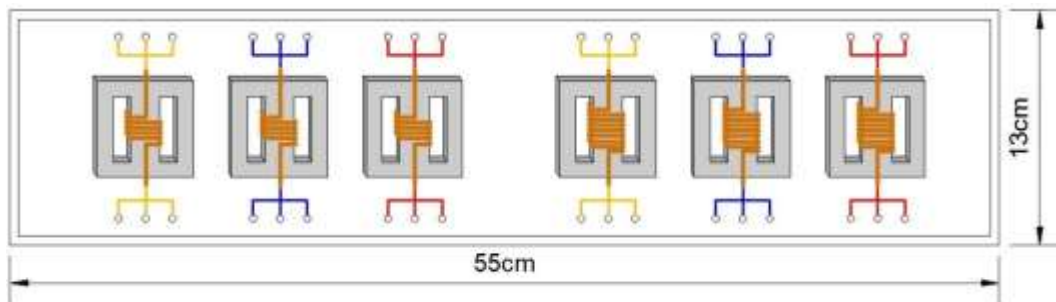
La caja que contiene los núcleos y bobinas de la carga inductiva se muestra en la Figura 39. El diseño tiene tres terminales para cada salida de las bobinas lo cual permite realizar conexiones en estrella o triángulo, poner en paralelo más cargas y a la vez acoplar resistencias en serie.

Figura 39. Caja para la carga inductiva.



La imagen de la tapa se muestra en la figura 40 y se debe imprimir en papel adhesivo a escala 1:1 del Anexo B.

Figura 40. Imagen superior de la caja para la carga inductiva.

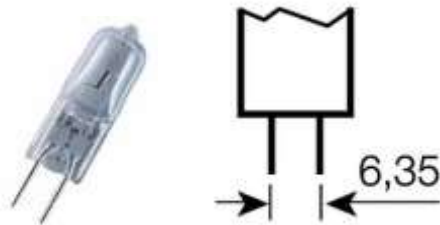


Para el sistema de potencia se utilizan dos cajas, una para cada barra de carga. Ellas contienen tres bobinas de 10 espiras y tres de 15.

6.10 BOMBILLOS HALÓGENOS

Para la carga resistiva del sistema se tomaron bombillos halógenos de 100 W y 24 V, largo 44 mm y ancho 12 mm, con casquillos de denominación estándar G6,35, 18 mm de diámetro como se observan en las figuras 41 y 42.

Figura 41. Bombillo halógeno 24 V y 100 W.



Fuente: Svetila.com.²⁰

Figura 42. Casquillo para bombillo halógeno.



Fuente: ElMaterialElectrico.com.²¹

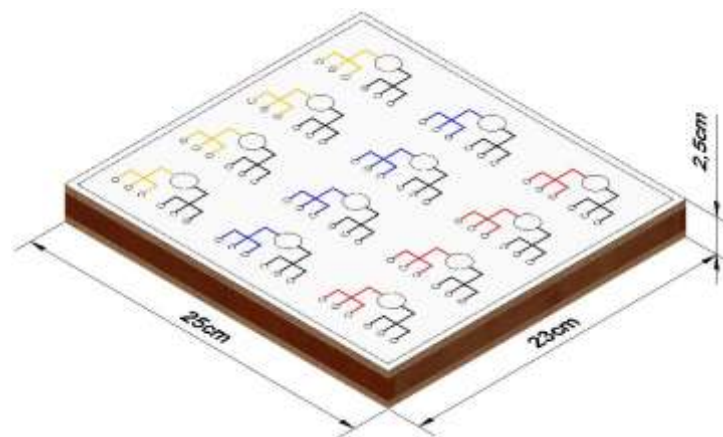
²⁰ SVETILA.COM. LUMINARIAS, ILUMINACIÓN Y BOMBILLAS.Osram halostar 64460 u ax 24v 100w gy6.35, [en línea], [Slovenia] SVETILA.com Stanko Plestenjak S.P.[Citado: 15 abril 2015] Disponible en: <http://www.svetila.com/es/de-bombillas-de-luz-66/lamparas-halogenas-1031/hsg-qt-jc-12v-91/halostar-64460-ax-24v-100w-gy6-35-178.html>

²¹ ELMATERIALELECTRICO.COM, Portalamparas para halógena dicroica G4 G6.3 y GX5.3 con cable , [en línea], Elmaterialelectrico.com [Malaga, España] [Citado 15 abril del 2015], Disponible en: <http://www.elmaterialelectrico.com/portalamparas/1012-portalampara-para-halogeno-dicroico-g4-g63-y-gx53-con-cable.html>

Dado que la potencia nominal de los tres alternadores es de 2494 VA, se necesitan 24 bombillos para cubrirla casi en su totalidad con un factor de potencia 1. Las pérdidas en las líneas se desprecian, ya que son valores insignificantes. Como la carga es trifásica, el número de bombillos debe ser divisible por tres y permitir que los dos barrajes tengan la misma potencia. Estos fueron los requisitos para elegir el consumo de cada unidad.

La carga resistiva total se divide en los dos barrajes del diseño, por tanto se tienen dos bancos, cada uno con 12 bombillos como se muestra en la Figura 43.

Figura 43. Caja para la carga resistiva.

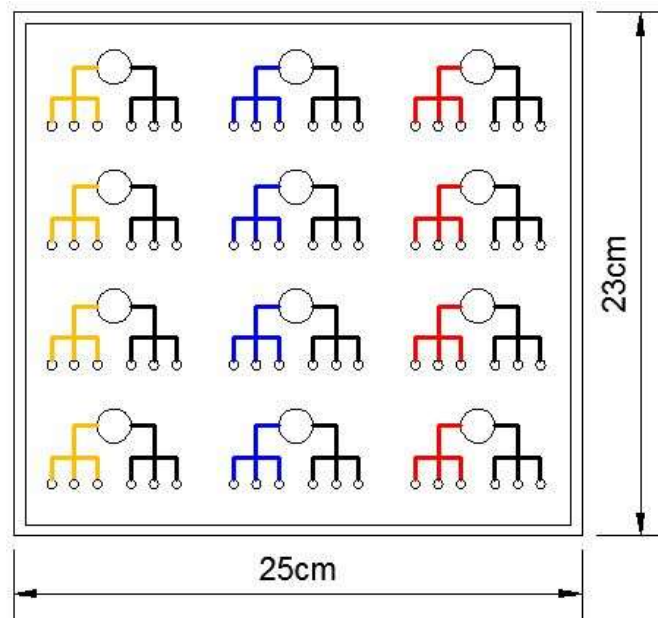


El diseño de la caja contiene tres terminales para cada salida de los bombillos lo cual permite realizar conexiones en estrella o triángulo, poner en paralelo más cargas y a la vez acoplar bobinas en serie para obtener diferentes factores de potencia.

En la parte interior de la caja de madera están únicamente los cables que conectan los terminales con las salidas de los bombillos.

La imagen de la tapa se debe imprimir en papel adhesivo a escala 1:1 del Anexo B y se muestra en la Figura 44.

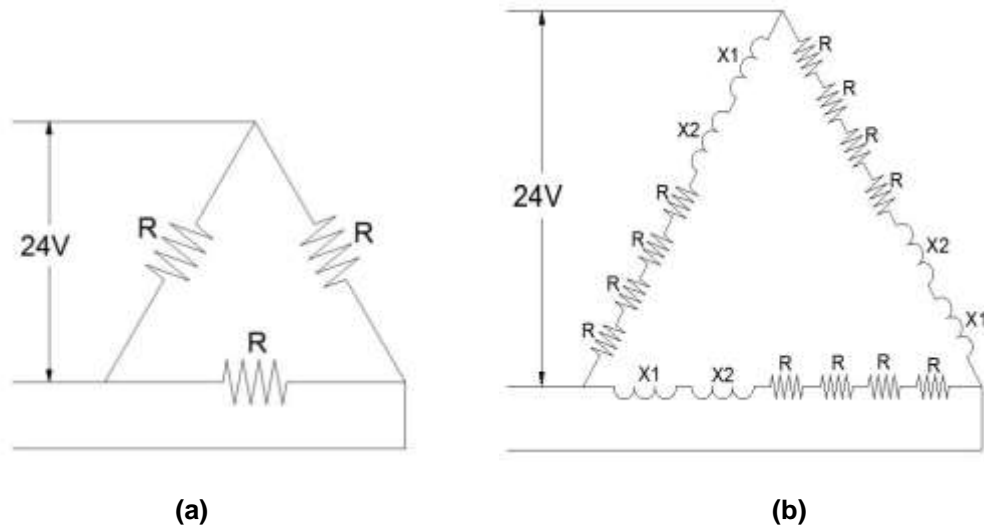
Figura 44. Imagen superior de la caja para la carga resistiva.



Después de tener la carga inductiva y resistiva, se realizaron los cálculos de los factores de potencia con las posibles combinaciones de carga en un barraje. Para ello se consideró la configuración delta, con la cual se obtiene un mayor consumo de potencia, ya que la tensión aplicada es más grande cuando se conecta en delta que cuando se conecta en estrella.

Los primeros cálculos se realizaron para las cargas que se muestran en la Figura 45, desde tener una carga puramente resistiva (a), se aumentó el número de bombillos y bobinas en serie, hasta llegar a la configuración (b).

Figura 45. Combinación de carga.



(a) Circuito de carga resistiva, (b) Circuito de carga con resistencia y bobinas en serie.

Para el cálculo de la corriente I_f en cada fase se utilizó la ecuación (17), donde R y X son la resistencia y reactancia de la bobina respectivamente y la tensión de línea aplicada es de 24V [6].

$$I_f = \frac{24}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (17)$$

La potencia activa trifásica $P_{3\phi}$ en un barraje se obtuvo con la siguiente ecuación:

$$P_{3\phi} = 3(I_f^2 R) \quad (18)$$

Analógicamente la potencia reactiva trifásica $Q_{3\phi}$ en un barraje se calculó con la expresión:

$$Q_{3\phi} = 3(I_f^2 X) \quad (19)$$

Con la potencia activa y reactiva, se obtuvo la potencia aparente trifásica con la ecuación (20).

$$S_{3\phi} = \sqrt{P_{3\phi}^2 + Q_{3\phi}^2} \quad (20)$$

Finalmente el factor de potencia Fp se calculó como sigue:

$$Fp = \frac{P_{3\phi}}{S_{3\phi}} \quad (21)$$

Los resultados de los cálculos se muestran en la Tabla 16, en la cual se observa que el factor de potencia no es menor a 0,949 en ninguno de los casos.

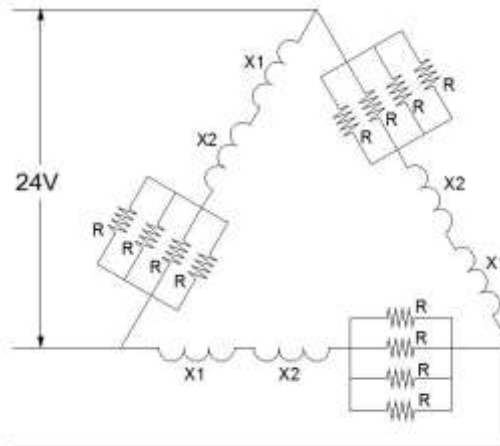
Tabla 16. Resultados de cálculos para resistencias y bobinas en serie.

R 1Φ [Ω]	X 1Φ [Ω]	I _f [A]	P 3Φ [W]	Q 3Φ[VAR]	S 3Φ [VA]	F _p	Espiras	Bombillos
5,76	0	4,167	300	0	300	1	-	1
5,76	1,247	4,072	286,558	62,063	293,202	0,977	15	1
5,76	0,670	4,139	295,992	34,442	297,989	0,993	10	1
5,76	1,918	3,953	270,063	89,915	284,638	0,949	15 y 10	1
11,52	0	2,083	150	0	150	1	-	2
11,52	1,443	2,067	147,683	18,499	148,837	0,992	15	2
11,52	0,734	2,079	149,393	9,525	149,696	0,998	10	2
11,52	2,177	2,047	144,826	27,375	147,390	0,983	15 y 10	2
17,28	0	1,389	100	0	100	1	-	3
17,28	1,443	1,384	99,307	8,293	99,653	0,997	15	3
17,28	0,734	1,388	99,820	4,243	99,910	0,999	10	3
17,28	2,177	1,378	98,437	12,404	99,215	0,992	15 y 10	3
23,04	0	1,042	75	0	75	1	-	4
23,04	1,443	1,040	74,707	4,679	74,853	0,998	15	4
23,04	0,734	1,041	74,924	2,389	74,962	0,999	10	4
23,04	2,177	1,037	74,336	7,025	74,667	0,996	15 y 10	4

Los valores de reactancia se tomaron de las tablas 14 y 15, de acuerdo a la corriente que pasa por las bobinas en cada configuración.

Seguidamente se utilizó el circuito de la Figura 46. Al poner resistencias en paralelo, la corriente por los arrollamientos aumenta y el factor de potencia disminuye. La carga inició con una bobina y dos resistencias en cada fase y se aumentó progresivamente hasta utilizar la carga total.

Figura 46. Circuito de carga con resistencias en paralelo y bobinas en serie.



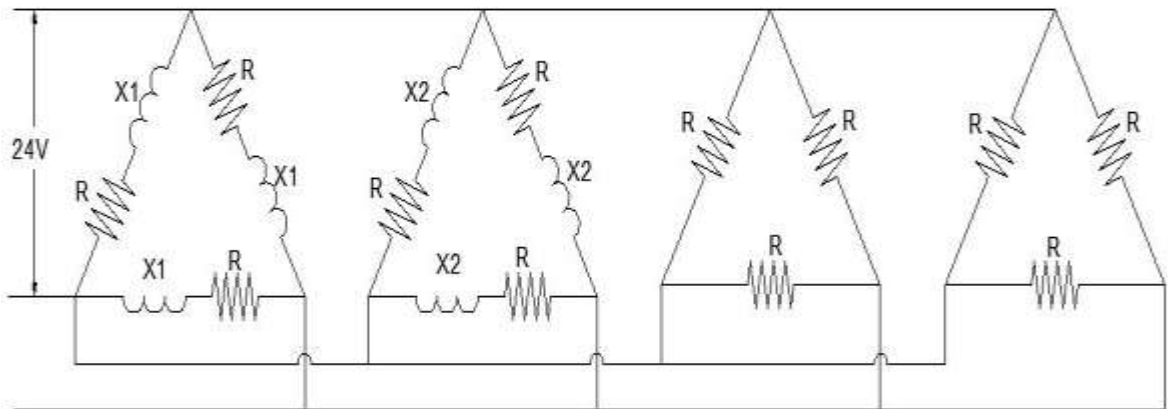
Los resultados se muestran en la Tabla 17. El menor factor de potencia se obtiene cuando se conectan dos bobinas en serie y cuatro resistencias en paralelo tal como lo muestra la Figura 46.

Tabla 17. Resultados de cálculos para resistencias en paralelo y bobinas en serie.

R 1Φ [Ω]	X 1Φ [Ω]	I _f [A]	P 3Φ [W]	Q 3Φ [VAR]	S 3Φ [VA]	F _p	Espiras	Bombillos
2,88	0,791	8,036	557,890	153,274	578,562	0,964	15	2
2,88	0,519	8,201	581,146	104,676	590,498	0,984	10	2
2,88	1,310	7,585	497,143	226,130	546,155	0,910	15 y 10	2
1,92	0,582	11,963	824,343	249,734	861,341	0,957	15	3
1,92	0,392	12,247	863,898	176,603	881,764	0,980	10	3
1,92	0,974	11,147	715,746	363,151	802,603	0,892	15 y 10	3
1,44	0,582	15,454	1031,671	416,725	1112,657	0,927	15	4
1,44	0,392	16,080	1117,014	304,462	1157,764	0,965	10	4
1,44	0,974	13,805	823,242	556,923	993,927	0,828	15 y 10	4

Las cargas en paralelo con dos, tres y cuatro deltas como lo muestra la Figura 47, no se consideraron para los cálculos, ya que no afectan considerablemente el factor de potencia.

Figura 47. Circuito de carga con cuatro deltas en paralelo.

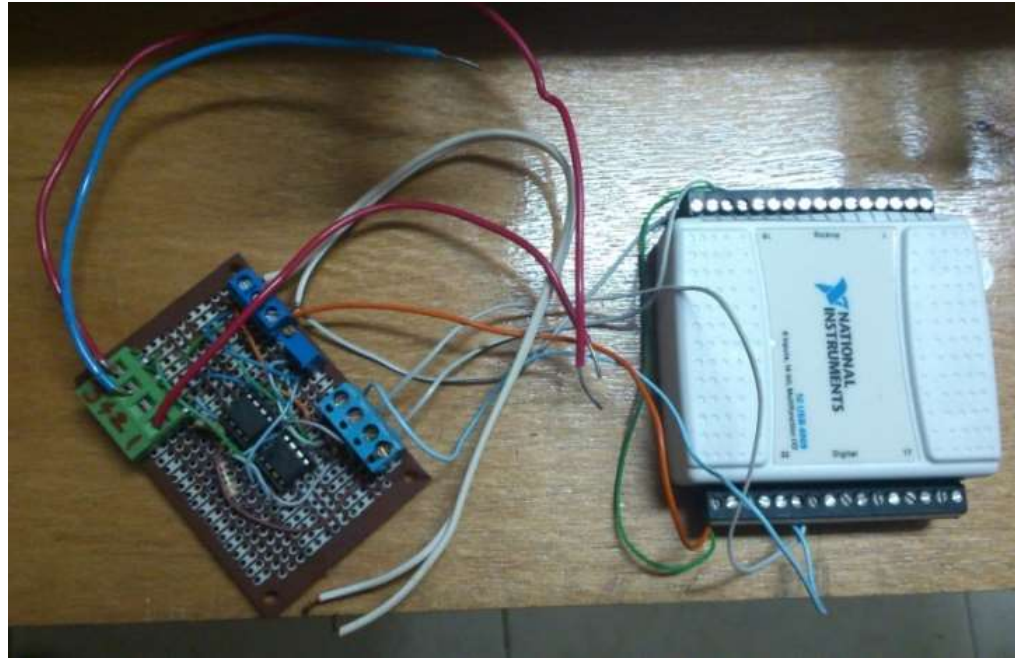


6.11 CIRCUITOS DE PROTECCIÓN

Para la conexión de la tarjeta NI USB-6009 al variador de velocidad es necesario un circuito de protección tal como lo muestra la Figura 48. Esto se debe a que la tarjeta trabaja a pequeñas corrientes y tensiones y el sistema utiliza potencias que ella no puede soportar.

El diseño de este circuito se puede encontrar en el trabajo de grado [5].

Figura 48. Circuito de protección y tarjeta NI USB-6009.



6.12 LISTADO DE ELEMENTOS Y COSTOS

A continuación se muestra el listado de los elementos necesarios para realizar el montaje del sistema de potencia y los costos de cada uno de ellos. Para efectos de la fluctuación de los precios se toma un 15% sobre el valor total. La consulta de los precios se realizó directamente en empresas de Bucaramanga.

Tabla 18. Listado y costos de elementos.

REFERENCIA	ARTÍCULO	CANTIDAD	VALOR UNITARIO	VALOR TOTAL
Figura 9	Alternador Ford 12 V 65 A Delco Remy	3	\$200.000	\$600.000
Figura 12	Motor Siemens trifásico 2 HP 1800 rpm 220/440 V	3	\$525.000	\$1'575.000
Figura 13	Variador de velocidad Sinamics V20 2 HP 220 V	3	\$628.000	\$1'884.000
Figura 14 y 64	Polea 12x1Ax1"	3	\$31.842	\$95.526

Figura 14 y 64	Correa Rexon A-46	3	\$8.584	\$25.752
Anexo A	Estructura metálica	3	\$700.000	\$2'100.000
Anexo F	Tornillo M10 X 100 mm, tuerca y arandela	13	\$1.500	\$19.500
Anexo F	Tornillo M4 X 100 mm, tuerca y arandela	4	\$1.000	\$4.000
Anexo F	Tornillo 5/16" X 3", tuerca y arandela	1	\$2.000	\$2.000
Anexo F	Tornillo 7/16" X 6", tuerca y arandela	1	\$2.000	\$2.000
Figura 16	Tarjeta NI USB-6009	3	\$1'060.240	\$3'180.720
Figura 17	Pinza amperimétrica True RMS UNI-T 204	6	\$165.000	\$990.000
Figura 18	Cuchilla eléctrica 3x60 A C-peí NEC	34	\$24.000	\$816.000
Figura 19	Platina de cobre 1/8X1/2" (metro)	3	\$10.800	\$32.400
Figura 19	Tornillo cobrizado 1/4X1" C/T/A	51	\$700	\$35.700
Figura 19	Aisladores para barraje 25 mm	30	\$1.200	\$36.000
Figura 19	Abrazadera cuadrada de ala doble	30	\$1.000	\$30.000
Figura 88	Conductor esmaltado calibre 10 (metro)	40	\$2.000	\$80.000
Figura 28	Núcleo de ferrita	12	\$5.000	\$60.000
Figura 41	Bombillo halógeno 24 V 100 W	24	\$12.500	\$300.000
Figura 42	Casquillo G6.35 para bombillo halógeno	24	\$1.000	\$24.000
Anexo C	Caja líneas	6	\$270.000	\$1'620.000
Anexo C	Caja barrajes	5	\$150.000	\$750.000
Anexo C	Caja bombillos	2	\$60.000	\$120.000
Anexo C	Caja bobinas	2	\$50.000	\$100.000
Figura 20	Terminal tipo ojo de cobre estañado $\Phi=1/4"$	60	\$200	\$12.000
Figura 26	Terminal tipo banana hembra color negro	150	\$250	\$37.500
Figura 26	Terminal tipo banana hembra color rojo	150	\$250	\$37.500
Figura 27	Terminal tipo banana macho color negro	225	\$450	\$101.250
Figura 27	Terminal tipo banana macho color rojo	225	\$450	\$101.250
Anexo D	Cable cobre amarillo calibre 10 AWG (metro)	100	\$1.356	\$135.627
Anexo D	Cable cobre azul calibre 10 AWG (metro)	100	\$1.356	\$135.627
Anexo D	Cable cobre rojo calibre 10 AWG (metro)	100	\$1.356	\$135.627
Figura 75	Amarre plástico 30 cm X 4 mm	25	\$100	\$2.500
Anexo B	Impresión de planos para las tapas de las cajas	1	\$6.000	\$6.000
SUBTOTAL				\$15'187.479
Fluctuación de precios 15%				\$2'278.122
TATAL				\$17'465.601

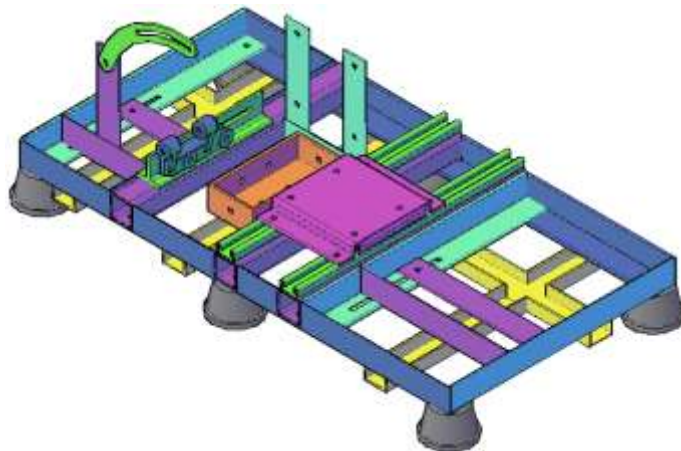
7 GUÍA PARA LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA DE POTENCIA

Con el propósito de crear un sistema eléctrico de potencia que cumpla con características de seguridad, funcionalidad y organización, cada una de las partes del sistema se diseñó para ocupar un área designada dentro de un compartimiento o módulo especial.

7.1 GENERACIÓN

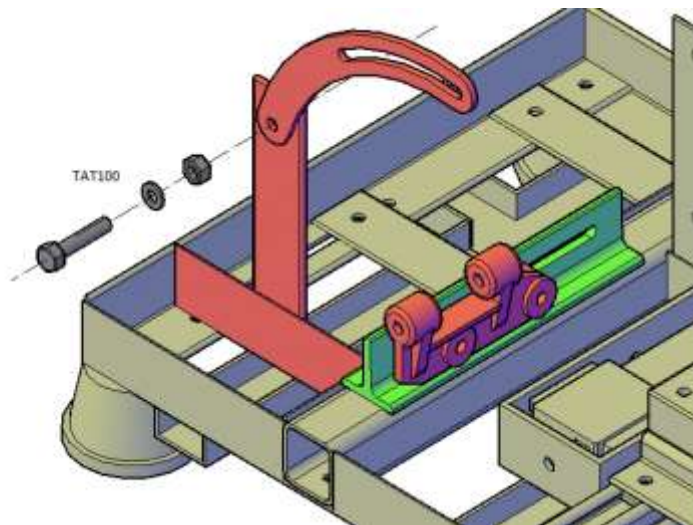
El módulo de generación se constituye sobre una base metálica cuyo diseño se enfoca en hacer un uso óptimo del espacio, la comodidad y seguridad del operador. La estructura alberga elementos de control tal como la tarjeta NI USB-6009, el circuito de protección, el sistema de control de campo del alternador y elementos de potencia: el motor, el alternador, el acople mecánico entre ellos y el barraje principal. La estructura de soporte se diseñó con elementos metálicos de fácil adquisición en el mercado tal como ángulos de hierro de diferentes tipos. El diagrama esquemático en 3D de la estructura se muestra en la Figura 49, la disposición general de los elementos sobre la misma se explicara a continuación.

Figura 49. Estructura de soporte del módulo de generación.

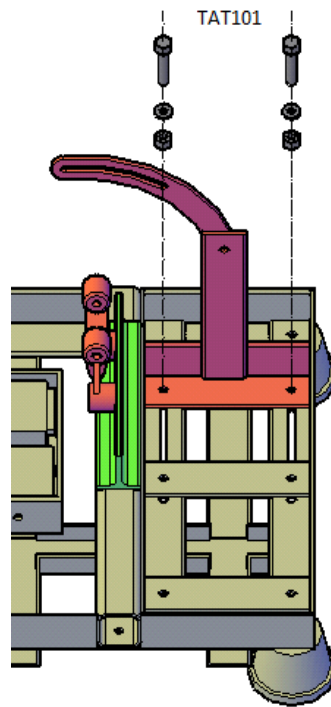


La estructura de soporte cuenta con un sistema de apoyo especial para el alternador, tal como se muestra en la Figura 50 a) y b) donde se indica además, el juego de tornillos correspondientes para su sujeción a la estructura metálica, ver Tabla 19. El sistema consta de tres piezas: una base especial para fijar éste en su parte inferior, un ángulo en T con una guía cuya finalidad es la de soportar la base y permitir ajustar su posición horizontal, y en la parte superior se cuenta con un brazo guía de forma curva para completar la fijación de la máquina y permitir ajustar la tensión de la correa de acople, el alternador se debe fijar a la base y al brazo por medio de un juego de tuercas, arandelas y tornillos, ver Figura 51.

Figura 50. Sistema de fijación del alternador sobre la estructura de soporte.

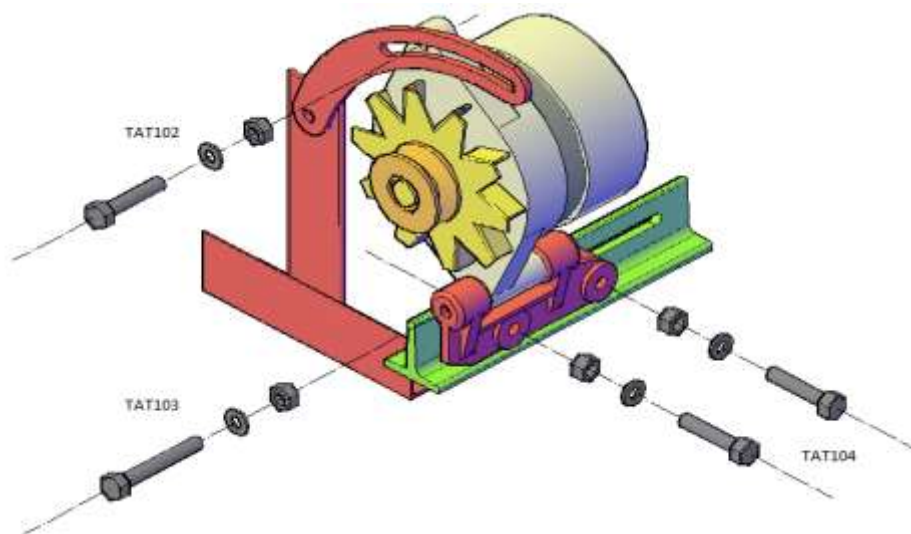


a)



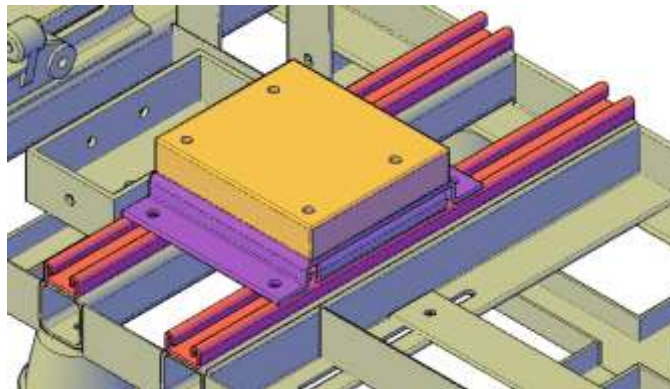
b)

Figura 51. Puntos de fijación del alternador.

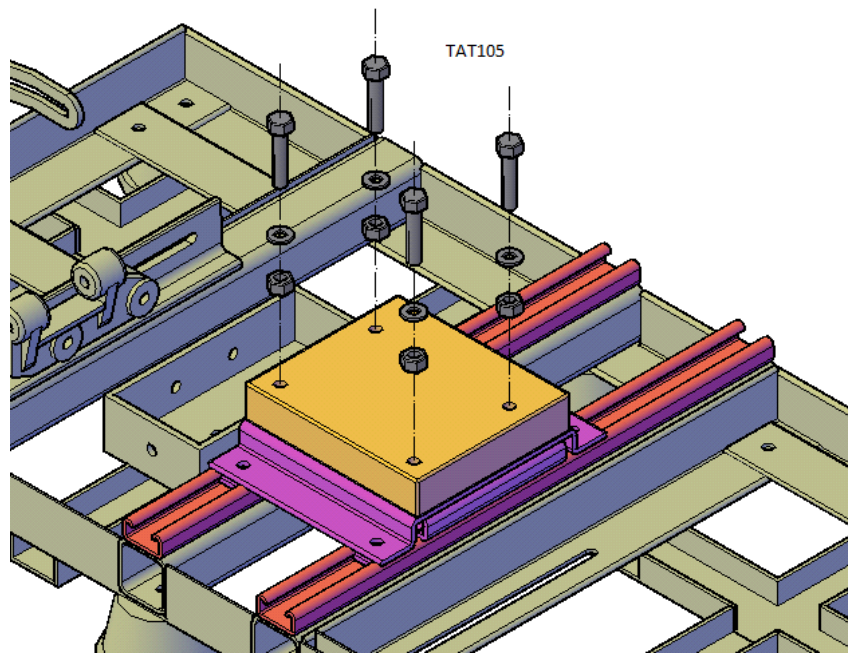


El motor debe reposar sobre una base en madera de forma rectangular y con la altura adecuada para que los ejes del alternador y el motor queden alineados. La base de madera se soporta por una placa metálica, la cual se diseñó para que se pueda deslizar sobre un juego de rieles que permiten ajustar la posición horizontal del motor, esto con el objetivo de poder calibrar el acople entre las maquinas, ver Figura 52 a) b) c). La Figura 52 d) muestra el ajuste de la base metálica a la estructura con el juego de tornillos TAT106 y las láminas metálicas en el interior de los rieles. Nótese en color marrón la base de madera necesaria para la instalación del motor. El conjunto motor, base de madera y placa metálica se ajustan en su posición final con un juego apropiado de tuercas, arandelas y tornillos como se muestra en la Figura 53. El motor descansa sobre una base de madera para ajustar la altura de su eje a la misma altura del eje del alternador.

