



POSGRADOS

MAESTRÍA EN

ELECTRICIDAD

RPC-SO-22-No.325-2018

OPCIÓN DE
TITULACIÓN:

PROYECTOS DE DESARROLLO

TEMA:

DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA PARAMETRIZACIÓN
DEL EQUIPAMIENTO ELÉCTRICO EN CENTRALES DE
GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA

AUTOR:

JOHN PAÚL DÍAZ YÉPEZ

DIRECTOR:

JUAN ENRIQUE CHÁVEZ CÁRDENAS

CUENCA- ECUADOR
2022

Autor:



John Paúl Díaz Yépez

Ingeniero Eléctrico.

Candidato a Magíster en Electricidad, Mención Sistemas Eléctricos de Potencia por la Universidad Politécnica Salesiana - Sede Cuenca

jdiaz@est.ups.edu.ec

insteltronic@gmail.com

Director:



Juan Enrique Chávez Cárdenas

Ingeniero Eléctrico.

Magíster en Administración de Negocios del Sector Eléctrico.

jchavezcardenas@hotmail.com

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2022 Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

DÍAZ YÉPEZ JOHN PAÚL

DESARROLLO DE UN MODELO PARA LA PARAMETRIZACIÓN DEL EQUIPAMIENTO ELÉCTRICO EN CENTRALES DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA

Agradecimientos

El presente trabajo de titulación está dedicado a mi esposa Johny y mi padre Mateo.

Este trabajo se ha realizado gracias al esfuerzo y dedicación de mi esposa y de mi padre que supieron motivarme en todo momento para culminar con la maestría y enseñarme que el esfuerzo y dedicación tienen su recompensa.

Gracias a la tutoría y apoyo del Ing. Juan Chávez para poder desarrollar con plenitud éste trabajo.

Gracias a todos los que contribuyeron con sus conocimientos e información muy valiosa con la cual se pudo completar el trabajo de titulación.

Índice general

Índice de Contenidos	6
Índice de Figuras	6
Índice de Tablas	11
Abstract	14
1. Introducción	15
1.1. Planteamiento del Problema	16
1.2. Objetivos.....	17
1.2.1. Objetivo general	17
1.2.2. Objetivos específicos.....	17
1.3. Justificación	17
1.4. Organización del manuscrito.....	18
2. Fundamento Teórico	19
2.1. Introducción	19
2.2. Complejo Hidroeléctrico Paute Integral	19
2.2.1. Paute Mazar: (170 MW)	20
2.2.2. Paute Molino: (1.100 MW)	22
2.3. Modelos de los Equipos que Conforman la Central Hidroeléctrica	25
2.3.1. Líneas	36
2.3.2. Sistemas de Distribución	72
2.3.3. Subestaciones:	73
2.3.4. Alimentadores	73
2.3.5. Dispositivos de corte y maniobra.	73
2.3.6. Análisis de los sistemas de distribución	73
2.3.7. Subestación Molino	74

2.4. Tipo de Torres.....	75
3. Levantamiento de Información Correspondiente al Equipamiento de las Centrales Hidroeléctricas	76
3.1. Introducción	76
3.2. Central Hidroeléctrica Mazar	76
3.2.1. Casa Máquinas Mazar	76
3.2.2. Turbina de Mazar.....	77
3.2.3. Generadores de Mazar.....	78
3.2.4. Transformadores de Mazar.....	79
3.2.5. Subestación Mazar.....	82
3.2.6. Placas de los trafos de Mazar.....	82
3.2.7. Cable de 230kV 1x500mm ² XLPE de Mazar.....	88
3.2.8. Cargas de Mazar.....	90
3.2.9. Torres.....	93
3.2.10. Cargas Presa	96
3.3. Central Hidroeléctrica Molino.....	97
3.3.1. Generadores de Molino	97
3.3.2. Transformadores de Molino	99
3.3.3. Cables de Molino	104
3.3.4. Autotransformadores.....	111
3.3.5. Interconexión Molino - Daniel Palacios.....	112
3.3.6. Subestación Molino	113
3.3.7. Interconexión Daniel Palacios - Mazar	114
3.3.8. Cargas Molino	115
3.3.9. Análisis de Flujo de potencia y cortocircuito	117
4. Diagramas unifilares y parametrización	118
4.1. Introducción	118
4.2. Desarrollo	118
4.2.1. Carga de Parámetros de las centrales hidroeléctricas en el programa Power Factory	123
5. Simulaciones del Equipamiento Eléctrico de las Centrales Mazar y Molino	145
5.1. Introducción	145
5.2. Flujo de potencia.....	145
5.2.1. Escenario operativo al 60 %	146
5.2.2. Escenario operativo al 100 %	150
5.2.3. Corto circuito norma IEC 60909 Trifásico.....	154
5.2.4. Corto circuito norma IEC 60909 Bifásico.....	157

5.2.5. Corto circuito norma IEC 60909 Monofásico.....	158
5.2.6. Corto circuito norma ANSI con falla trifásica diagrama Sub- estacion Paute Molino	159
6. Análisis de los Resultados	160
6.1. Introducción	160
6.2. Resultados del proceso de simulación	160
6.2.1. Flujo de potencia.....	160
7. Conclusiones y Recomendaciones	164
7.1. Introducción	164
7.2. Conclusiones.....	164
7.3. Recomendaciones.....	165
Glosario	166
Referencias	166

Índice de Figuras

2.1. Complejo Hidroeléctrico Paute Integral. Fuente: Unidad de Negocio CELEC SUR[1].....	20
2.2. Presa Mazar. Fuente: Unidad de Negocio CELEC SUR[1].....	21
2.3. Casa de Máquinas Central Mazar. Fuente: Unidad de Negocio CELEC SUR[1].....	21
2.4. Casa de Máquinas Central Molino. Fuente: Unidad de Negocio CELEC SUR [1].....	23
2.5. Diagrama de un generador hidroeléctrico[2]	26
2.6. Circuito equivalente en el eje directo d. Fuente: El autor.....	26
2.7. Circuito eléctrico equivalente en el eje de cuadratura q – rotor de polos salientes. Fuente: El autor.....	27
2.8. Circuito eléctrico equivalente en el eje de cuadratura q – rotor cilíndrico. Fuente: El autor	27
2.9. Ficha de información básica en la ventana de características del generador. Fuente: El autor	31
2.10. Características del generador mediante el desplegable de edición enType. Fuente: El autor	31
2.11. Biblioteca de generadores de PowerFactory. Fuente: El autor	32
2.12. Edición del tipo de generador en la pestaña Basic . Fuente: El autor	32
2.13. Límites de potencia reactiva del generador. Fuente: El autor	33
2.14. Selección los límites de potencia reactiva del generador. Fuente: El autor	33
2.15. Submenú de edición que representa las características del generador. Fuente: El autor	34
2.16. Selección de la celda referente a las características del generador. Fuente: El autor.....	34
2.17. Edición del elemento Terminal. Fuente: El autor	35

2.18. Ventana flujo de cargas referente a las características de los generadores. Fuente: El autor	35
2.19. Componentes de secuencias para tensiones trifásicas. Fuente: El autor.....	37
2.20. Circuito de secuencia cero equivalentes. Fuente: El autor	38
2.21. Circuito de secuencia positiva equivalente. Fuente: El autor.....	38
2.22. Circuito de secuencia negativa equivalente. Fuente: El autor.....	39
2.23. Modelos de Impedancias de fallas para sistemas de potencia. Fuente: El autor.....	39
2.24. Red de dos puertos. Fuente: El autor.....	40
2.25. Circuito línea corta. Fuente: El autor	41
2.26. Línea media. Fuente: El autor.....	42
2.27. Sección de la línea larga. Fuente: El autor.....	43
2.28. Sección transversal de un cable de un solo núcleo que incluye el núcleo, la vaina y la armadura. Fuente: El autor.....	45
2.29. Información de conductores, capacidad de corriente[3].....	47
2.30. Opciones de líneas. Fuente: El autor	49
2.31. Opciones para editar una línea y tipos de línea. Fuente: El autor.....	49
2.32. Librería para líneas de PowerFactory. Fuente: El autor	50
2.33. Barra sencilla. Fuente: El autor.....	51
2.34. Configuración en H. Fuente: El autor.....	52
2.35. Barra principal y de transferencia. Fuente: El autor	52
2.36. Barra doble. Fuente: El autor	53
2.37. Doble barra con seccionador by-pass. Fuente: El autor	54
2.38. Doble barra con seccionador de transferencia. Fuente: El autor.....	54
2.39. Barra doble más barra de transferencia. Fuente: El autor.....	55
2.40. Barras y terminales. Fuente: El autor	55
2.41. Transformador[4]	56
2.42. Diagrama equivalente transformador de doble arrollamiento [5] .	56
2.43. Diagramas equivalentes del transformador con arrollamiento doble. Fuente: [5].....	57
2.44. Diagrama secuencia positiva del transformador de 3 devanados, tomas modeladas en el punto de estrella [5]	58
2.45. Cortocircuito en el lado MV, circuito abierto en el lado LV [5]	59
2.46. Modelo de ecuencia positiva del transformador de 3 devanados, tomas modeladas en terminales [5]	59
2.47. Representación del transformador [6]	61
2.48. Diagrama de red de secuencia 0 en el transformador[6]	61

2.49. Diagrama de secuencia 0 del trafo de devanado triple.[6].....	62
2.50. Conexión de transformadores de devanado triple [6]	62
2.51. Auto-transformador YN-yn-d. Fuente: El autor.....	63
2.52. Conexión de un Cambiador de Taps [7]	63
2.53. Circuito equivalente de la máquina de inducción como generador [8]	64
2.54. Esquema de fasores del generador de inducción [8]	65
2.55. Diagrama equivalente del motor de inducción sin la resistencia Rc. Fuente: El autor	65
2.56. Diagrama Thevenin en c-d [8]	66
2.57. Ventana de características de los transformadores. Fuente: El autor	68
2.58. Métodos de arranque de motores [9]	69
2.59. Modelo 4 hilos conexión a tierra [10]	71
2.60. Modelo de 3 hilos [10]	72
2.61. Figura 2.70: Sistema Nacional Interconectado: Fuente: CELEC EP.[11]	74
2.62. Estructuras para transmisión en 230 kV [6].....	75
2.63. Torres a 138 kV [6].....	75
3.1. Distribución del Generador y la turbina en casa de máquinas. Fuen- te: CELEC EP[11].....	77
3.2. Casa de máquinas. Fuente: CELEC EP.[11].....	78
3.3. Representaciones de la turbina y casa de máquinas. Fuente: CE- LEC EP.[11]	80
3.4. Placa del transformador TSA1 Fuente: CELEC EP[11]	83
3.5. Placa del transformador TSA2 Fuente: CELEC EP[11]	83
3.6. Placa del transformador TES Fuente: CELEC EP[11]	84
3.7. Placa del transformador TPR Fuente: CELEC EP[11]	84
3.8. Placa del transformador TAG1 Fuente: CELEC EP[11]	85
3.9. Placa del transformador TAG2 Fuente: CELEC EP[11]	86
3.10. Conexión transformadores de sistemas auxiliares. Fuente: CELEC EP.[11]	87
3.11. Corte del cable 1x500mm ² aluminio XLPE 230 Kv. Fuente: CELEC EP.[11]	89
3.12. Medidas de torre de suspensión. Fuente: CELEC EP[11].....	95
3.13. Torre suspensión desde presa hasta las centrales: Fuente el Autor	96
3.14. Generador Molino. Fuente: CELEC EP[11].....	98
3.15. Vista del cable a 230KV. Fuente: Celec	107
3.16. Especificaciones del cable a 230KV. Fuente: Celec	108

3.17. Disposición de cables a 230KV. Fuente: Celec.....	109
3.18. Corte transversal del cable a 138KV. Fuente: Elmecsa	110
3.19. Corte real del cable a 138KV de la unidad 4. Fuente: Celec	111
3.20. Disposición del cable a 138KV. Fuente: Celec	111
3.21. Sistema Molino-Presa-Mazar[12]	113
3.22. S/E Molino dentro del SNI. Fuente: CELEC EP.[11].....	114
4.1. Diagrama Unifilar Central Hidroeléctrica Mazar. Fuente: CELEC EP.....	119
4.2. Diagrama Unifilar Molino - Presa D:P. – Sopladora – Guarumales. Fuente: CELEC EP	120
4.3. Diagrama Unifilar Central Hidroeléctrica Molino. Fuente: CELEC EP	121
4.4. Diagrama Unifilar de la S.E. Paute Molino. Fuente: CELEC EP.....	122
4.5. Esquema unifilar de la Hidroeléctrica Mazar. Fuente: El autor.....	124
4.6. Esquema Mazar barra de 230KV. Fuente: El autor	125
4.7. Esquema Mazar barra de 13.8KV. Fuente: El autor	126
4.8. Esquema Mazar barra de 480V. Fuente: El autor.....	127
4.9. Diagrama Central Hidroeléctrica Molino Presa. Fuente: El autor	128
4.10. Diagrama Central Hidroeléctrica Molino Presa barras de 13.8KV sección izquierda. Fuente: El autor	129
4.11. Diagrama Central Hidroeléctrica Molino Presa barras de 13.8KV sección derecha. Fuente: El autor.....	130
4.12. Diagrama Central Hidroeléctrica Molino Presa barra 480V sección izquierda. Fuente: El autor.....	131
4.13. Diagrama Central Hidroeléctrica Molino Presa barra de 480V sec- ción derecha. Fuente: El autor.....	132
4.14. Diagrama Unifilar subestación Paute Molino. Fuente: el Autor.....	133
4.15. Diagrama Unifilar Molino 480V. Fuente: el Autor	134
4.16. Modelación del Cable para la Fase AB. Fuente: el Autor.....	135
4.17. Cuadro resumen del Cable. Fuente: el Autor	136
4.18. Datos ingresados al programa del Cable. Fuente: el Autor.....	137
4.19. Disposición del Cable. Fuente: el Autor	137
4.20. Modelación del Cable para la Fase C. Fuente: el Autor.....	138
4.21. Cuadro resumen del Cable de 230kV Fase C. Fuente: el Autor	139
4.22. Datos ingresados del Cable de 230kV Fase C. Fuente: el Autor	140
4.23. Disposición del Cable de 230kV Fase C. Fuente: el Autor	140
4.24. Modelación del Cable a 230kV Mazar. Fuente: el Autor	141
4.25. Cuadro resumen del Cable de 230kV Mazar. Fuente: el Autor	142

4.26. Datos ingresados al programa del Cable de 230kV Mazar. Fuente: el Autor	143
4.27. Disposición del Cable de 230kV Mazar. Fuente: el Autor	144
5.1. Simulación Flujo de Potencia de Molino Presa al 60%. Fuente: el Autor	146
5.2. Simulación Flujo de Potencia Mazar al 60%. Fuente: el Autor	147
5.3. Simulación Flujo de Potencia de la Subestación Paute Molino al 60%. Fuente: el Autor	148
5.4. Simulación Flujo de Potencia Molino 480V al 60%. Fuente: el Autor.	149
5.5. Modelación Flujo de Potencia de Molino Presa 100%. Fuente: el Autor	150
5.6. Simulación Flujo de Potencia de Mazar 100%. Fuente: el Autor	151
5.7. Simulación Flujo de Potencia de la Subestación Paute Molino 100%. Fuente: el Autor	152
5.8. Simulación Flujo de Potencia Molino 480V al 100%. Fuente: el Au- tor	153
5.9. Simulación Corto Circuito Molino Presa. Fuente: el Autor	154
5.10. Modelación Corto Circuito Central Hidroeléctrica Mazar. Fuente: el Autor	155
5.11. Simulación Corto Circuito Subestación Paute Molino	156
5.12. Simulación Corto Circuito de una falla bifásica en el diagrama Molino Presa	157
5.13. Simulación Corto Circuito con una falla monofásica en el diagra- ma Subestacion Paute Molino	158
5.14. Simulación Corto Circuito con una falla trifásica en el diagrama Subestacion Paute Molino	159

Índice de Tablas

2.1. Características del piso principal. Fuente: Unidad de Negocio CE- LEC SUR[1]	22
2.2. Generador. Fuente: Unidad de Negocio CELEC SUR[1]	22
2.3. Características del Rotor. Fuente: Unidad de Negocio CELEC SUR[1]	22
2.4. Características de la turbina. Fuente: Unidad de Negocio CELEC SUR[1].....	22
2.5. Características constructivas del generador. Fuente: Unidad de Ne- gocio CELEC SUR [1]	24
2.6. Generador de Emergencia. Fuente: Unidad de Negocio CELEC SUR [1]	24
2.7. Turbina del generador de emergencia. Fuente: Unidad de Nego- cio CELEC SUR [1].....	24
2.8. Especificaciones de la turbina Pelton. Fuente: Unidad de Negocio CELEC SUR [1].....	25
2.9. Especificaciones por Fases AB y C. Fuente: Unidad de Negocio CELEC SUR [1].....	25
2.10. Especificaciones máquina síncrona. Fuente: CELEC EP.[1]	28
2.11. Resistividades y el coeficiente de temperatura de los metales. Fuen- te: El autor.....	45
2.12. Conductores ACSR [6]	50
3.1. Especificaciones de Casa de Máquinas. Fuente: CELEC EP[11].....	77
3.2. Especificaciones de las Turbinas. Fuente: CELEC EP[11].....	77
3.3. Central Hidroeléctrica Mazar. Fuente: CELEC EP[11]	79
3.4. Especificaciones de los Transformadores. Fuente: CELEC EP[11] .	79
3.5. Datos del Transformador TPR. Fuente: CELEC EP[11]	80
3.6. Datos del Transformador TES Fuente: CELEC EP[11].....	81

3.7. Datos de los Transformadores TPSA (3 transformadores monofásicos). Fuente: CELEC EP.[11]	81
3.8. Transformador TSA1 y TSA2. Fuente: CELEC EP.[11]	81
3.9. Transformador TSAU1 y TSAU2. Fuente: CELEC EP[11].....	81
3.10.Transformador TAG1 y TAG2 Fuente: CELEC EP[11]	82
3.11.Subestación GIS. Fuente: CELEC EP[11]	82
3.12.Presa. Fuente: CELEC EP[11]	88
3.13.Datos de los conductores de los TPSA (fases). Fuente: CELEC EP	90
3.14.Datos del conductor de los TPSA (neutro). Fuente: CELEC EP	90
3.15.Datos del conductor de los TSA (desde el TDSM hacia el TDCM). Fuente: CELEC EP[11]	90
3.16.Cables Aislados. Fuente: CELEC EP.[11]	90
3.17.Datos de cargas instaladas en la central Mazar. Fuente: CELEC EP[11].....	91
3.18.Tablero TDCGCM. Fuente: CELEC EP[11].....	92
3.19.Cargas del TDES. Fuente: CELEC EP[11]	93
3.20.Cargas del TDTA. Fuente: CELEC EP[11]	93
3.21.ubicación de estructuras. Fuente: CELEC EP[11]	94
3.22.Cargas de Servicios Auxiliares del desagüe de fondo. Fuente: CE- LEC EP[11]	97
3.23.Cargas de Servicios Auxiliares en el área de la Presa. Fuente: CE- LEC EP[11]	97
3.24.Central hidroeléctrica Molino. Fuente: CELEC EP[11]	98
3.25.Transformador principal Fase AB. Fuente: CELEC EP[11].....	99
3.26.Transformador principal Fase C. Fuente: CELEC EP	100
3.27.Transformador TRJ. Fuente: CELEC EP[11].....	101
3.28.Transformador TRK. Fuente: CELEC EP[11]	101
3.29.Transformadores auxiliares Fase AB. Fuente: CELEC EP.[11]	102
3.30.Transformadores de servicios auxiliares de Fase C. Fuente: CELEC EP.[11]	103
3.31.Transformadores de Excitación. Fuente: CELEC EP[11].....	104
3.32.Cables de conexión. Fuente: CELEC EP	104
3.33.Autotransformador. Fuente: CELEC EP[11]	112
3.34.Línea presa 1. Interconexión Molino – Presa Daniel Palacios. Fuen- te: CELEC EP.[11]	112
3.35.Línea presa 2. Interconexión Molino – Presa Daniel Palacios. Fuen- te: CELEC EP[11].....	113

3.36.Línea Molino 1. Interconexión desde Presa Daniel Palacios hacia Mazar. Fuente: CELEC EP.[11]	114
3.37.Línea Molino 2. Interconexión desde la Presa Daniel Palacios a Mazar. Fuente: CELEC EP.[11]	115
3.38.Centro de Cargas de las unidades de la fase C . Fuente: CELEC EP[11].....	115
3.39.Centro de Cargas de las Unidades de la fase AB. Fuente: CELEC EP[11].....	116
3.40.Centro de Cargas de Casa de Máquinas. Fuente: CELEC EP[11]	116
6.1. Resultados obtenidos en la modelación de flujo de carga. Fuente: El autor	161
6.2. Modelación Cortocircuito falla bifásica IEC. Fuente: El autor	162
6.3. Modelación Cortocircuito norma ANSI falla trifásica. Fuente: El autor	163

Abstract

This technical project arises from the need to have models to run simulations that allow adequate management, operational decision making in the energy production process, it is worth talking that this process needs several fundamental aspects for its correct operation, among them, sustained decision making and execution activities with quality, effectiveness and efficiency.

Based on what has been described, the research focuses on determining the parameters of the equipment, when we have established these parameters, the mathematical models are built and later, with these models, simulations are benefit the operation activities, carry out studies of various circumstances that may arise in the electrical systems of generation plants.

Once the equipment data has been contrasted and by using the PowerFactory Electrical Systems Simulation software from DlgSILENT [13], a corresponding model of the equipment of the hydroelectric generation plants will be developed, for this purpose the data obtained from each piece of equipment that makes up the unit, through which the simulations corresponding to flows and short circuits will be analyze the behavior of each unit the hydroelectric generation system.

Capítulo 1

Introducción

En Ecuador actualmente se utiliza de forma mayoritaria la generación hidroeléctrica para proveer de energía eléctrica a todo el país, por lo que se necesita que el sistema de generación sea confiable, eficiente y que suministre energía de calidad.

Hoy en día se pueden encontrar centrales hidroeléctricas en cascada como Mazar y Molino que utilizan la fuerza de los afluentes del río denominado Paute para generar electricidad, para ello se debe contar con un sistema de modelación y simulación del equipamiento eléctrico que permita realizar un análisis para toma de decisiones que garantice un sistema confiable y seguro.

CELECSUR es la Unidad de Negocio encargada de la generación eléctrica, puesto que siempre existen actualizaciones en los equipos, se necesita actualizar las bases de datos de los mismos lo cual permite contar con modelos confiables para realizar simulaciones y en base al análisis de los resultados optimizar las tareas de operación y mantenimiento, así como también realizar el correspondiente análisis de fallas. Además, se contribuye con el adecuado dimensionamiento del equipamiento eléctrico y en general el desarrollo de adecuadas especificaciones técnicas de equipos en caso de modificaciones o expansiones futuras.

En la actualidad la empresa de generación eléctrica no posee su equipamiento eléctrico modelado en algún programa de simulación, con el presente trabajo se pueden modelar las centrales eléctricas y realizar múltiples estudios, tales como flujos de carga, cortocircuitos, coordinaciones de protecciones, análisis de comportamiento transitorio y dinámico entre otros. En algunos casos sólo se tiene una parte modelada pero no está actualizada, por tal motivo se decidió modelar el equipamiento eléctrico de las centrales Mazar y Molino.

A partir de la necesidad de tener un modelo actualizado de las centrales hidroeléctricas, se pueden realizar todo tipo de simulaciones para diferentes casos de análisis e identificar cómo reacciona el equipamiento eléctrico. Con éstos planteamientos es posible buscar las soluciones más acertadas que permitan eliminar o reducir el nivel de afectaciones que producen las fallas. Entre éstas se tiene la afectación al equipamiento que fue diseñado y construido para operar en condiciones normales. Es decir, dentro de parámetros específicos de trabajo de la unidad de generación, todos los equipos son susceptibles de falla, lo que afecta su correcto funcionamiento y las características propias de trabajo.

A través del programa PowerFactory [14], se procede a desarrollar el diseño del circuito correspondiente a las centrales hidroeléctricas Mazar y Molino, siendo el motivo de estudio del presente trabajo. Para éste fin se recopilan y se actualizan los datos que posee cada equipo que conforma la unidad de generación eléctrica, se analizan éstos datos y cuando se validan, se utilizan para poder cargar los mismos al diseño realizado en el simulador. Se verifica que las simulaciones trabajen adecuadamente, realizando las pruebas correspondientes para el análisis de fallas en estado estacionario y se verifica los diferentes aspectos del funcionamiento del equipamiento eléctrico. Una vez comprobado el mismo, se procede a realizar las diferentes pruebas para el análisis de las unidades de generación.

1.1. Planteamiento del Problema

El presente trabajo se realiza dada la necesidad de disponer de modelos que permitan la simulación en estado estacionario y dinámico del comportamiento y desempeño de los SEP en centrales hidroeléctricas que soporten la toma de decisiones operativas de mantenimiento y de inversión, para garantizar la calidad, confiabilidad y disponibilidad de la energía generada en las centrales Mazar y Molino.

La utilización de instrumentos especializados, por ejemplo, el programa Power Factory Digsilent, permite recrear los circuitos que conforman el sistema de generación eléctrica en las centrales que conforman el complejo hidroeléctrico Hidropaute. Se han realizado algunas simulaciones para comprobar el uso del programa y por tal motivo se plantea el proyecto para simular de forma completa el equipamiento eléctrico de las centrales hidroeléctricas Mazar y Molino desde las subestaciones de 230 y 138 kV hasta los sistemas auxiliares

de 480V.

Con la realización del presente proyecto se hace un aporte a la Central Hidroeléctrica para la digitalización de sus circuitos eléctricos, que permiten simular las diversas condiciones para estudios de flujo de carga, coordinación de protecciones, cortocircuitos, análisis transitorios, análisis dinámicos, etc, para el equipamiento actual y cambios o ampliaciones en sus instalaciones.

1.2. Objetivos

El desarrollo y análisis está centrado en la modelación del equipamiento eléctrico, simulaciones mediante herramientas específicas de análisis de Sistemas de Potencia. Para este fin se establecieron los siguientes objetivos generales y específicos:

1.2.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo para la parametrización del equipamiento eléctrico en centrales de generación hidroeléctrica.

1.2.2. Objetivos específicos

- Analizar el comportamiento de centrales hidroeléctricas mediante el uso de un software de simulación para Sistemas Eléctricos de Potencia desde las barras de subestación de 230kV hasta los sistemas auxiliares a 480V.
- Definir los modelos y parámetros de las centrales de generación Molino y Mazar más adecuados para estudio de estado estacionario, incluidas las subestaciones de 230kV.
- Definir los modelos y parámetros de las centrales de generación Molino y Mazar más adecuados para estudios dinámicos, incluidas las subestaciones de 230kV.

1.3. Justificación

En la actualidad, Ecuador utiliza de forma mayoritaria la generación hidroeléctrica, para proveer de energía eléctrica a todo el país. Es necesario que el

sistema de generación sea confiable y que suministre energía de calidad.

Por tal motivo se utiliza un simulador en donde es posible analizar flujos de carga, o realizar la coordinación de protecciones, cortocircuitos de SEPS con la finalidad de determinar la respuesta del sistema desde las barras de subestaciones hasta los sistemas auxiliares en las centrales que conforman el complejo hidroeléctrico Paute Integral (Mazar y Molino).

1.4. Organización del manuscrito

La organización del manuscrito del trabajo de titulación se describe a continuación:

En el capítulo 1 se plantea el problema y se detallan los objetivos. En el capítulo 2 se presenta una revisión general de las centrales hidroeléctricas. En el capítulo 3 se realiza el levantamiento de la información de todos los componentes eléctricos de Mazar y de Molino. En el capítulo 4 se detallan los diagramas unifilares de las centrales hidroeléctricas. En el capítulo 5 se realizan las simulaciones con las cuales se verifican. En el capítulo 6 se revisan y analizan los datos obtenidos en las simulaciones y por último, en el capítulo 7 se plantean las conclusiones y recomendaciones que nacen de todo el trabajo realizado y las experiencias adquiridas en cada paso del trabajo de titulación.

Capítulo 2

Fundamento Teórico

2.1. Introducción

El capítulo se encuentra conformado por los antecedentes sobre las centrales hidroeléctricas Molino, Mazar y las subestaciones correspondientes. Además, se presenta la teoría necesaria para modelar los diferentes equipos (Generadores, transformadores, líneas de transmisión, etc.) que conforman las centrales y el uso del programa Power Factory.

2.2. Complejo Hidroeléctrico Paute Integral

El Complejo Hidroeléctrico Integral de Paute se está conformado por la central Mazar, central Molino, central Sopladora y en proyecto la central Cardenillo, utilizando los afluentes del denominado río Paute para crear energía amigable con el ambiente y de este modo, aportar al ajuste del marco energético del Ecuador. La Figura 5.5 muestra este Complejo Hidroeléctrico.



Figura 2.1: Complejo Hidroeléctrico Paute Integral. Fuente: Unidad de Negocio CELEC SUR[1]

2.2.1. Paute Mazar: (170 MW)

Consta de una presa de enrocado de 166 m de altura con pantalla de hormigón, que enmarca un depósito con un volumen completo de 410 Hm³ y una central dentro de la montaña, en donde encontramos los conjuntos turbina-generador y sus respectivos transformadores. La central cuenta con dos turbinas tipo Francis, generando 85 MW cada una que en total entregan los 170 MW de capacidad, con lo cual aportan aproximadamente 800 GWh/año al S.I.N. En la Figura 5.6 se aprecia una vista exterior de la Presa Mazar.



Figura 2.2: Presa Mazar. Fuente: Unidad de Negocio CELEC SUR[1]

Casa máquinas.

Se aprecia ésta estructura en la Figura 5.7



Figura 2.3: Casa de Máquinas Central Mazar. Fuente: Unidad de Negocio CE-LEC SUR[1]

Características de Casa de máquinas.

En las siguientes tablas se visualizan las partes que conforman la casa de máquinas.

Tabla 2.1: Características del piso principal. Fuente: Unidad de Negocio CELEC SUR[1]

Forma	Subterránea
Tamaño (Ancho x longitud x altura)	21m x 62,50m x 41m
Elevación del piso principal	2.006,60 m.s.n.m.
Vol. Hormigón Conv	13.160 m ³

Tabla 2.2: Generador. Fuente: Unidad de Negocio CELEC SUR[1]

Cantidad	dos con eje vertical, refrigerados por viento.
Generación	100 MegaVoltsAmperios

Tabla 2.3: Características del Rotor. Fuente: Unidad de Negocio CELEC SUR[1]

Cantidad Polos	28
Sentido de rotación(vista superior)	Horario

Tabla 2.4: Características de la turbina. Fuente: Unidad de Negocio CELEC SUR[1]

Cantidad	2
Tipo	Francis, eje vertical
Caudal máx	70,55 metros cúbicos/seg

2.2.2. Paute Molino: (1.100 MW)

La central Molino se compone de una presa tipo curva de gravedad de 170 m de altura. Luego, en ese punto, a 8 km de distancia se ubica la casa de máquinas

compuesta de 10 unidades productoras con turbina Pelton, que trabajan con caudal de $200 \text{ m}^3/\text{s}$ [1].

Casa de máquinas.

En la Figura 5.8 , se observa el sumidero subterráneo con turbogeneradores y los transformadores. La entrada principal a Casa de máquinas tiene una longitud de 190 m. El acceso está fijado con hormigón proyectado. Consta de 10 generadores, que se han introducido en dos fases de desarrollo denominadas Fase AB que consta de cinco unidades de 100 MW y la Fase C que consta de cinco unidades de 115 MW cada una, en total 1075 MW.



Figura 2.4: Casa de Máquinas Central Molino. Fuente: Unidad de Negocio CE-LEC SUR [1]

Características de equipos.

Característica Constructiva del Generador.

Cada unidad que se encuentra en la Fase AB son SIEMENS y cada unidad que se encuentra en la Fase C son ANSALDO, una empresa de origen italiano.

El generador se refrigera a través de un entramado AGUA-AIRE, donde se asocian así en 6 refrigeradores (radiadores) iguales situados alrededor del generador. De este modo, el aire del interior del generador se enfría por convección.

Tabla 2.5: Características constructivas del generador. Fuente: Unidad de Negocio CELEC SUR [1]

CARÁCTERÍSTICAS	FASE AB	FASE C
I nom.	4643.9 Amp.	5342.6 Amp.
Potencia	111 MVA	127.7 MVA
Temperatura de Funcionamiento	60°C	60°C
f	60 Hz	60 Hz
Velocidad de Rotación	360 rpm	630 rpm
Conexión del Estator	Y	Y

Generador de Emergencia.
Sus especificaciones son

Tabla 2.6: Generador de Emergencia. Fuente: Unidad de Negocio CELEC SUR [1]

Fases	Tres
Frecuencia	60 Hz
Tensión de Generación	480 V
Potencia	500 KVA

Turbina.

La Tabla 2.7, presenta las especificaciones fundamentales de la turbina del generador de emergencia.

Tabla 2.7: Turbina del generador de emergencia. Fuente: Unidad de Negocio CELEC SUR [1]

Capacidad	401 KW
Tipo	Pelton eje horizontal
Velocidad	1800 revoluciones por minuto
Caudal	88.2 lts/s

Los atributos de la turbina son los que se muestran en la siguiente tabla y nos describen las características principales y representativas de cada una de las unidades de la central y son:

Tabla 2.8: Especificaciones de la turbina Pelton. Fuente: Unidad de Negocio CELEC SUR [1]

Rendimiento	91.83 porciento
Elevación rodete de turbinas	1.323 metro sobre el nivel del mar
Rotación	Sentido horario
Número de inyectores	6
Tipo	Pelton, eje vertical
# de alabes	22

Los atributos de las fases AB y C son

Tabla 2.9: Especificaciones por Fases AB y C. Fuente: Unidad de Negocio CELEC SUR [1]

	FASE AB	FASE C
# de unidades	5	5
Potencia, caída neta	116 MW	122 MW

2.3. Modelos de los Equipos que Conforman la Central Hidroeléctrica

Generador

La función de un generador es convertir un tipo de energía en otra muy diferente. El estator es el componente fijo del generador que transfiere la energía generada a donde se requiera y el rotor es la parte móvil montada sobre un eje que gira impulsado mediante la turbina como se ilustra en la Figura 2.5.