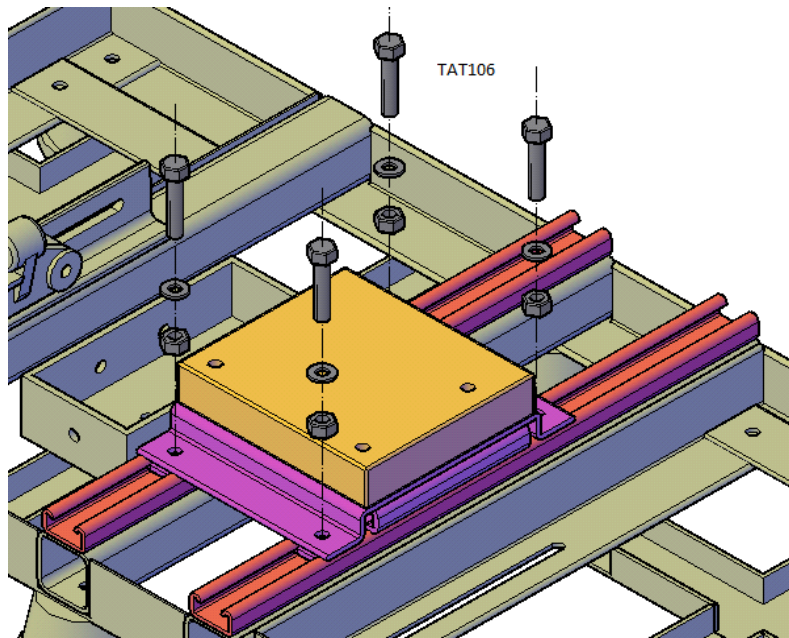
Figura 52. Sistema de soporte para el motor.



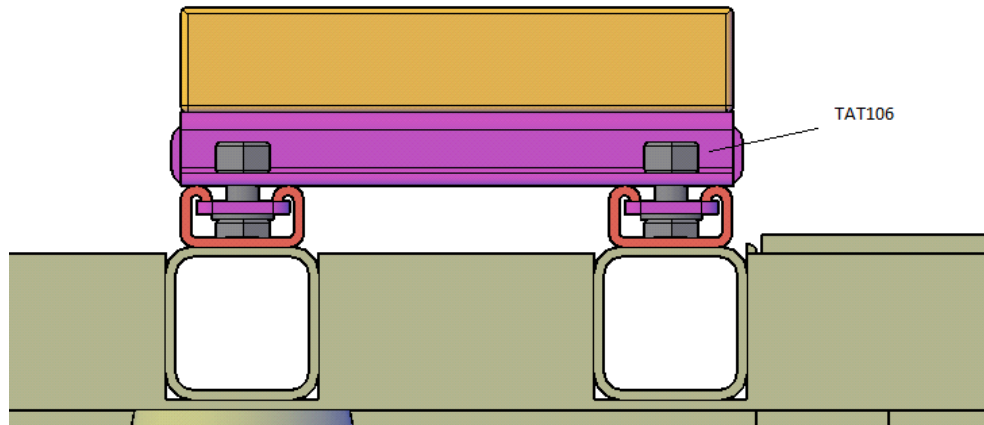
a)



b)

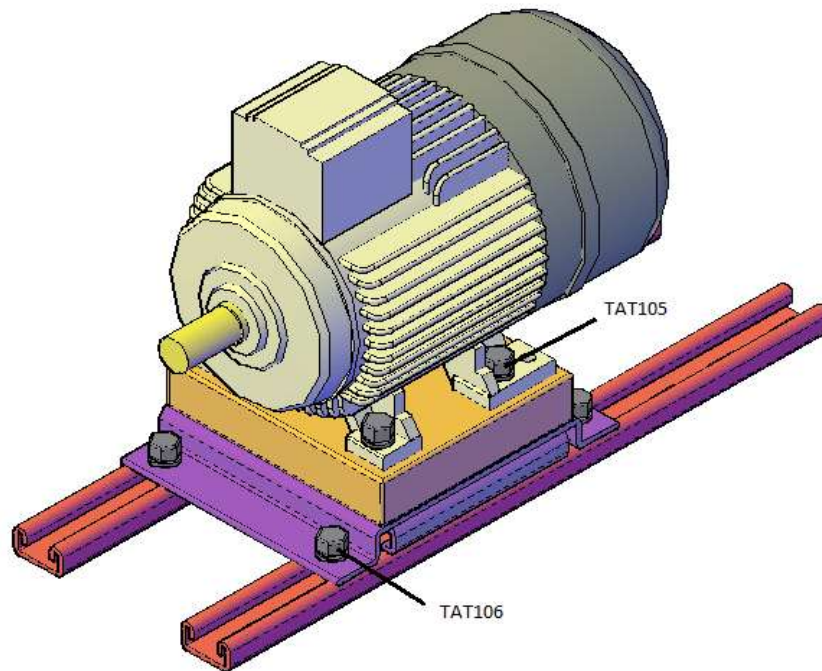


c)



d)

Figura 53. Puntos de sujeción del motor sobre la estructura de soporte.



La estructura de soporte se diseñó para albergar el variador de velocidad Sinamics V20 tipo B. La posición del variador en la estructura metálica se muestra en la Figura 54. Para fijar

el variador de velocidad a la estructura de soporte se debe utilizar un juego de tuercas, arandelas y tornillos, ver Figura 55.

Figura 54. Soporte para el variador de velocidad.

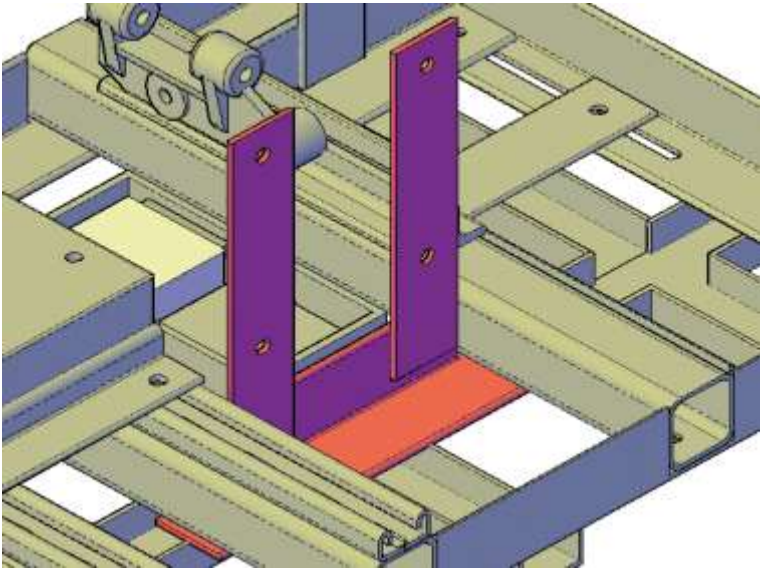
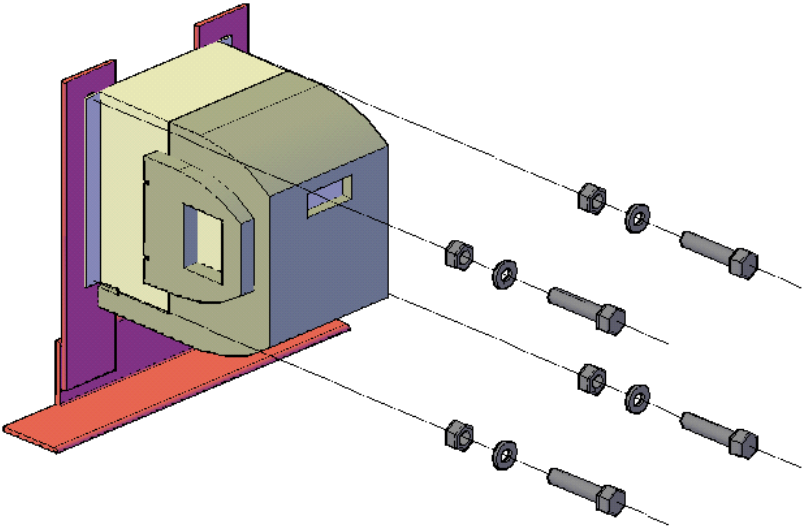


Figura 55. Puntos de fijación del variador de velocidad



La tarjeta NI USB-6009 y el circuito de protección son ubicados en la caja metálica tal como se indica en la Figura 56, cabe aclarar que esta caja deberá estar cerrada cada vez que se opere el sistema de generación, esto es para proteger la electrónica de la tarjeta y el circuito de protección de la interferencia electromagnética generada por el alternador y el motor. La caja tiene una serie de orificios en cada uno de sus lados para que se facilite la entrada y la salida de los cables de conexión entre los diferentes dispositivos del sistema. La Figura 57 muestra cual debe ser la disposición de los elementos dentro de la caja.

Figura 56. Caja metálica.

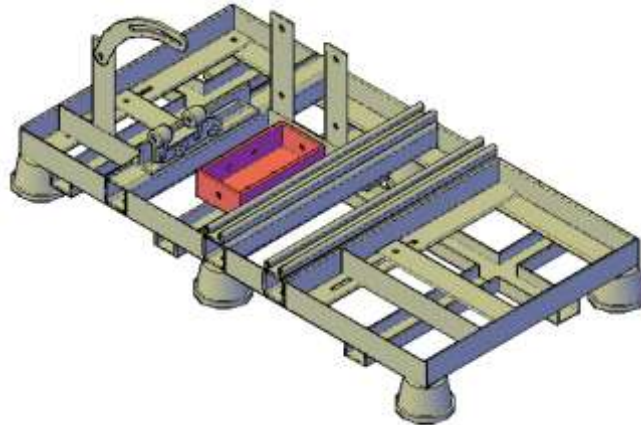
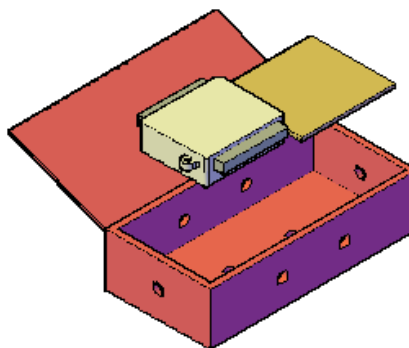


Figura 57. Tarjeta NI USB6009 y circuito de protección dentro de la caja metálica.



El barraje principal se debe ubicar en el espacio que está justo al lado del motor. La estructura de soporte cuenta con unas láminas que pueden deslizarse a lo largo de las guías para nivelar y asegurar en su posición la caja del barraje, ver Figura 58. La posición del barraje sobre la estructura se muestra en la Figura 59.

Figura 58. Espacio designado para el barraje principal.

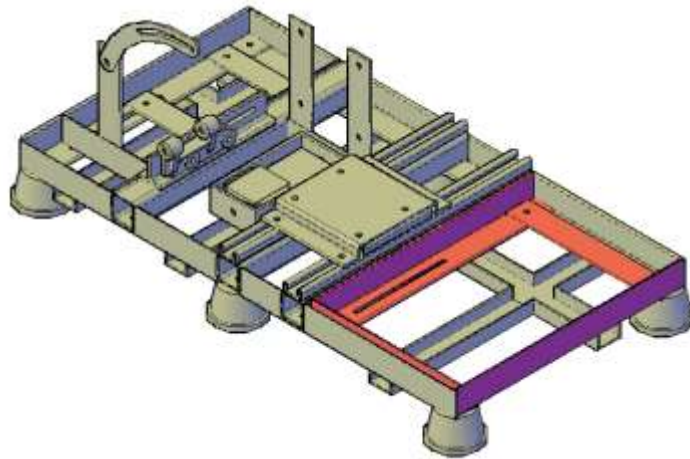
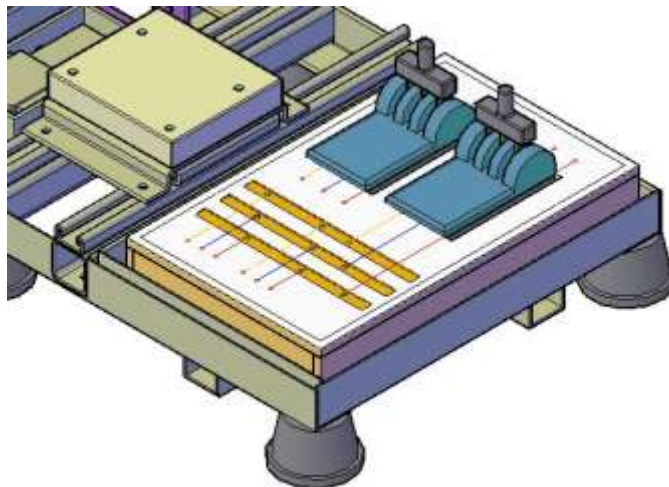


Figura 59. Posición y orientación del barraje sobre la estructura de soporte.



El sistema de control de campo del alternador consta de una fuente de tensión DC; la posición prevista por diseño para esta fuente es la que se muestra en la figura 60. El sistema tiene una serie de láminas de soporte que se pueden deslizar, las cuales sirven para nivelar la postura de la fuente DC. La orientación que debe tener dentro de la estructura se muestra en la figura 61.

Figura 60. Espacio para el sistema de control de campo.

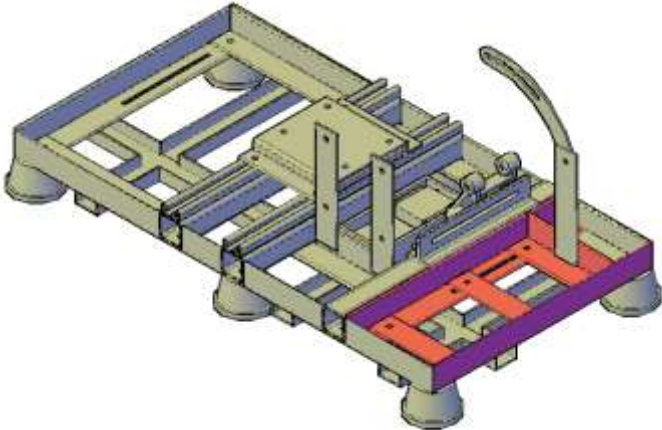
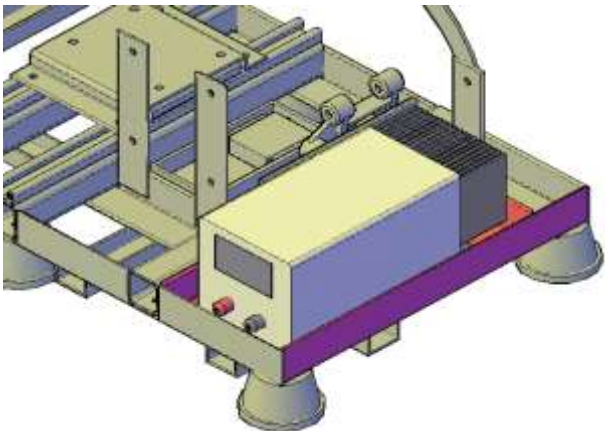
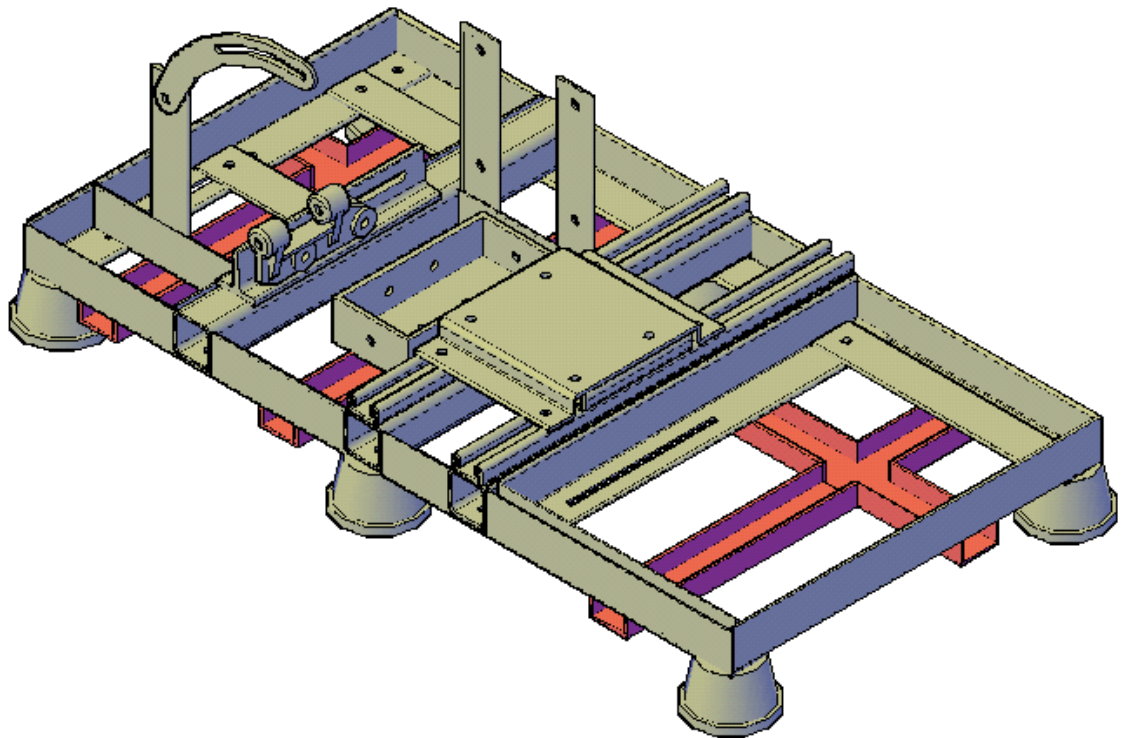


Figura 61. Orientación del sistema de control de campo.



Los cables para las conexiones entre los elementos del módulo de generación deben ser puestos y ordenados en la bandeja porta cables. Esta última se dispuso para que abarque todos los espacios de la estructura donde se pueda llevar un tendido de cable. En la Figura 62 se puede observar la disposición de la bandeja en la parte inferior estructura (en color rojo).

Figura 62. Bandeja porta cables.



El acople entre el motor y el alternador se realiza mediante una correa Rexon A46, la cual entrelaza a la polea del alternador y una polea de 12 pulgadas que se ajusta al eje del motor. La disposición de estas sobre los ejes de las maquinas debe ser hecha con un sistema apropiado de ajuste, también hay que tener en cuenta que los ejes de las maquinas deben alinearse (a la misma altura) para que el acople tenga una eficiencia máxima. La

tensión de la correa puede ajustarse girando el alternador sobre su punto de apoyo inferior, una vez obtenida la tensión que se desea, el alternador se debe fijar en su parte superior al brazo curvo de la estructura de soporte, ver figuras 63 y 64. En la Figura 65 se muestra un boceto completo de cómo se verá el módulo de generación una vez termine su construcción. Esto también se puede ver de forma clara en el plano que corresponde al Anexo E.

Figura 63. Acople motor alternador.

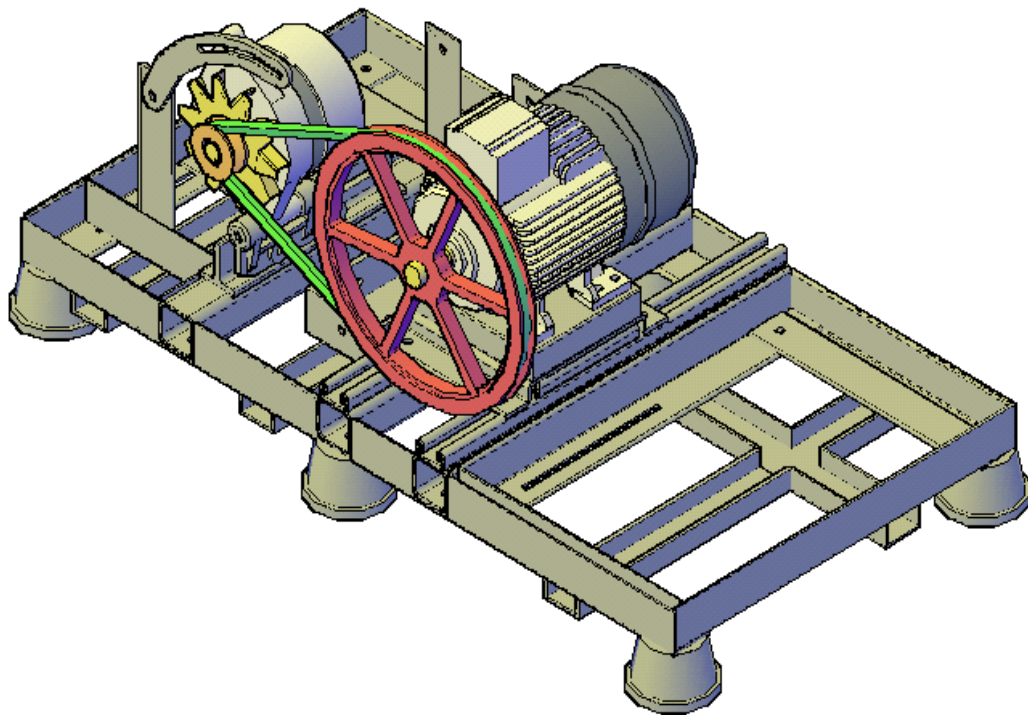


Figura 64. Acople motor alternador, alineación horizontal de los ejes.

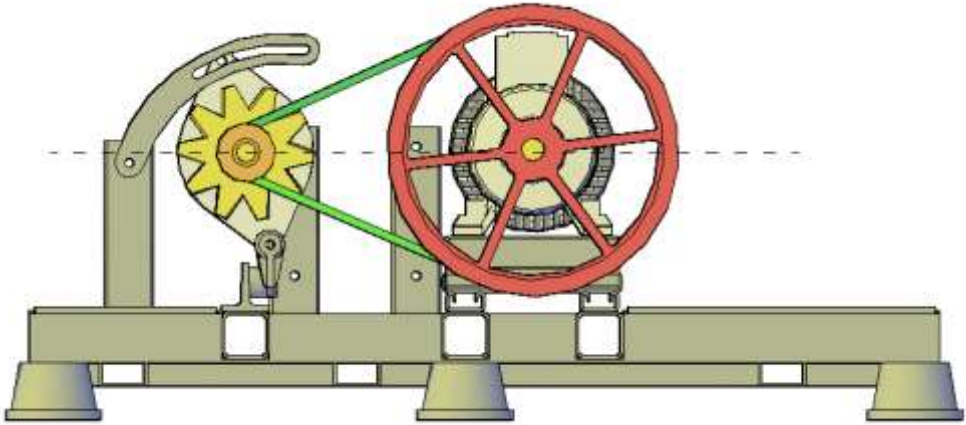
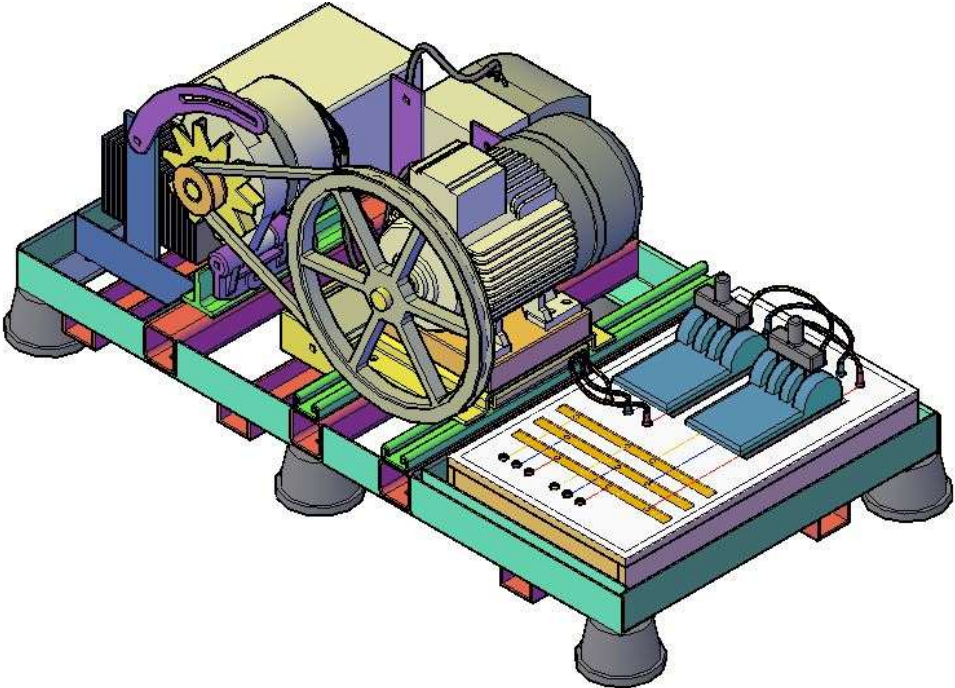
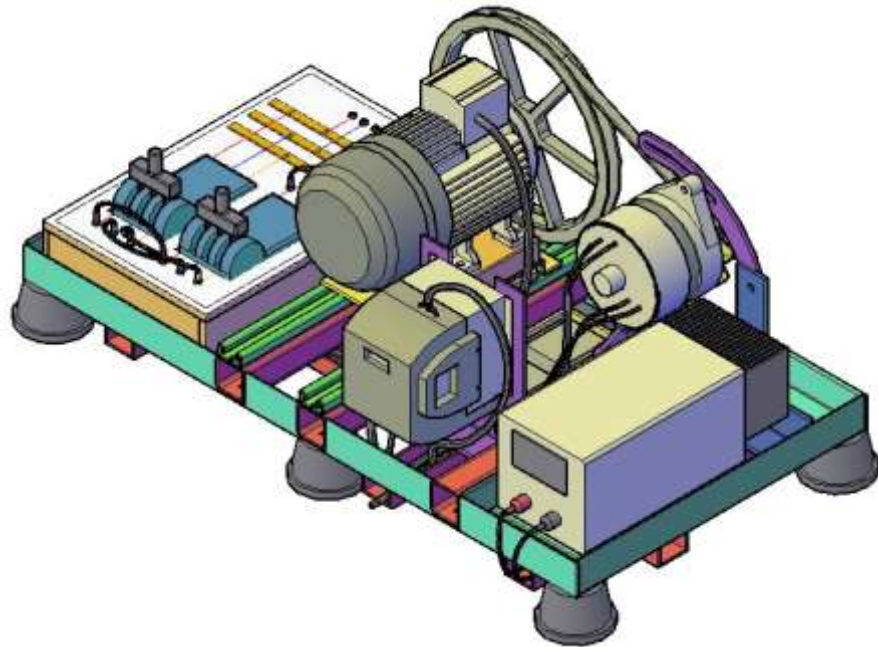


Figura 65. Módulo de generación con todos sus componentes.



a)



b)

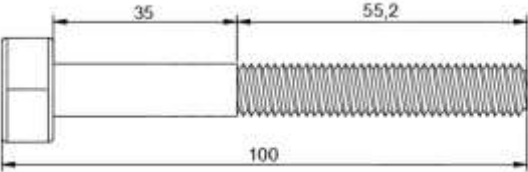
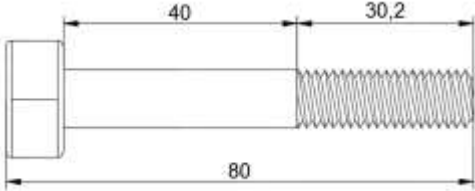
a) Vista frontal, b) vista posterior.

En la Tabla 19 se muestran las características de los tornillos que se necesitan para el módulo de generación. Se recomienda que sean de acero inoxidable.

Tabla 19. Referencia de la tornillería en la estructura de soporte.

Conjunto N°	Cantidad	Designación de Perno	Observaciones
TAT100	1	Tornillo Cabeza hexagonal 5.8 M10x1,5 5H 30	Longitud de rosca normal.
	1	Tuerca M10	Grado y ajuste según designación de tornillo.
	1	Arandela M10	Grado según designación de tornillo.
TAT101	2	Tornillo Cabeza hexagonal	Longitud de rosca normal.

		5.8 M10x1,5 5H 30	
	2	Tuerca M10	Grado y ajuste según designación de tornillo.
	2	Arandela M10	Grado según designación de tornillo.
TAT102	1	Tornillo cabeza hexagonal, G2 5/16" 18 UNC 3B 3"	Longitud de rosca según diagrama TAT102.
	1	Tuerca 5/16"	Grado y ajuste según designación de tornillo.
	1	Arandela 5/16"	Grado según designación de tornillo.
	Diagrama TAT102: Longitud del Vástago y rosca [pulgadas]		
TAT103	1	Tornillo cabeza hexagonal, G2 7/16" 14 UNC 3B 6"	Longitud de rosca según diagrama TAT103.
	1	Tuerca 7/16"	Grado y ajuste según designación de tornillo.
	1	Arandela 7/16"	Grado según designación de tornillo.
	Diagrama TAT103: Longitud del Vástago y rosca [pulgadas]		
TAT104	2	Tornillo Cabeza hexagonal 5.8 M10x1,5 5H 100	Longitud de rosca según diagrama TAT104.

	2	Tuerca M10	Grado y ajuste según designación de tornillo.
	2	Arandela M10	Grado según designación de tornillo.
	Diagrama TAT104: Longitud del Vástago y rosca [mm]		
			
TAT105	4	Tornillo Cabeza hexagonal 5.8 M10x1,5 5H 80	Longitud de rosca según diagrama TAT105.
	4	Tuerca M10	Grado y ajuste designación de tornillo.
	4	Arandela M10	Grado según designación de tornillo.
	Diagrama TAT105: Longitud del Vástago y rosca [mm]		
			
TAT106	4	Tornillo Cabeza hexagonal 5.8 M10x1,5 5H 30	Longitud de rosca normal.
	4	Tuerca M10	Grado y ajuste designación de tornillo.
	4	Arandela M10	Grado según designación de tornillo.
TAT107	4	Tornillo cabeza hexagonal 4.8 M4x0,7 6g 30	Longitud de rosca normal.

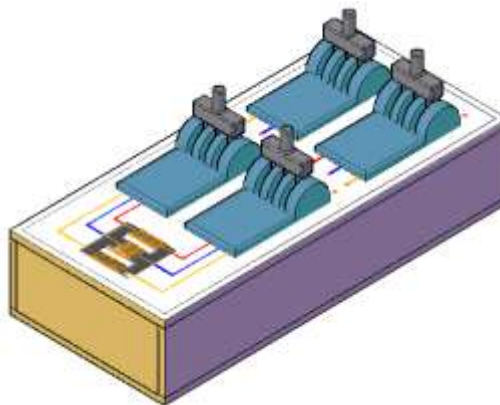
	4	Tuerca M4	Grado y ajuste según designación de tornillo.
	4	Arandela M4	Grado según designación de tornillo.

Todos los tornillos, tuercas y arandelas que se especifican en la Tabla 19 se deben implementar según lo indica el plano que corresponde al Anexo F.

7.2 TRANSPORTE

Las líneas de transmisión están compuestas por una serie de bobinas que se arrollan sobre un núcleo ferromagnético, conductores, borneras, una serie de cuchillas las cuales harán las veces de seccionadores y una cubierta en madera que se diseñó para alojar estos elementos. La Figura 66 muestra el módulo de la línea. La composición interna de sus partes se explica a continuación.

Figura 66. Módulo de línea de transmisión.



Los núcleos de ferrita se deben ubicar como lo muestra la Figura 67, se deben fijar con

amarres plásticos de 4 mm de ancho por 30 cm de largo a la base de la caja, tal como lo enseña la Figura 68.

Figura 67. Espacio para la ubicación del núcleo ferromagnético.

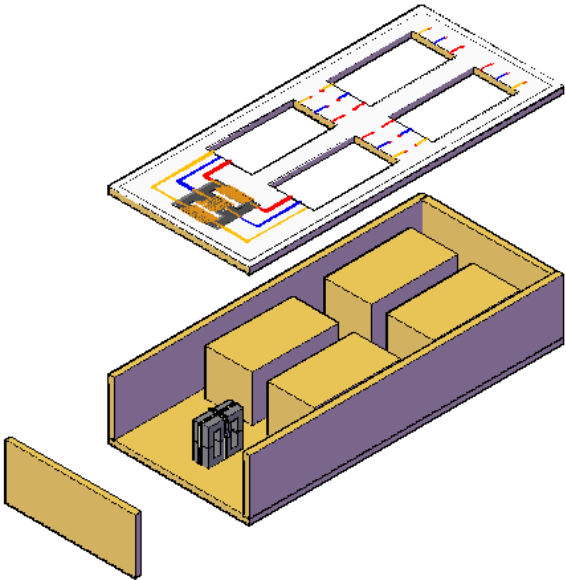
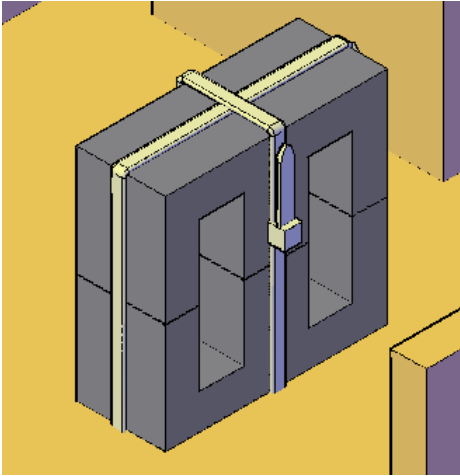
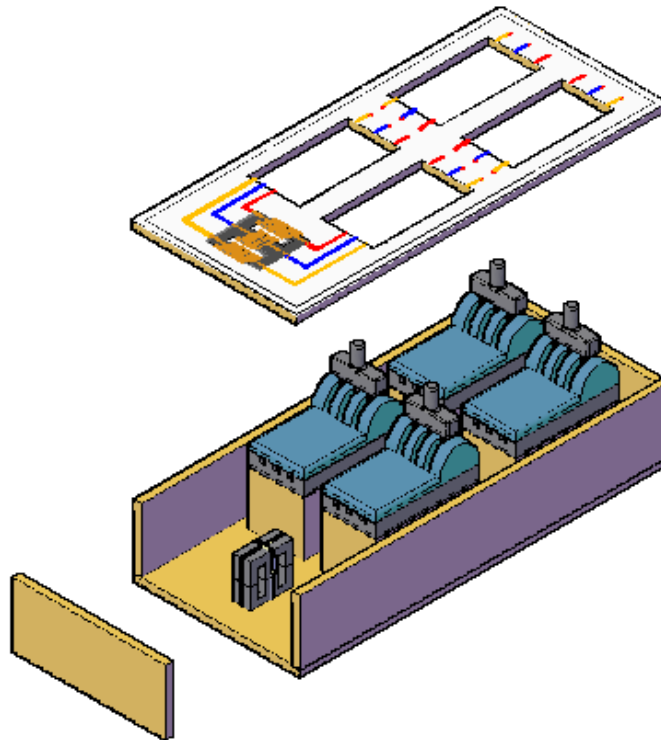


Figura 68. Amarre del núcleo de ferrita a la caja.