Cuando se produce la interacción del generador con el sistema de energía puede resultar un proceso complicado y puede ser en polos de respuesta ligeramente amortiguados que pueden ser estimulados por la acción rápida del regulador, la presencia de oscilaciones en algunas ocasiones produce oscilaciones de potencia indeseables.

Cualquiera de las unidades generadoras debe estar en disponibilidad cuando el CENACE lo requiera.

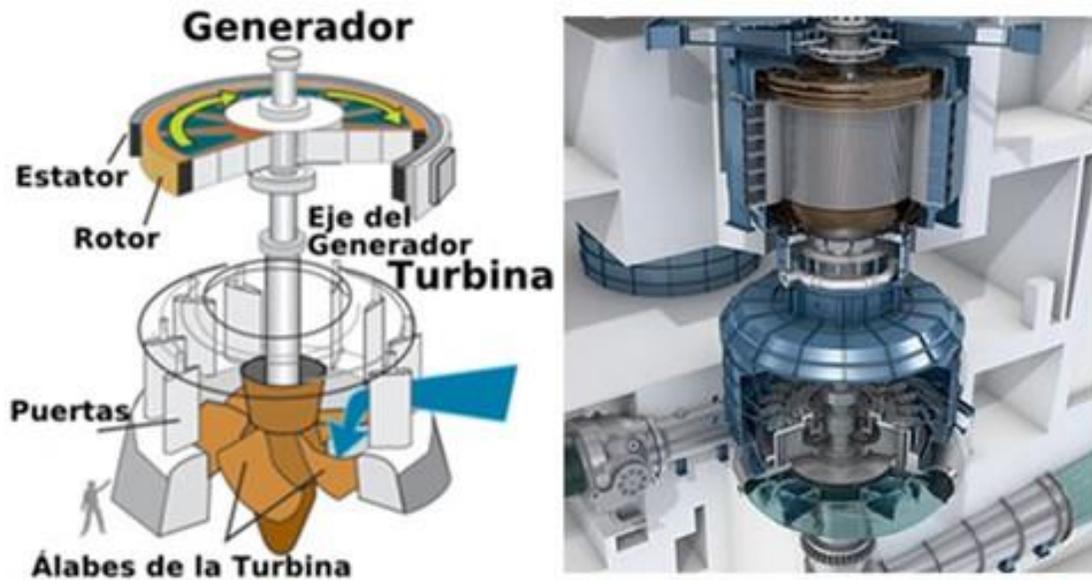


Figura 2.5: Diagrama de un generador hidroelectrico[2]

La representación numérica de la máquina síncrona se presenta en las figuras 2.6 2.7 2.8. Estos modelos están basados y representados en un sistema de referencia de rotor que utiliza coordenadas con marco de referencia dq del programa Power Factory.

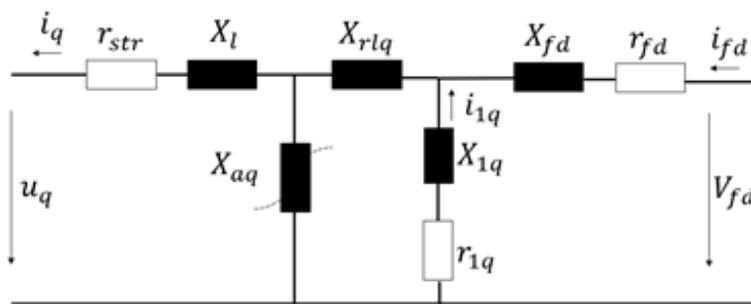


Figura 2.6: Circuito equivalente en el eje directo d. Fuente: El autor

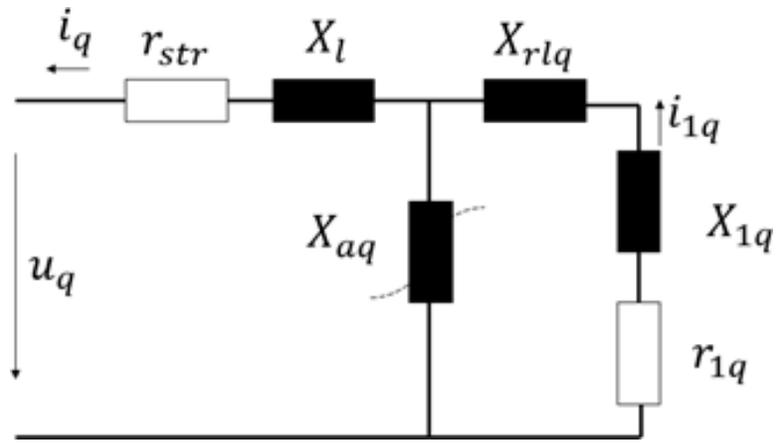


Figura 2.7: Circuito eléctrico equivalente en el eje de cuadratura q – rotor de polos salientes. Fuente: El autor

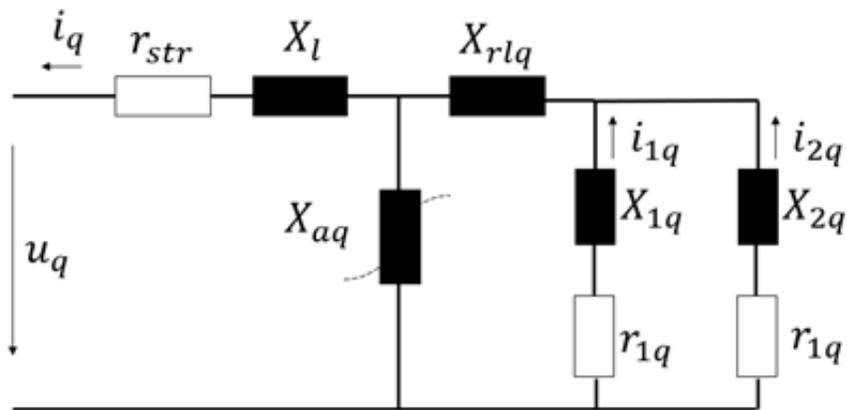


Figura 2.8: Circuito eléctrico equivalente en el eje de cuadratura q – rotor cilíndrico. Fuente: El autor

El eje d del rotor está modelado por dos mallas de rotor que se dirigen al devanado de excitación o campo y al devanado de amortiguamiento 1d. Para el eje de cuadratura q el software mantiene dos modelos, un polo saliente para el

modelo de máquina de rotor que tiene solo el devanado de amortiguamiento 1q y un modelo de máquina de rotor cilíndrico con los devanados de amortiguamiento 1q y 2q. Los parámetros típicos para una máquina síncrona son los parámetros de corto circuito [5].

Dichas especificaciones son

Tabla 2.10: Especificaciones máquina síncrona. Fuente: CELEC EP.[1]

Nombre	Símbolo	Unidad	Descripción
rstr	rstr	p.u.	Resistencia del estator
x1	X1	p.u.	Reactancia del estator
xr1	Xr1d	p.u.	Reactancia de acoplamiento entre el devanado de campo y el de amortiguamiento%
xr1q	Xr1q	p.u.	Reactancia de acoplamiento entre los devanados de amortiguamiento del eje q
xad	Xad	p.u.	Reactancia magnetizante eje d
xaq	Xaq	p.u.	Reactancia magnetizante eje q
xfd	Xfd	p.u.	Reactancia del devanado de excitación eje d
X1d	X1d	p.u.	Reactancia del devanado de amortiguamiento 1d eje d
X1q	X1q	p.u.	Reactancia del devanado de amortiguamiento 1q eje q
X2q	X2q	p.u.	Reactancia del devanado de amortiguamiento 2q eje q
rfd	rfd	p.u.	Resistencia del devanado de excitación eje d
r1d	r1d	p.u.	Resistencia del devanado de amortiguamiento 1d eje d
r1q	r1q	p.u.	Resistencia del devanado de amortiguamiento 1q eje q
r2q	r2q	p.u.	Resistencia del devanado de amortiguamiento 2q eje q

Se presentan las ecuaciones del rotor cilíndrico y se modela el generador con rotor de polos salientes ignorando las variables de bobinado del devanado de amortiguamiento 2q, teniendo como referencia los diagramas de circuitos equivalentes, se puede ir derivando cada una de las ecuaciones resultantes.

La modelación matemática de voltaje en el caso del estator se puede des-

cribir de la siguiente manera

$$\begin{aligned}\mu_d &= -r_{str} \cdot i_d - n \cdot \Psi_q + \frac{1}{\omega_n} \cdot \frac{d\Psi_d}{dt} \\ \mu_q &= -r_{str} \cdot i_q + n \cdot \Psi_d + \frac{1}{\omega_n} \cdot \frac{d\Psi_q}{dt} \\ \mu_0 &= -r_{str} \cdot i_0 + \frac{1}{\omega_n} \cdot \frac{d\Psi_0}{dt}\end{aligned}\quad (2.1)$$

Donde n es la velocidad del rotor y $\omega_n = 2 \cdot \pi \cdot f_{nom}$ es la frecuencia angular nominal. Las ecuaciones de enlace de flujo del estator en los ejes d y q tienen la siguiente forma

$$\begin{aligned}\Psi_d &= -(x_l + x_{ad}) \cdot i_d + x_{ad} \cdot i_{fd} + x_{ad} \cdot i_{1d} \\ \Psi_q &= -(x_l + x_{aq}) \cdot i_q + x_{aq} \cdot i_{2q} + x_{aq} \cdot i_{1q}\end{aligned}\quad (2.2)$$

Las ecuaciones de flujo del estator también se pueden escribir de la siguiente forma

$$\begin{aligned}\Psi_d &= \Psi_{ad} - x_l \cdot i_d \\ \Psi_q &= \Psi_{aq} - x_l \cdot i_q\end{aligned}\quad (2.3)$$

Donde Ψ_{ad} y Ψ_{aq} son los componentes de los ejes d y q del flujo de magnetización

$$\begin{aligned}\Psi_{ad} &= x_{ad}(-i_d + i_{1d} + i_{fd}) \\ \Psi_{aq} &= x_{aq}(-i_q + i_{1q} + i_{2q})\end{aligned}\quad (2.4)$$

Las ecuaciones de enlace de flujo del rotor en los ejes d y q tienen la siguiente forma:

$$\begin{aligned}\Psi_{fd} &= -x_{ad} \cdot i_d + (x_{ad} + x_{rld} + x_{fd}) \cdot i_{fd} + (x_{ad} + x_{rld}) \cdot i_{1d} \\ \Psi_{1d} &= -x_{ad} \cdot i_d + (x_{ad} + x_{rld}) \cdot i_{fd} + (x_{ad} + x_{rld} + x_{1d}) \cdot i_{1d} \\ \Psi_{1q} &= -x_{aq} \cdot i_q + (x_{aq} + x_{rlq}) \cdot i_{2q} + (x_{aq} + x_{rlq} + x_{1q}) \cdot i_{1q} \\ \Psi_{2q} &= -x_{aq} \cdot i_q + (x_{aq} + x_{rlq} + x_{2q}) \cdot i_{2q} + (x_{aq} + x_{rlq}) \cdot i_{1q}\end{aligned}\quad (2.5)$$

Introduciendo los flujos subtransitorios tenemos:

$$\begin{aligned}\Psi'_{d'} &= k_{fd} \cdot \Psi_{fd} + k_{1d} \cdot \Psi_{1d} \\ \Psi'_{q'} &= k_{1q} \cdot \Psi_{1q} + k_{2q} \cdot \Psi_{2q}\end{aligned}\quad (2.6)$$

PowerFactory cuenta con dos modelos de máquinas generadoras [13]: por una parte las máquinas síncronas y por otra las asíncronas. Se pueden utilizar con la actividad de motor o generador. El presente trabajo ha seleccionado las máquinas síncronas. Se utilizan dos pestañas la primera denominada Datos básicos y la segunda llamada Flujo de carga.

- **Basic Data:**
en esta pestaña se aprecia el nombre del generador, se puede seleccionar como: motor o generador. Ver Figura 2.9.
- **Type:**
Como muestra la Figura 2.10, se escogen distintos generadores.
- **Select Global Type:**
esta elección permite elegir los generadores accesibles de la biblioteca. Suponiendo que se elija uno de ellos, se tendrían las cualidades en la Figura 2.11.
- **Select Project Type:**
permite escoger uno de los generadores creados en el diseño.
- **New Project Type:**
diseña un generador de los atributos requeridos como en la Figura 2.12
La Figura 2.13, presenta Load Flow siendo una pestaña que indica los límites de reactiva siendo por defecto del programa algunos valores como en la Figura 2.14.
- **Remove Type:**
Permite borrar el generador elegido.

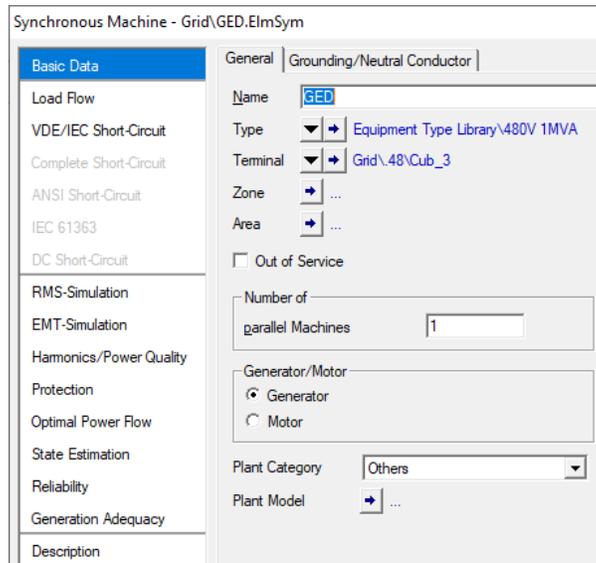


Figura 2.9: Ficha de información básica en la ventana de características del generador. Fuente: El autor

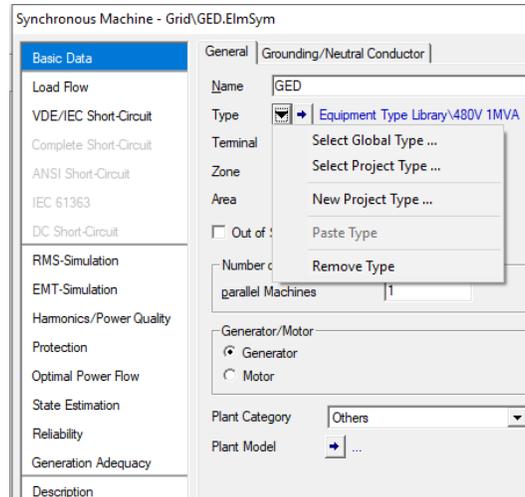


Figura 2.10: Características del generador mediante el desplegable de edición enType. Fuente: El autor.

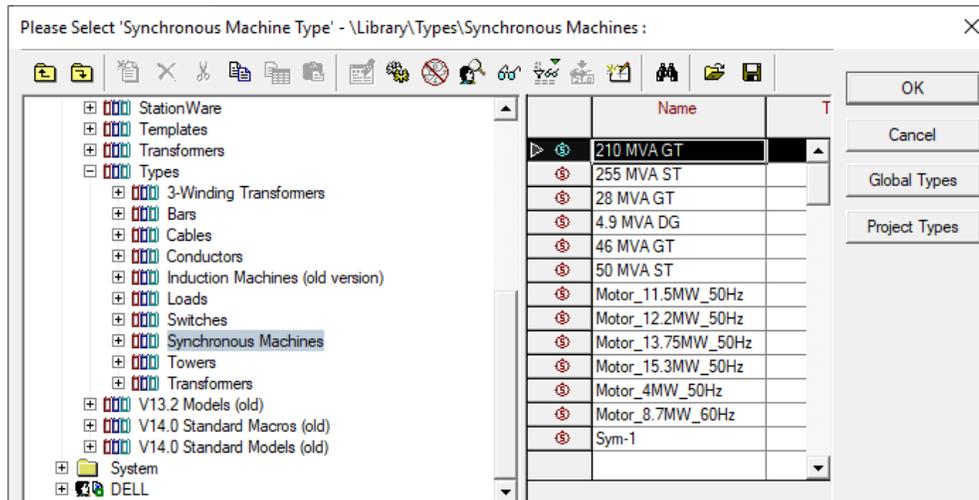


Figura 2.11: Biblioteca de generadores de PowerFactory. Fuente: El autor.

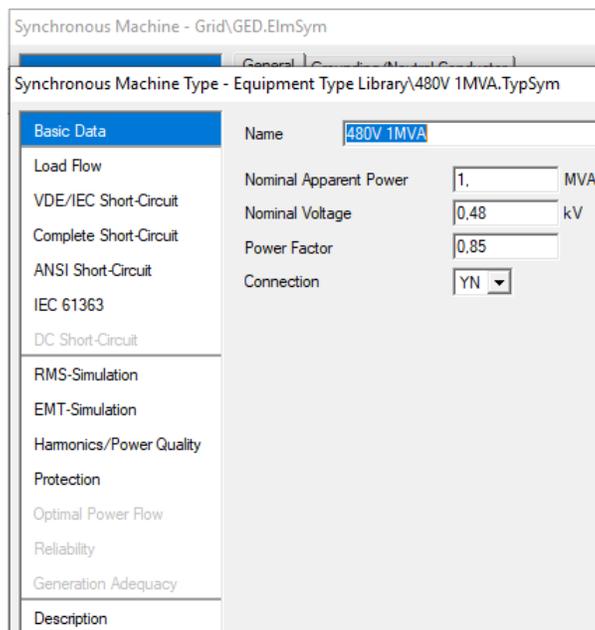


Figura 2.12: Edición del tipo de generador en la pestaña Basic . Fuente: El autor

Synchronous Machine Type - Equipment Type Library\480V 1MVA.TypSym

Basic Data	Synchronous Reactances	
Load Flow	xd	2, p.u.
VDE/IEC Short-Circuit	xq	2, p.u.
Complete Short-Circuit	Reactive Power Limits	
ANSI Short-Circuit	Minimum Value	-1, Mvar
IEC 61363	Maximum Value	1, Mvar
DC Short-Circuit	Zero Sequence Data	Negative Sequence Data
RMS-Simulation	Reactance x0	0,1 p.u.
EMT-Simulation	Resistance r0	0, p.u.
Hamonics/Power Quality		Reactance x2
Protection		0,2 p.u.
Optimal Power Flow		Resistance r2
Reliability		0, p.u.
Generation Adequacy		
Description		

Figura 2.13: Límites de potencia reactiva del generador. Fuente: El autor.

Settings Synchronous Machine Type - ...ettings Synchronous Machine Type.OptTypsym

Reactive Power Lim.	Input of Reactive Power Limits
Short-Circuit Impedance	<input type="radio"/> p.u.
Time Constants	<input checked="" type="radio"/> Absolute Values
Saturation Table	

Figura 2.14: Selección los límites de potencia reactiva del generador. Fuente: El autor

En las siguientes figuras se muestra el ingreso de datos como en la Figura 2.16 , aquí los botones desplegados reaparecen. Siendo el primero de ellos, en otro segmento igualmente llamado Terminal Figura 2.17.

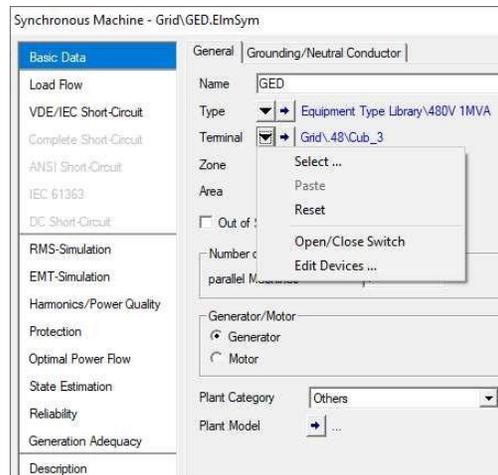


Figura 2.15: Submenú de edición que representa las características del generador. Fuente: El autor.

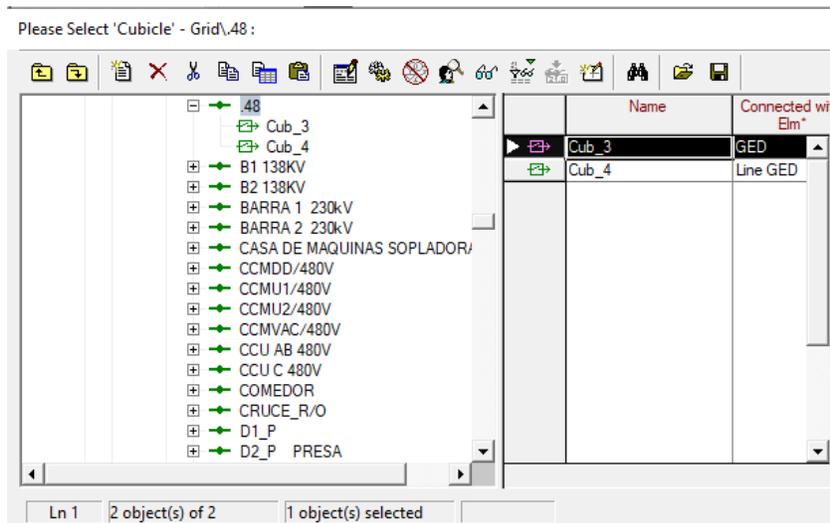


Figura 2.16: Selección de la celda referente a las características del generador. Fuente: El autor.

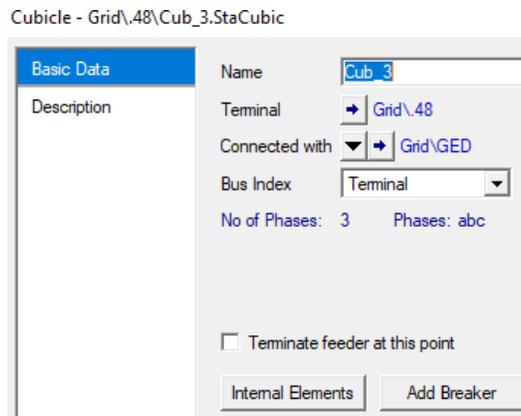


Figura 2.17: Edición del elemento Terminal. Fuente: El autor.

- Load Flow: Figura 2.18. Esta ventana muestra cada una de las cualidades introducidas en Basic Data (Datos Básicos en castellano) del generador.

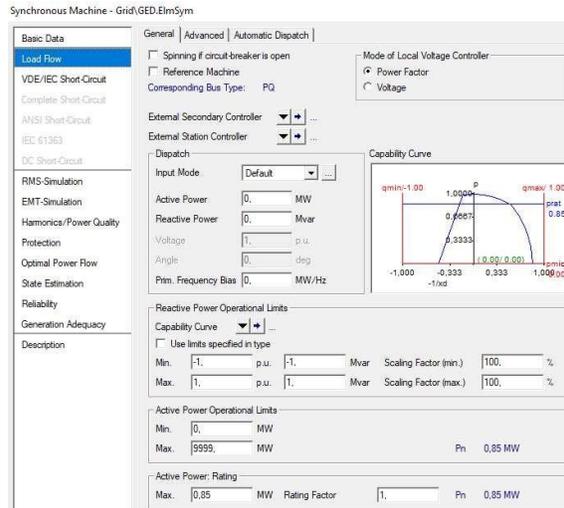


Figura 2.18: Ventana flujo de cargas referente a las características de los generadores. Fuente: El autor

2.3.1. Líneas

Los parámetros que influyen en el comportamiento de las líneas son la resistencia, la inductancia y la capacitancia, generalmente se desprecia la conductancia shunt de la línea [15]. Cuando realizamos los cálculos correspondientes a las líneas largas debemos tener en cuenta los valores exactos de éstos tres parámetros, al realizar los cálculos de las líneas cortas podemos despreciar el valor de la susceptancia. Los sistemas desiguales pueden investigarse desde las organizaciones de disposición positiva, negativa y cero:

La agrupación positiva se refiere a la corriente de energía que viene de la organización a la pila, es decir, del generador hacia delante ya que la sucesión queda representada, en consecuencia, no hay ningún arreglo malo o edad de agrupación cero en los marcos de edad equilibrada.

La agrupación negativa significa que la estimación de desequilibrio actual en el marco (tres etapas).

Es posible referirse a la proporción de la parte de tensión de la disposición negativa con respecto a la sucesión positiva

$$V_d = \frac{V^{(-)}}{V^{(+)}} * 100 \quad (2.7)$$

Por último, la disposición cero está conectada a la asociación relativa a la tierra. Los flujos de disposición 0 son aquellos que no obtienen el circuito a través de las etapas dinámicas, pero sí lo hacen a través de las desprejuiciadas, o a través de GND, los voltajes de sucesión 0 en un marco de conexión estrella se ubican en el punto focal, cuya extensión se estima con respecto a tierra o a la asociación estrella [16]. La regla es crítica debido a que los marcos eléctricos pueden visualizarse en base a la organización de agrupación positiva, negativa y cero. [17].

Las partes de inclinación positiva, compuestas por tres vectores de módulo equivalente, con contrastes escénicos de 120° y con una sucesión escénica similar a la de los primeros vectores Figura 2.19 a). Las partes de secuencia negativa son vectores con módulo equivalente, contrastes escénicos de 120° y con la agrupación de etapas inversa a la de los primeros vectores Figura 2.19 b). La secuencia cero está enmarcada por tres vectores de módulo similar y con una diferencia de etapas nulo, como se muestra en la Figura 2.19 c).

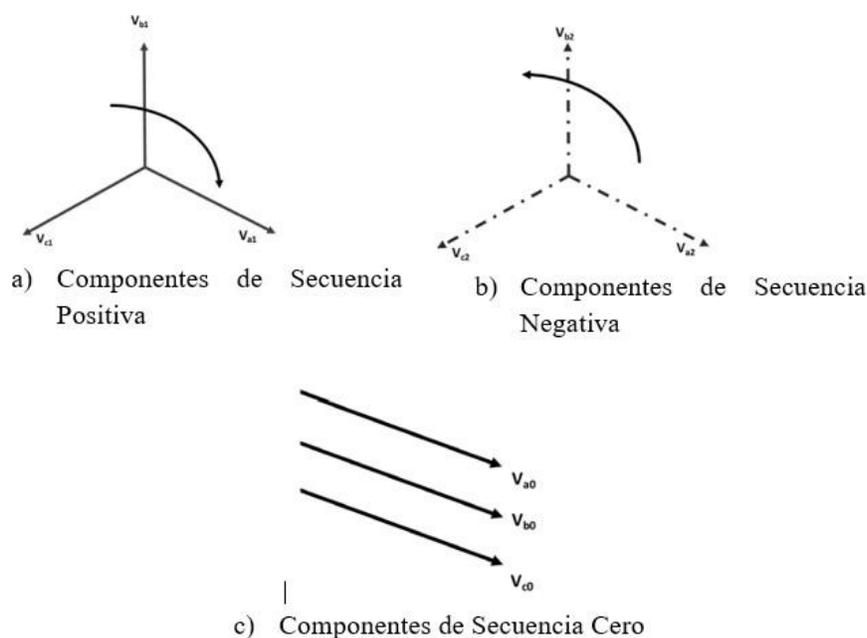


Figura 2.19: Componentes de secuencias para tensiones trifásicas. Fuente: El autor.

Red de secuencia cero

La siguiente ecuación combina V_{a0} con la I_{a0} esto es útil para definir la impedancia de secuencia cero Z_0 según Figura 2.20 .

Red de secuencia positiva

A continuación Z_1 es corriente de secuencia positiva (impedancia de secuencia positiva) Figura 2.21.

$$V_{a1} = Z_Y I_{a1} = (Z_1) I_{a1} \quad (2.8)$$

Red de secuencia negativa Donde Z_2 con corriente de secuencia negativa es

$$V_{a2} = Z_Y I_{a2} = (Z_2) I_{a2} \quad (2.9)$$

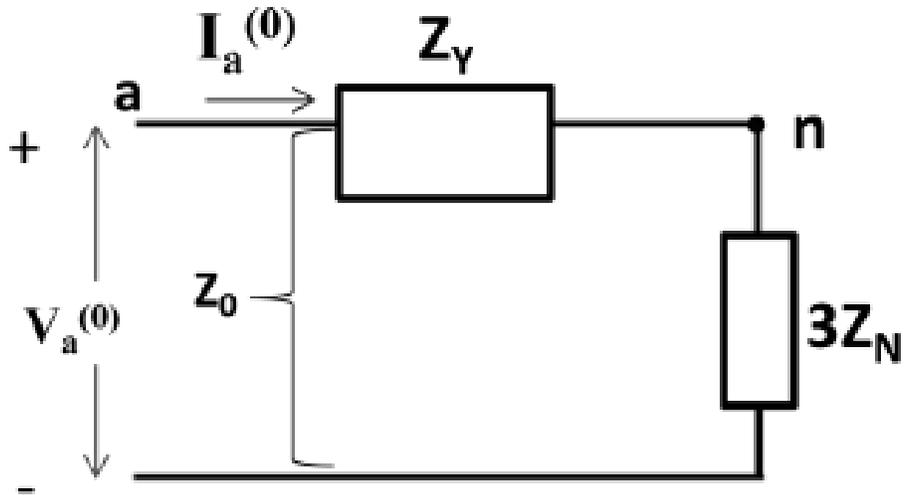


Figura 2.20: Circuito de secuencia cero equivalentes. Fuente: El autor.

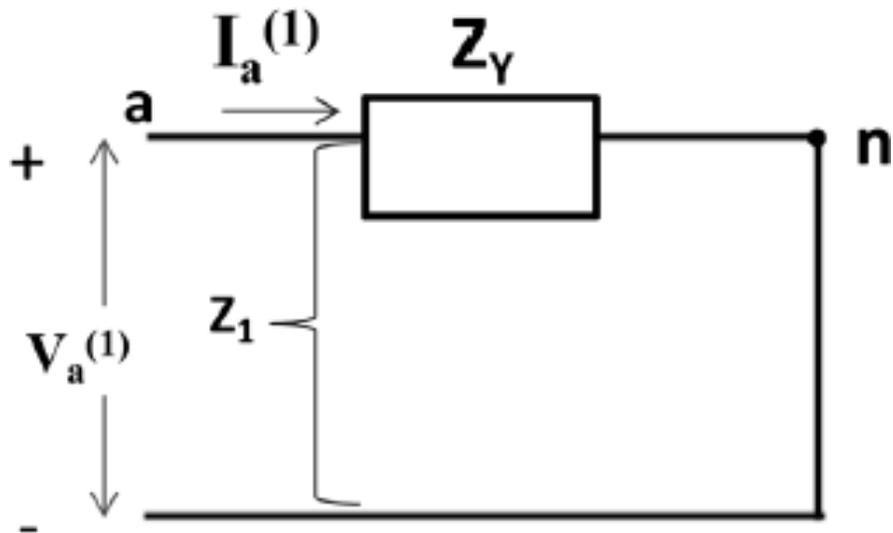


Figura 2.21: Circuito de secuencia positiva equivalente. Fuente: El autor.

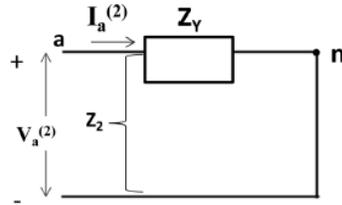


Figura 2.22: Circuito de secuencia negativa equivalente. Fuente: El autor.

Circuito de secuencia negativa equivalente

En sistemas eléctricos conectados en delta, el análisis que se ha mencionado para la impedancia de secuencia cero no se aplica, porque no poseen conexión de neutro. Es de gran importancia, debido a que el estudio de componentes simétricas y el análisis de cortocircuitos en redes eléctricas, así como el análisis de sobretensiones ocasionadas por las fallas en los sistemas de potencia. Por lo tanto, para establecer una correlación del tipo de falla y su análisis se debe modelar como se aprecia en la siguiente Figura 2.23.

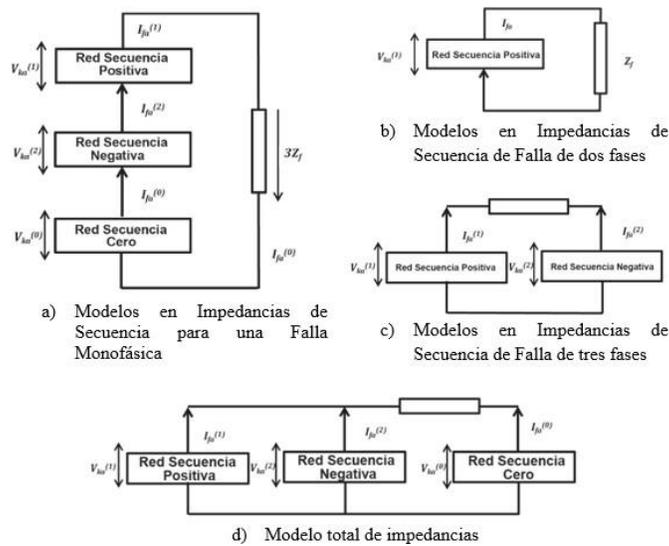


Figura 2.23: Modelos de Impedancias de fallas para sistemas de potencia. Fuente: El autor

Líneas de transmisión de longitud corta.

Para realizar los cálculos correspondientes a este tipo de línea podemos introducir las medidas ABCD



Figura 2.24: Red de dos puertos. Fuente: El autor

Se establece una relación entre los terminales emisor y receptor representado de la siguiente manera:

$$V_S = AV_r + VI_r \quad (2.10)$$

$$I_S = CV_r + DI_r \quad (2.11)$$

O en forma de matriz queda:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Seguidamente A, B, C y D son parámetros que dependen de los atributos R, L, C y G de la LT, la relación entre estos parámetros es:

$$AD - BC = 1 \quad (2.13)$$

Se aplica al circuito de las líneas monofásicas Figura 2.25 .