Las cuchillas se deben colocar sobre las bases de madera en la parte inferior de la caja, además se deben asegurar a estas con tornillos golosos, la posición de las cuchillas dentro de la caja se muestra en la Figura 69.

Figura 69. Cuchillas fijas a la base de madera.



7.3 CARGAS

El sistema de cargas está compuesto por dos módulos independientes, uno de carga resistiva y otro de carga inductiva, los cuales se diseñaron para ser interconectados de diversas formas con el objetivo de variar la carga dentro de un rango de potencias admisibles para el sistema, Los módulos se muestran en las figuras 70 y 71 respectivamente.

Figura 70. Módulo de carga resistiva compuesto por bombillos halógenos.

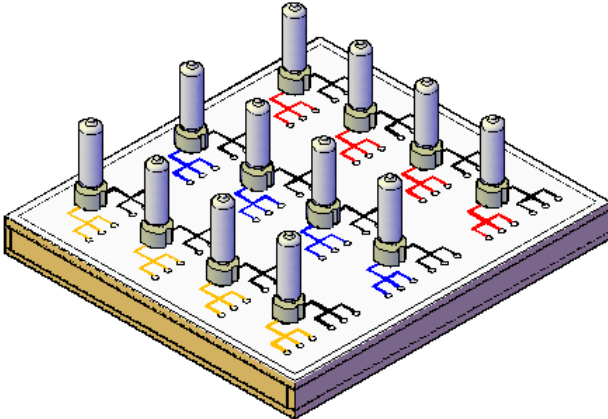
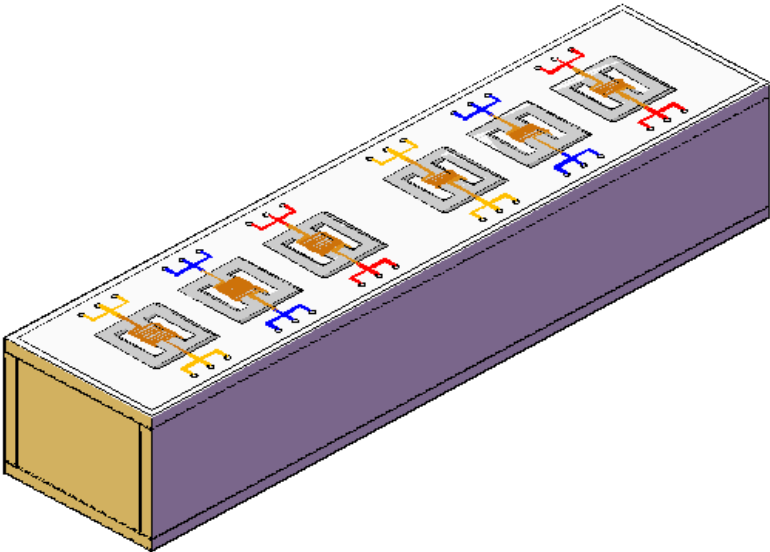


Figura 71. Módulo de carga inductiva compuesto por núcleos y bobinas.



7.3.1 Carga resistiva. La carga resistiva está conformada por luminarias halógenas debidamente conectadas al módulo, el cual contiene las bases en cerámica apropiadas para la conexión de las mismas. Estas bases deben estar aseguradas con pegante epóxico o silicona a la tapa de la caja, su disposición es la que se muestra en la Figura 72. La Figura 73 muestra la disposición de los bombillos.

Figura 72. Módulo de carga resistiva.

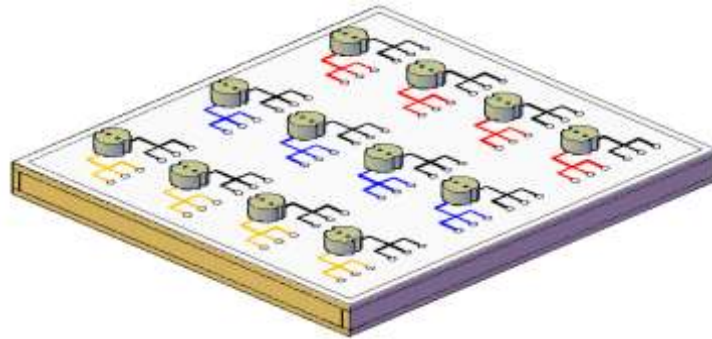
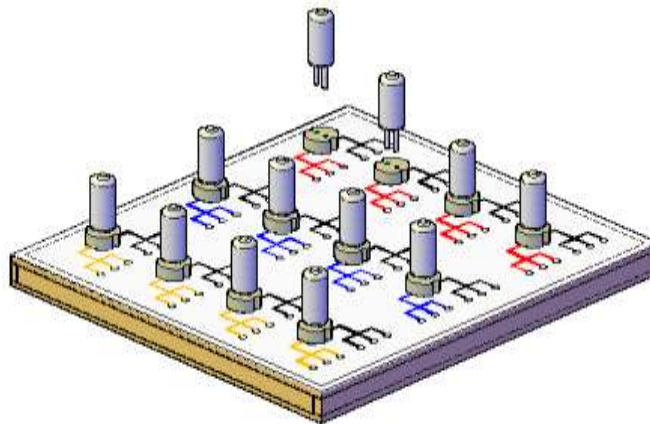


Figura 73. Modo de conexión de los bombillos al módulo.



7.3.2 Carga inductiva. Al igual que en el módulo de línea, el de carga inductiva está compuesto por seis bobinas que se arrollan en núcleos ferromagnéticos con su respectivo recubrimiento o caja, este módulo consta con el espacio necesario para alojar las bobinas tal como se muestra en la Figura 74. El detalle del amarre de los núcleos a la base del módulo se muestra en la Figura 75.

Figura 74. Módulo de carga inductiva.

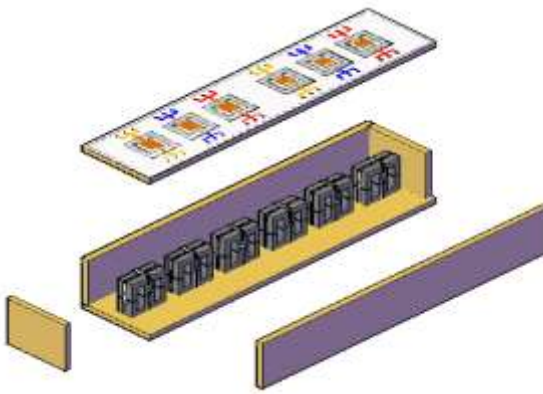
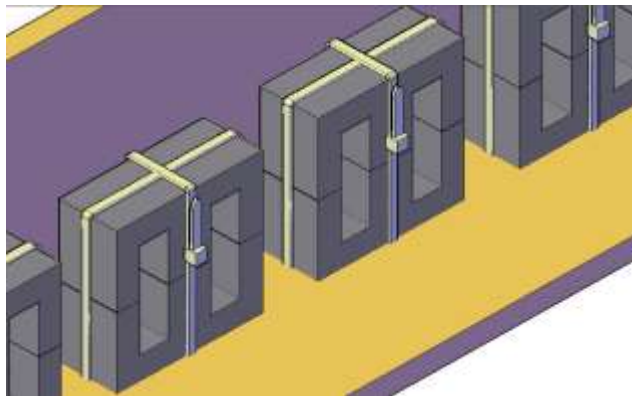


Figura 75. Detalle del amarre de los núcleos a la base del módulo.

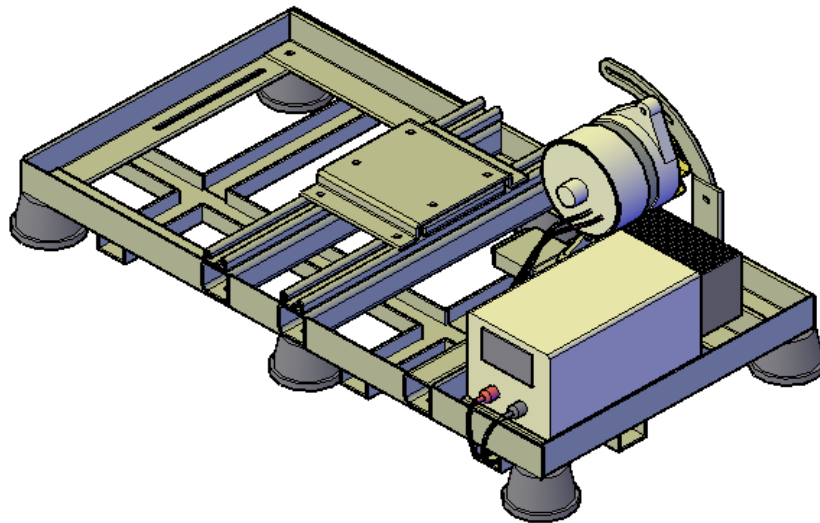


7.4 CABLEADO DEL SISTEMA DE POTENCIA

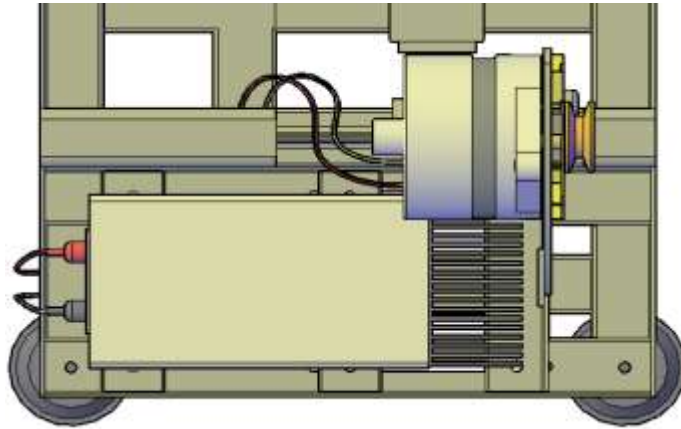
Se especifica en esta sección como se deben realizar las conexiones entre los distintos elementos dentro de la estructura metálica.

7.4.1 Conexión entre el sistema de control de campo y el alternador. La conexión debe realizarse con festos fabricados con cable calibre 14 AWG como mínimo puesto que por estos conductores circulara la corriente que excitara el campo de la máquina. El tendido de los cables se debe realizar con orden y se debe usar como medio la bandeja porta cables tal como se muestra en la Figura 76 a), b) y c). La conexión de los conductores en el lado del alternador debe ser correcta, según el sistema de fijación que tenga el alternador a utilizar, cabe recordar que para variar el campo de la maquina el alternador no debe tener ningún tipo de regulador.

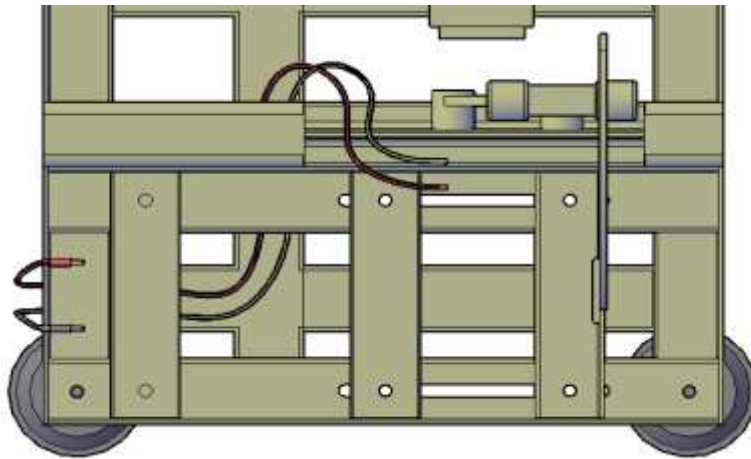
Figura 76. Conexión entre el control de campo y alternador.



a)



b)



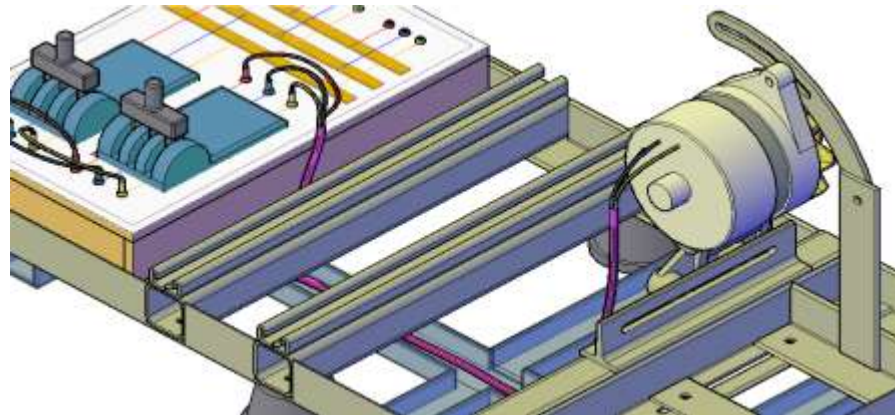
c)

a) Detalle de conexión entre el sistema de control de campo y el alternador usando conectores con terminal tipo banana. b) Conexión Fuente DC Alternador, vista superior. c) Tendido de los conductores de forma ordenada sobre la bandeja porta cables.

7.4.2 Conexión entre el alternador y la barra de generación. Este acople se debe hacer con cable encauchado calibre 10 de 2 pares, de los cuales 3 conductores se usaran para la conexión de las fases y el cuarto conductor se usara para interconectar la masa del alternador con la estructura metálica (la cual deberá estar debidamente conectada a la tierra

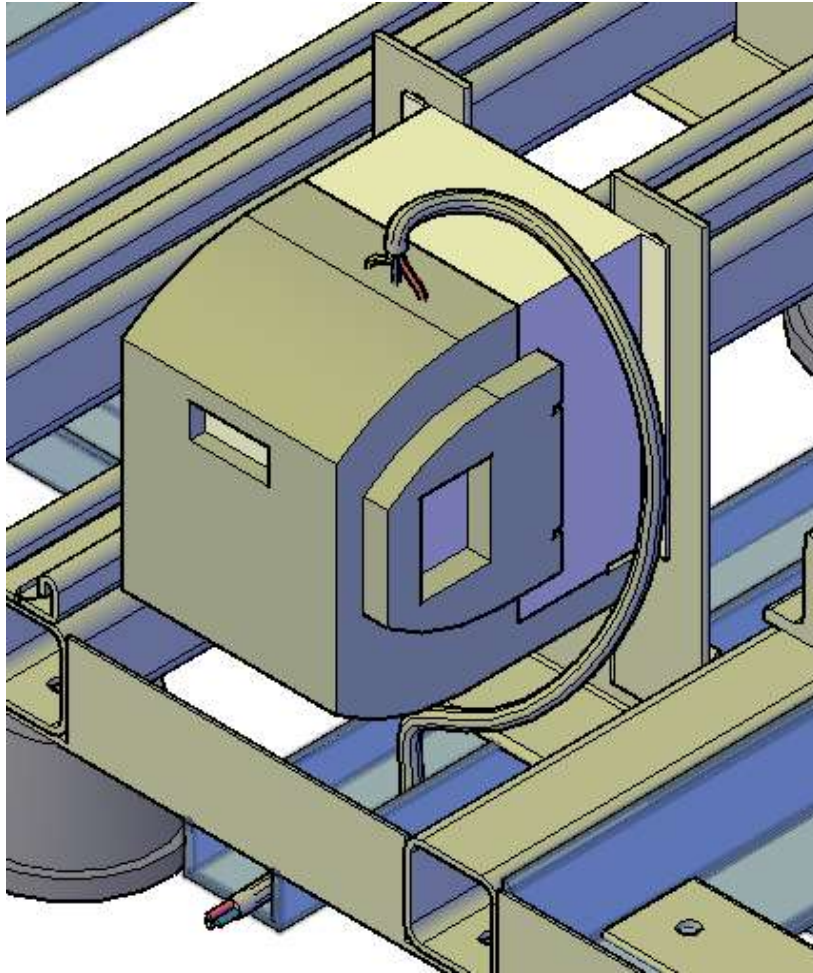
de la red). El conductor debe tener en uno de sus extremos conectores tipo banana para realizar la conexión con el barraje y el extremo contrario deberá tener conectores tipo ojo para el acople por el lado del alternador, la conexión y el tendido del cable es como se muestra en la figura 77.

Figura 77. Conexión entre el alternador y la barra de generación.



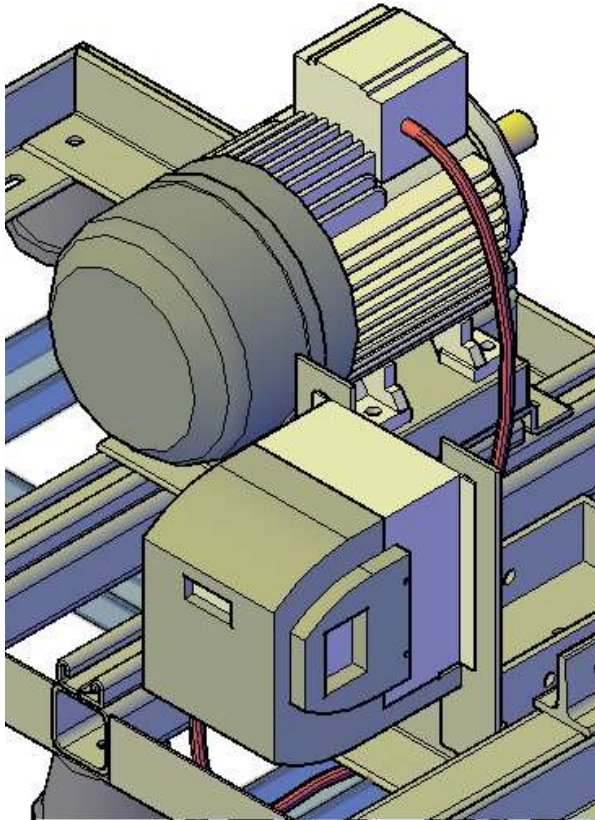
7.4.3 Conexión del variador de velocidad a la red. La conexión general para la energía del variador debe realizarse con cable recubierto de caucho calibre 10 como mínimo, de dos pares, de los cuales 3 conductores se deben usar en la conexión del Variador Sinamics V20 y el cuarto conductor, se debe usar para conectar la estructura a la puesta a tierra de la red. El variador se puede conectar a la redes monofásica (fase neutro) o trifásicas (120/208 V), (para mayor detalle sobre su conexión ver el manual). La conexión del variador de velocidad es la que se muestra en la Figura 78.

Figura 78. Conexión del variador de velocidad a la red.



7.4.4 Conexión variador-motor. Esta conexión debe soportar la transferencia de energía del variador hacia el motor por lo que debe realizarse con un cable encauchado calibre 10 como mínimo, de dos pares, puesto que se trata de un motor trifásico de 2 HP, tres de los conductores alimentaran las fases del motor y el cuarto conductor se usara para conectar el chasis del motor con la estructura metálica. La conexión es la que se muestra en la Figura 79.

Figura 79. Conexión entre el variador y el motor.

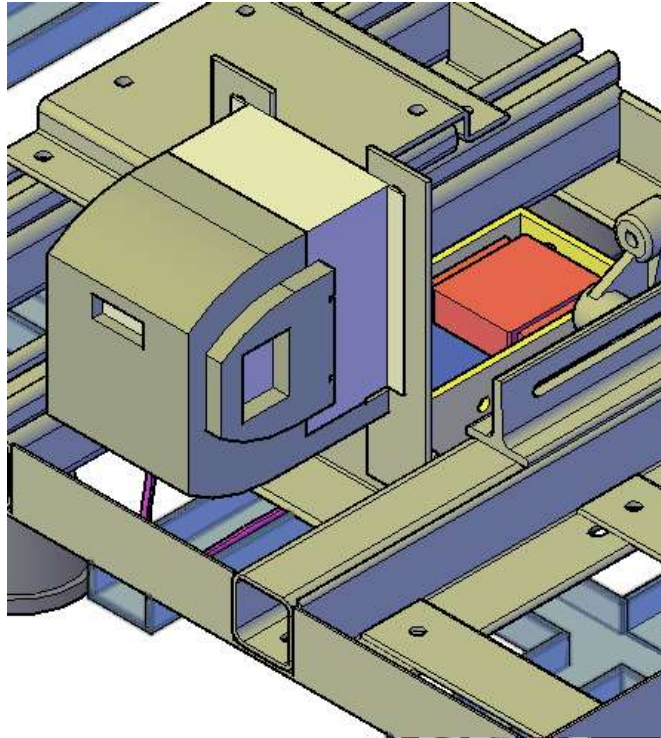


Conexión variador motor con cable encauchado (en color rojo), nótese que el cable se conecta por la parte inferior del variador (para mayor detalle sobre la conexión del variador ver el manual) y cae a la bandeja porta cables por donde viaja hasta llegar al punto de conexión con el motor.

7.4.5 Conexión del sistema de control de potencia al variador. El sistema de control de potencia se compone por un circuito de protección y una tarjeta NI que se conecta según diseño propuesto el trabajo de grado titulado: “Sistema para evaluar el comportamiento de un alternador de automóvil en generación eólica”. La conexión de comunicación entre el sistema de control y el variador de velocidad se debe realizar con cable UTP categoría 6 de 5 pares, la conexión es como se muestra en la Figura 80, la comunicación entre la tarjeta NI y el computador se puede hacer por medio de un cable USB el cual se puede tener en

la bandeja porta cables hasta llegar a la caja donde se aloja la tarjeta.

Figura 80. Conexión sistema de control al variador.

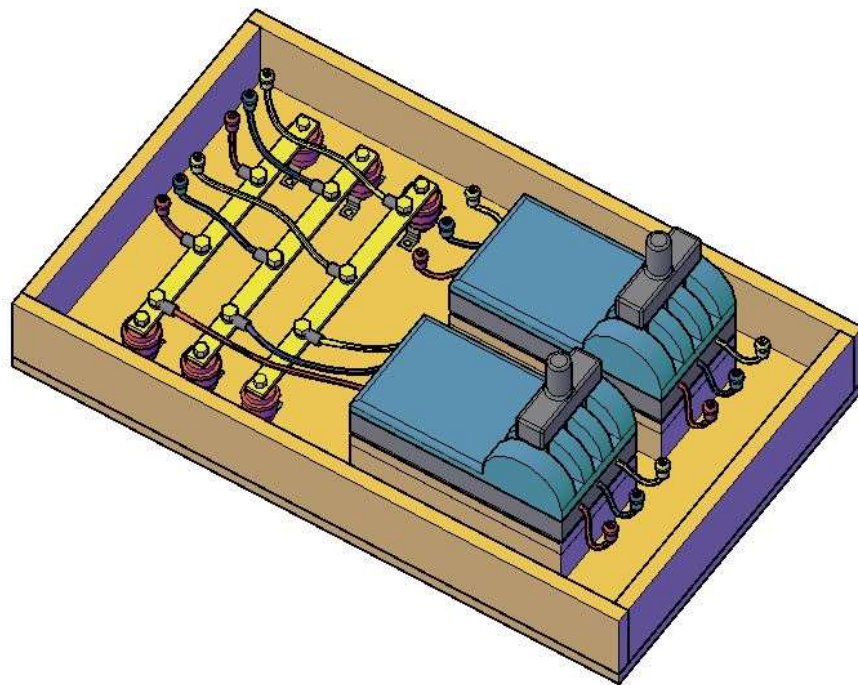


La conexión se hace en los puertos de usuario de la parte inferior del variador, el cable UTP (magenta) cae a la bandeja porta cables y llega a la caja metálica (amarillo) donde se aloja el circuito de protección (azul) y la tarjeta NI (rojo).

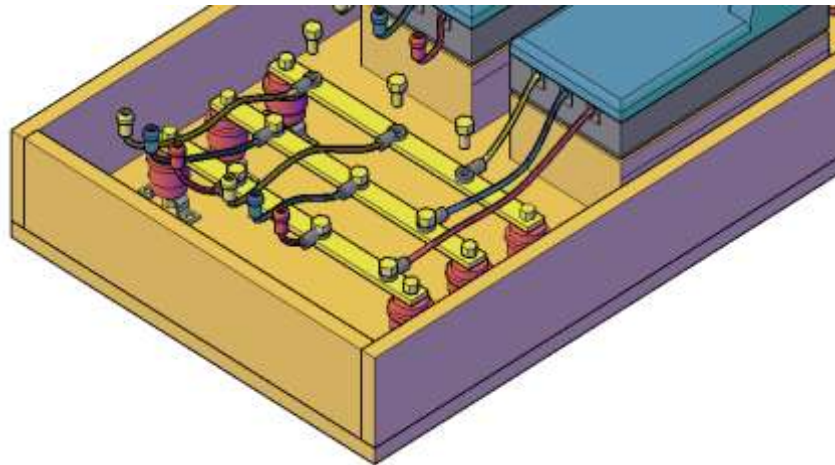
7.4.6 Cableado la barra principal del módulo de generación. La conexión del barraje del módulo de generación se debe hacer como se muestra en el diagrama esquemático de la Figura 24, se usa para esto cable calibre 10 de color amarillo, azul y rojo para las fases. Para una correcta conexión de las diferentes partes internas del barraje se deben adecuar en los extremos de los conductores conectores tipo ojo los cuales se podrán fijar por medio de un juego de tuercas y tornillos a cada uno de los barrajes, cuchillas y terminales tipo

banana hembra, tal como se muestra en la Figura 81. El módulo de barraje de generación se diseñó con base en los posibles sistemas de protección e interrupción que se puedan añadir al módulo en posteriores proyectos, el punto de conexión de estos sistemas es el que se muestra en la Figura 82. Cabe aclarar que si no se cuenta con ninguno de estos sistemas estos bornes de conexión simplemente se deben conectar tal como se muestra en la Figura 82.

Figura 81. Conexión entre la barra y cuchillas de protección.



a)

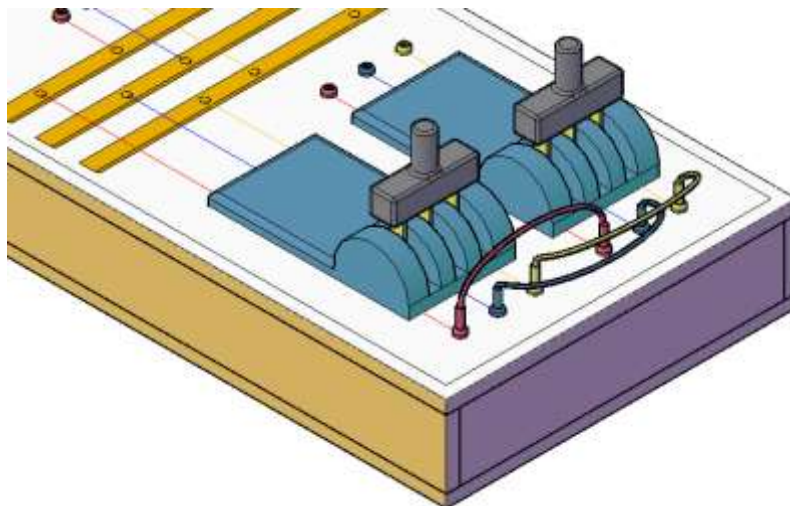


b)

(a) Conexiones en toda la caja, b) Detalle de la conexión entre las barras y las cuchillas de protección.

Nótese que los terminales de ojo se aseguran con tornillos a la barra. También se observan los terminales tipo banana hembra para la conexión exterior hacia otros módulos.

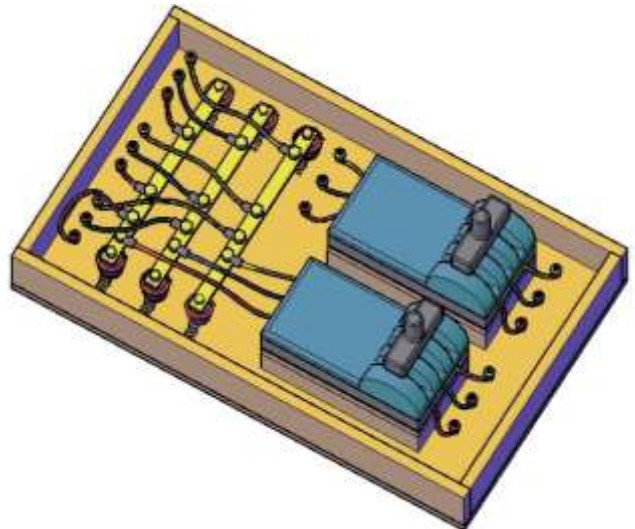
Figura 82. Punto de conexión para sistemas adicionales de corte y/o protección.



Si no se desea utilizar ninguna protección adicional se deben cortocircuitar los bornes tal como se muestra en la Figura 82.

7.4.7 Cableado del módulo de barra de carga. El conexionado de este módulo es similar al del módulo de generación, Solo que cuenta con el espacio para una tercera línea de transmisión, el diagrama esquemático de la conexión interna es el que se muestra en la Figura 25, el detalle de la conexión interna de este módulo se muestra en la Figura 83. El módulo de barraje de carga también cuenta con un punto de conexión para sistemas de corte y protección adicionales tal como se muestra en la Figura 82.

Figura 83. Detalle de la conexión interna de la barra de carga.



7.4.8 Cableado del módulo de línea de transmisión. El diagrama esquemático de la conexión interna de este módulo es el que se muestra en la Figura 38, el módulo tiene también puntos de conexión para protecciones adicionales, en caso de no existir, se deben

puentear estos bornes tal como se muestra en la figura 84, el cableado interno se debe hacer con cable calibre 10, el detalle de las conexiones internas se muestra en la Figura 85.

Figura 84. Puntos de conexión para sistemas adicionales de corte y/o protección.

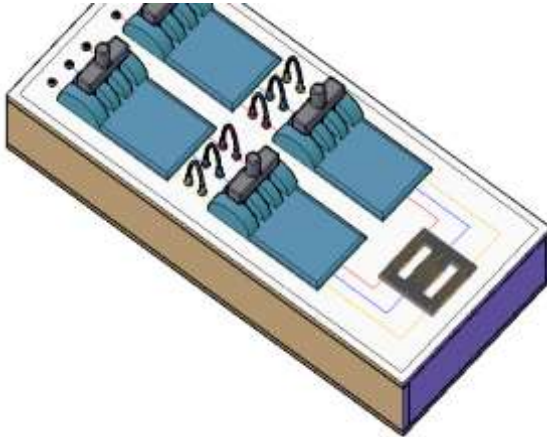
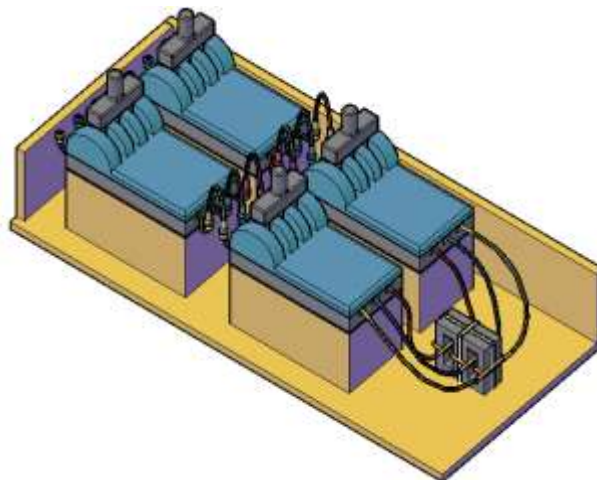


Figura 85. Detalle de la conexión interna del módulo de línea.