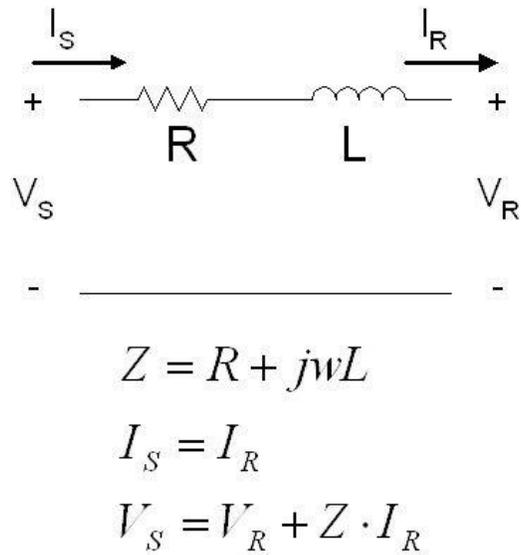


Figura 2.25: Circuito línea corta. Fuente: El autor

Las ecuaciones quedan de la siguiente forma:

$$V_s = V_r + ZI_r \quad (2.14)$$

$$I_s = I_r \quad (2.15)$$

$$\begin{bmatrix} V_s \\ I_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_r \\ I_r \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Comparando las ecuaciones (14) y (18).

$$A = D = 1 \quad (2.17)$$

$$B = Z \quad (2.18)$$

$$C = 0 \quad (2.19)$$

Líneas de transmisión de media longitud

Para este tipo de línea debemos centrarnos en la capacitancia. Figura 2.26.

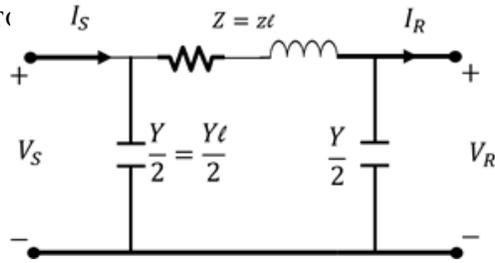


Figura 2.26: Línea media. Fuente: El autor.

Empezamos obteniendo valores de ABCD del circuito π en donde la corriente de la rama serie es igual a $I_R + \frac{V_R Y}{2}$

Pasando a la ecuación LKV en el extremo emisor y receptor tenemos:

$$V_S = V_R + Z \left(I_R + \frac{V_R Y}{2} \right) \quad (2.20)$$

$$V_S = \left(1 + \frac{YZ}{2} \right) V_R + Z I_R$$

Además, tenemos:

$$I_S = I_R + \frac{V_R Y}{2} + \frac{V_S Y}{2} \quad (2.21)$$

Combinando las ecuaciones (20) y (21) resulta:

$$I_S = I_R + \frac{V_R Y}{2} + \left[\left(1 + \frac{YZ}{2} \right) V_R + Z I_R \right] \frac{Y}{2} \quad (2.22)$$

$$I_S = Y \left(1 + \frac{YZ}{4} \right) V_S + \left(1 + \frac{YZ}{2} \right) I_R$$

Escribiendo las ecuaciones (20) y (22) en forma matricial se tiene:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{YZ}{2} & Z \\ Y \left(1 + \frac{YZ}{4} \right) & 1 + \frac{YZ}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Si comparamos las ecuaciones (21) y (23) obtenemos:

$$A = D = 1 + \frac{YZ}{2} \quad (2.24)$$

$$B = Z \quad (2.25)$$

$$C = Y \left(1 + \frac{YZ}{4} \right) \quad (2.26)$$

Líneas de transmisión de longitud larga

El diagrama equivalente es

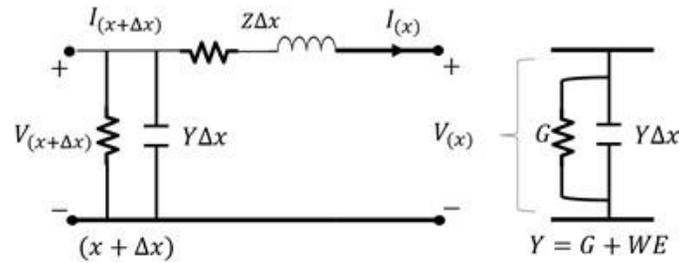


Figura 2.27: Sección de la línea larga. Fuente: El autor.

De igual manera

$$Z = R + j\omega L \quad (2.27)$$

$$Y = g + j\omega C \quad (2.28)$$

Aplicando la LKV al circuito obtenemos:

$$\begin{aligned} V_{(x+\Delta x)} &= V_{(x)} + I_{(x)}(Z\Delta x) \\ V_{(x+\Delta x)} - V_{(x)} &= I_{(x)}(Z\Delta x) \\ V_{(x+\Delta x)} + V_{(x)} &= I_{(x)}(Z\Delta x) \end{aligned} \quad (2.29)$$

$$\frac{V_{(x+\Delta x)} - V_{(x)}}{\Delta x} = I_{(x)} Z \quad (2.30)$$

$$V_{(x)} = Z I_{(x)} \quad (2.31)$$

Reemplazando en términos de ABCD en forma matricial tenemos:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

En donde:

$$A_{(x)} = D_{(x)} = \cosh(YX) \quad (2.33)$$

$$B_{(x)} = Z_C \sinh(YX) \quad (2.34)$$

$$C_{(x)} = \frac{1}{Z_C} \sinh(YX) \quad (2.35)$$

Cables.

Cable de un solo núcleo

El tipo de cable de núcleo único admite hasta tres capas conductoras tubulares en disposición coaxial, es decir, núcleo, cubierta y armadura, separadas por tres capas aislantes. La Figura 2.28 muestra el diseño típico de un cable de un solo núcleo de CA de alto voltaje. El modelo también admite la definición de una capa semiconductor exterior-núcleo y exterior-aislamiento.

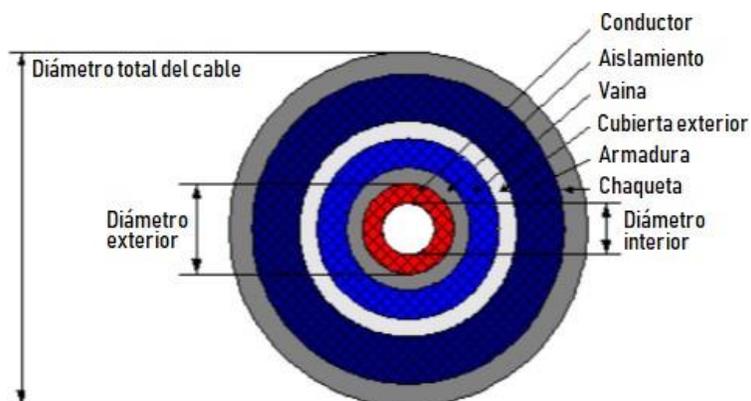


Figura 2.28: Sección transversal de un cable de un solo núcleo que incluye el núcleo, la vaina y la armadura. Fuente: El autor

En el simulador se puede usar la función adecuada para ingresar todos los datos geométricos que definen la sección transversal del cable de un solo núcleo y las propiedades de todos los materiales constitutivos.

Coefficiente de temperatura. Si tenemos la temperatura de una línea, la resistividad de las capas conductoras se ajusta mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_T = \rho_{20^\circ\text{C}} * [1 + \alpha(20 - T)] \quad (2.36)$$

Donde α es el coeficiente de temperatura. Las resistividades y el coeficiente de temperatura de los metales comunes se dan en la Tabla 2.11 a continuación

Tabla 2.11: Resistividades y el coeficiente de temperatura de los metales. Fuente: El autor.

Material	Resistividad a 20°C[cm]	Coefficiente de temperatura a 20°C [1/°C]
Cobre, torneado	2.83	0.0039
Cobre, templado	1.77	0.00382
Laton	6.4-8.4	0.0020
Hierro	10	0.0050
Plata	1.59	0.0038
Acero	12-88	0.001-0.005

Aislamiento

Revestimiento que envuelve el canal, para impedir el curso del flujo eléctrico fuera del transportador [18].

Cubierta

Está hecha de materiales que aseguran precisamente el enlace. Su capacidad es blindar la protección de los conductores frente a la actividad de la temperatura, el sol, el aguacero, etc. Todos los conductores tienen oposición; se necesita energía para constreñir la progresión de un flujo eléctrico [18].

Tipos de cables de uso industrial.

Los establecimientos modernos utilizan el cobre como componente del canal. La utilización de conductos de aluminio en este tipo de establecimientos es extremadamente baja y favorables atributos sintéticos, eléctricos y mecánicos [18].

Ductos y canalizaciones

La cantidad de conductores introducidos por tubería, o cualquier tipo de canal cerrado o semiabierto, no debe ser superada debido a que disminuye el límite de dispersión del calor, ampliando las desgracias energéticas. El calor irradiado por un canal al pasar un flujo eléctrico debe diseminarse inmediatamente por el aire circundante, suponiendo que esta dispersión del calor no se produzca, la temperatura del clima y la temperatura del transportador aumenta [18].

Capacidad de Conductores

El límite ostensible de los alimentadores, según la comprobación de los conductores, se puede encontrar en la representación adjunta.

Ecuación:

$$S = \sqrt{3} * V * I = 12MVA \quad (2.37)$$

Descripción	Formación	Diámetro hilo de Aluminio DC a 20°C	Diámetro hilo de Acero en XLPE	Carga de Ruptura	Resistencia Eléctrica DC a 20°C	Diámetro Total Aprox.	Peso Total Aprox.
	Hilos Al / Hilos Acero	mm	mm	kg-F	ohm/km	mm	kg/km
ACSR/GA 4 AWG (6/1) Swan	6/1	2,12	2,12	845	1,35	6,4	85
ACSR/GA 2 AWG (6/1) Sparrow	6/1	2,67	2,67	1290	0,85	8,0	136
ACSR/GA 1/0 AWG (6/1) Raven	6/1	3,37	3,37	1985	0,53	10,1	216
ACSR/GA 2/0 AWG (6/1) Quail	6/1	3,78	3,78	2405	0,42	11,3	273
ACSR/GA 3/0 AWG (6/1) Pigeon	6/1	4,25	4,25	3003	0,34	12,7	344
ACSR/GA 4/0 AWG (6/1) Penguin	6/1	4,77	4,77	3787	0,27	14,3	433
ACSR/GA 266.8 kcmil (26/7) Partridge	26/7	2,57	2,00	5120	0,21	16,3	547

Figura 2.29: Información de conductores, capacidad de corriente[3]

En PowerFactory, las condiciones nodales utilizadas para abordar las organizaciones disecadas se llevan a cabo utilizando dos técnicas únicas:

- Newton-Raphson (ecuaciones actuales)
- Newton-Raphson (ecuaciones de potencia, clásicas)

En las dos formulaciones, los sistemas posteriores de las condiciones no lineales se resuelven mediante una estrategia iterativa. Las estimaciones del flujo de carga se utilizan para desglosar los marcos de potencia en condiciones de estado consistente y sin problemas (sin cortocircuitos)[19]. Las corrientes de la máquina en estado estable se calculan a partir de:

$$I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2.38)$$

Donde

$i=1,2,\dots,m$

m es el numero de generadores

V_i es el voltaje terminal del i -ésimo generador; y

P_i y Q_i Son el generador de potencias reales y reactivas.

Para el sistema n-bus, la ecuación de voltaje de nodo en forma de matriz es

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2i} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \dots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{ni} & \dots & Y_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$$

6

$$\mathbf{I}_{bus} = \mathbf{Y}_{bus} \mathbf{V}_{bus} \quad (2.39)$$

PowerFactory utiliza el método Newton-Raphson (ecuación de potencia, clásico) como su solucionador de ecuaciones no lineales. Este método se utiliza para grandes sistemas de transmisión, especialmente cuando están muy cargados.

Se utilizó para flujo de carga de CA [19].

La conexión uno a uno entre dos barras es muy sencilla. Se puede realizar en un gráfico unifilar seleccionando el botón de línea y haciendo clic izquierdo en la línea y terminando la línea en una segunda barra por un clic izquierdo de este. El mismo creará un objeto Elmlne en su base de datos, siendo representados por 3 despleables, como se puede observar a continuación.

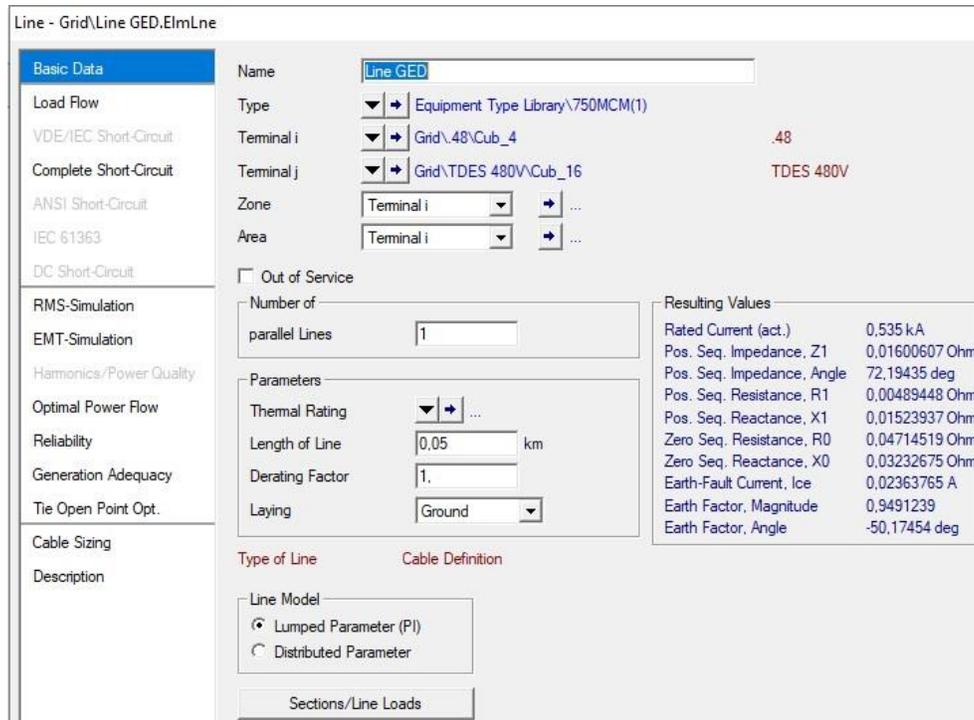


Figura 2.30: Opciones de líneas. Fuente: El autor.

A continuación, se escoge la línea como se puede observar en la siguiente Figura 2.31.

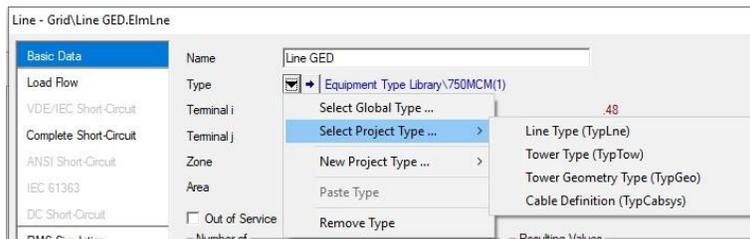


Figura 2.31: Opciones para editar una línea y tipos de línea. Fuente: El autor.

La Figura 2.32 muestra la librería para líneas de Power Factory la cual se encuentra en Select Global Type. Existen diferentes tipos de líneas y estos de-

penderán del voltaje, el material, sección del cable, etc.

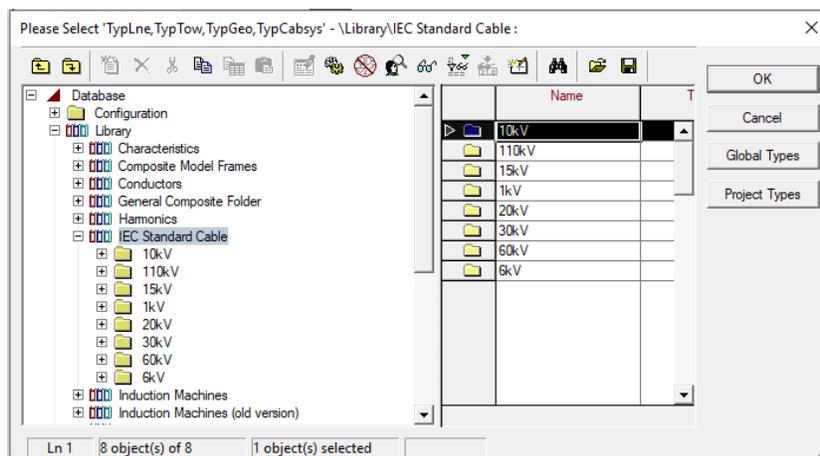


Figura 2.32: Librería para líneas de PowerFactory. Fuente: El autor.

A continuación se presentan las especificaciones eléctricas de los cables siendo estos utilizados en las LT del Sistema Nacional de Transmisión (SNT).

Tabla 2.12: Conductores ACSR [6]

Cable[cmil]	Tensión nom	Corriente nom
1192	230kV-138kV	1160 A
1590	230kV-138kV	1380 A

Interruptores.

Podemos encontrar varios modelos de interruptores entre los cuales tenemos:

Interruptor automático. Este interruptor interrumpe de forma automática la corriente bajo especificaciones preestablecidas.