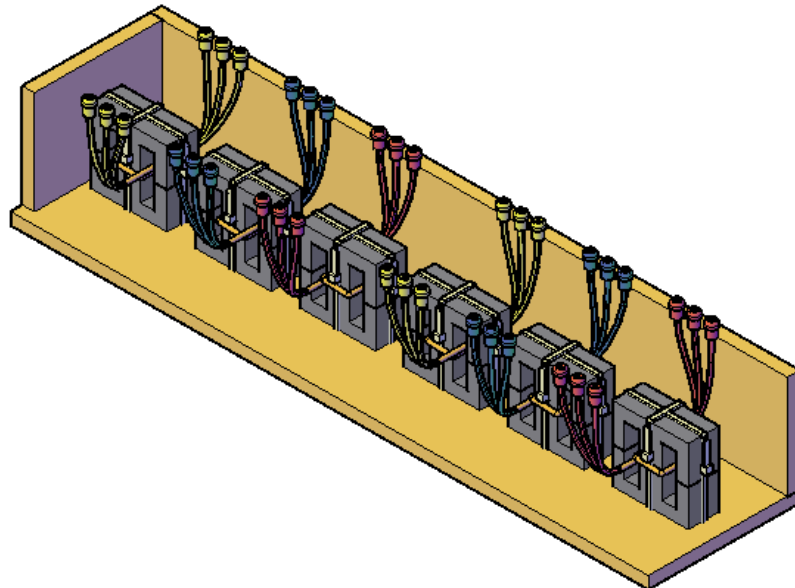


La conexión de los conductores a las bobinas del núcleo ferromagnético se debe hacer con un buen empalme (wester corto), o conectores de presión. (En la Figura 86 se observan bobinas de una sola espira, se ha hecho así por cuestión de claridad pero el diseño de la

impedancia de la línea indica que las bobinas deben ser conformadas por más de una espira).

7.4.9 Cableado del módulo de carga inductiva. El cableado interno de este módulo debe realizarse tal como lo muestra el diagrama esquemático de la Figura 40, el calibre a utilizar es el número 10, si bien el cableado interno de este módulo es sencillo, hay que tener en cuenta que cada uno de los extremos de cada bobina debe tener al menos tres puntos de conexión como lo muestra el detalle en la Figura 86. Se observan los 6 núcleos y los extremos de sus bobinas en conexión con tres bornes que conforman un único punto de conexión.

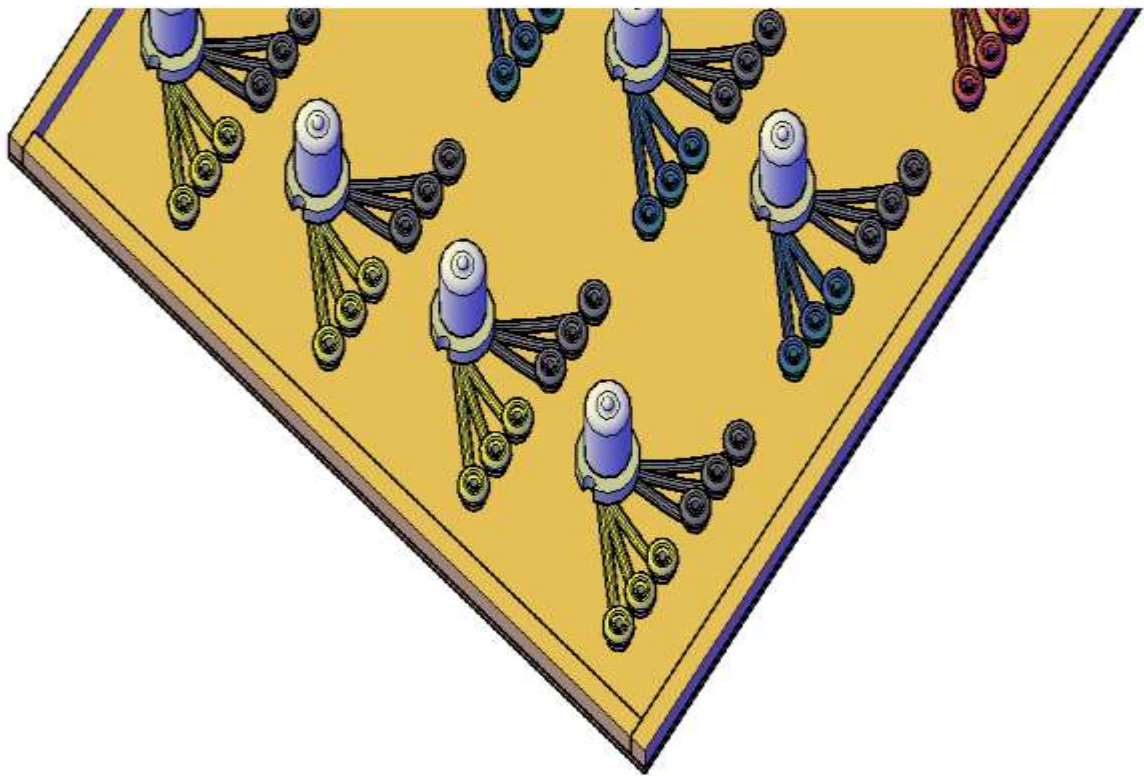
Figura 86. Detalle de la conexión interna del módulo de carga inductiva.



7.4.10 Conexión en el módulo de carga resistiva. La conexión de este módulo es similar a la del módulo de carga inductiva, en donde cada uno de los extremos de una carga debe tener al menos tres bornes de conexión que conforman el mismo nodo, su conexión debe

realizarse como lo indica la Figura 44, el detalle de la conexión interna se muestra en la Figura 87, el calibre mínimo para el cableado interno es número 10. Se muestran los bombillos halógenos conectados a sus bases cada uno de los terminales de la carga tiene a menos tres puntos de conexión.

Figura 87. Detalle de la conexión interna del módulo de carga resistiva.



8 CARACTERIZACIÓN DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Se diseñaron y construyeron tres líneas de transmisión, de las cuales dos utilizan el núcleo (a) y una el núcleo (b) de la Figura 28. Los cálculos se realizaron con las ecuaciones (12) y (13) y los resultados se muestran en las tablas 20, 21 y 22.

Tabla 20. Resultados del número de espiras y resistencias en cada fase de la Línea 1.

LÍNEA 1		
Distancia d1	2,6	[cm]
Distancia d2	6,5	[cm]
Distancia d3	6,5	[cm]
Distancia d4	4,4	[cm]
Distancia d5	1,0	[cm]
Distancia d6	1,9	[cm]
Longitud l1	10,95	[cm]
Longitud l2	5,45	[cm]
Área A1	2,60	[cm ²]
Área A2	4,94	[cm ²]
Número de espiras N1=N3	10	Vueltas
Número de espiras N2	8	Vueltas
Resistividad cobre ρ	1,72E-08	[Ω .m]
longitud del conductor lateral $l_{c1} = l_{c3}$	0,368	[m]
longitud del conductor lateral l_{c2}	0,368	[m]
Sección del conductor S	5,25E-06	[m ²]
Resistencia bobinas laterales $R_{e1}=R_{e3}$	1,207E-03	[Ω]
Resistencia bobinas laterales R_{e2}	1,207E-03	[Ω]

En la Tabla 20 se observa que el número de espiras para la línea de transmisión 1 es de 10 en las columnas laterales y 8 en la columna central. La construcción de esta primera línea se muestra en la Figura 88.

Figura 88. Línea de transmisión 10-8.

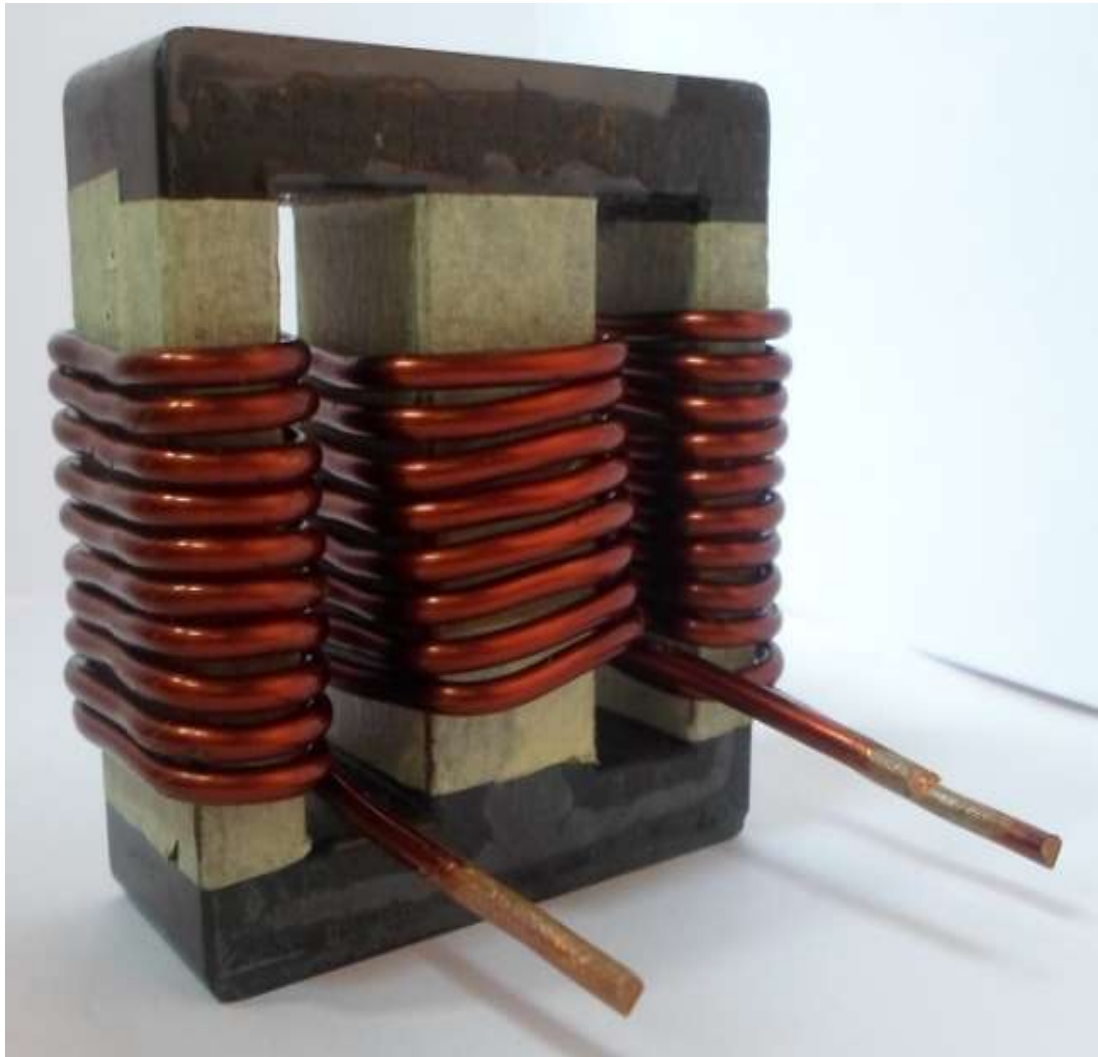


Tabla 21. Resultados del número de espiras y resistencias en cada fase de la línea 2.

LÍNEA 2		
Distancia d1	2,6	[cm]
Distancia d2	6,5	[cm]
Distancia d3	6,5	[cm]
Distancia d4	4,4	[cm]
Distancia d5	1,0	[cm]
Distancia d6	1,9	[cm]
Longitud l1	10,95	[cm]
Longitud l2	5,45	[cm]
Área A1	2,60	[cm ²]
Área A2	4,94	[cm ²]
Número de espiras N1=N3	15	Vueltas
Número de espiras N2	12	Vueltas
Resistividad cobre ρ	1,72E-08	[Ω .m]
longitud del conductor lateral $l_{c1} = l_{c3}$	0,548	[m]
longitud del conductor lateral l_{c2}	0,548	[m]
Sección del conductor S	5,25E-06	[m ²]
Resistencia bobinas laterales $R_{e1} = R_{e3}$	1,798E-03	[Ω]
Resistencia bobinas laterales R_{e2}	1,797E-03	[Ω]

En la Tabla 21 se observa que el número de espiras para la línea de transmisión 2 es de 15 en las columnas laterales y 12 en la columna central. La construcción de la segunda línea se muestra en la Figura 89.

Figura 89. Línea de transmisión 15-12.

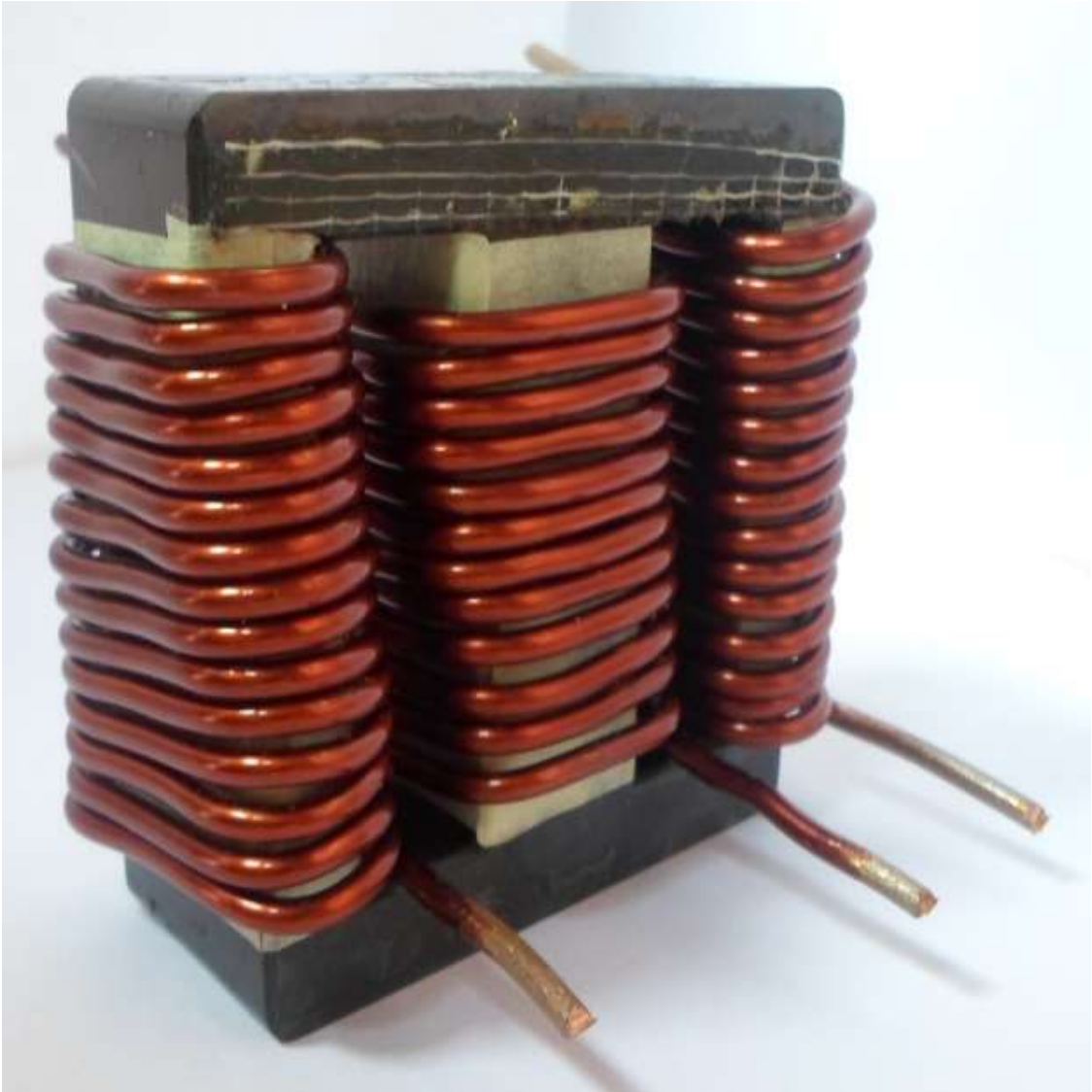
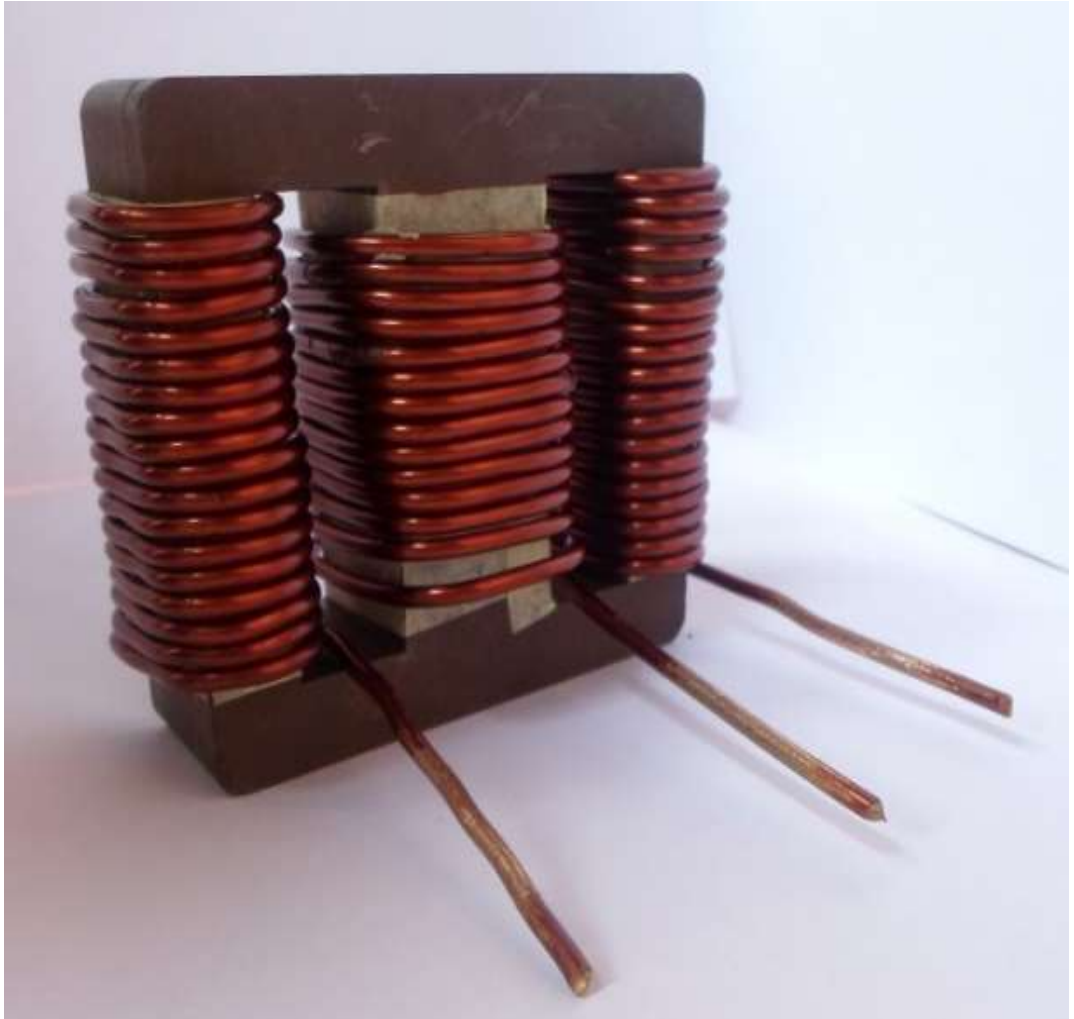


Tabla 22. Resultados del número de espiras y resistencias en cada fase de la Línea 3.

LÍNEA 3		
Distancia d1	2,4	[cm]
Distancia d2	7,7	[cm]
Distancia d3	7,7	[cm]
Distancia d4	5,4	[cm]
Distancia d5	1,2	[cm]
Distancia d6	2,3	[cm]
Longitud l1	13,05	[cm]
Longitud l2	6,55	[cm]
Área A1	2,88	[cm ²]
Área A2	5,52	[cm ²]
Número de espiras N1=N3	18	Vueltas
Número de espiras N2	14	Vueltas
Resistividad cobre ρ	1,72E-08	[Ω .m]
longitud del conductor lateral $l_{c1} = l_{c3}$	0,656	[m]
longitud del conductor lateral l_{c2}	0,666	[m]
Sección del conductor S	5,25E-06	[m ²]
Resistencia bobinas laterales $R_{e1} = R_{e3}$	2,152E-03	[Ω]
Resistencia bobinas laterales R_{e2}	2,184E-03	[Ω]

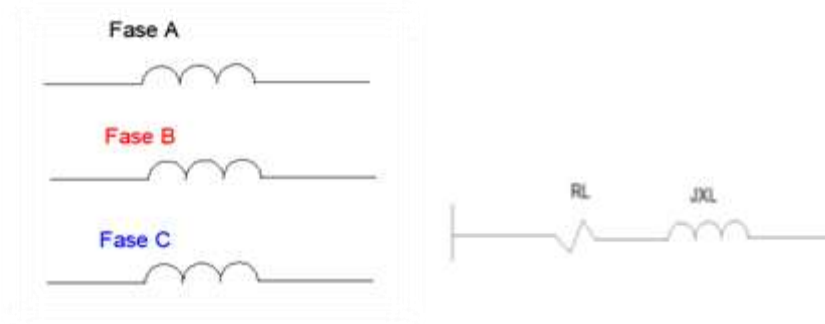
En la Tabla 22 se observa que el número de espiras para la línea de transmisión 2 es de 18 en las columnas laterales y 14 en la columna central. La construcción de la tercera línea se muestra en la figura 90.

Figura 90. Línea de transmisión 18-14.



El modelo que representa la línea corresponde al de una línea corta como lo muestra la Figura 91.

Figura 91. Línea de transmisión trifásica y equivalente monofásico de línea corta.



Para caracterizar las tres líneas que ya se especificaron, se parte de las ecuaciones (22):

$$\begin{aligned}
 E_a &= +i_a R + L_a \frac{di_a}{dt} + M_{ab} \frac{di_b}{dt} + M_{ac} \frac{di_c}{dt} \\
 E_b &= +i_b R + M_{ba} \frac{di_a}{dt} + L_b \frac{di_b}{dt} + M_{bc} \frac{di_c}{dt} \\
 E_c &= +i_c R + M_{ca} \frac{di_a}{dt} + M_{cb} \frac{di_b}{dt} + L_c \frac{di_c}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

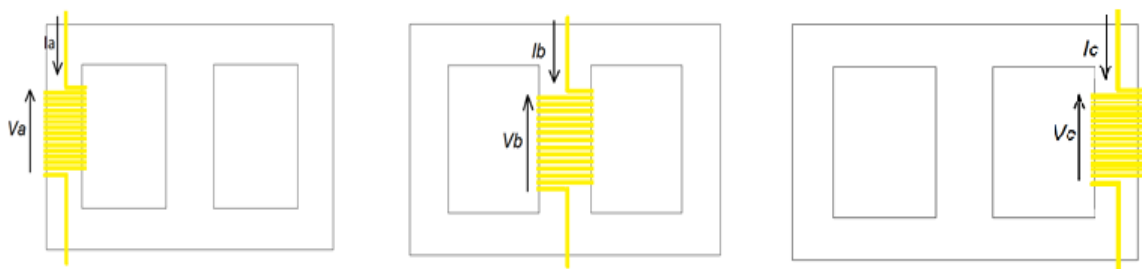
Este modelo permite interpretar de forma correcta dos características básicas de una línea de transmisión: la inductancia propia y las inductancias mutuas que se vinculan en cada fase [1]. Con base en esto, es fácil comprender que caracterizar las líneas consiste en determinar los coeficientes que acompañan las variables de cada ecuación. A lo largo de todo este capítulo se presentan los procedimientos y todos los resultados de las distintas pruebas hechas con el fin de determinar los parámetros que ya se mencionaron.

En teoría se puede determinar el coeficiente de inductancia propia al aplicar las ecuaciones (7), (8), (9), (10), (11) y (12) de la sección 4.9. Sin embargo, en este caso no es posible obtener un valor aceptable de forma teórica, ya que se desconocen las características ferromagnéticas del núcleo con el cual están acopladas las líneas. Es por esta razón, que para obtener estos valores se aplican para las inductancias propias y mutuas de cada línea, las pruebas que se especifican en las secciones 6.1, 6.2, 6.3 y 6.4 allí también se enseñan los resultados que se presentaron, a través de tablas y gráficas. Se presenta para cada uno de los valores que se midieron.

8.1 INDUCTANCIA PROPIA DE CADA FASE A DIFERENTES CORRIENTES

Para obtener el coeficiente de auto inductancia se implementó y se tomaron las medidas bajo el esquema de prueba que se muestra en la Figura 92. El objetivo de esta primera etapa, es el de observar la forma como varia el coeficiente de inductancia propia para distintos valores de corriente, cuando se mantiene una misma frecuencia en este caso 360Hz. Entonces, para cada línea de transmisión se energizó cada fase a diferentes niveles de corriente y se tomó la información el parámetro tensión. De esta forma se pudo obtener la impedancia, la inductancia y valores de permeabilidad [2].

Figura 92. Esquema de prueba para determinar la inductancia.



Para cada línea de transmisión se realizó esta prueba por fase, los resultados son los que se presentan en las tablas de la 22 a la 30 y se basan en las ecuaciones (14), (15) y (16).

Como se puede observar, los valores de inductancia varían en función de la corriente para una frecuencia fija de la tensión aplicada. Este hecho se debe a que la permeabilidad del material cambia en función a la corriente, no obstante lo hace de forma no lineal. En las tablas de la 22 a la 30 también se muestra el dato de los valores de permeabilidad de cada núcleo magnético para cada corriente, estos valores se obtuvieron al aplicar las ecuaciones (23) y (24).

$$\mu = \frac{L \cdot l1}{N^2} \cdot \left[\frac{1}{A1} + \frac{l2}{l1 \cdot A2 + l2 \cdot A1} \right] \quad (23)$$

$$\mu = \frac{L \cdot (l1+l2)}{N^2 \cdot A2} \quad (24)$$

La Ecuación (7) se utilizó para el cálculo del valor de permeabilidad en caso de alimentar de forma individual el arrollamiento lateral. La Ecuación (8) se utilizó en caso de alimentar el arrollamiento central.

8.1.1 Línea de 10-8 para una frecuencia de 360 Hz. Se presenta en esta parte los resultados para cada una de las fases de la línea 10-8 cuando se alimenta por una fase y se toma la medida de tensión. Lo que se varía es la corriente que fluye por la fase. Esta información se encuentra en las Tablas 23, 24 y 25 y las Figuras 93, 94 y 95. Los valores de inductancia e impedancia que se presenta en las gráficas tienen una escala mayor, esto con el fin de poder presentar todos los datos en una misma gráfica. Así las inductancias se dan en μH y las impedancias en $\text{m}\Omega$.

Tabla 23. Línea 10-8. Inductancia propia para la fase A a 360 Hz.

No. Medida	Velocidad [rpm]	Ia [A]	Vfa [V]	Za [Ω]	Xa [Ω]	La [H]	μ_r
1	3600	2,0	0,979	0,490	0,489	2,16E-04	875,822
2	3600	4,0	1,699	0,425	0,425	1,88E-04	759,969
3	3611	6,0	2,000	0,333	0,333	1,47E-04	594,587
4	3611	10,1	2,385	0,236	0,236	1,04E-04	421,212

Figura 93. Línea 10-8 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs corriente de fase A.

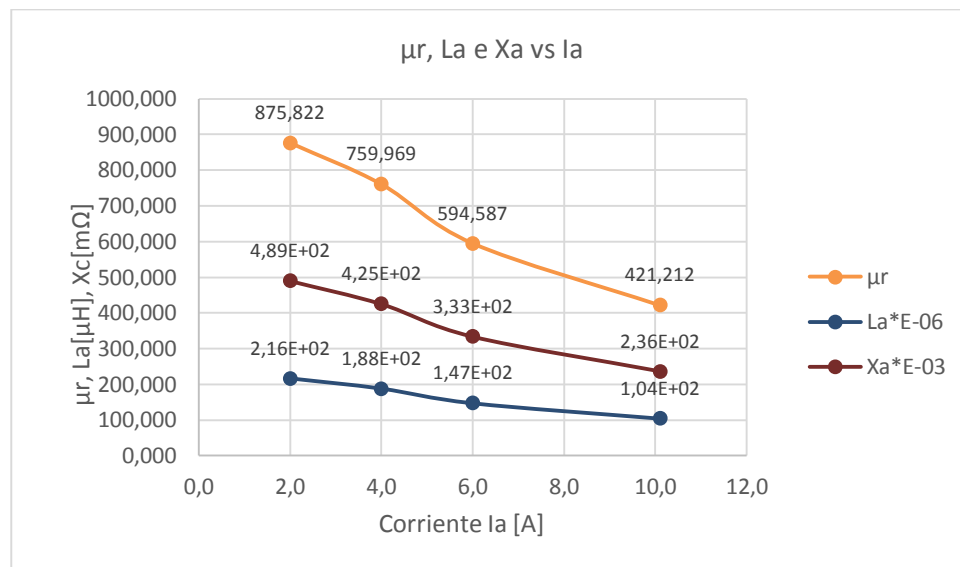


Tabla 24. Línea 10-8. Inductancia propia para la fase B a 360 Hz.

No. Medida	Velocidad [rpm]	Ib [A]	Vfb [V]	Zb [Ω]	Xb [Ω]	Lb [H]	μ_r
1	3606	2,0	1,001	0,501	0,500	2,21E-04	881,410
2	3602	4,0	1,731	0,433	0,433	1,91E-04	762,944
3	3611	6,0	2,472	0,412	0,412	1,82E-04	724,551
4	3606	10,1	3,263	0,323	0,323	1,43E-04	568,942

Figura 94. Línea 10-8 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs corriente de fase B.

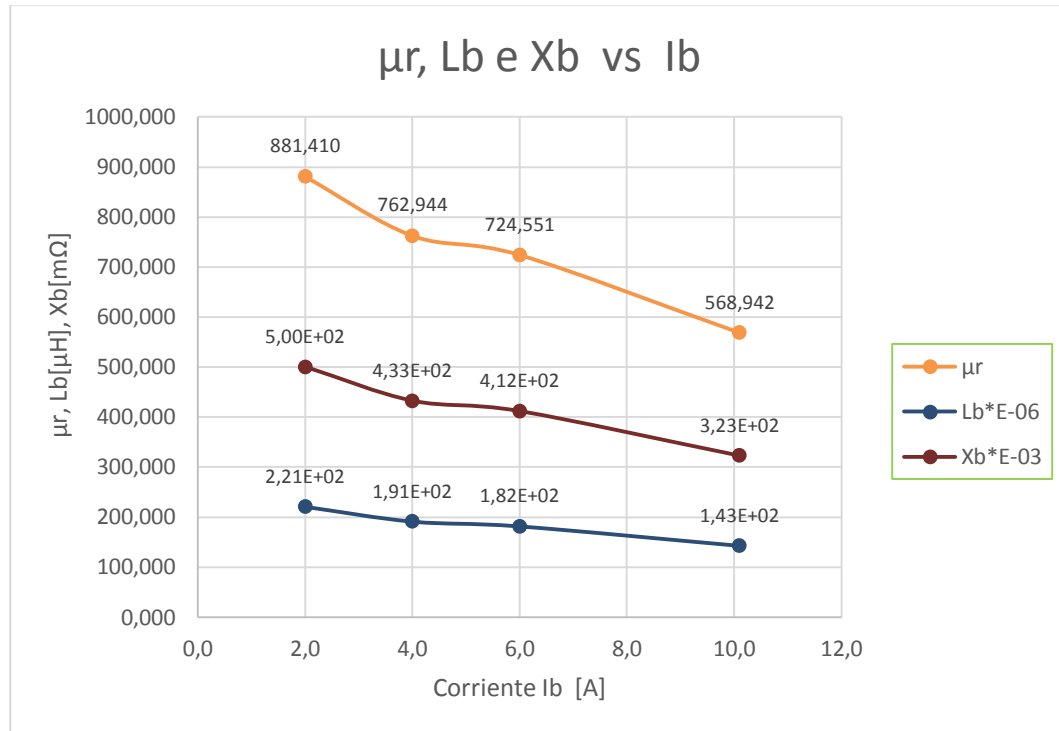
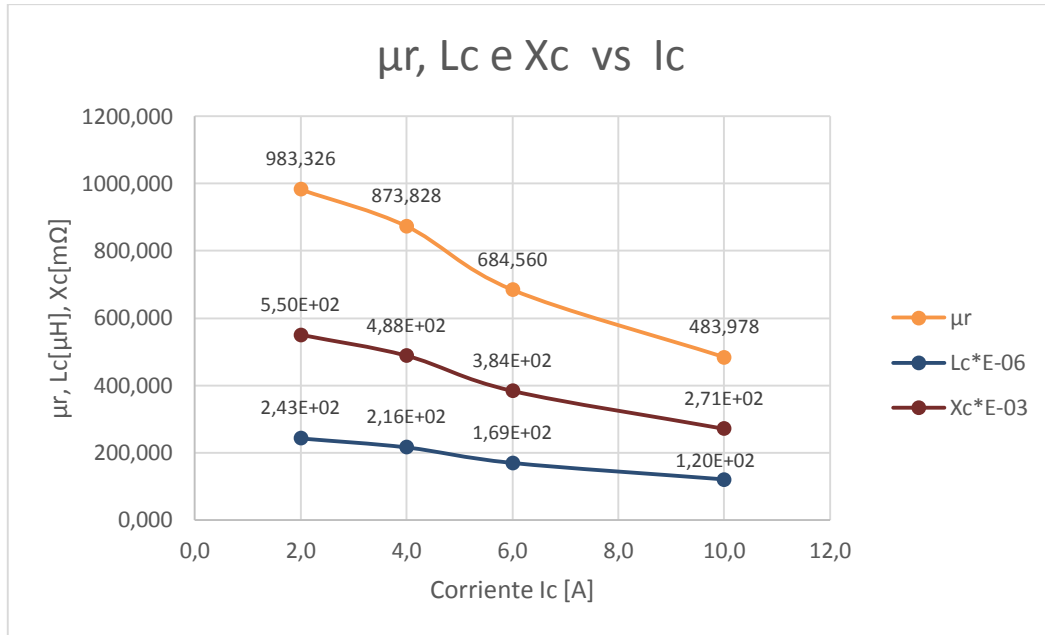


Tabla 25. Línea 10-8. Inductancia propia para la fase C a 360 Hz.