Barras de subestaciones

En las subestaciones se tiene varios componentes que forman parte del aparataje de una subestación eléctrica entre ellos las barras que son puntos

donde llegan o salen varias líneas eléctricas [20].

Barrajes colectores.

Componente real de un patio de maniobras que se dirige al centro de la estructura.

Configuración de una subestación.

Permite que la subestación tenga varios niveles de calidad inquebrantable, bienestar y adaptabilidad en el cuidado, cambio y circulación de corriente y ofrece niveles cambiantes de estas características.

Tipos de configuración.

Sirven para interconectarse con al menos una barra de distribución a través de seccionadores:

Barra sencilla.

a) Está más allá del ámbito de las posibilidades esperar realizar el apoyo sin entrometerse en la asistencia.

b) Está más allá de las posibilidades de realizar un aumento de la subestación sin entrometerse en la asistencia.

La cantidad de circuitos impactados por cualquiera de los motivos anteriores puede disminuirse segmentando el transporte, o en todo caso, enmarcando anillos. Esta forma de actuar tiene el límite de que toda la subestación queda indisponible cuando se produce un problema en las barras principales.

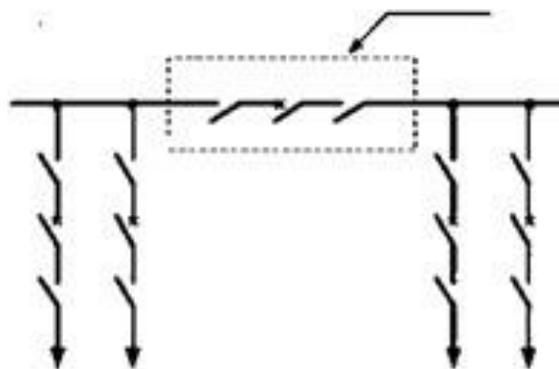


Figura 2.33: Barra sencilla. Fuente: El autor

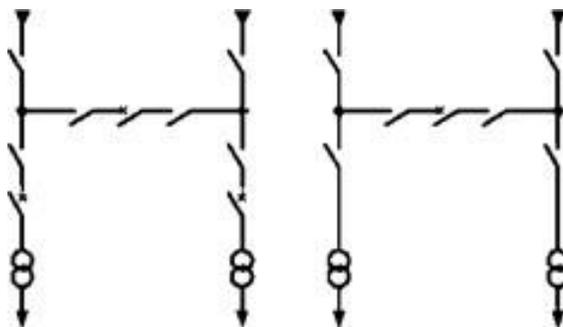


Figura 2.34: Configuración en H. Fuente: El autor

Barra principal y de transferencia

La Figura 2.35 muestra la disposición de barras principales y de transferencia.

Se trata de una variación de la disposición doble de barras, el supuesto transporte de intercambio se utiliza distintamente como asistente.

Se han contrastado los diferentes planes con sus ventajas y desventajas. La premisa del examen utilizado es la avocación monetaria para un nivel específico de calidad inquebrantable.

El aseguramiento del nivel de calidad inquebrantable requiere una evaluación de las condiciones de trabajo previstas y la progresión de la administración que necesita la red de distribución.

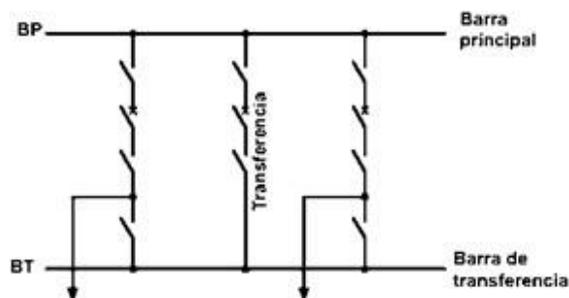


Figura 2.35: Barra principal y de transferencia. Fuente: El autor

Doble barra.

La Figura 2.36 muestra la disposición de doble bus. En este diseño, se utilizan dos disposiciones de barras colectoras indistintas, una puede ser utilizada como un extra para la otra, con este plan de juego se tiende a asegurar que no hay interferencia de la administración; si una de las disposiciones de barras colectoras se cae, no obstante:

1. La pila de cargas puede ser libre, de manera que cada pila puede ser atendida desde las barras.
2. Las barras pueden ser seleccionadas independientemente para el apoyo y mantenimiento de las cubiertas, en cualquier caso, los interruptores no son accesibles para el mantenimiento sin desenganchar las barras de comparación.
3. La adaptabilidad en la actividad ordinaria puede considerarse como grande.
4. Este tipo de barra se sugiere cuando la coherencia del suministro de carga legitima los gastos adicionales.

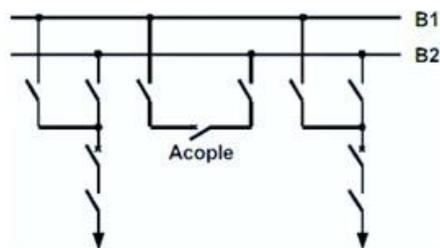


Figura 2.36: Barra doble. Fuente: El autor

Barra doble con seccionador “bypass”

Se parece bastante a la configuración de doble barra de la sección precedente, lo que se ha aumentado en las líneas es un seccionados de bypass. Esta configuración de barras posee las mismas ventajas que la configuración anterior además existe la posibilidad de reparar el interruptor de la disposición dañada. Como la configuración presenta más componentes esto tiene la desventaja un mayor costo de montaje al igual que una mayor dificultad tanto en su configuración como en las maniobras que deben ser realizadas. Figura 2.37.

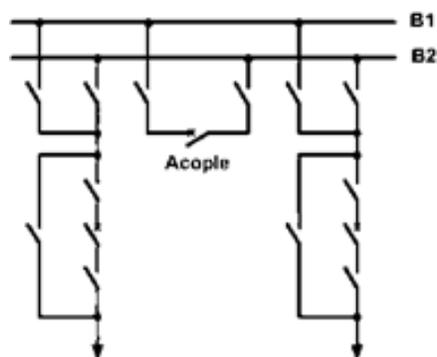


Figura 2.37: Doble barra con seccionador by-pass. Fuente: El autor

Barra doble con seccionador de transferencia

Es más simple en su operación y control figura 2.38.

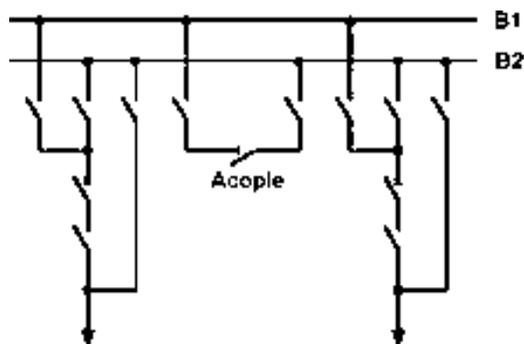


Figura 2.38: Doble barra con seccionador de transferencia. Fuente: El autor

Barra doble con barra de transferencia

Su uso predominante es en aquellas situaciones en las que es fundamental un suministro permanente de energía. Este diseño se compone de una doble disposición de barras a las que se asocian las líneas mediante seccionadores y los desvíos se asocian a las barras de intercambio. La motivación de los módulos de acoplamiento es mantener una asociación eléctrica entre las barras de intercambio y cualquiera de las otras dos barras. El diagrama de esta configuración se presenta en la Figura 2.39.

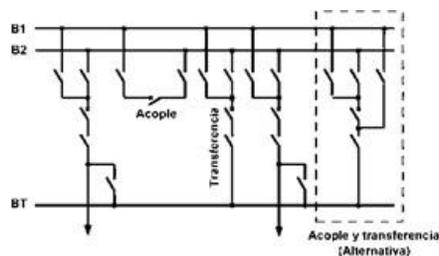


Figura 2.39: Barra doble más barra de transferencia. Fuente: El autor.

PowerFactory tiene una opción para dirigirse a un centro donde no se necesita una barra ésta se denomina "Terminal" (ElmTerm) que es gráficamente como un punto y se obtiene de una clase similar (TypBar). La Figura 2.40 muestra los resultados concebibles con los componentes de la barra y con los componentes de la terminal.

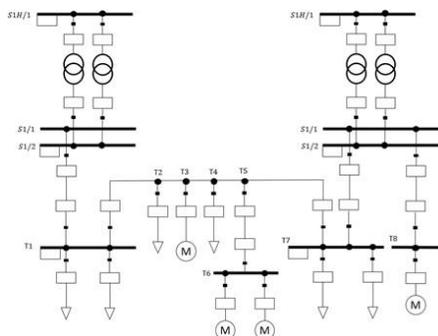


Figura 2.40: Barras y terminales. Fuente: El autor.

Transformadores

El transformador permite tener diferentes voltajes dependiendo del número de espiras que contenga tanto el primario como el secundario. Las partes de un transformador básico se muestran en la Figura 2.41.

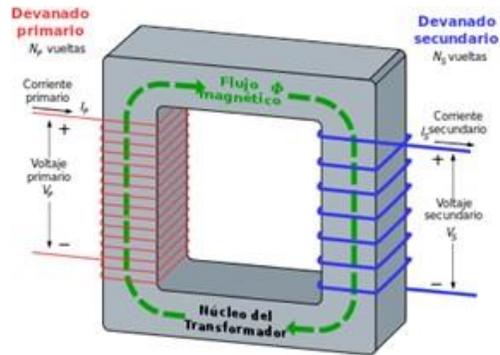


Figura 2.41: Transformador[4]

Transformador de dos devanados

Un transformador se compone de dos circuitos eléctricos acoplados a través de un circuito de atracción.

La Figura 2.42 muestra un transformador de tres etapas que puede ser tratado por un circuito comparable de una sola etapa.

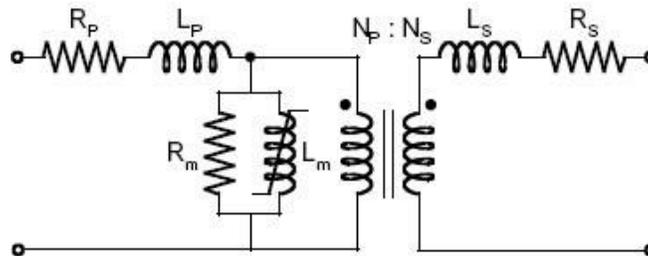


Figura 2.42: Diagrama equivalente transformador de doble arrollamiento [5]

El diagrama de la prueba estándar de cortocircuito es:

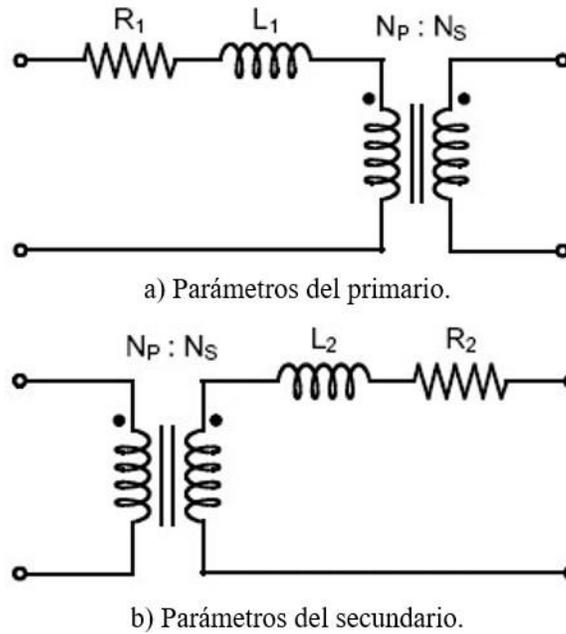


Figura 2.43: Diagramas equivalentes del transformador con arrollamiento doble. Fuente: [5]

Para la prueba de coro circuito se utiliza:

$$Z_2 = \varepsilon_{cc} \frac{V_{n2}^2}{S_n} \quad (2.40)$$

$$R_2 = \frac{W_{cc}}{S_n} \frac{V_{n2}^2}{S_n} \quad (2.41)$$

$$X_2 = \omega L_2 = \sqrt{Z_2^2 - R_2^2} \quad (2.42)$$

Para la estimación de los límites alusivos al lado esencial, se utilizarán las ecuaciones adjuntas:

$$Z_1 = Z_{cc1} = R_{cc1} + jX_{cc1} \quad (2.43)$$

$$Z_2 = Z_{cc2} = R_{cc2} + jX_{cc2} \quad (2.44)$$

Transformador triple devanado.

Podemos abordar los modelos de transformadores en determinadas agrupaciones con impedancias para cada unidad. Los modelos de disposición negativa son indistinguibles de los modelos de sucesión positiva. Cada uno de los devanados de AT, MT y BT tiene una oposición y una reactancia de dispersión de los devanados de comparación. Un transformador óptimo con una proporción de vueltas de 1:1 une los tres devanados en el punto de estrella atractivo. Los modelos incorporan además una reactancia de carga y una oposición de infortunio del hierro asignadas individualmente por x_M y r_{Fe} . La reactancia de carga y la pérdida en el hierro pueden mostrarse en varias posiciones. Además, la situación de las corrientes puede transformarse desde el punto de estrella, siendo la posición por defecto el punto de la estrella. El modelo de agrupación positiva del transformador de 3 devanados se representa por

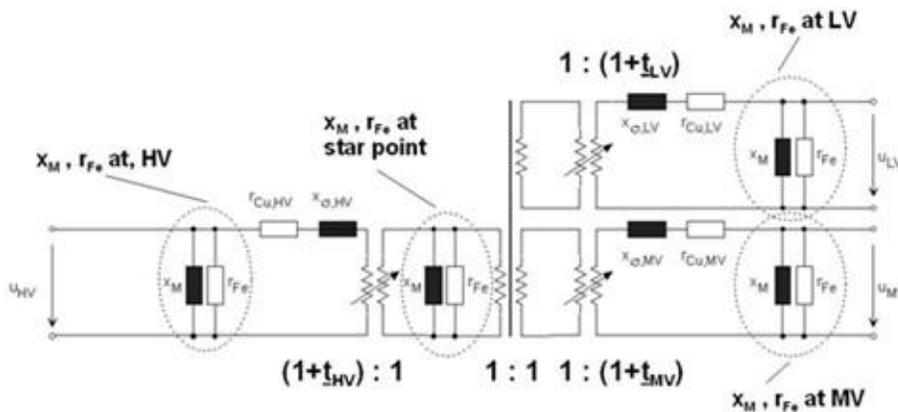


Figura 2.44: Diagrama secuencia positiva del transformador de 3 devanados, tomas modeladas en el punto de estrella [5]

Medición HV-MV

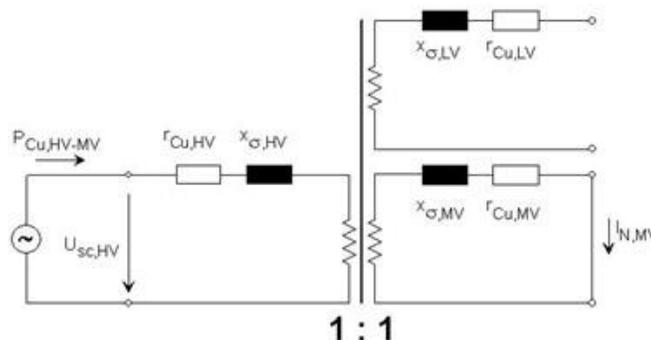


Figura 2.45: Cortocircuito en el lado MV, circuito abierto en el lado LV [5]

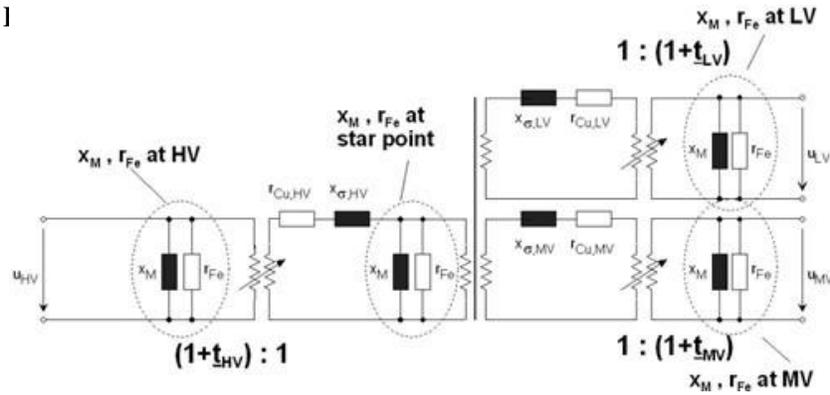


Figura 2.46: Modelo de ecuencia positiva del transformador de 3 devanados, tomas modeladas en terminales [5]

El devanado en cortocircuito (lado MV) debe transportar la corriente nominal de acuerdo con:

$$I_{N.MV} = \frac{\text{Min}(S_{rT.HV}, S_{rT.MV})}{\sqrt{3} \cdot U_{rT.MV}} \quad (2.45)$$

La tensión de cortocircuito de secuencia positiva HV-MV se puede calcular a partir de la tensión medida en el lado de HV:

$$\mu_{sc.HV-MV} = \frac{U_{sc,HV}}{U_{rT,MV}} \times 100\% \quad (2.46)$$

La parte real de la tensión de cortocircuito se puede especificar de diferentes maneras:

- Pérdidas de cobre en kW:

El flujo de potencia activa medida en kW se puede ingresar directamente en el campo de entrada correspondiente

- Parte real de la tensión de cortocircuito en porcentaje (%):

$$\mu_{r,sc.HV-MV} = \frac{P_{Cu,HV-MV}}{\text{Min}_{S_{rT,HV},(S_{rT,MV})} \times 1000} \times 100\% \quad (2.47)$$

con PCu en kW.