No. Medida	Velocidad [rpm]	I_c [A]	V_{fc} [V]	Z_c [Ω]	X_c [Ω]	L_c [H]	μ_r
1	3606	2,0	1,101	0,551	0,550	2,43E-04	983,326
2	3599	4,0	1,953	0,488	0,488	2,16E-04	873,828
3	3610	6,0	2,302	0,384	0,384	1,69E-04	684,560
4	3608	10,0	2,711	0,271	0,271	1,20E-04	483,978

Figura 95. Línea 10-8 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs corriente de fase C.



8.1.2 Línea de 15-12 para una frecuencia de 360 Hz. Se presenta en esta parte los resultados para cada una de las fases de la línea 15-12 cuando se alimenta por una fase y se toma la medida de tensión. Lo que se varía es la corriente que fluye por la fase. Esta información se encuentra en las tablas 26, 27 y 28 y en las Figuras 96, 97 y 98.

Tabla 26. Línea 15-12 Inductancia propia para la fase A a 360 Hz.

No.Medida	Velocidad [rpm]	Ia [A]	Vfa [V]	Za [Ω]	Xa [Ω]	La [H]	μ_r
1	3604	2,0	2,459	1,230	1,229	5,43E-04	976,624
2	3596	4,0	3,249	0,812	0,812	3,59E-04	646,626
3	3604	6,0	3,628	0,605	0,605	2,67E-04	480,301
4	3597	10,0	4,210	0,421	0,421	1,86E-04	335,060

Figura 96. Línea 15-12 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs corriente de fase A.

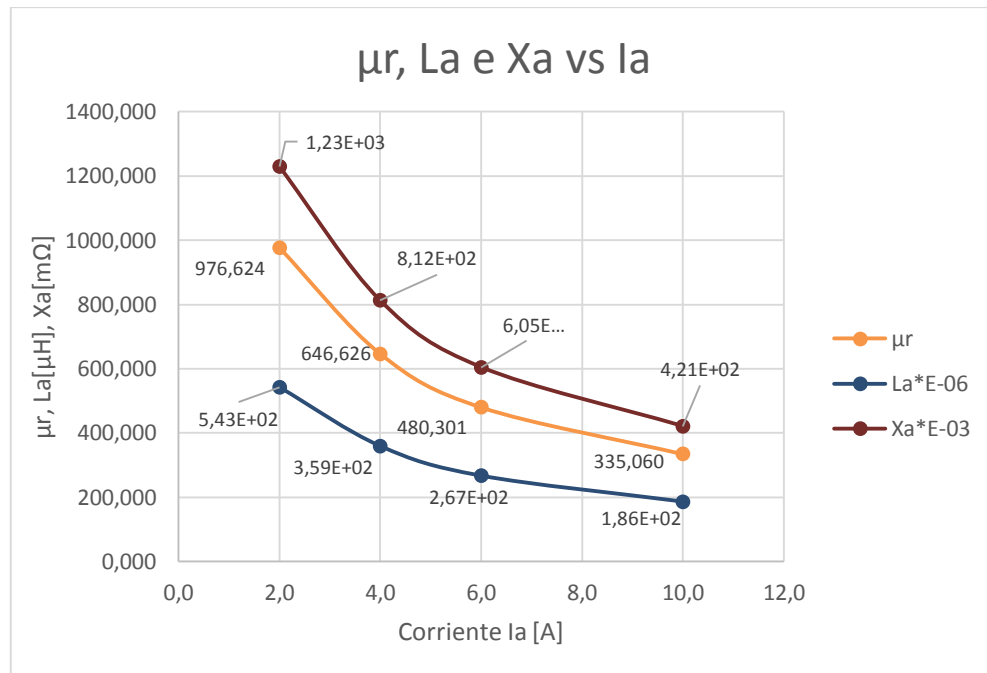


Tabla 27. Línea 15-12. Inductancia propia para la fase B a 360 Hz.

No. Medida	Velocidad [rpm]	I_b [A]	V_{fb} [V]	Z_b [Ω]	X_b [Ω]	L_b [H]	μ_r
1	3607	2,0	2,115	1,058	1,057	4,67E-04	827,470
2	3599	4,0	3,821	0,955	0,955	4,22E-04	749,123
3	3606	6,0	4,810	0,802	0,802	3,54E-04	627,459
4	3600	10,0	5,630	0,563	0,563	2,49E-04	441,390

Figura 97. Línea 15-12 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs corriente de fase B.

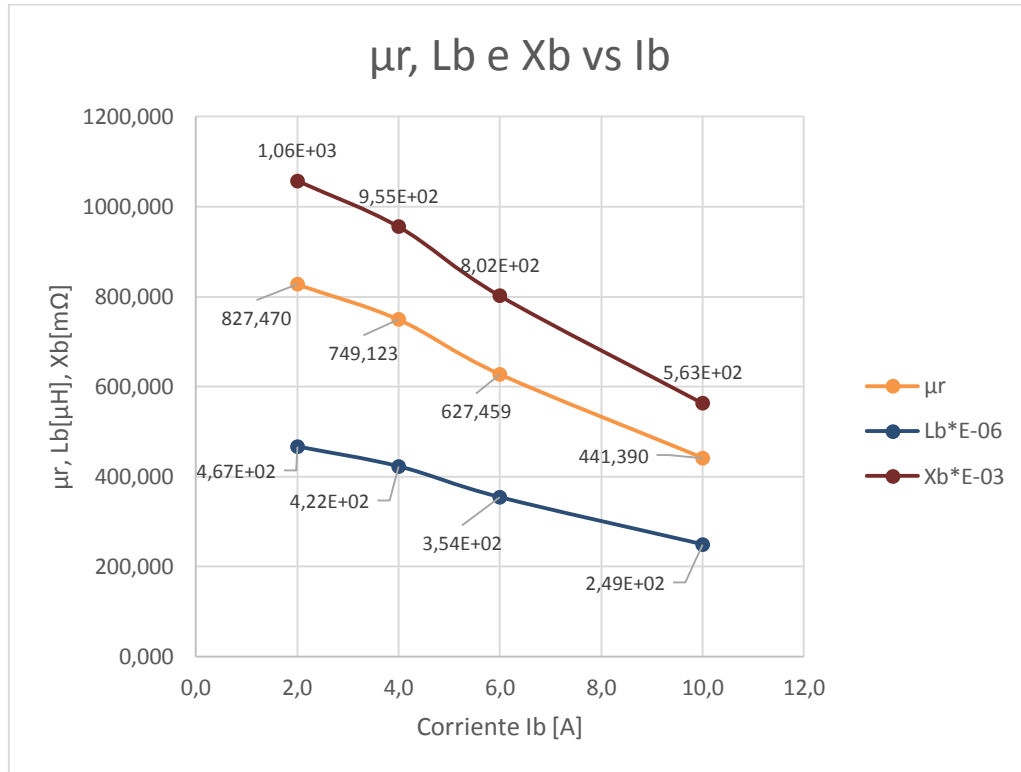
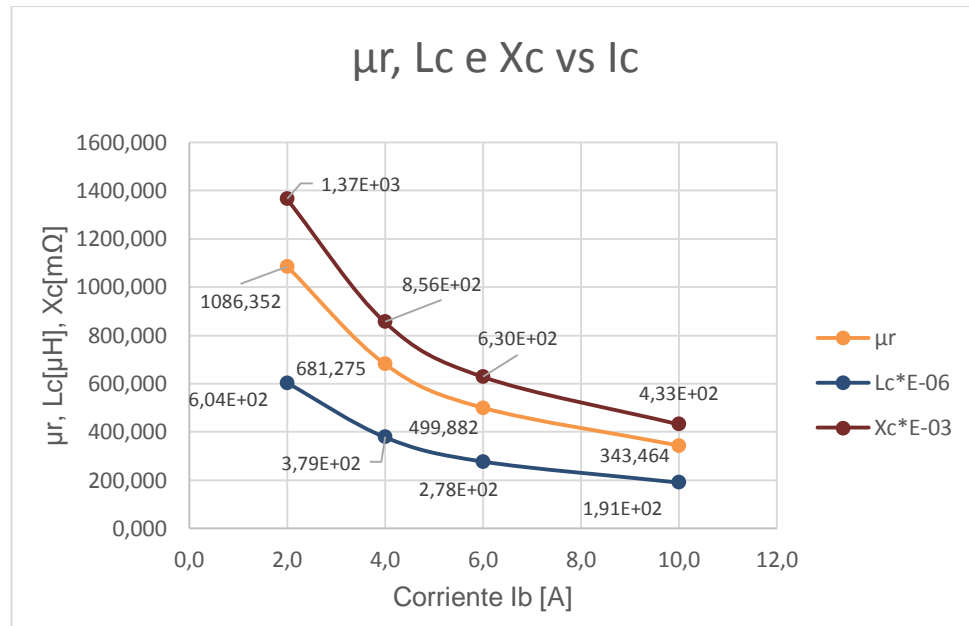


Tabla 28. Línea 15-12. Inductancia propia para la fase C a 360 Hz.

No. Medida	Velocidad [rpm]	I_c [A]	V_{fc} [V]	Z_c [Ω]	X_c [Ω]	L_c [H]	μ_r
1	3601	2,0	2,733	1,367	1,366	6,04E-04	1086,352
2	3598	4,0	3,425	0,856	0,856	3,79E-04	681,275
3	3606	6,0	3,778	0,630	0,630	2,78E-04	499,882
4	3609	10,0	4,330	0,433	0,433	1,91E-04	343,464

Figura 98. Línea 15-12 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs corriente de fase C.



8.1.3 Línea de 18-14 para una frecuencia de 360 Hz. Se presenta en esta parte los resultados para cada una de las fases de la línea 18-14 cuando se alimenta por una fase y se toma la medida de tensión. Lo que se varía es la corriente que fluye por la fase. Esta información se encuentra en las tablas 29, 30 y 31 y en las Figuras 99, 100 y 101.

Tabla 29. Línea 18-14. Inductancia propia para la fase A a 360 Hz.

No. Medida	Velocidad [rpm]	Ia [A]	Vfa [V]	Za [Ω]	Xa [Ω]	La [H]	μ_r
1	3605	2,0	0,339	0,1695	0,169	7,48E-05	100,556
2	3604	4,0	0,490	0,1225	0,122	5,41E-05	72,688
3	3609	6,0	0,693	0,1155	0,115	5,09E-05	68,438
4	3599	10,1	1,132	0,1121	0,112	4,96E-05	66,595

Figura 99. Línea 18-14 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs corriente de fase A.

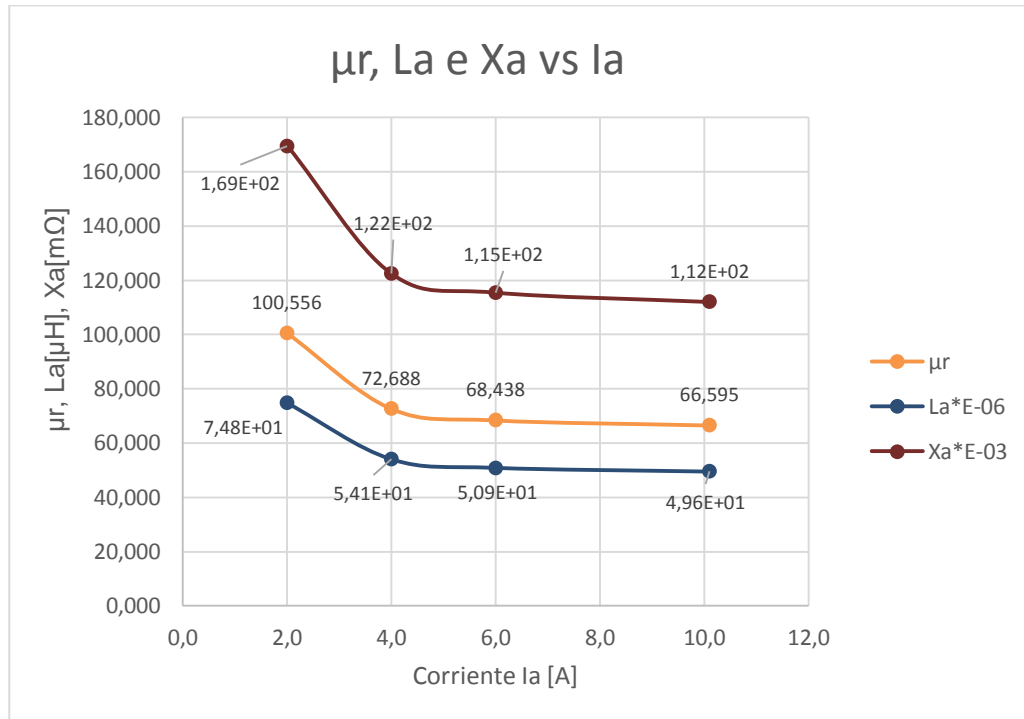


Tabla 30. Línea 18-14. Inductancia propia para la fase B a 360 Hz.

No. Medida	Velocidad [rpm]	I_b [A]	V_{fb} [V]	Z_b [Ω]	X_b [Ω]	L_b [H]	μ_r
1	3603	2,0	0,347	0,1735	0,173	7,66E-05	107,412
2	3599	4,0	0,539	0,1348	0,135	5,96E-05	83,511
3	3606	6,0	0,759	0,1265	0,126	5,58E-05	78,244
4	3609	10,0	1,235	0,1235	0,123	5,45E-05	76,325

Figura 100. Línea 18-14 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs corriente de fase B.

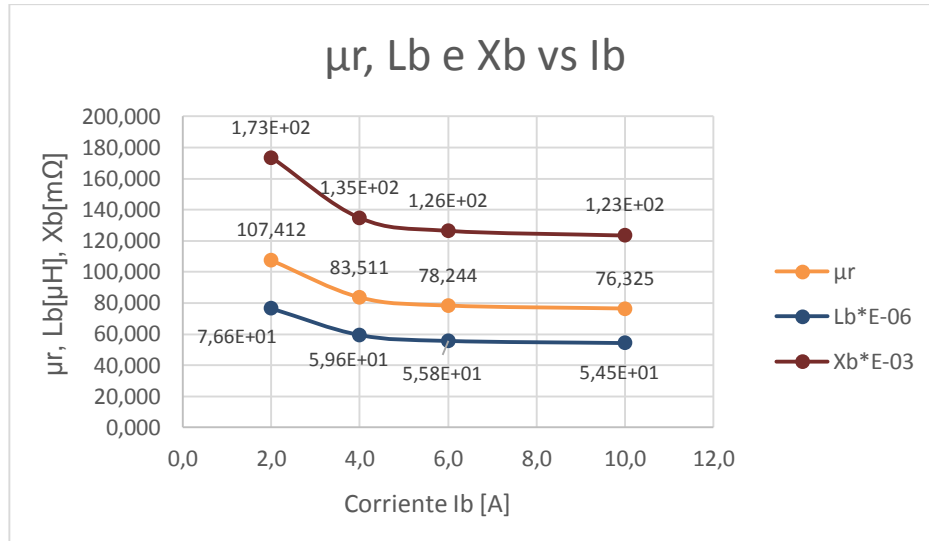
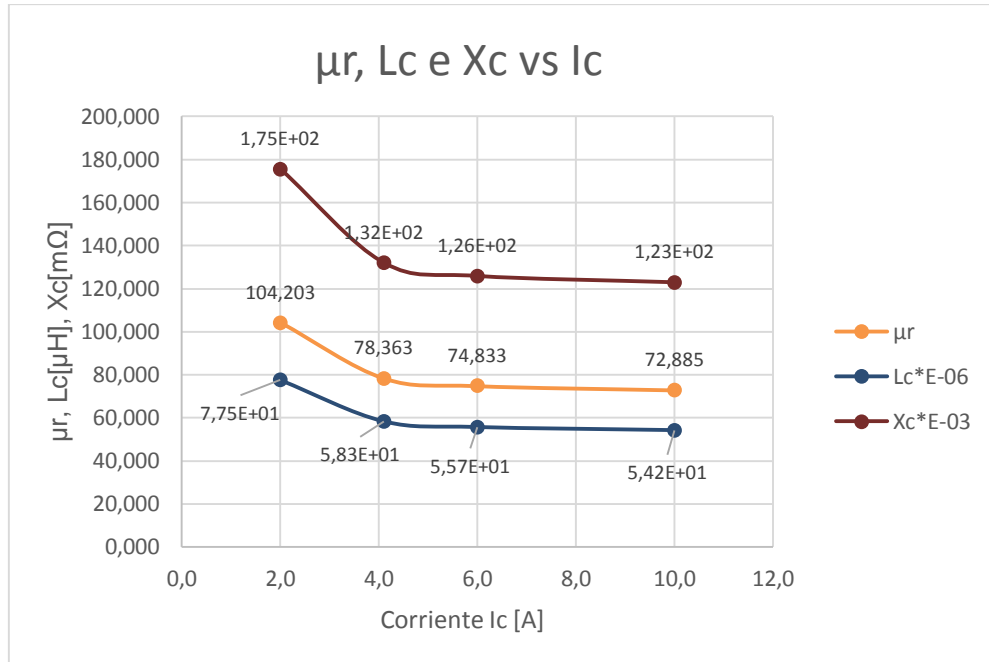


Tabla 31. Línea 18-14. Inductancia propia para la fase C a 360 Hz.

No. Medida	Velocidad [rpm]	Ic [A]	Vfc [V]	Zc [Ω]	Xc [Ω]	Lc [H]	μ_r
1	3602	2,0	0,351	0,1755	0,175	7,75E-05	104,203
2	3601	4,1	0,541	0,1320	0,132	5,83E-05	78,363
3	3596	6,0	0,755	0,1258	0,126	5,57E-05	74,833
4	3606	10,0	1,229	0,1229	0,123	5,42E-05	72,885

Figura 101. Línea 18-14 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs corriente de fase C.



En los resultados que se muestran en las tablas y graficas de esta sección se observa como la permeabilidad magnética varía de forma no lineal con el aumento de la corriente y tiene un comportamiento decreciente. Este mismo efecto es el que se presenta para los valores de inductancia propia e impedancia propia para cada fase.

8.2 INDUCTANCIA PROPIA DE CADA FASE A DIFERENTES FRECUENCIAS

Se hizo uso del mismo esquema de conexión presentado en la Figura 92 y se alimentó cada fase a una corriente de 10 A pero en este caso se varió la frecuencia. El objetivo es observar la incidencia de este parámetro en la inductancia e impedancia de las líneas. Los resultados correspondientes a esta prueba se presentan en las Tablas de la 32 a la 40 y en las Figuras de la 102 a la 110.

8.2.1 **Línea de 10-8 para una corriente de 10 A.** Se presenta en esta parte los resultados para cada una de las fases de la línea 10-8 cuando se alimenta por una fase y se toma la medida de tensión. Lo que se varía es la frecuencia de la fuente de alimentación. Esta información se encuentra en las Tablas 32, 33 y 34, y en las Figuras 102, 103 y 104.

Tabla 32. Línea 10-8. Inductancia propia para la fase A a 10 A.

No.Med	Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]	Vfa [V]	Za [Ω]	Xa [Ω]	La [H]	μ_r
1	610,5	61,05	0,525	0,0515	0,051	1,34E-04	542,901
2	1200	120	0,875	0,0875	0,087	1,16E-04	469,626
3	2403	240,3	1,651	0,1635	0,163	1,08E-04	438,154
4	3607	360,7	2,429	0,2429	0,243	1,07E-04	433,753

Figura 102. Línea 10-8 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs frecuencia de fase A.

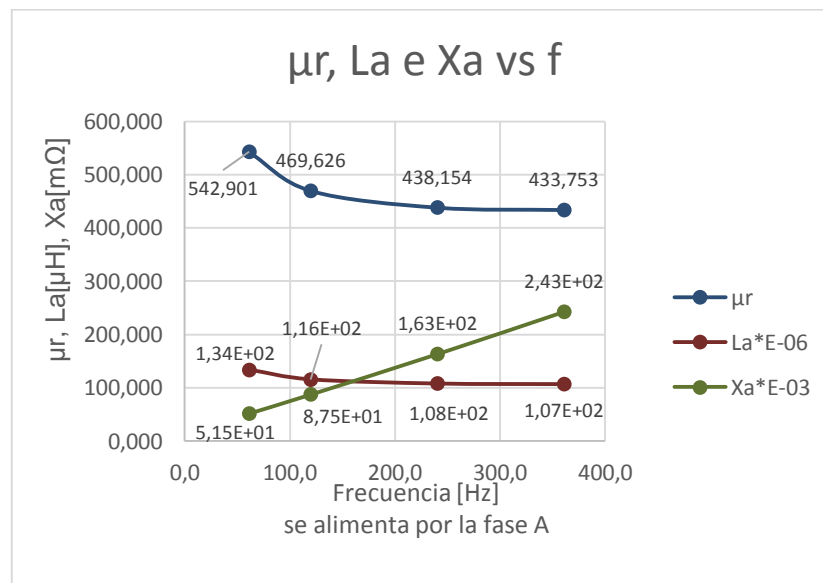


Tabla 33. Línea 10-8. Inductancia propia para la fase B a 10 A.

No. Med	Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]	Vfa [V]	Za [Ω]	Xa [Ω]	La [H]	μ_r
1	610,5	61,05	0,525	0,0515	0,051	1,34E-04	542,901
2	1200	120	0,875	0,0875	0,087	1,16E-04	469,626
3	2403	240,3	1,651	0,1635	0,163	1,08E-04	438,154
4	3607	360,7	2,429	0,2429	0,243	1,07E-04	433,753

Figura 103. Línea 10-8 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs frecuencia de fase B.

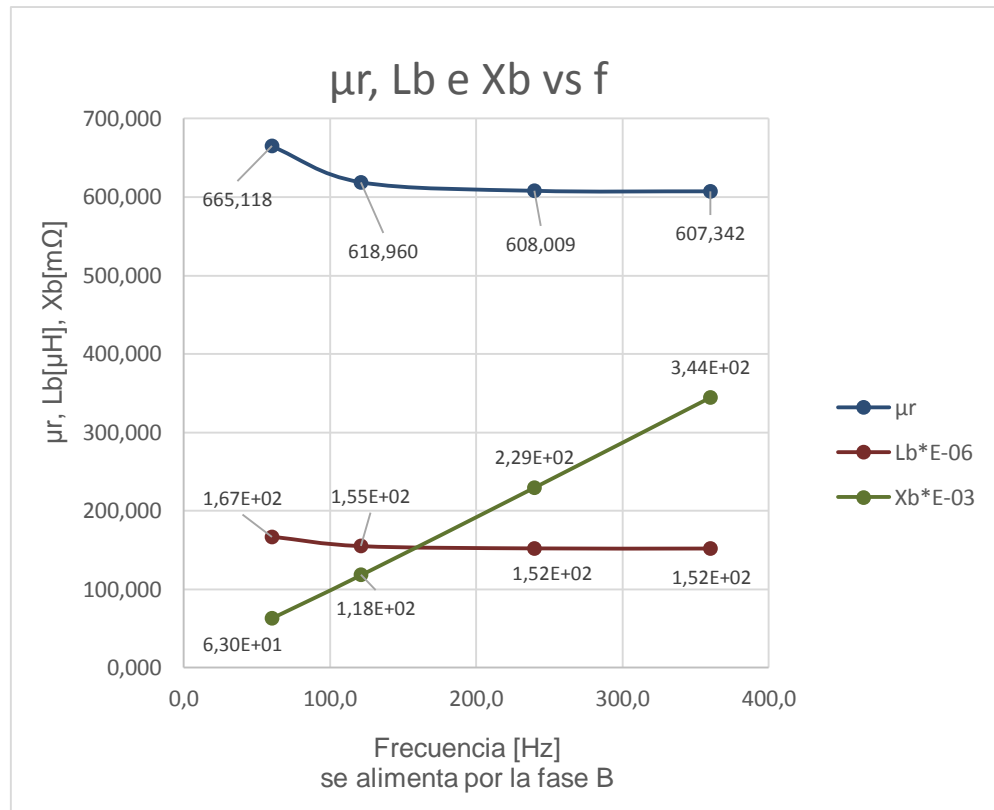
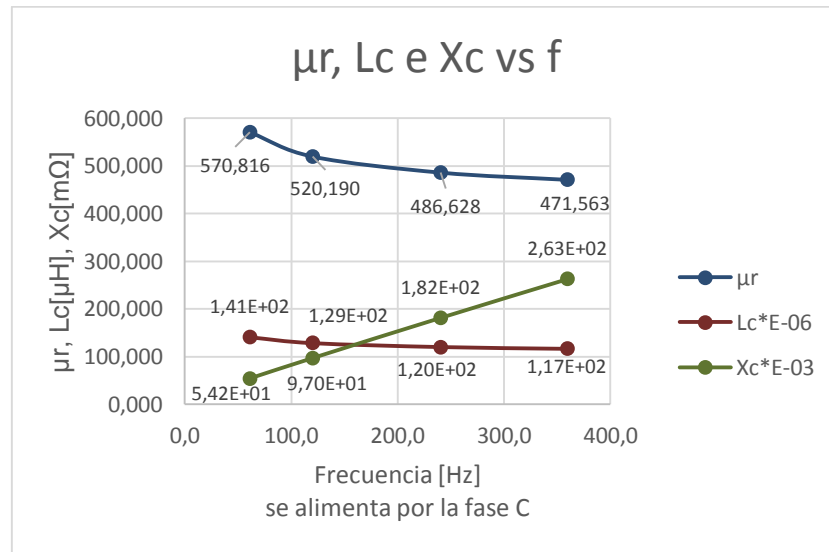


Tabla 34. Línea 10-8 Inductancia propia para la fase C a 10 A. a

No.Med	Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]	Vfc [V]	Zc [Ω]	Xc [Ω]	Lc [H]	μ_r
1	612,1	61,2	0,548	0,0543	0,054	1,41E-04	570,816
2	1201	120,1	0,970	0,0970	0,097	1,29E-04	520,190
3	2405	240,5	1,817	0,1817	0,182	1,20E-04	486,628
4	3596	359,6	2,659	0,2633	0,263	1,17E-04	471,563

Figura 104. Línea 10-8 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs frecuencia de fase C.



8.2.2 Línea de 15-12 para una corriente de 10 A. Se presenta en esta parte los resultados para cada una de las fases de la línea 15-12 cuando se alimenta por una fase y se toma la medida de tensión. Lo que se varía es la frecuencia de la fuente de alimentación. Esta información se encuentra en las Tablas 35, 36 y 37, y en las Figuras 105, 106 y 107.

Tabla 35. Línea 15-12 Inductancia propia para la fase A a 10 A.

No. Medida	Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]	Vfa [V]	Za [Ω]	Xa [Ω]	La [H]	μ_r
1	603,7	60,4	0,782	0,077	0,077	2,04E-04	367,055
2	1204	120,4	1,414	0,140	0,140	1,85E-04	332,851
3	2408	240,8	2,659	0,266	0,266	1,76E-04	316,109
4	3597	359,7	3,875	0,388	0,387	1,71E-04	308,398

Figura 105. Línea 15-12 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs frecuencia de fase A.

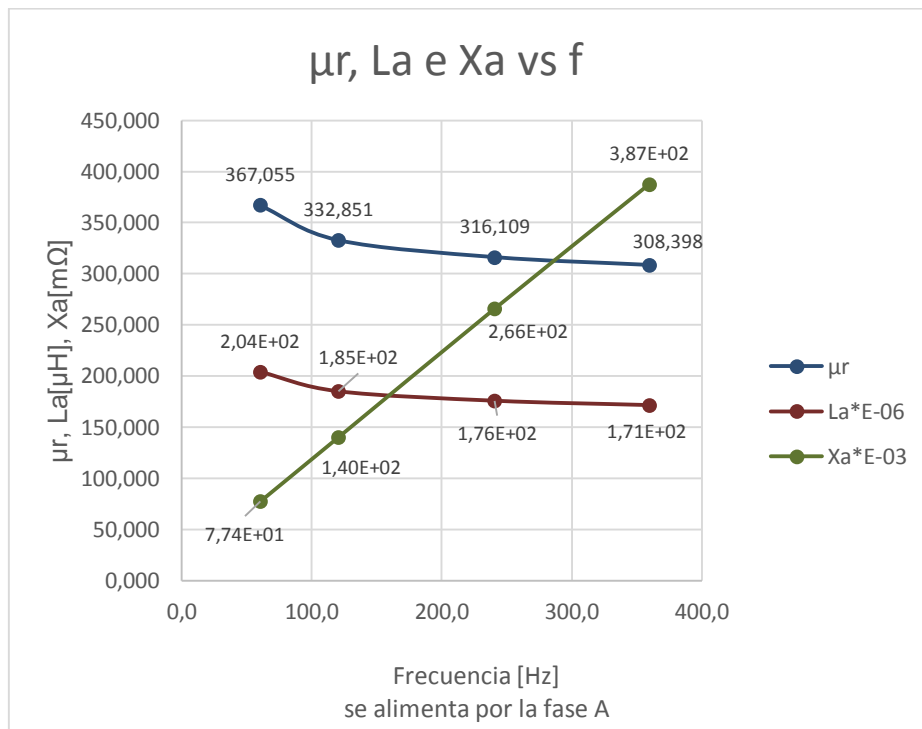


Tabla 36. Línea 15-12 Inductancia propia para la fase B a 10 A.

No.Med	Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]	Vfb [V]	Zb [Ω]	Xb [Ω]	Lb [H]	μ_r
1	599	59,9	1,051	0,105	0,105	2,79E-04	495,143
2	1196	119,6	1,974	0,197	0,197	2,63E-04	465,818
3	2395	239,5	3,837	0,384	0,384	2,55E-04	452,168
4	3599	359,9	5,670	0,573	0,573	2,53E-04	449,141

Figura 106. Línea 15-12 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs frecuencia de fase B.

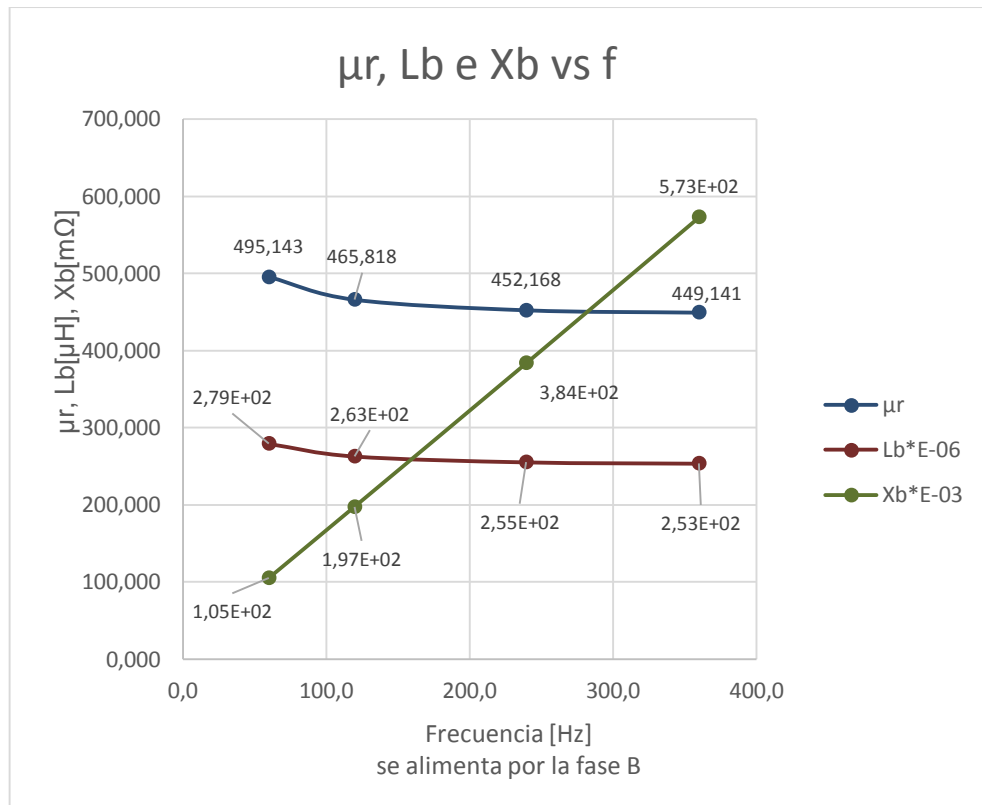
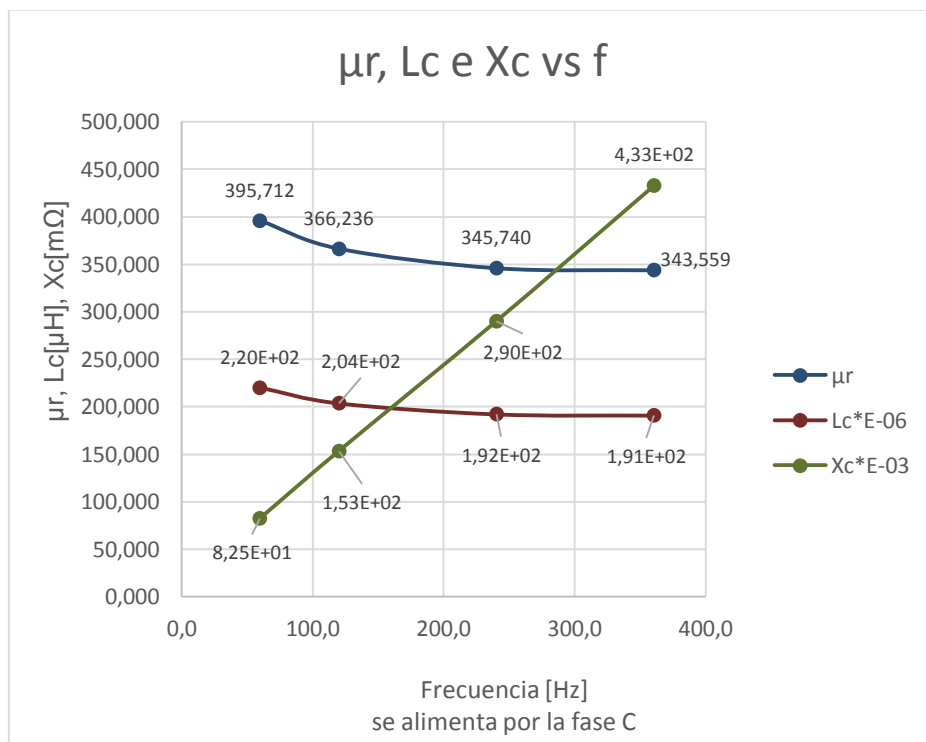


Tabla 37. Línea 15-12 Inductancia propia para la fase C a 10 A.

No.Med	Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]	Vfc [V]	Zc [Ω]	Xc [Ω]	Lc [H]	μ_r
1	596,7	59,7	0,825	0,083	0,082	2,20E-04	395,712
2	1199	119,9	1,534	0,153	0,153	2,04E-04	366,236
3	2402	240,2	2,930	0,290	0,290	1,92E-04	345,740
4	3608	360,8	4,330	0,433	0,433	1,91E-04	343,559

Figura 107. Línea 15-12 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs frecuencia de fase C.



8.2.3 Línea de 18-14 para una corriente de 10 A. Se presenta en esta parte los resultados para cada una de las fases de la línea 18-14 cuando se alimenta por una fase y se toma la medida de tensión. Lo que se varía es la frecuencia de la fuente de alimentación. Esta información se encuentra en las Tablas 38, 39 y 40, y en las Figura 108, 109 y 110.

Tabla 38. Línea 18-14 Inductancia propia para la fase A a 10 A.

No.Med	Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]	Vfa [V]	Za [Ω]	Xa [Ω]	La [H]	μ_r
1	609,9	61,0	0,342	0,0339	0,034	8,82E-05	118,508
2	1200	120,0	0,443	0,0443	0,044	5,87E-05	78,866
3	2405	240,5	0,749	0,0742	0,074	4,91E-05	65,924
4	3597	359,7	0,989	0,0989	0,099	4,37E-05	58,794

Figura 108. Línea 18-14 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs frecuencia de fase A.

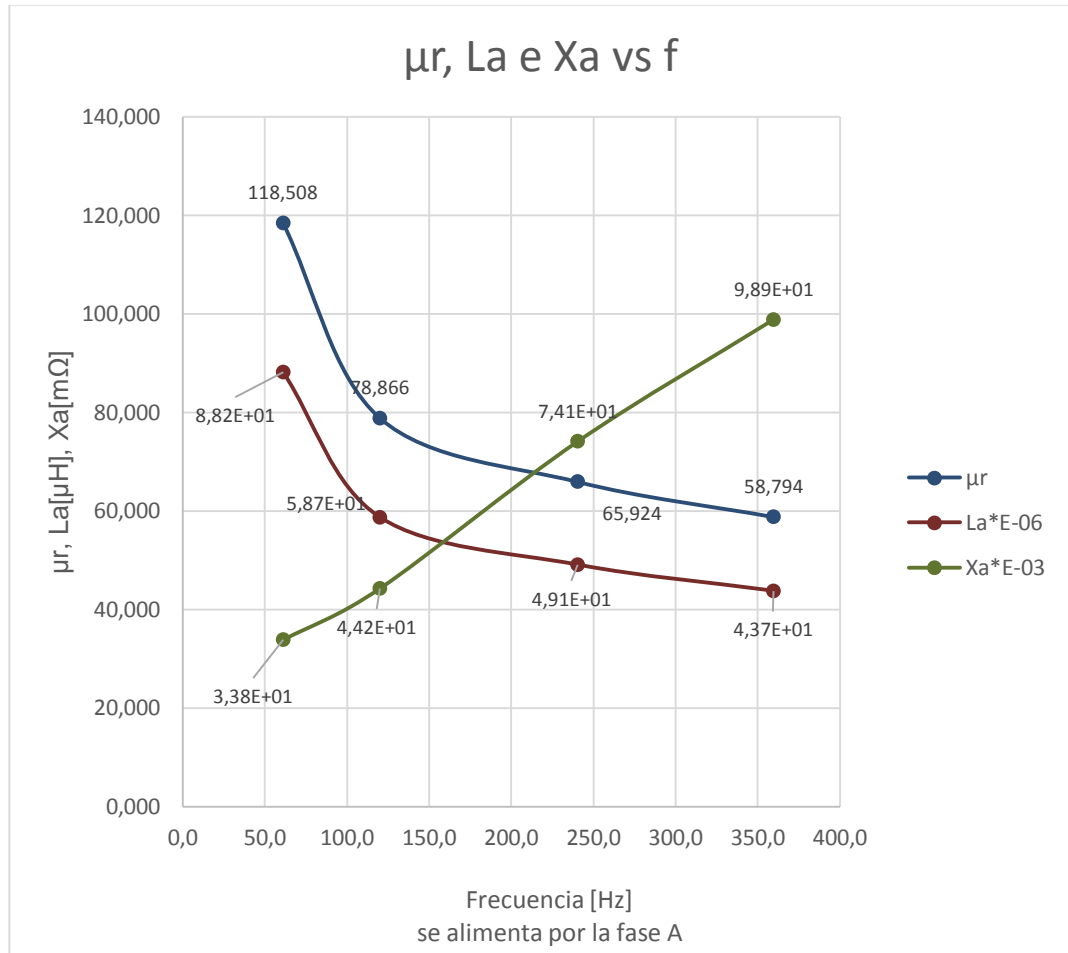


Tabla 39. Línea 18-14 Inductancia propia para la fase B a 10 A.

No. Med	Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]	Vfb [V]	Zb [Ω]	Xb [Ω]	Lb [H]	μ_r
1	602,3	60,2	0,357	0,0357	0,036	9,42E-05	131,976
2	1195	119,5	0,457	0,0457	0,046	6,08E-05	85,213
3	2399	239,9	0,777	0,0777	0,078	5,15E-05	72,222
4	3600	360,0	1,163	0,1163	0,116	5,14E-05	72,053

Figura 109. Línea 18-14 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs frecuencia de fase B.

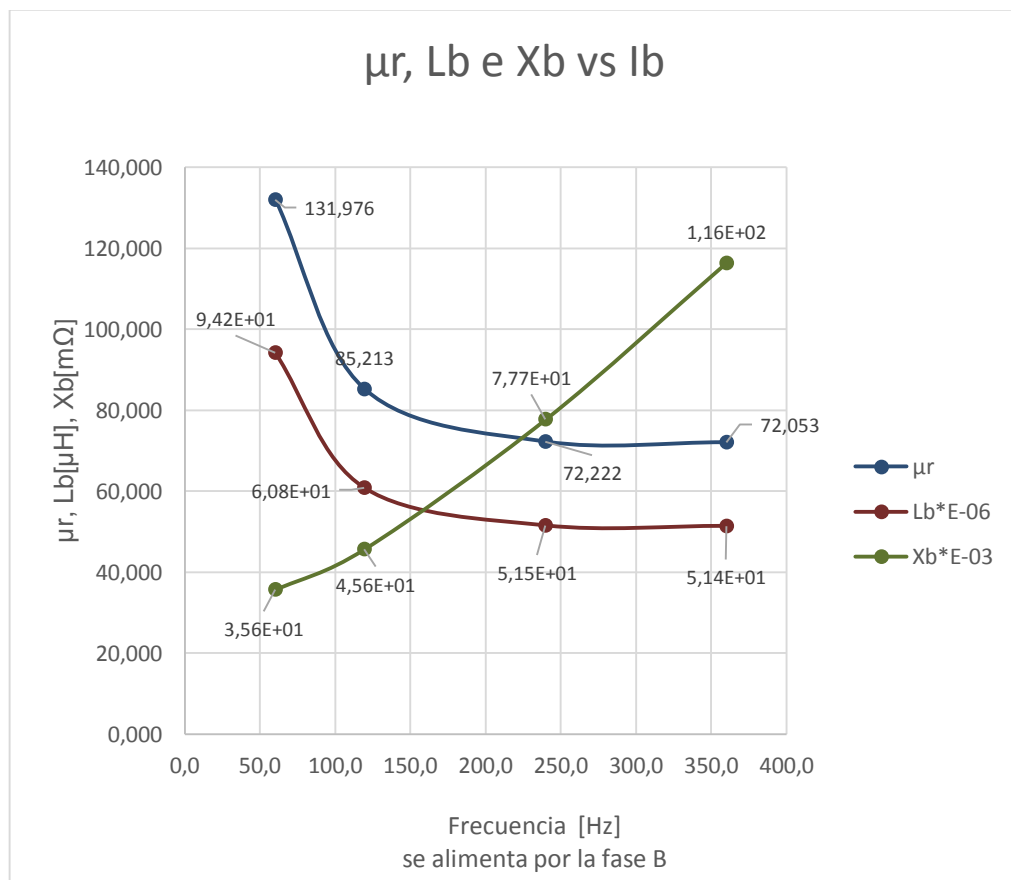
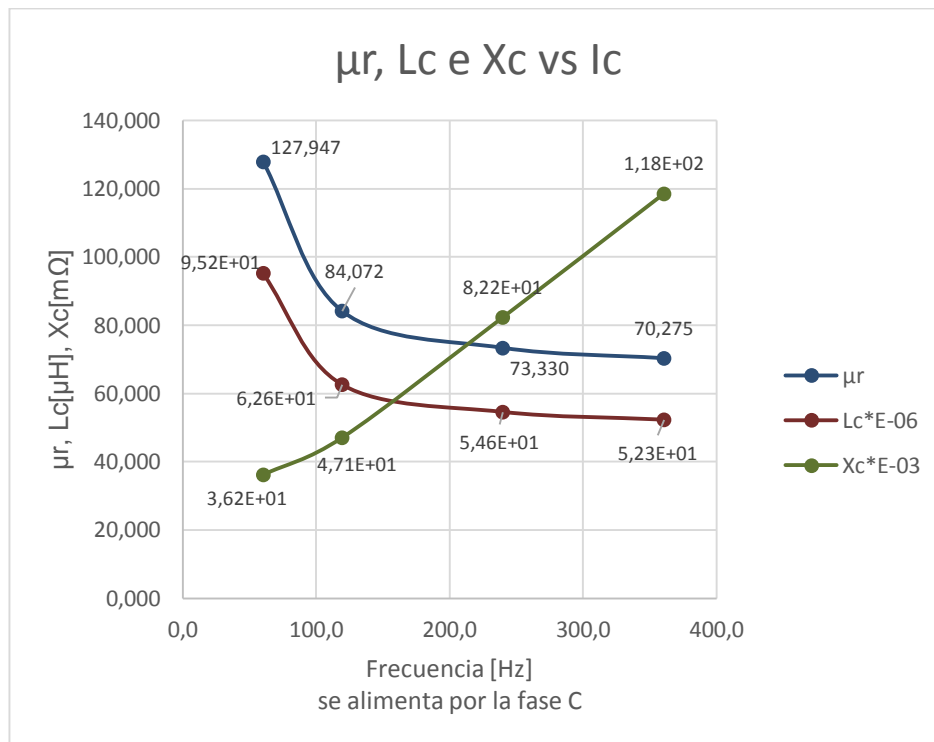


Tabla 40. Línea 18-14 Inductancia propia para la fase C a 10 A.

No.Med	Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]	Vfc [V]	Zc [Ω]	Xc [Ω]	Lc [H]	μ_r
1	604,7	60,5	0,366	0,0362	0,036	9,52E-05	127,947
2	1197	119,7	0,471	0,0471	0,047	6,26E-05	84,072
3	2399	239,9	0,831	0,0823	0,082	5,46E-05	73,330
4	3606	360,6	1,185	0,1185	0,118	5,23E-05	70,275

Figura 110. Línea 18-14 Permeabilidad, inductancia e impedancia vs frecuencia de fase C.



Estos resultados denotan que no hay una variación considerable en el parámetro inductancia, pero si cambia de forma radical la impedancia para cada valor de frecuencia. Ambos resultados son los que se esperan obtener. El primero, pues se sabe que la

permeabilidad no depende de la variable frecuencia sino del nivel de saturación magnética del material. El segundo pues se sabe que la impedancia se relaciona directamente con la frecuencia del sistema.

Con base en la información que se muestra en las secciones 6.2 y 6.3 se tiene descrito el segundo coeficiente del modelo para cada línea.

8.3 TENSIÓN INDUCIDA EN LAS FASES A DIFERENTES CORRIENTES

El tercer coeficiente necesario para completar el modelo de las líneas corresponde al de las inductancias mutuas [7]. En las tablas de la 41 a la 49 y las Figuras de la 111 a la 119 se muestran los valores que describen el coeficiente de inductancia mutua en función de la corriente. La ecuación (25) es la que se aplica para determinar el coeficiente de inductancia mutua.

$$M'' = \frac{E''}{I' \cdot 2\pi \cdot f} \quad (25)$$

Donde:

M'' : Coeficiente de inducción mutua entre dos fases

E'' : Tensión inducida en la fase por donde no fluye corriente

I' : Corriente que fluye por la fase principal.

8.3.1 Línea de 10-8 para una frecuencia de 360 Hz

Se presenta en esta parte los resultados para cada una de las fases de la línea 10-8 cuando se alimenta por una fase y se toma la medida de tensión en las dos que restan. Lo que se varía es la corriente que fluye por la fase principal. Esta información se encuentra en las Tablas 41, 42 y 43 y en las Figura 111, 112 y 113.

Tabla 41. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 360 Hz.

No.Medida	Ia [A]	Vfb [V]	Vfc [V]	Mba[H]	Mca [H]
1	2,0	0,642	0,291	1,42E-04	6,43E-05
2	4,0	1,106	0,568	1,22E-04	6,28E-05
3	6,0	1,305	0,697	9,59E-05	5,12E-05
4	10,1	1,551	0,805	6,77E-05	3,51E-05

Figura 111. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 360 Hz.

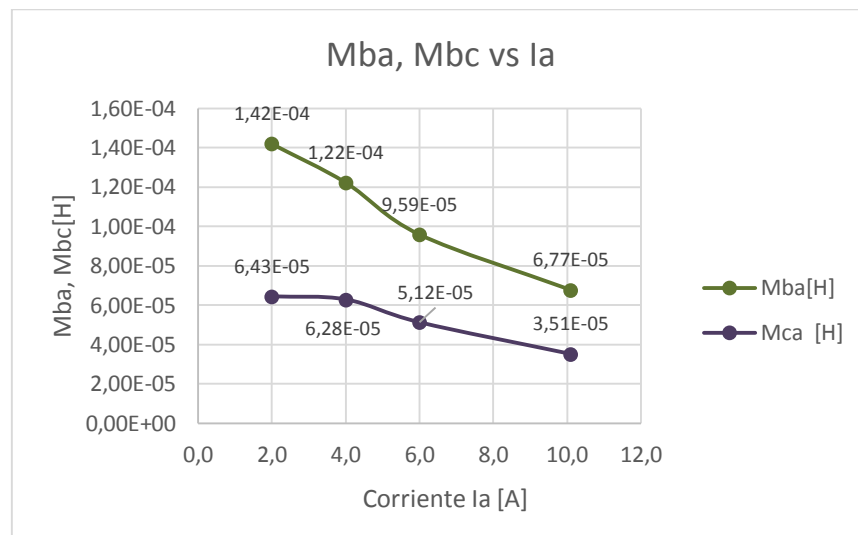


Tabla 42. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 360 Hz.

No.Medida	Ib [A]	Vfa [V]	Vfc [V]	Mab[H]	Mcb [H]
1	2,0	0,701	0,389	1,55E-04	8,58E-05
2	4,0	1,173	0,885	1,30E-04	9,78E-05
3	6,0	1,607	1,316	1,18E-04	9,67E-05
4	10,1	2,005	1,856	8,76E-05	8,11E-05

Figura 112. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 360 Hz.

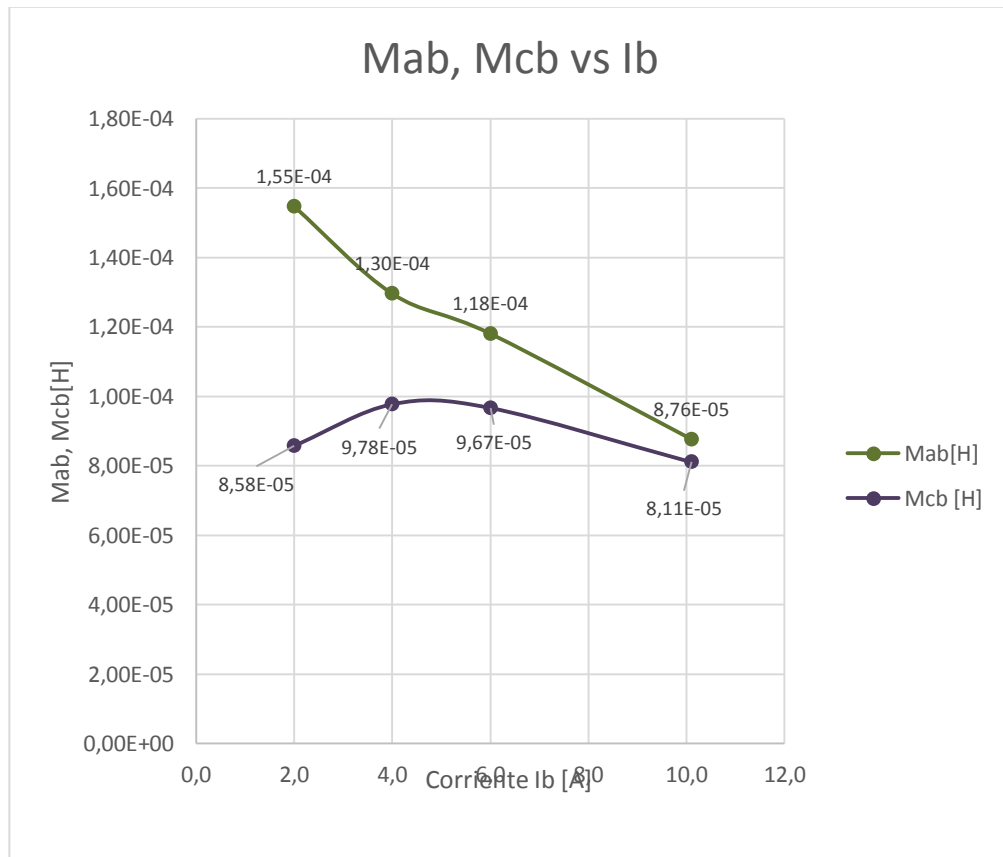
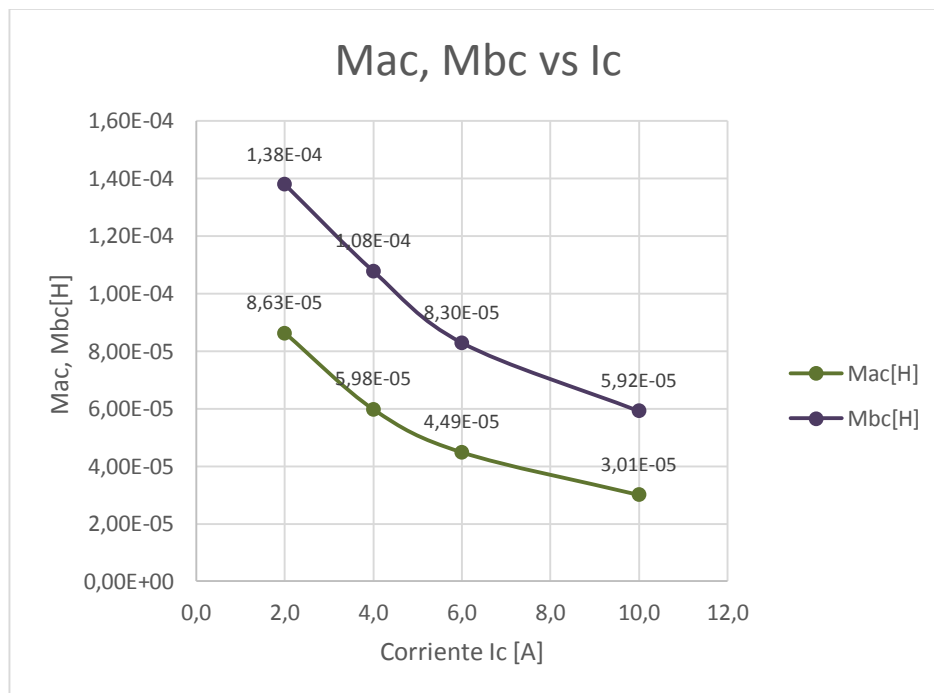


Tabla 43. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 360 Hz.

No.Medida	Ic [A]	Vfa [V]	Vfb [V]	Mac[H]	Mbc[H]
1	2,0	0,391	0,625	8,63E-05	1,38E-04
2	4,0	0,541	0,975	5,98E-05	1,08E-04
3	6,0	0,611	1,129	4,49E-05	8,30E-05
4	10,0	0,683	1,343	3,01E-05	5,92E-05

Figura 113. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 360 Hz.



8.3.2 Línea de 15-12 para una frecuencia de 360 Hz. Se presenta en esta parte los resultados para cada una de las fases de la línea 15-12 cuando se alimenta por una fase y se toma la medida de tensión en las dos que restan. Lo que se varía es la corriente que fluye por la fase principal. Esta información se encuentra en las Tablas 44, 45 y 46, y en las Figura 114, 115 y 116.

Tabla 44. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 360 Hz.

No.Medida	Ia [A]	Vfb [V]	Vfc [V]	Mba[H]	Mca[H]
1	2,0	1,500	0,871	3,31E-04	1,92E-04
2	4,0	1,975	1,105	2,19E-04	1,22E-04
3	6,0	2,199	1,222	1,62E-04	8,99E-05
4	10,0	2,533	1,395	1,12E-04	6,17E-05

Figura 114. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 360 Hz.

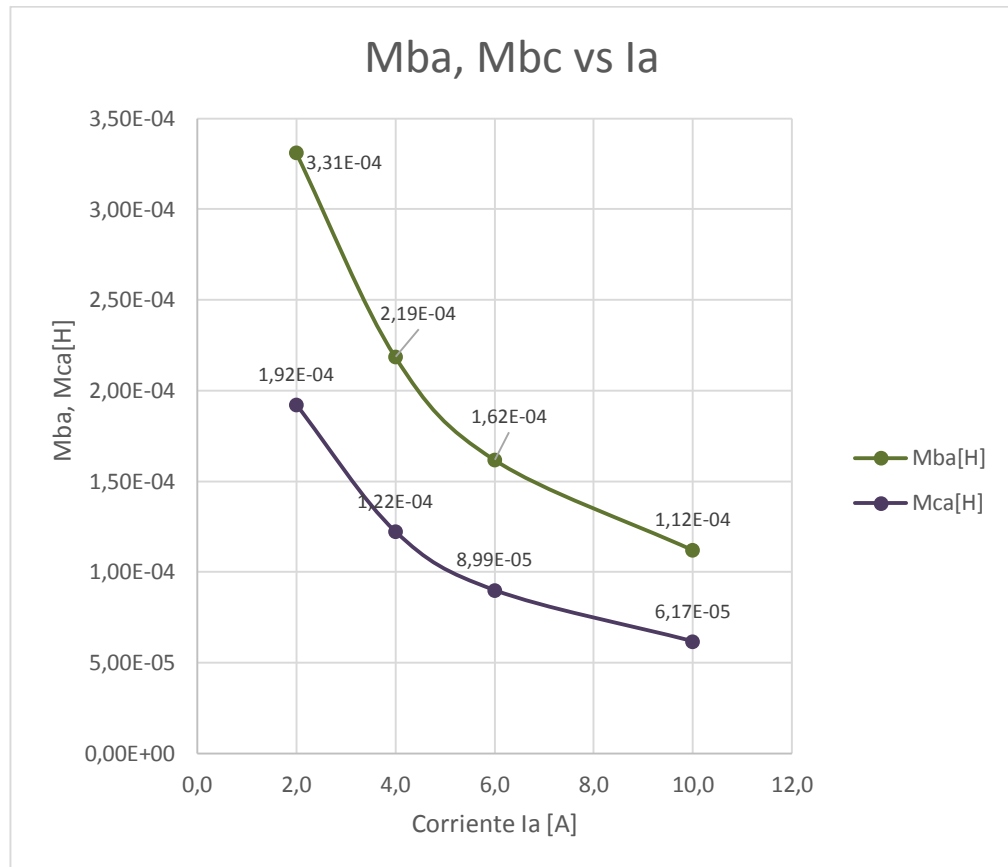


Tabla 45. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 360 Hz.

No.Medida	Ib [A]	Vfa [V]	Vfc [V]	Mab[H]	Mcb[H]
1	2,0	1,269	1,357	2,80E-04	2,99E-04
2	4,0	2,279	2,371	2,52E-04	2,62E-04
3	6,0	2,851	2,997	2,10E-04	2,20E-04
4	10,0	3,297	3,489	1,46E-04	1,54E-04

Figura 115. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 360 Hz.

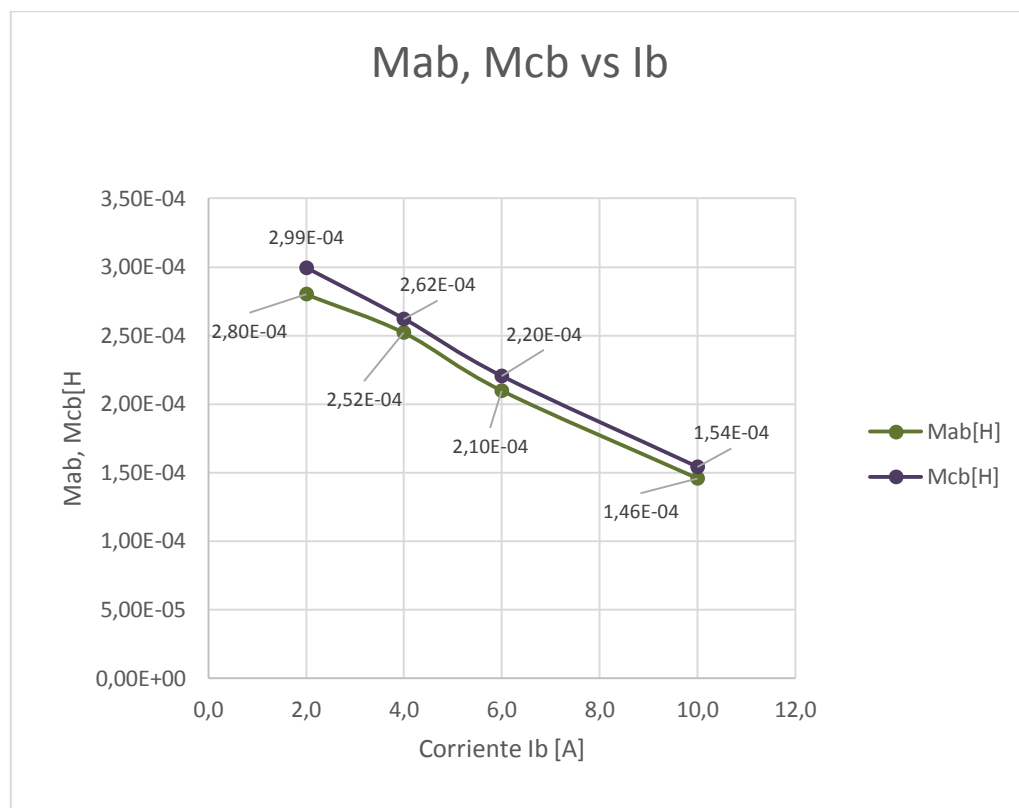
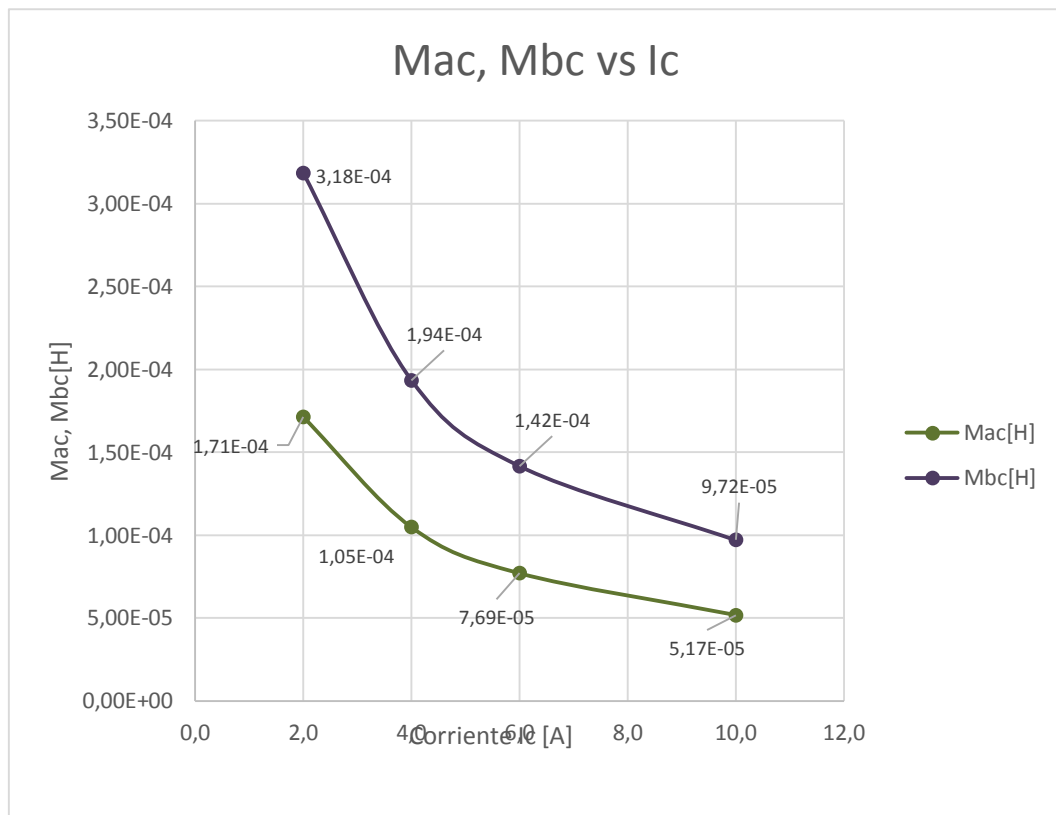


Tabla 46. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 360 Hz.