- Relación X / R:

Parte imaginaria de la tensión de cortocircuito HV-MV:

$$u_{i,HV-MV} = \sqrt{U_{sc,HV-MV}^2 - U_{r,sc,HV-MV}^2} \quad (2.48)$$

Relación X / R para HV-MV:

$$\frac{X}{R_{HV-MV}} = \frac{U_{i,HV-MV}}{U_{r,HV-MV}} \quad (2.49)$$

La tensión y la impedancia de cortocircuito se refieren al mínimo de las potencias nominales del lado HV y MV.

$$r_{Cu,HV-MV} = \frac{U_{r,sc,HV-MV}}{100\%} = r_{Cu,HV} + r_{Cu,MV} \quad (2.50)$$

$$r_{\sigma,HV-MV} = \frac{U_{i,sc,HV-MV}}{100\%} = x_{\sigma,HV} + x_{\sigma,LV} \quad (2.51)$$

Secuencia + y Secuencia -

Al referirse a la secuencia positiva y la secuencia negativa se deb tener en cuenta el tipo de conexi3nes y las podemos representarla como se muestra en la figura 2.47.

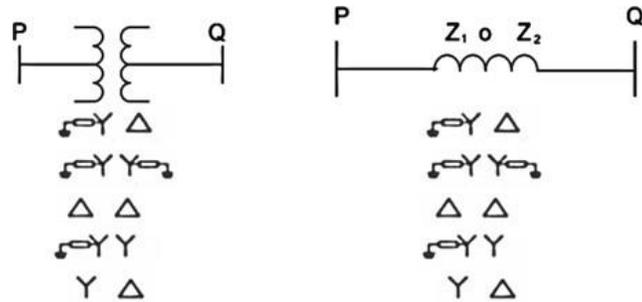


Figura 2.47: Representaci3n del transformador [6]

Red de Secuencia Cero

En el siguiente diagrama podemos ver la presentaci3n de la secuencia cero

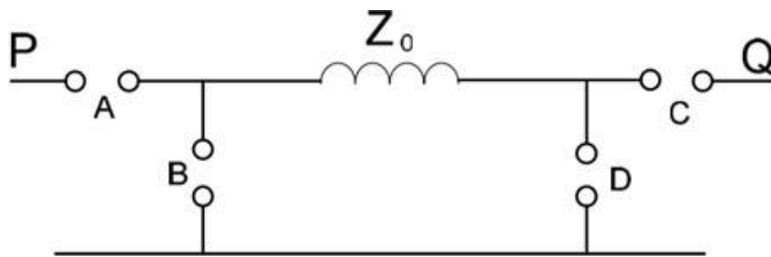


Figura 2.48: Diagrama de red de secuencia 0 en el transformador[6]

Cambiando las conexi3nes se tiene el siguiente diagrama para tres devanados

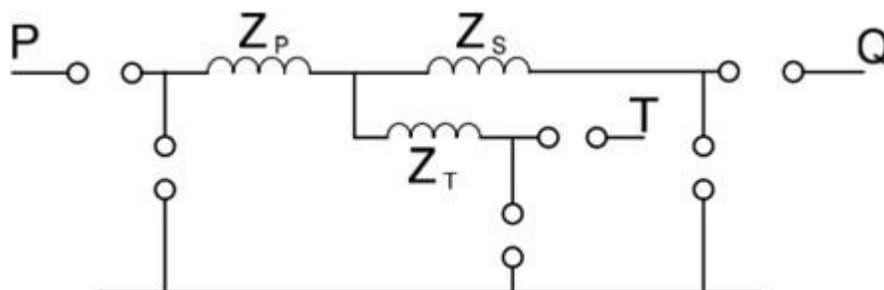


Figura 2.49: Diagrama de secuencia 0 del trafo de devanado triple.[6]

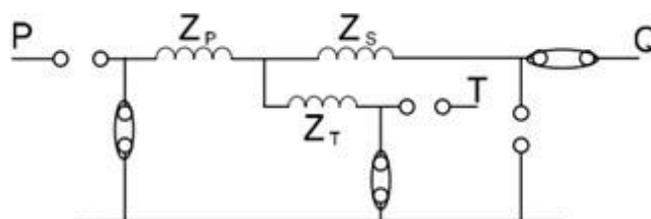


Figura 2.50: Conexión de transformadores de devanado triple [6]

Autotransformadores.

El autotransformador tiene los devanados conectados en serie y tiene las mismas ecuaciones del transformador normal.

Los modelos de autotransformadores en Power Factory [13], se basan en los modelos de transformadores de 3 y 2 devanados igual a como se explicó anteriormente. Por lo tanto, un autotransformador se define utilizando los mismos elementos que se utilizan para los transformadores de 3 y 2 devanados. Tan pronto como el grupo de conexión en el tipo de transformador se establezca en YN-yn-d, el modelo considerará una conexión de devanado del autotransformador en lugar del devanado separado galvánicamente

En la Figura 2.51 se tiene el esquema de un auto-transformador.

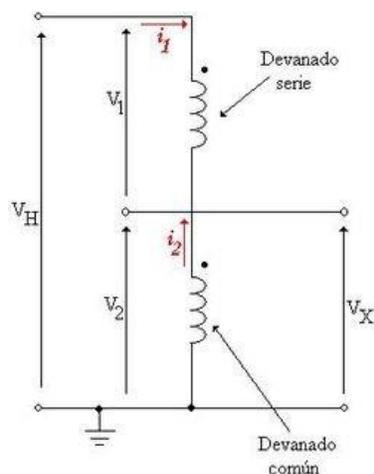


Figura 2.51: Auto-transformador YN-yn-d. Fuente: El autor

Transformadores con taps.

Es importante conocer los taps o OLTC (On-Load Taps-Changer, Cambiador de Derivación Bajo Carga en Castellano) es el dispositivo electromecánico que nos permite hacer el cambio de taps sin necesidad de desconectar el transformador y por ende trabaja el cambio bajo la carga total [21].

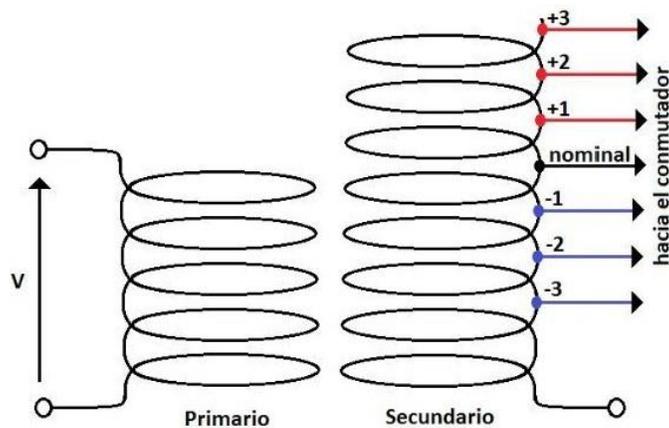


Figura 2.52: Conexión de un Cambiador de Taps [7]

El diagrama fasorial se representa

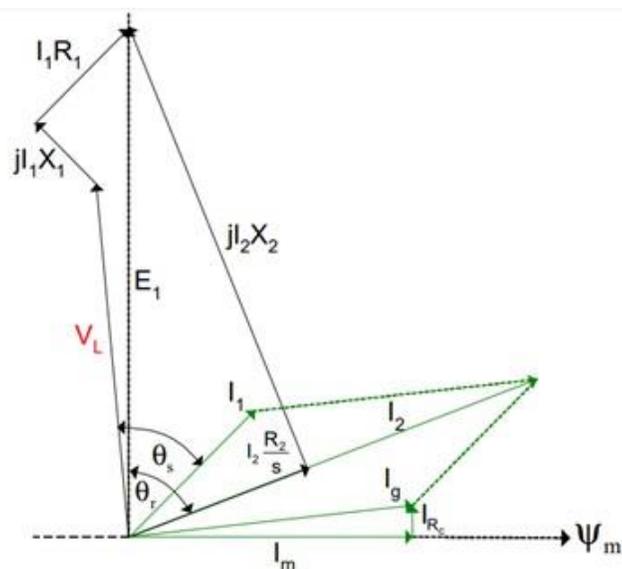


Figura 2.54: Esquema de fasores del generador de inducción [8]

En la Figura 2.64 se aprecia el diagrama del motor de inducción sin resistencia

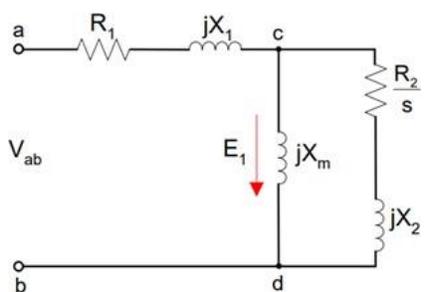


Figura 2.55: Diagrama equivalente del motor de inducción sin la resistencia R_c .
Fuente: El autor

Donde el voltaje Thevenin es:

$$\overline{V}_{th} = \frac{j X_m}{R_1 + j X_1 + j X_m} \overline{V}_{ab} \quad (2.54)$$

La impedancia de Thevenin es:

$$\overline{Z}_{th} = \frac{j X_m (R_1 + j X_1)}{R_1 + j (X_1 + X_m)} = R_{th} + j X_{th} \quad (2.55)$$

La Figura 2.56 muestra el circuito equivalente de Thevenin de los terminales c-d

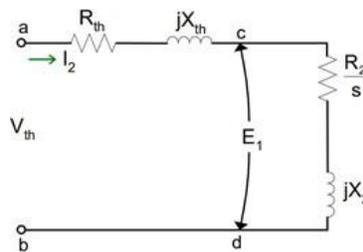


Figura 2.56: Diagrama Thevenin en c-d [8]

La corriente fasorial \overline{I}_2 Thevenin del circuito anterior es

$$\overline{I}_2 = \frac{V_{th < 0^\circ}}{R_{th} + \frac{R_2}{s} + j(X_2 + X_{th})} \quad (2.56)$$

La impedancia total del circuito es: $Z = R_{th} + \frac{R_2}{s} + j(X_2 + X_{th}) = |Z| < \theta_s$, por lo tanto, la corriente \overline{I}_2 , es:

$$\overline{I}_2 = \frac{V_{th < 0^\circ}}{|Z| < \theta_s} \quad (2.57)$$

Donde: $\theta_s =$ angulo entre $R_{th} + \frac{R_2}{s}$ y $X_2 + X_{th}$

Del circuito del Thevenin, tenemos:

$$|Z| = \frac{X'_{th}}{\text{sen}(\theta_s)} \quad (2.58)$$

Donde: $X'_{th} = X_2 + X_{th}$

Remplazando la ecuación de [Z] en la ecuación \bar{I}_2 , se tiene

$$\bar{I}_2 = \frac{V_{th} \text{sen}(\theta_s) \angle -\theta_s}{X'_{th}} \quad (2.59)$$

Utilizando Euler: $e^{j\theta} = \cos(\theta) + j \text{sen}(\theta)$

$$\bar{I}_2 = I_{2r} + jI_{2i} = \frac{V_{th}}{X'_{th}} (\text{sen}(\theta_s) \cos(\theta_s) - j \text{sen}^2(\theta_s)) \quad (2.60)$$

El producto de la corriente \bar{I}_2 por su conjugada, es:

$$I_2^2 = I_{2r}^2 + I_{2i}^2 = \frac{V_{th}^2}{X_{th}^2} \text{sen}^2(\theta_s) \quad (2.61)$$

La expresión I_{2i} , es:

$$I_{2i} = -\frac{V_{th}}{X'_{th}} \text{sen}^2(\theta_s) \quad (2.62)$$

Despejando $\text{sen}^2(\theta_s)$ tenemos:

$$I_{2r}^2 + I_{2i}^2 = -\frac{V_{th}}{X'_{th}} I_{2i} \quad (2.63)$$

Posteriormente a la deducción de la condición aborda el área matemática quedando

$$I_{2r}^2 + \left(I_{2i} + \frac{V_{th}}{2X'_{th}} \right)^2 = \frac{V_{th}^2}{2X'_{th}} \quad (2.64)$$

Parámetros del Transformador en Power Factory

Se puede elegir con que celda se va a trabajar como vemos en la Figura 2.57.

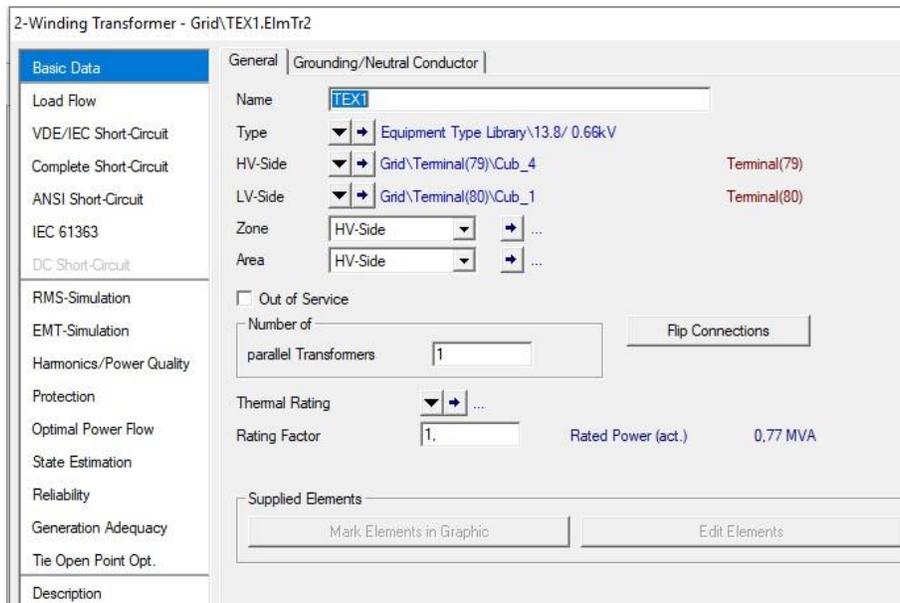


Figura 2.57: Ventana de características de los transformadores. Fuente: El autor

Arranadores suaves.

Son dispositivos electrónicos para maniobrar el arranque y parada de motores trifásicos de inducción. Los motores de inducción tienen una corriente inicial algo elevada entre 3 y múltiples veces la corriente evaluada (en actividad típica).

La Figura 2.58 representa la variación de corriente respecto al tiempo en los diferentes métodos de arranque para motores.

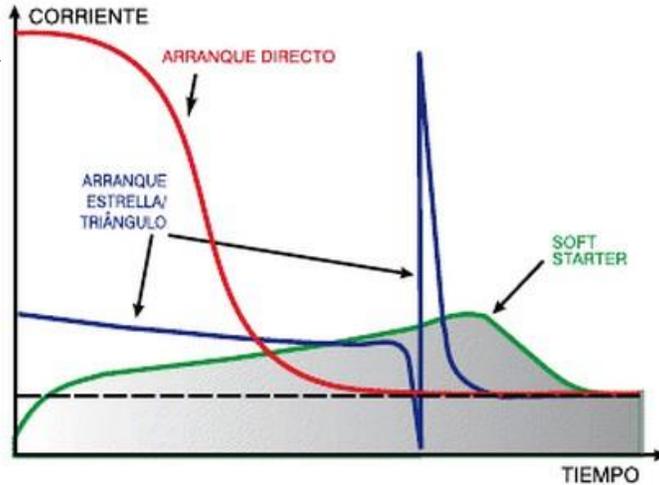


Figura 2.58: Métodos de arranque de motores [9]

Modelamiento de una carga.

A diferencia de elementos comunes en los SEPS las cargas son difíciles de encajar en parámetros fijos de modelación.

Para modelar una carga se tienen dos enfoques. La primera depende de la recopilación de datos sobre el tipo y la síntesis de la pila asociada a una barra colectora, lo que se denomina demostración basada en las partes, y la metodología posterior depende de la utilización de las estimaciones registradas a lo largo del marco de potencia, donde al cambiar los límites se crea el modelo de carga relacionado y se denomina visualización basada en la estimación. Los modelos de carga estática expresan los atributos de grandes cantidades en cualquier momento del tiempo como elementos matemáticos de dimensionamiento de tensión de barras y recurrencia, las partes de potencia dinámica y receptiva son autónomas, por lo que se utilizan dos diseños, el modelo notable y el modelo polinómico.

Modelo Exponencial.

La potencia activa y reactiva consumida es

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha \quad (2.65)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\beta \quad (2.66)$$

Los parámetros α y β varían dependiendo de lo que esté conectado a la barra, además se puede incluir en el modelo el efecto de la frecuencia y la representación es la siguiente:

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^\alpha (1 + k_{pf} \Delta f) \quad (2.67)$$

$$Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0}\right)^\beta (1 + k_{qf} \Delta f) \quad (2.68)$$

Modelo Polinomial.