No.Medida	Ic [A]	Vfa [V]	Vfb [V]	Mac[H]	Mbc[H]
1	2,0	0,775	1,441	1,71E-04	3,18E-04
2	4,0	0,947	1,750	1,05E-04	1,94E-04
3	6,0	1,046	1,927	7,69E-05	1,42E-04
4	10,0	1,173	2,203	5,17E-05	9,72E-05

Figura 116. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 360 Hz.



8.3.3 Línea de 18-14 para una frecuencia de 360 Hz. Se presenta en esta parte los resultados para cada una de las fases de la línea 18-14 cuando se alimenta por una fase y se toma la medida de tensión en las dos que restan. Lo que se varía es la corriente que fluye por la fase principal. Esta información se encuentra en las Tablas 47, 48 y 49 y en las Figuras 117, 118 y 119.

Tabla 47. Línea 18-14 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 360 Hz.

No.Medida	Ia [A]	Vfb [V]	Vfc [V]	Mba[H]	Mca [H]
1	2,0	0,269	0,245	5,94E-05	5,41E-05
2	4,0	0,305	0,261	3,37E-05	2,88E-05
3	6,0	0,365	0,271	2,68E-05	1,99E-05
4	10,1	0,533	0,314	2,33E-05	1,37E-05

Figura 117. Línea 18-14 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 360 Hz.

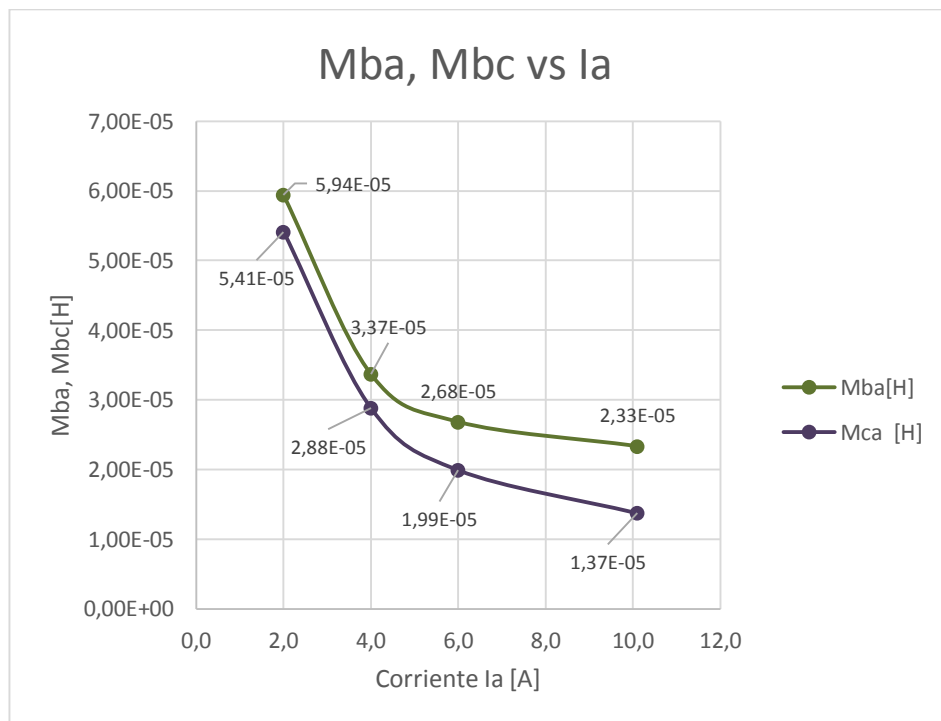


Tabla 48. Línea 18-14 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 360 Hz.

No.Medida	Ib [A]	Vfa [V]	Vfc [V]	Mab[H]	Mcb [H]
1	2,0	0,260	0,257	5,74E-05	5,68E-05
2	4,0	0,299	0,293	3,31E-05	3,24E-05
3	6,0	0,369	0,367	2,71E-05	2,70E-05
4	10,0	0,543	0,539	2,39E-05	2,38E-05

Figura 118. Línea 18-14 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 360 Hz.

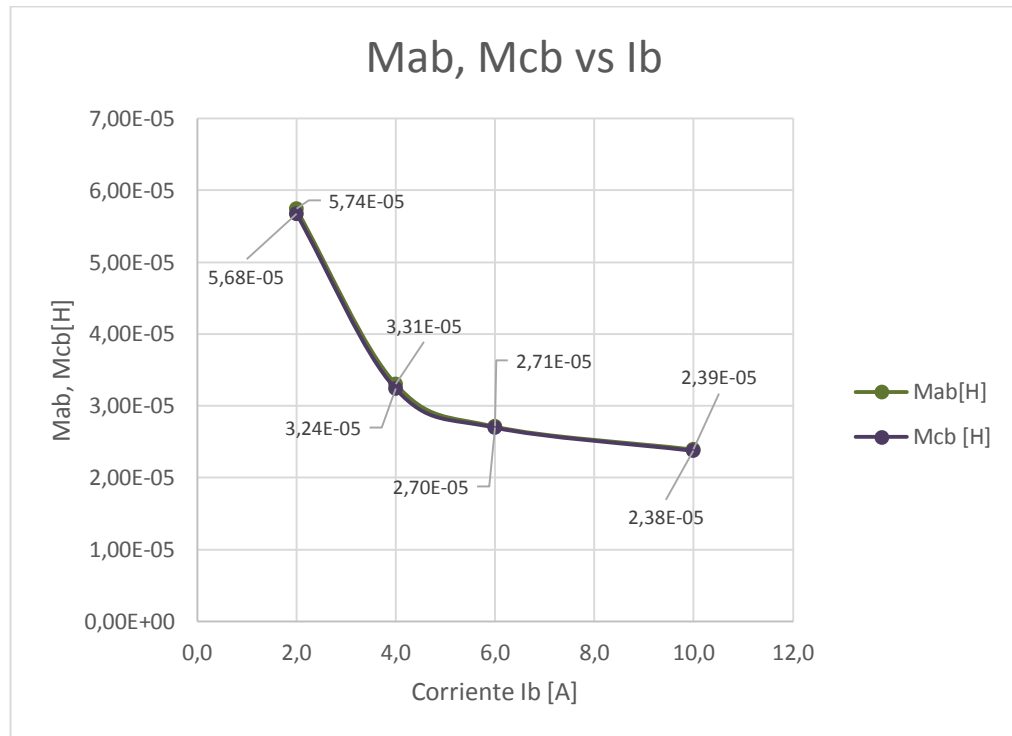
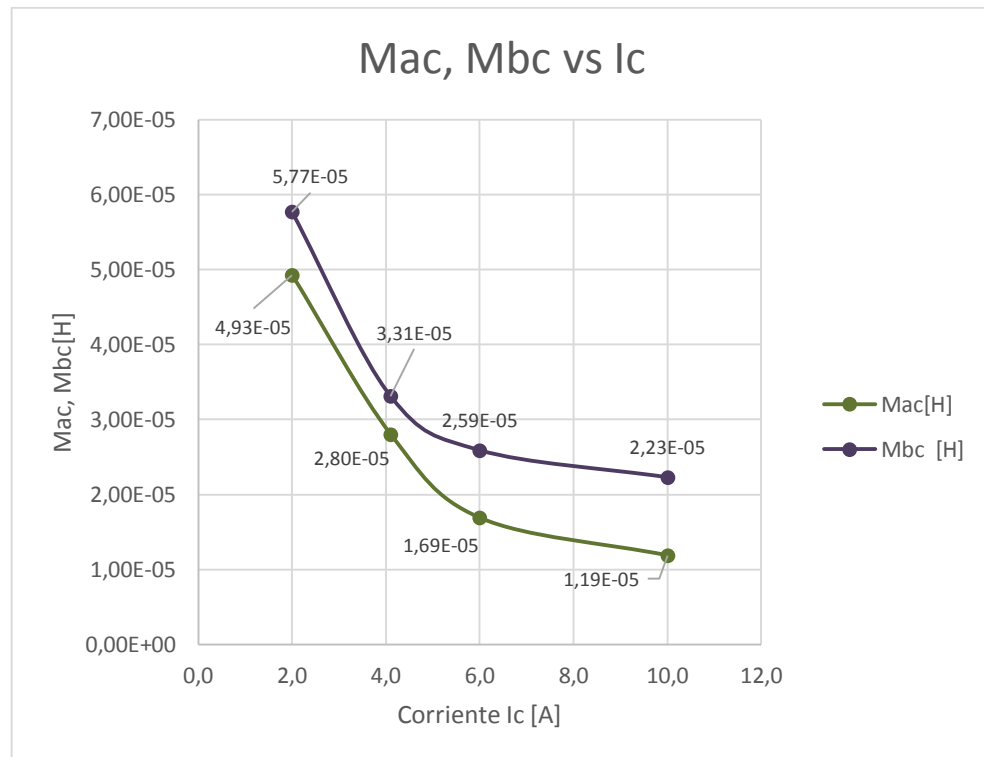


Tabla 49. Línea 18-14 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 360 Hz.

No.Medida	Ic [A]	Vfa [V]	Vfb [V]	Mac[H]	Mbc [H]
1	2,0	0,223	0,261	4,93E-05	5,77E-05
2	4,1	0,260	0,307	2,80E-05	3,31E-05
3	6,0	0,229	0,351	1,69E-05	2,59E-05
4	10,0	0,269	0,505	1,19E-05	2,23E-05

El coeficiente de inductancia mutua varía en función de la corriente de la misma forma como lo hace la inductancia propia, este hecho lo confirman los valores que se aprecian en las tablas.

Figura 119. Línea 18-14 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 360 Hz.



Según los datos que se presentaron en esta sección, se tiene que la inductancia mutua varía en función de la corriente de una forma similar, a como lo hace el parámetro de auto inductancia según lo que se presenta en la sección 6.1.

8.4 TENSIÓN INDUCIDA EN LAS FASES A DIFERENTES FRECUENCIAS

En las Tablas de la 49 a la 57 y en las Figuras de la 120 a la 128, se presentan los datos que corresponde a variar la velocidad y dejar una corriente constante. En todos los casos la Ecuación (25) es la que se aplica para determinar el coeficiente de inductancia mutua.

8.4.1 Línea de 10-8 para una corriente de 10 A. Se presenta en esta parte los resultados para cada una de las fases de la línea 10-8 cuando se alimenta por una fase y se toma la medida de tensión en las dos que restan. Lo que se varía es la frecuencia de la fuente que alimenta la línea. Esta información se encuentra en las Tablas 50, 51 y 52 y en las Figuras 120, 121 y 122.

Tabla 50. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 10 A. a) Medida, b) Incertidumbre.

No.Medida	Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]	Vfb [V]	Vfc [V]	Mba[H]	Mca [H]
1	610,5	61,05	0,305	0,610	7,80E-05	1,56E-04
2	1200	120	0,569	0,456	7,55E-05	6,05E-05
3	2403	240,3	1,103	0,626	7,23E-05	4,11E-05
4	3607	360,7	1,651	0,717	7,28E-05	3,16E-05

Figura 120. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 10 A.

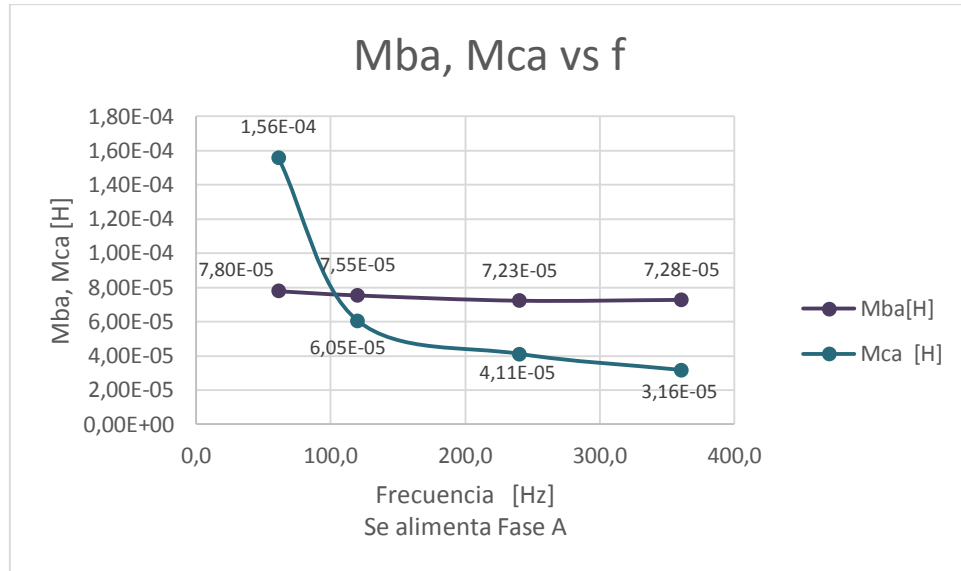


Tabla 51. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 10 A.

No. Medida	Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]	Vfa [V]	Vfc [V]	Mab[H]	Mcb [H]
1	601,4	60,1	0,371	0,335	9,82E-05	8,87E-05
2	1212	121,2	0,731	0,669	9,41E-05	8,61E-05
3	2397	239,7	1,409	1,297	9,36E-05	8,61E-05
4	3600	360,0	2,110	1,983	9,33E-05	8,77E-05

Figura 121. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 10 A.

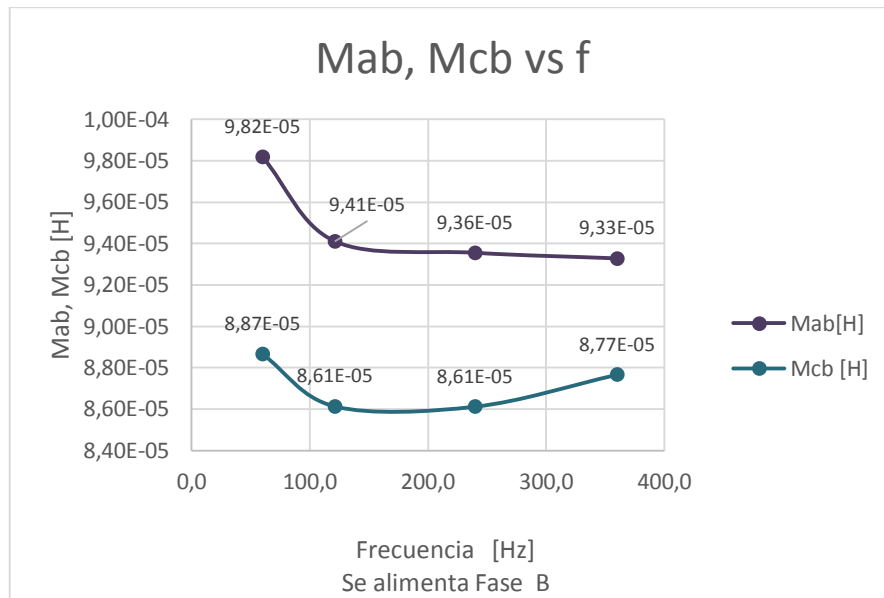
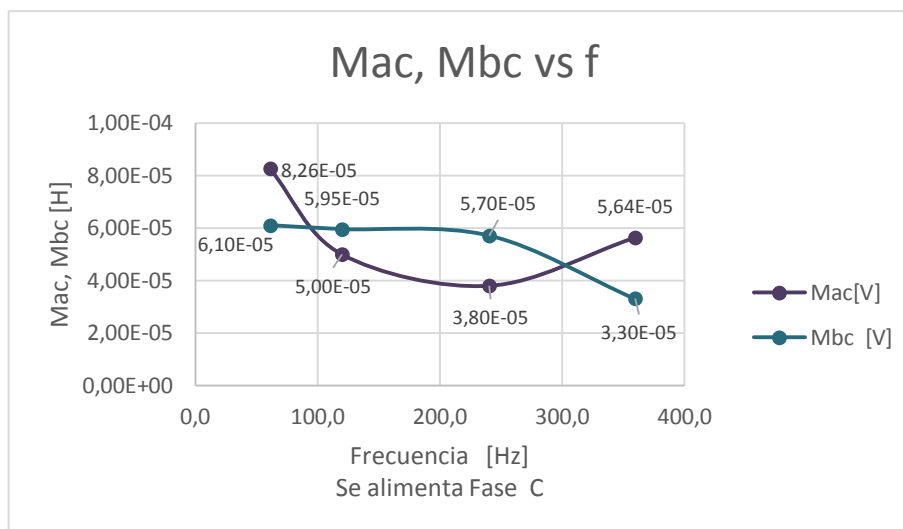


Tabla 52. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 10 A.

No.Medida	Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]	Vfa [V]	Vfb [V]	Mac[V]	Mbc [V]
1	612,1	61,2	0,321	0,237	8,26E-05	6,10E-05
2	1201	120,1	0,377	0,449	5,00E-05	5,95E-05
3	2405	240,5	0,574	0,862	3,80E-05	5,70E-05
4	3596	359,6	1,286	0,754	5,64E-05	3,30E-05

Figura 122. Línea 10-8 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 10 A.



8.4.2 Línea de 15-12 para una corriente de 10 A. Se presenta en esta parte los que resultados para cada una de las fases de la línea 15-12 cuando se alimenta por una fase y se toma la medida de tensión en las dos que restan. Lo que se varía es la frecuencia de la fuente que alimenta la línea. Esta información se encuentra en las tablas 53, 54 y 55, y las Figuras 123, 124 y 125.

Tabla 53. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 10 A.

No.Medida	Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]	Vfb [V]	Vfc [V]	Mba[V]	Mca [V]
1	603,7	60,4	0,601	0,436	1,57E-04	1,14E-04
2	1204	120,4	0,869	0,569	1,14E-04	7,45E-05
3	2408	240,8	1,671	0,933	1,10E-04	6,17E-05
4	3597	359,7	2,393	1,305	1,06E-04	5,77E-05

Figura 123. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 10 A.

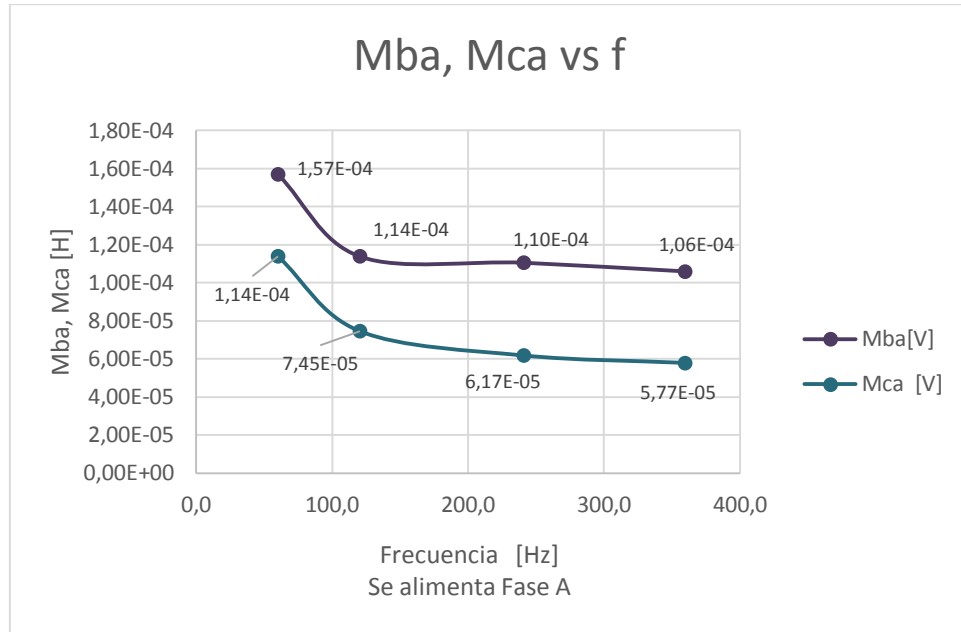


Tabla 54. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 10 A.

No. Medida	Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]	Vfa [V]	Vfc [V]	Mab[V]	Mcb [V]
1	599	59,9	0,679	0,687	1,80E-04	1,83E-04
2	1196	119,6	1,191	1,248	1,58E-04	1,66E-04
3	2395	239,5	2,240	2,391	1,49E-04	1,59E-04
4	3599	359,9	3,295	3,512	1,47E-04	1,57E-04

Figura 124. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 10 A.

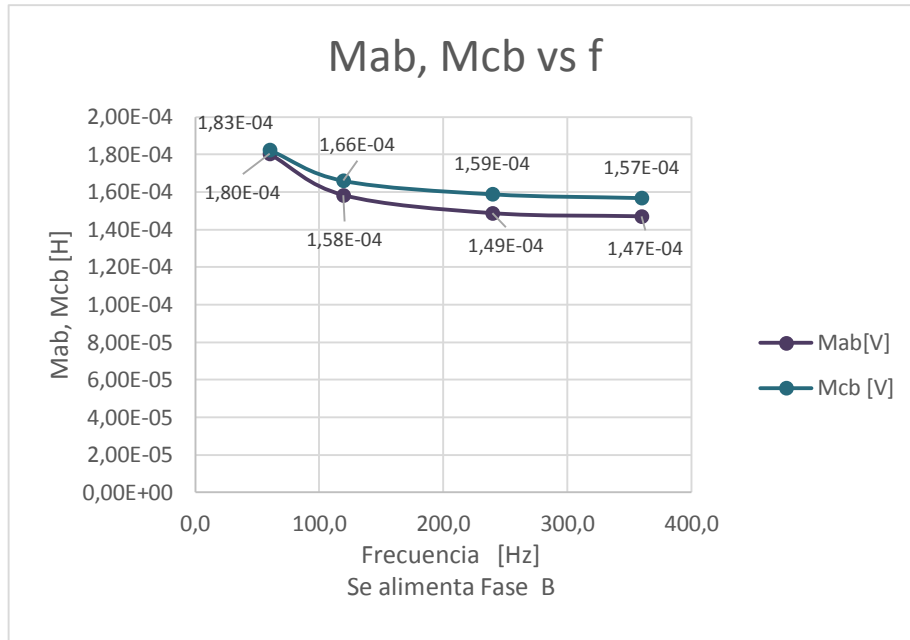
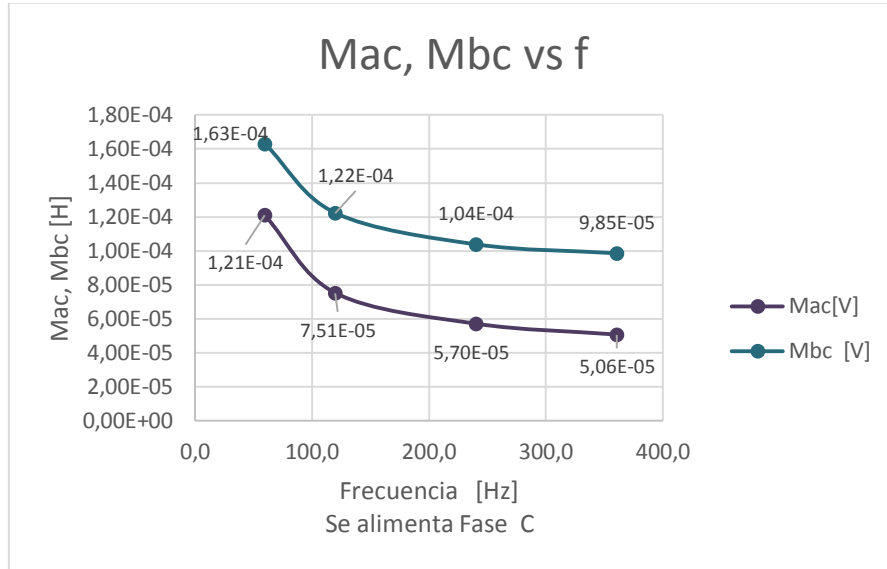


Tabla 55. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 10 A.

No.Medid	Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]	Vfa [V]	Vfb [V]	Mac[V]	Mbc [V]
a						
1	596,7	59,7	0,453	0,611	1,21E-04	1,63E-04
2	1199	119,9	0,566	0,921	7,51E-05	1,22E-04
3	2402	240,2	0,869	1,582	5,70E-05	1,04E-04
4	3608	360,8	1,147	2,233	5,06E-05	9,85E-05

Figura 125. Línea 15-12 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 10 A.



8.4.3 Línea de 18-14 para una corriente de 10 A. Se presenta en esta parte los resultados para cada una de las fases de la línea 18-14 cuando se alimenta por una fase y se toma la medida de tensión en las dos que restan. Lo que se varía es la frecuencia de la fuente que alimenta la línea. Esta información se encuentra en las Tablas 56, 57 y 58, y en las Figura 126, 127 y 128.

Tabla 56. Línea 18-14 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 10 A.

No.Medida	Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]	Vfb [V]	Vfc [V]	Mba[V]	Mca [V]
1	609,9	61,0	0,316	0,288	8,16E-05	7,44E-05
2	1200	120,0	0,297	0,282	3,94E-05	3,74E-05
3	2405	240,5	0,376	0,263	2,46E-05	1,72E-05
4	3597	359,7	0,478	0,274	2,11E-05	1,21E-05

Figura 126. Línea 18-14. Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase A a 10 A.

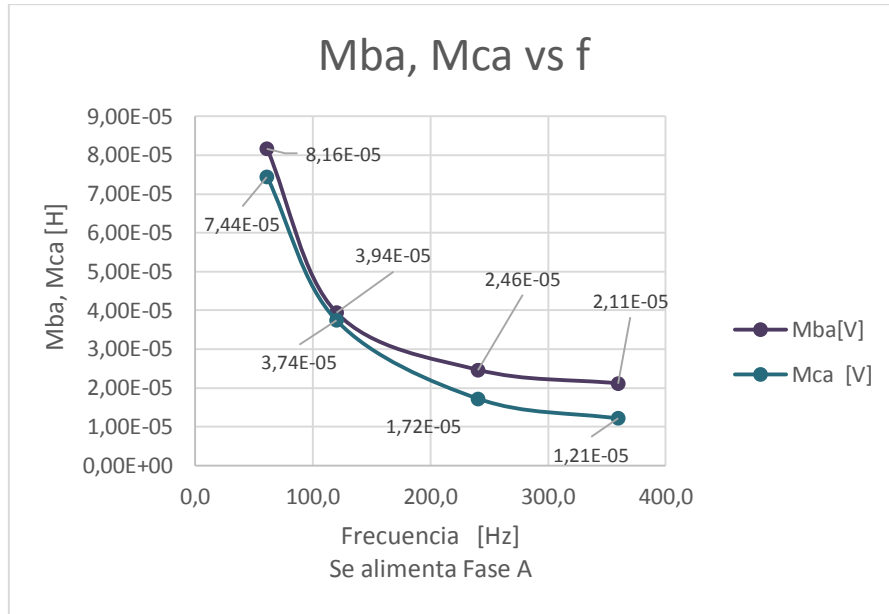


Tabla 57. Línea 18-14 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 10 A.

No.Medid	Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]	Vfa [V]	Vfc [V]	Mab[V]	Mcb [V]
a						
1	602,3	60,2	0,299	0,306	7,90E-05	8,09E-05
2	1195	119,5	0,315	0,303	4,20E-05	4,04E-05
3	2399	239,9	0,391	0,369	2,59E-05	2,45E-05
4	3600	360,0	0,537	0,481	2,37E-05	2,13E-05

Figura 127. Línea 18-14 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase B a 10 A.

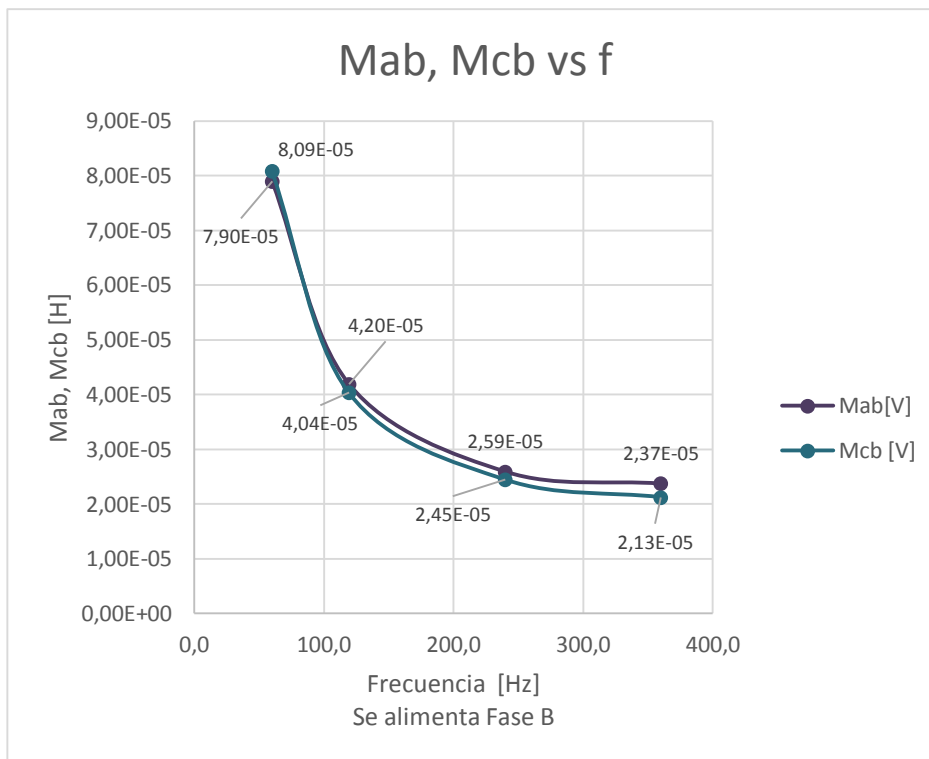
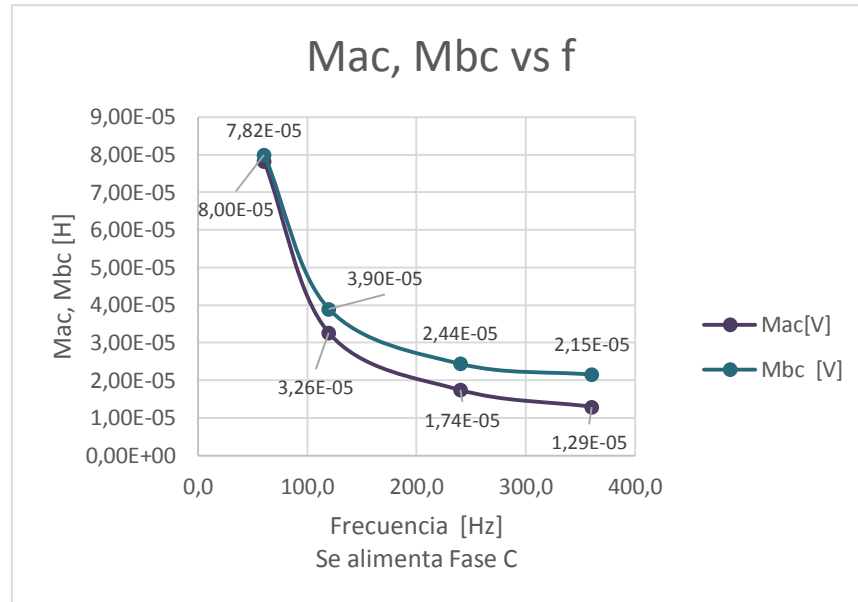


Tabla 58. Línea 18-14 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 10 A.

No.Medida	Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]	Vfa [V]	Vfb [V]	Mac[V]	Mbc [V]
1	604,7	60,5	0,300	0,307	7,82E-05	8,00E-05
2	1197	119,7	0,245	0,293	3,26E-05	3,90E-05
3	2399	239,9	0,265	0,371	1,74E-05	2,44E-05
4	3606	360,6	0,293	0,487	1,29E-05	2,15E-05

Figura 128. Línea 18-14 Inductancias mutuas. Se alimenta por la fase C a 10 A.



En este caso para una corriente constante se observa en las tablas y gráficas de esta sección, como el coeficiente varía de forma menos dramática al cambio de la frecuencia. Esto se ajusta al hecho de que esta característica no depende del valor de la velocidad. Las pequeñas variaciones que se presentan en las tablas, se deben a posibles errores en los parámetros que se midieron, tales como velocidad en el eje del alternador y tensión inducida como también a la incertidumbre de los equipos de medición.

Con la información que se brinda en las secciones 6.3 y 6.4 se logra una descripción aceptable del último coeficiente necesario para describir completamente el sistema de ecuaciones (22).

Las impedancias de secuencias positivas y negativas para las líneas de transmisión corresponden a los mismos valores que se especifican en todas las tablas y gráficas de las secciones 6.1, 6.2, 6.3, 6.4.

8.5 OPERACIÓN TRIFÁSICA DE LAS LÍNEAS A DIFERENTES FRECUENCIAS

En esta sección se presentan los valores que se obtuvieron después de conectar cada línea en estrella a una fuente trifásica balanceada. Se observan desbalances de hasta dos amperes en las corrientes, cuando por una fase se alcanzan los 10 A. En las tablas 59, 60 y 61 se presentan estos datos.

Tabla 59. Línea de 10-8 Conexión trifásica en estrella a 10 A.

Velocidad [rpm]	Tensión de línea [V]	FASE A		FASE B		FASE C	
		Vf [V]	If [A]	Vf [V]	If [A]	Vf [V]	If [A]
599,6	1,322	0,543	8,9	0,590	8,7	0,545	10,2
1198	2,058	0,925	8,7	1,083	8,1	1,005	10,1
2405	3,657	1,732	9,2	2,054	7,9	1,875	10,1
3599	5,110	2,475	9,3	2,859	7,6	2,691	10,1

Tabla 60. Línea de 15-12 Conexión trifásica en estrella a 10 A.

Velocidad [rpm]	Tensión de línea [V]	FASE A		FASE B		FASE C	
		Vf [V]	If [A]	Vf [V]	If [A]	Vf [V]	If [A]
610,5	1,688	0,763	8,4	0,897	7,8	0,832	10,1
1201	2,931	1,383	8,9	1,633	7,4	1,529	10,0
2408	5,55	2,692	10,0	3,118	7,4	2,937	10,2
3602	7,87	3,883	10,0	4,470	7,1	4,270	9,8

Tabla 61. Línea de 18-14 Conexión trifásica en estrella a 10 A.

Velocidad [rpm]	Tensión de línea [V]	FASE A		FASE B		FASE C	
		Vf [V]	If [A]	Vf [V]	If [A]	Vf [V]	If [A]
614	1,069	0,392	10,2	0,431	9,9	0,476	10,3
1196	1,392	0,569	10,0	0,643	8,4	0,769	9,3
2402	2,342	1,065	10,0	1,223	8,5	1,575	9,5
3606	2,949	1,421	10,2	1,627	9,5	1,985	9,3

8.6 INDUCTANCIA DE LA LÍNEA EN FUNCIÓN DE LA GEOMETRÍA

A partir de la Ecuación (22) y las dimensiones físicas de los núcleos magnéticos, se obtiene una expresión que describe la inductancia en estado estable de las líneas de transmisión en función de su geometría.

Se empieza por escribir los términos de las expresiones de la Ecuación (22) en el dominio de la frecuencia tal y como se indica en la Ecuación (26).

$$\begin{aligned}
 E_a &= +I_a R + I_a \cdot j\omega L_a + I_b \cdot j\omega M_{ab} + I_c \cdot j\omega M_{ac} \\
 E_b &= +I_b R + I_a \cdot j\omega M_{ba} + I_b \cdot j\omega L_b + I_c \cdot j\omega M_{bc} \\
 E_c &= +I_c R + I_a \cdot j\omega M_{ca} + I_b \cdot j\omega M_{cb} + I_c \cdot j\omega L_c
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

Siempre que los términos de inductancia mutua descritos M_{ab} , M_{ac} , M_{ba} , M_{bc} , M_{ca} y M_{cb} se igualen a M_{ind} y los de inductancia propia L_a , L_b y L_c se iguales a L_p se reducen las expresiones de la Ecuación (26) a las de la ecuación (27):

$$\begin{aligned}
 E_a &= +I_a R + I_a \cdot J\omega L_p + (I_b + I_c) \cdot J\omega M_{ind} \\
 E_b &= +I_b R + I_b \cdot J\omega L_p + (I_a + I_c) \cdot J\omega M_{ind} \\
 E_c &= +I_c R + I_c \cdot J\omega L_p + (I_a + I_b) \cdot J\omega M_{ind}
 \end{aligned}
 \tag{27}$$

Como también se cumple la Ecuación (28):

$$I_a + I_b + I_c = 0 \tag{28}$$

Se logra obtener la Ecuación (29) como:

$$\begin{aligned}
 E_a &= +I_a R + I_a \cdot J\omega L_t \\
 E_b &= +I_b R + I_b \cdot J\omega L_t \\
 E_c &= +I_c R + I_c \cdot J\omega L_t
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

En donde L_t satisface la Ecuación (29) como lo indica la Ecuación (30):

$$L_t = L_p - M_{ind} \tag{30}$$

Las dimensiones físicas de los núcleos son las que se describen en las tablas 20, 21 y 22. Con ellas se obtienen las ecuaciones (31), (32) y (33) las cuales describen cada uno de los coeficientes de auto inductancia e inductancia mutua en función de la geometría.

Para la fase A se tienen los coeficientes que se muestran en la ecuación (31):

$$L_a = \frac{5}{12} \cdot \frac{\mu A_1 N a^2}{l_2}$$

$$M_{ab} = \frac{1}{3} \cdot \frac{\mu A_1 N a N b}{l_2} \quad (31)$$

$$M_{ac} = \frac{1}{12} \cdot \frac{\mu A_1 N a N c}{l_2}$$

Para la fase B se tienen los coeficientes que se muestran en la Ecuación (32):

$$L_b = \frac{2}{3} \cdot \frac{\mu A_1 N b^2}{l_2}$$

$$M_{ba} = M_{ab} \quad (32)$$

$$M_{bc} = M_{ba}$$

Para la fase C se tienen los coeficientes que se muestran en la Ecuación (33):

$$L_c = \frac{5}{12} \cdot \frac{\mu A_1 N c^2}{l_2}$$

$$M_{ca} = M_{ac} \quad (33)$$

$$M_{cb} = M_{bc}$$

Como lo muestran las tablas 20, 21 y 22 a cada línea se le realizó un ajuste en la columna central con el fin de igualar los valores de inductancia propia para cada fase. Así, se tienen líneas de 8, 12 y 14 espiras en la columna central y en sus laterales de manera respectiva 10, 15 y 18 espiras. También se demuestra que para las tres líneas de transmisión se cumple la ecuación (34).

$$N_b = \frac{4}{5} \cdot N_c \quad (34)$$

Con la ecuación 34 se modifica la inductancia mutua M_{ab} de la Ecuación 31 de donde se obtiene la Ecuación (35):

$$M_{ab} = \frac{4}{15} \cdot \frac{\mu A_1 N_a N_c}{l_2} = \frac{16}{5} M_{ac} \quad (35)$$

Así, se reemplazan los valores de las ecuaciones (31), (32) y (33) en la Ecuación (26) y se obtienen las ecuaciones (39), (40), (43) y (44) para las impedancias e inductancias en estado estable en función de la geometría.

Entonces para la fase A se tiene que:

$$\begin{aligned} E_a &= +I_a R + I_a \cdot J\omega L_a + I_b \cdot J\omega \frac{16}{5} M_{ac} + I_c \cdot J\omega M_{ac} \\ &= +I_a R + I_a \cdot J\omega L_a + (I_b \cdot \frac{16}{5} + I_c) \cdot J\omega M_{ac} \end{aligned}$$

Al aplicar la ecuación (28):

$$E_a = +I_a R + I_a \cdot J\omega L_a + (-I_a \cdot \frac{16}{5} - I_c \frac{16}{5} + I_c) \cdot J\omega M_{ac}$$

$$\begin{aligned}
&= +IaR + Ia \cdot JwLa + \left(-Ia \cdot \frac{16}{5} - Ic \frac{16}{5} + Ic\right) \cdot JwMac \\
&= +IaR + Ia \cdot JwLa - \left(Ia \frac{16}{5} + Ic \frac{11}{5}\right) \cdot JwMac
\end{aligned}$$

Como se cumple también la ecuación (36):

$$Ic = Ia \cdot e^{J\frac{2\pi}{3}} \quad (36)$$

$$Ea = +IaR + Ia \cdot JwLa - \left(Ia \frac{16}{5} + Ia \cdot e^{J\frac{2\pi}{3}} \cdot \frac{11}{5}\right) \cdot JwMac \quad (37)$$

Así se obtiene una expresión para la impedancia y la inductancia total en la fase A de la línea en función de la geometría como lo indican las ecuaciones (39) y (40). De la Ecuación (37) se obtiene una expresión para una impedancia en estado permanente para la fase A. Ecuación (38):

$$Zt = R + \left[JwLa - \left(\frac{16}{5} + e^{J\frac{2\pi}{3}} \cdot \frac{11}{5} \right) \cdot JwMac \right] \quad (38)$$

Al reemplazar los valores de las expresiones de la Ecuación (31) en la Ecuación (38) se obtienen las ecuaciones (39) y (40):

$$Zt = R + \left[Jw \frac{5}{12} \cdot \frac{\mu A1Na^2}{l2} - \left(\frac{16}{5} + e^{J\frac{2\pi}{3}} \cdot \frac{11}{5} \right) \cdot Jw \frac{1}{12} \cdot \frac{\mu A1NaNc}{l2} \right] \quad (39)$$

$$L_t = \left[\frac{5}{12} \cdot \frac{\mu A1Na^2}{l2} - \left(\frac{16}{5} + e^{j\frac{2\pi}{3}} \cdot \frac{11}{5} \right) \cdot \frac{1}{12} \cdot \frac{\mu A1NaNc}{l2} \right] \quad (40)$$

Para la fase B como se cumple la afirmación de la ecuación (41):

$$M_{ind} = M_{ba} = M_{bc} \quad (41)$$

Se parte de las ecuaciones (27), (28), (29) y (30), se reemplazan los términos de la Ecuación (32), para obtener las ecuaciones (42), (43) y (44) para la impedancia e inductancia total:

$$E_b = +I_b R + I_b \cdot j\omega \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{\mu A1Nb^2}{l2} - \frac{1}{3} \cdot \frac{\mu A1NaNb}{l2} \right] \quad (42)$$

$$Z_t = R + j\omega \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{\mu A1Nb^2}{l2} - \frac{1}{3} \cdot \frac{\mu A1NaNb}{l2} \right] \quad (43)$$

$$L_t = \left[\frac{2}{3} \cdot \frac{\mu A1Nb^2}{l2} - \frac{1}{3} \cdot \frac{\mu A1NaNb}{l2} \right] \quad (44)$$

En este caso las ecuaciones se dejan en términos de Nb y no de Nc como se hizo con las ecuaciones que describen la fase A.

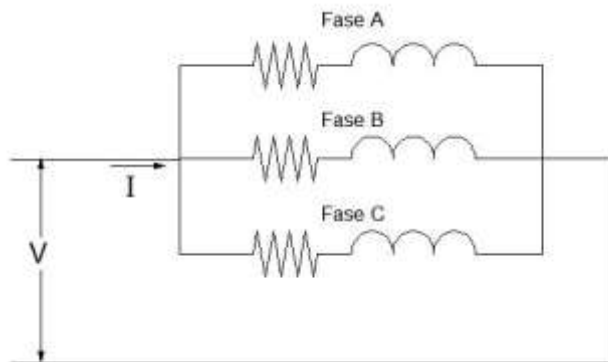
Para la fase C resultan los mismos valores que se obtuvieron para la fase A, esto se debe a la simetría geométrica que tienen ambas fases, entonces la Impedancia y la inductancia total en función de la geometría corresponde a las ecuaciones (39) y (40) de forma respectiva.

Los valores que se especifican en todas las ecuaciones (N_a , N_b , N_c , A_1 , L_2 y μ), son los que se especifican en las tablas 20, 21 y 22 y corresponden a las dimensiones de las líneas que se construyeron. Así al aplicar a cada una de ellas estas ecuaciones se obtiene un valor que se aproxima al verdadero valor de inductancia total en estado estable para cada fase.

8.7 IMPEDANCIA DE SECUENCIA CERO

La impedancia de secuencia cero es útil para el análisis de fallas del sistema [1]. Para el cálculo de esta, se realizó la conexión que se muestra en la figura 93, donde se cortocircuitaron las tres fases de las líneas y se aplicaron tensiones y corrientes determinadas.

Figura 129. Conexión de las bobinas para el cálculo de Z_0 .



Primero se realizaron medidas de tensión a diferentes frecuencias y a corriente constante de 10A. Los resultados de cada una de las líneas que se construyeron se muestran en las tablas 62, 63 y 64 y las gráficas 130, 131 y 132. Para el cálculo del Z_0 se utilizó la ecuación (14).

Tabla 62. Impedancias de secuencia cero para la línea 10-8 a corriente 10 A.

Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]	V [V]	Z0 [Ω]
600,9	60,1	0,422	0,0426
1206	120,6	0,355	0,0355
2408	240,8	0,389	0,0385
3598	359,8	0,377	0,0377

Figura 130. Impedancias de secuencia cero para la línea 10-8 a corriente 10 A.

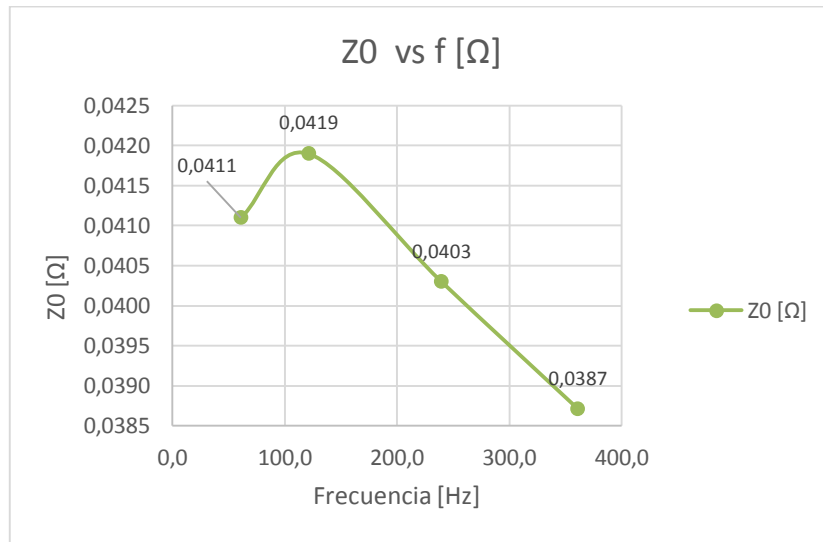


Tabla 63. Impedancias de secuencia cero para la línea 15-12 a corriente 10 A.

Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]	V [V]	Z0 [Ω]
598,5	59,9	0,419	0,0415
1204	120,4	0,412	0,0412
2408	240,8	0,391	0,0391
3603	360,3	0,379	0,0379

Figura 131. Impedancias de secuencia cero para la línea 15-12 corriente 10 A.

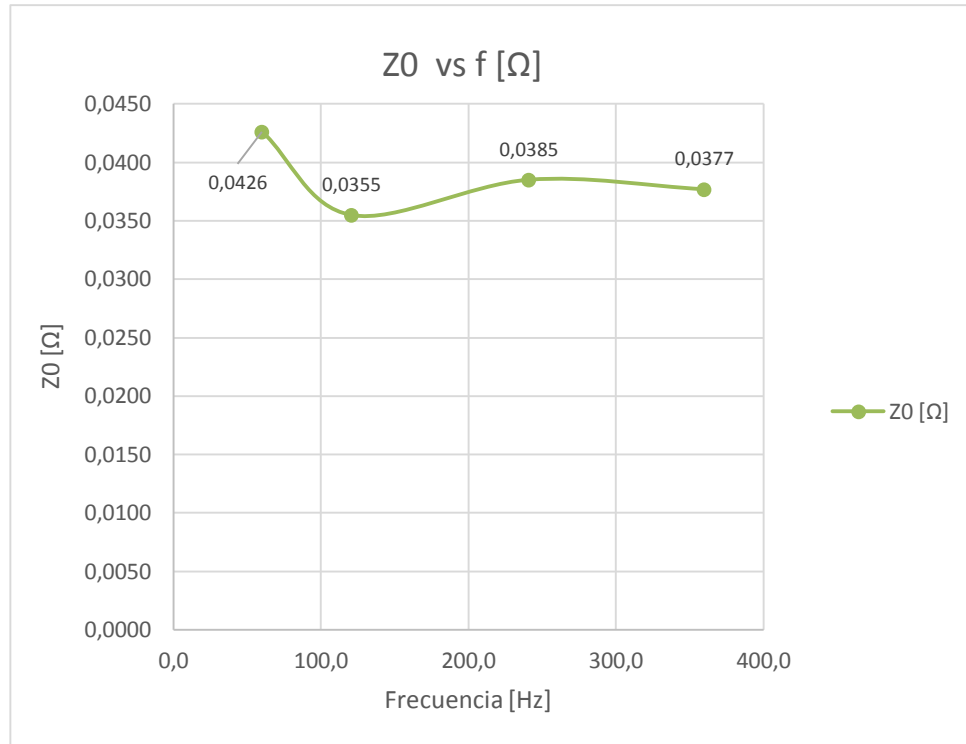
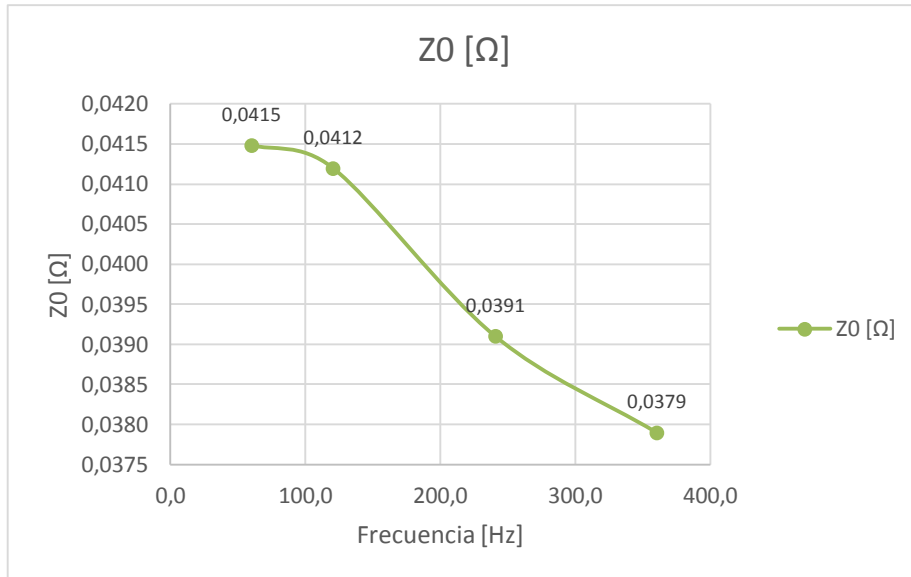


Tabla 64. Impedancias de secuencia cero para la línea 18-14 a corriente 10 A.

Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]	V [V]	Z_0 [Ω]
609,1	60,9	0,411	0,0411
1211	121,1	0,419	0,0419
2395	239,5	0,403	0,0403
3609	360,9	0,391	0,0387

Figura 132. Impedancias de secuencia cero para la línea 18-14 a corriente 10 A.



En las tablas anteriores se puede observar que la impedancia de secuencia cero no tiene un cambio considerable al variar la frecuencia y mantener la corriente constante.

Seguidamente se midió la tensión, a frecuencia constante de 360 Hz y corriente variable. Los resultados de esta segunda medición y cálculos de impedancia se muestran en las tablas 65, 66 y 67, y las Figura 133, 134 y 135 para cada una de las líneas.

Tabla 65. Impedancias de secuencia cero para la línea 10-8 a frecuencia 360 Hz.

I [A]	V [V]	Z0 [Ω]
2,0	0,329	0,1645
4,1	0,350	0,0854
6,0	0,341	0,0568
10,1	0,375	0,0371

Figura 133. Impedancias de secuencia cero para la línea 10-8 a frecuencia 360 Hz.

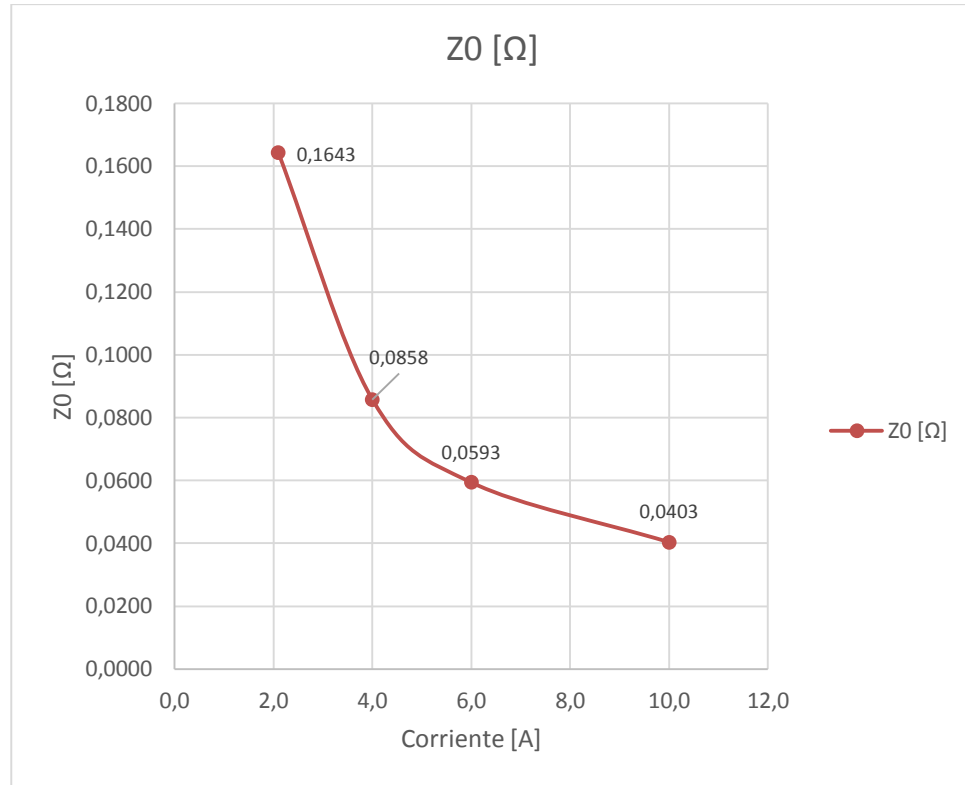


Tabla 66. Impedancias de secuencia cero para la línea 15-12 a frecuencia 360 Hz.

I [A]	V [V]	Z0 [Ω]
2,0	0,338	0,1690
4,0	0,339	0,0848
6,0	0,351	0,0585
10,1	0,384	0,0380

Figura 134. Impedancias de secuencia cero para la línea 15-12 a frecuencia 360 Hz.

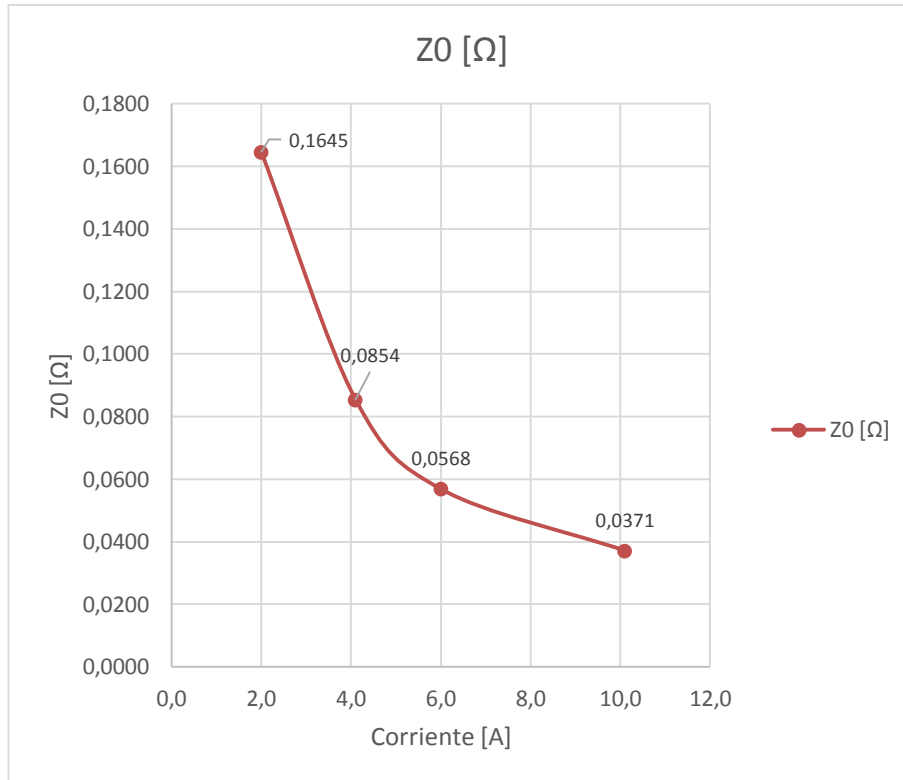
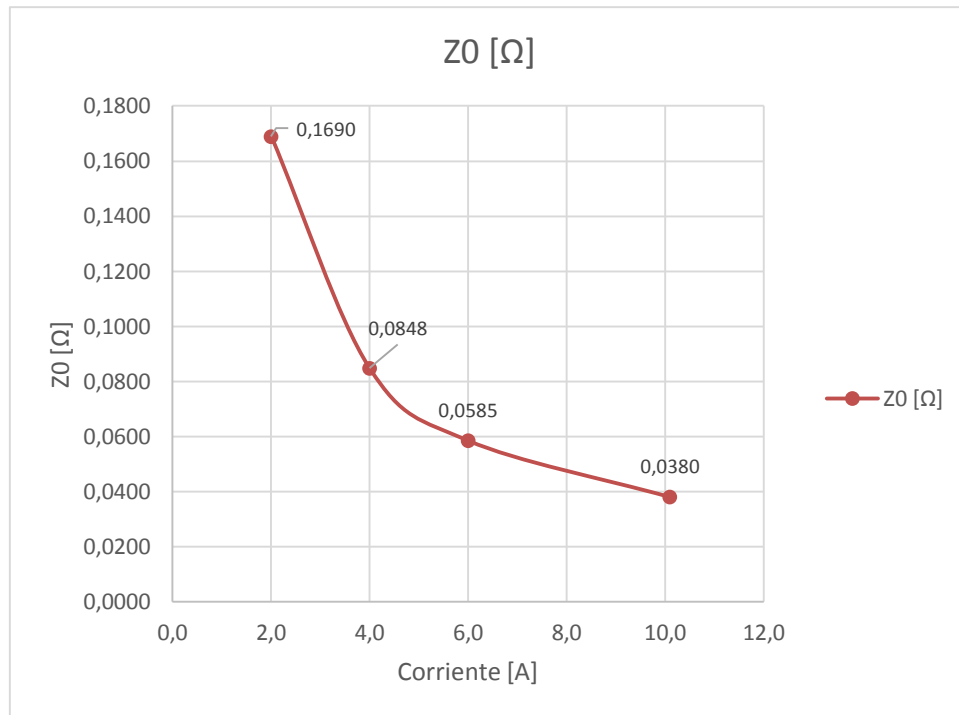


Tabla 67. Impedancias de secuencia cero para la línea 18-14 a frecuencia 360 Hz.

I [A]	V [V]	Z_0 [Ω]
2,1	0,345	0,1643
4,0	0,343	0,0858
6,0	0,356	0,0593
10,0	0,403	0,0403

Figura 135. Impedancias de secuencia cero para la línea 18-14 a frecuencia 360 Hz.



En esta ocasión se puede observar el cambio en la impedancia al variar la corriente y mantener la frecuencia constante. A mayor corriente, menor es la Z0 en cada una de las líneas.

Los resultados de la caracterización de las líneas de transmisión serán útiles para posteriores trabajos de grado donde se implemente el sistema de potencia y se realice un análisis de fallas.

9 CONCLUSIONES

- Se realizó el diseño de la parte eléctrica de un sistema de potencia y se especificaron por medio de simulaciones, las condiciones de operación nominal con las que este debe trabajar en estado estable. Los resultados muestran que esta red trabaja con valores de fácil manejo, por lo cual implementar un sistema con base en este diseño, será muy importante para fortalecer las herramientas con las que se dispone en el laboratorio de máquinas.
- Se elaboró un diseño estructural del sistema de potencia y se detallaron las características físicas y las dimensiones de los soportes y las cajas, sobre las cuales se van a ubicar los elementos eléctricos y electrónicos. El diseño permite ubicar los elementos en orden para garantizar tanto la seguridad, como la comodidad en el momento de poner en operación el sistema.
- Dado que los elementos del sistema de potencia: generación, transmisión, barrajes y carga, se diseñaron en forma modular, su interconexión se puede realizar efectivamente al posicionar cada uno de estos a conveniencia dentro del espacio de trabajo disponible. Adicionalmente, la estructura metálica de soporte cumple con las especificaciones necesarias para albergar de forma práctica y segura, los elementos de control y potencia del módulo de generación. Su diseño contempla los aspectos propios de cada uno de sus componentes, tales como: distancias adecuadas para la ventilación del variador de velocidad, protección para los circuitos electrónicos contra ruido electromagnético, distancias apropiadas para los diferentes acoples mecánicos existentes en el módulo y una orientación de los elementos teniendo en cuenta la seguridad del operador.
- Se seleccionaron cada uno de los elementos y materiales que conforman la parte física del sistema de potencia, de tal forma que garantizaran el correcto funcionamiento al momento de la implementación. Los componentes se eligieron

por su fácil consecución en el mercado regional y por el bajo costo comparado con los precios de los elementos que generalmente se usan en los laboratorios.

- Se construyeron de forma artesanal tres líneas de transmisión acopladas entre sí a través de un núcleo magnético y posteriormente se realizó la caracterización de cada una de ellas. A causa del alto índice de permeabilidad de la ferrita, se lograron obtener valores de inductancias que son aceptables. Las líneas de transmisión sin embargo, no tienen un comportamiento lineal respecto a la corriente, ya que el material ferromagnético no presenta esta característica. De esta forma se obtiene una inductancia que varía en función de la corriente.
- A partir de las características físicas de las líneas de transmisión y con base en las dimensiones, se pudo obtener un modelo matemático para la inductancia total de la línea por fase en función de la geometría.
- Este trabajo de grado representa un paso importante en el desarrollo académico de los estudiantes de Ingeniería Eléctrica, gracias a que brinda las pautas necesarias y cumple con los pasos iniciales, para la futura implementación de un sistema eléctrico de potencia en el Laboratorio de Máquinas Eléctricas de la Escuela.
- Aparte de la implementación, se pueden elaborar trabajos que tengan como objetivo el análisis de fallas y la coordinación de protecciones. También se tiene la posibilidad de transportar la energía en corriente continua, ya que en el alternador permanecerán los diodos rectificadores.

10 RECOMENDACIONES

- Para implementar las líneas con núcleos de ferrita en el sistema de potencia, se recomienda reducir el número de vueltas de los devanados a una o dos espiras como se indica en la sección 4.10, tabla 12. También se puede hacer con el uso de entrehierros, lo cual no se especifica en este libro.
- Las líneas de transmisión que se caracterizaron presentan desbalances de corriente, debido a que las tres columnas de los núcleos no tienen igual medida. Se recomienda utilizar núcleos trifásicos para disminuir estas diferencias, lo cual no fue posible en este trabajo de grado por la dificultad para encontrarlos en el mercado.

11 OBSERVACIONES

- Actualmente se tiene una herramienta que realiza el control de potencia generada por los alternadores desde un computador, con el uso de la tarjeta NI USB-6009 para realizar la conexión entre este y el variador de velocidad. El trabajo de grado se titula: “Sistema para evaluar el comportamiento de un alternador de automóvil en generación eólica”, elaborado por los estudiantes Laura Burgos Grateron y Diego Emilio Sierra Galindo. Adicionalmente, se está diseñando un circuito para el manejo de la excitación en el proyecto titulado: “Control de campo de un alternador de automóvil” elaborado por la estudiante Natalia Franco.

BIBLIOGRAFÍA

ALEXANDER Charles. K. y SADIKU, Matthew. N. O. Fundamentos de Circuitos Eléctricos, 3ra. ed. México: McGraw-Hill, 2006, pp. 555-577.

BURGOS, Laura y SIERRA, Diego. E, “Sistema para evaluar el comportamiento de un alternador de automóvil en generación eólica”. Trabajo de grado Ingenieros Electricista y Electrónico. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico- Mecánicas, Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones, 2015.

DUNCAN GLOBER, J. y MULUCUTLA S., Sarma. Sistemas de Potencia Análisis y Diseño, 3ed. Buenos Aires, Thomson, 2003. pp. 5-23, 208-225, 356-380.

DUNCAN GLOBER, J. y MULUCUTLA S., Sarma. Sistemas de Potencia Análisis y Diseño, 3ed. Buenos Aires, Thomson, 2003. pp. 5-23, 208-225, 356-380.

GRAINGER. Jhon. J y STEVENSON, William. D. Análisis de Sistemas de Potencia. México: McGraw-Hill, 1996, pp. 151, 183-201.

MORA, Jesus Fraile. Máquinas Eléctricas, 5ta. ed. España: McGraw-Hill, 2003, pp. 1-39, 386-387, 658-681.