En éste modelo la carga se modela como la mezcla de cargas y una impedancia constante y se representa por:

$$P = P_0 \left(a_0 + a_1 \left(\frac{V}{V_0}\right) + a_2 \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 \right) \quad (2.69)$$

$$Q = Q_0 \left(b_0 + b_1 \left(\frac{V}{V_0}\right) + b_2 \left(\frac{V}{V_0}\right)^2 \right) \quad (2.70)$$

Los coeficientes a y b son:

$$\begin{aligned} a_0 + a_1 + a_2 &= 1 \\ b_0 + b_1 + b_2 &= 1 \end{aligned} \quad (2.71)$$

Modelamiento de redes externas.

En un sep tenemos unidades de creación de electricidad la cual debemos trasladarla a los hábitats de utilización con el menor coste concebible.

Red a tres hilos y red a cuatro hilos.

El método típico de abordar las redes de dispersión para diversas investigaciones y exámenes se termina normalmente disminuyendo la disposición de n transmisores, en su mayor parte de tres etapas además de imparciales, a un marco de tres hilos, trabajando ampliamente en las estimaciones, donde se pueden obtener dos modelos, uno donde se piensa que el primer marco es el de tres etapas además de imparcial, y se aplica Kron para disminuir etapas. Formamos una matriz de impedancias.

$$[Z_{prim}] = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} & Z_{14} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} & Z_{24} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} & Z_{34} \\ Z_{41} & Z_{42} & Z_{43} & Z_{44} \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

En la Figura 2.59 se observa un modelo con cuatro hilos de establecimiento, que es el típico modelo que esperaremos como único y del que partimos.

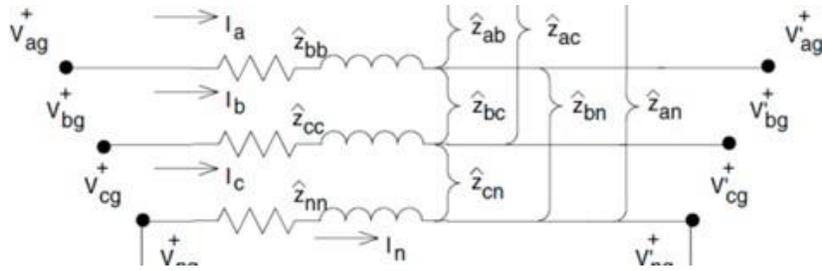


Figura 2.59: Modelo 4 hilos conexión a tierra [10]

se puede basar en

$$\begin{bmatrix} V_{ag} \\ V_{bg} \\ V_{cg} \\ V_{ng} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_{ag} \\ V'_{bg} \\ V'_{cg} \\ V'_{ng} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{an} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bn} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cn} \\ Z_{na} & Z_{nb} & Z_{nc} & Z_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

Aplicando la ecuación de Kron tenemos

$$[Z] = [Z_{ij}] - [Z_{ij}] \cdot [Z_{nn}]^{-1} \cdot [Z_{nj}] \quad (2.74)$$

La Figura 2.60 muestra el modelo que se utilizaría después de la disminución de la impedancia de forma inflexible. 72

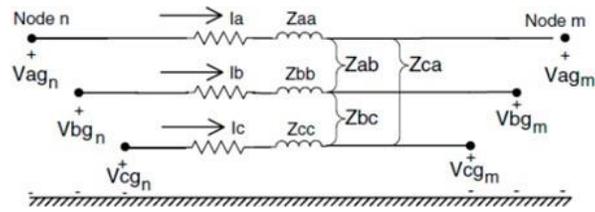


Figura 2.60: Modelo de 3 hilos [10]

Modelamiento de compensación de potencia reactiva.

A continuación, se presentan algunos tipos de compensadores [22].

Compensador en serie

Un compensador serie inyecta voltaje en cuadratura respecto a la corriente.

Compensador en paralelo

Un compensador en paralelo con la línea, tiene como función cambiar la magnitud de las tensiones en los extremos emisor o receptor.

Compensadores combinados

Es una combinación de los dos anteriores.

2.3.2. Sistemas de Distribución

Están compuestos por las subestaciones, alimentadores y todos los elementos que ayuden a un mejor trabajo.

Clasificación de los sistemas de distribución

Tenemos varias metodologías de dispersión espiral y de ajuste. La elección específica de cada tipo de metodología se basa en la progresión de la asistencia ideal, la directriz de la tensión y básicamente de los costes.

Sistemas aéreos

Son los más comunes por ser simples y de bajo costo [23].

Sistemas subterráneos

Este sistema es utilizado en lugares donde exista gran cantidad de gente y por lo general son de alto costo [24].

Sistemas mixtos

Los sistemas mixtos son utilizados si existe un traslape de conductores aislados [25].

2.3.3. Subestaciones:

Las subestaciones sirven para reducir la tensión desde las barras de un voltaje superior a valores inferiores, se incluye los transformadores y los equipos para proteger los elementos de la subestación.

2.3.4. Alimentadores.

Se los encuentra entre la subestación y los transformadores comúnmente son de cuatro hilos.

2.3.5. Dispositivos de corte y maniobra.

Como su nombre lo indica sirven para abrir o cerrar circuitos y para ayudar a realizar de forma segura maniobras en las redes, entre los principales tenemos disyuntor, reconectador, seccionador y fusible.

2.3.6. Análisis de los sistemas de distribución

Tenemos

- Reconfiguración de los alimentadores
- Transferencia de carga
- Índices de calidad

2.3.7. Subestación Molino

El propósito de esta Subestación es alimentar energía desde las unidades generadoras a la Red Eléctrica Nacional. Las líneas de transmisión que operan a 230kV transmiten la carga más pesada de Paute al resto del sistema, para Guayaquil y Quito la ex INECEL puso en funcionamiento en 1990 una configuración en anillo para el sistema de 230kV. Un lado del anillo a lo largo de la COSTA otro anillo lateral a lo largo de la "SIERRA".

Dado que Paute es la estación generadora más grande durante muchos años, su Subestación Molino tiene una posición muy importante en el Sistema Eléctrico Nacional ". En la siguiente, figura se observa el sistema nacional interconectado.

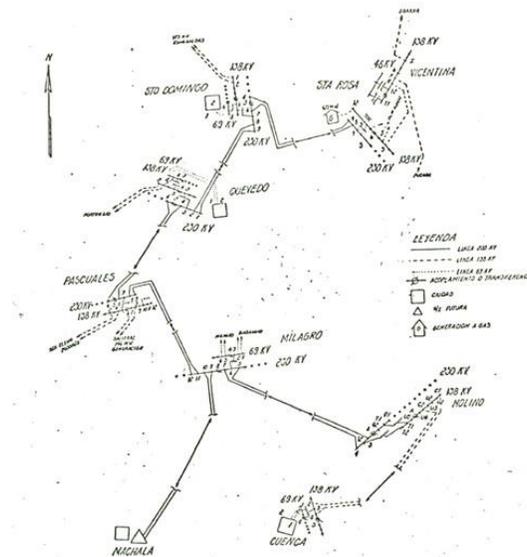


Figura 2.61: Figura 2.70: Sistema Nacional Interconectado: Fuente: CELEC EP.[11]

2.4. Tipo de Torres

Dependiendo de la cantidad de tensión que se vaya a transportar por las torres se tienen los diferentes tipos.

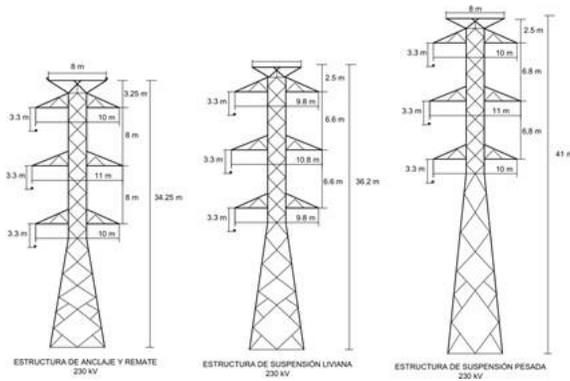


Figura 2.62: Estructuras para transmisión en 230 kV [6]

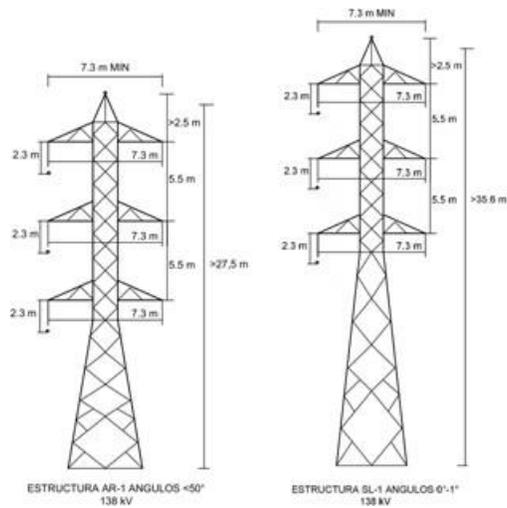


Figura 2.63: Torres a 138 kV [6]

Capítulo 3

Levantamiento de Información Correspondiente al Equipamiento de las Centrales Hidroeléctricas

3.1. Introducción

Las centrales hidroeléctricas del complejo Paute integral poseen varios tipos de componentes dependiendo del lugar donde se ubican y de la altura de la caída de agua que posee cada central.

Para comenzar con la recopilación de la información de cada equipo, me he basado de información que se tiene en las propias centrales y se realizó una verificación de los datos allí encontrados para constatar si los valores referenciales están iguales o a existido alguna modificación con el transcurso del tiempo. En primer lugar se empezó con la recopilación de datos de cada central donde se determinó el siguiente equipamiento.

3.2. Central Hidroeléctrica Mazar

3.2.1. Casa Máquinas Mazar

La Casa de Máquinas de Mazar esta dentro de la montaña, posee varios niveles en los cuales encontramos distribuido los diferentes equipo y generadores de la central.

Tabla 3.1: Especificaciones de Casa de Máquinas. Fuente: CELEC EP[11]

Forma	subterránea
Ancho Longitud Altura	21 x 62,50 x 41 m

3.2.2. Turbina de Mazar

Tabla 3.2: Especificaciones de las Turbinas. Fuente: CELEC EP[11]

Cantidad	2
Tipo	Francis, eje vertical
Caudal	70,55 metros cúbicos/seg

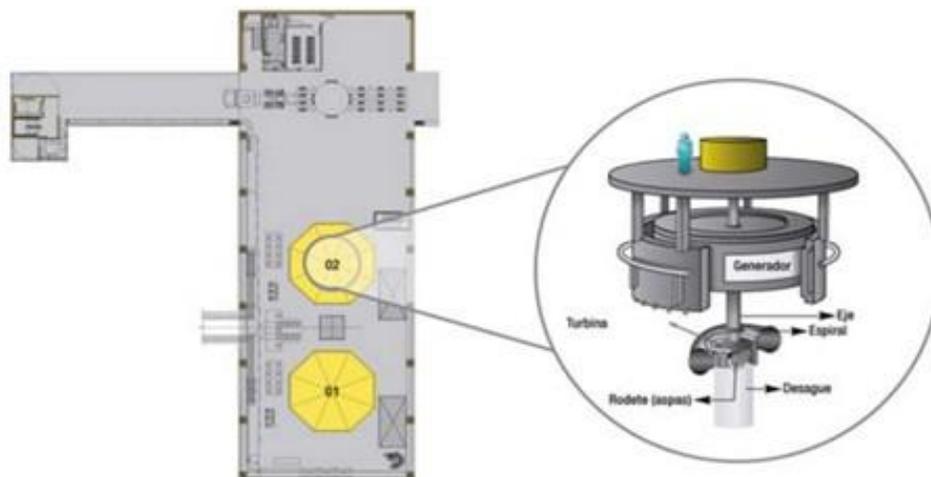


Figura 3.1: Distribución del Generador y la turbina en casa de máquinas. Fuente: CELEC EP[11]



Figura 3.2: Casa de máquinas. Fuente: CELEC EP.[11]

3.2.3. Generadores de Mazar

Datos de los generadores de la Central Hidroeléctrica Mazar.

Tabla 3.3: Central Hidroeléctrica Mazar. Fuente: CELEC EP[11]

		Datos de los Generadores		
Central		Paute-Mazar		
Unidad			U1	U2
Marca			ALSTOM	ALSTOM
Aislamiento			F	F
Potencia nom		Megavoltamperios	100	100
Generación		Megawaaios	85	85
Pot. Reactiva	max	MVAR	50	50
	min	MVAR	-60	-60
Cos θ			0.85	0.85
Tensión nom		kV	13.8	13.8
Número de polos			28	28
Velocidad nom		rpm	257.14	257.14
Reactancia de dispersión	Xl	pu	0.13	0.13
Reactancia de secuencia negativa	X ₁	pu	0.2	0.2
Reactancia de secuencia cero	X ₀	pu	0.091	0.091
Relación X_{qu} / X_{du}		pu	≤ 1.35	≤ 1.35
Momento de inercia	GD ²	Tm ²	4209	4209

3.2.4. Transformadores de Mazar

Datos de los Transformadores de la Central Mazar

Para cada unidad generadora se tiene un transformador denominado principal que ayuda a elevar el voltaje para trasladar la energía generada hacia la subestación y desde allí al lugar de consumo. La central dispone de dos transformadores los cuales están enbebidos en aceite.

Tabla 3.4: Especificaciones de los Transformadores. Fuente: CELEC EP[11]

Cantidad	2
Generación	100 MegavoltsAmperios
Tensión	13,8/230kV

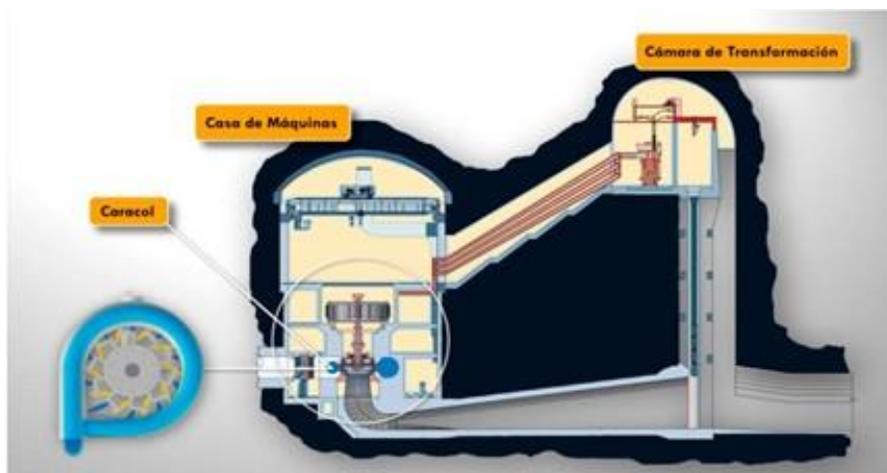


Figura 3.3: Representaciones de la turbina y casa de máquinas. Fuente: CELEC EP.[11]

La siguiente tabla presenta datos del transformador para la alimentación Zona de Presa (TPR).

Tabla 3.5: Datos del Transformador TPR. Fuente: CELEC EP[11]

Datos del transformador TPR	
Potencia Nominal	500 kVA
Voltaje nominal	13800 V / 480V
Grupo de conexión	Dyn1
Impedancia a 115°C	5,70%
No. de fases	3

A continuación, la tabla presenta datos del Transformador de alimentación del Edificio de Servicios (TES).

Tabla 3.6: Datos del Transformador TES Fuente: CELEC EP[11]

Potencia Nominal	1 MVA
Voltaje nominal	13800 V / 480V
Grupo de conexión	YNyn0(d)
Impedancia	6,05 %
No. de fases	3

Tabla 3.7: Datos de los Transformadores TPSA (3 transformadores monofásicos). Fuente: CELEC EP.[11]

Potencia Nominal	333 kVA
Voltaje nominal	230 kV / 13,8 kV
Grupo de conexión	YN-yn
Impedancia	TPSA1 = 7.14 % (85°C)1138 W TPSA2 = 7.25 % (85°C)1155 W TPSA3 = 7.20 % (85°C)1183 W

Tabla 3.8: Transformador TSA1 y TSA2. Fuente: CELEC EP.[11]

Capacidad	1,25 Megavoltamperios
Primario	13,8 kilovoltios
Secundario	480 Voltios

Tabla 3.9: Transformador TSAU1 y TSAU2. Fuente: CELEC EP[11]

Capacidad	300 Magavoltamperios
Primario	13,8 kilovoltios
Secundario	480 Voltios

Tabla 3.10: Transformador TAG1 y TAG2 Fuente: CELEC EP[11]

Capacidad	3,5 Megavoltamperios
Primario	13,8 kilovoltios
Secundario	13,8 kilovoltios

3.2.5. Subestación Mazar

La subestación de la Central Mazar contiene un tipo de aislamiento con gas SF6 lo cual permite que se pueda tener en un muy reducido espacio toda la subestación.

Tabla 3.11: Subestación GIS. Fuente: CELEC EP[11]

Clase	Exterior con aislamiento SF6
Tensión	230 kilovoltios
Longitud x Alto	66 metros x 23 metros

3.2.6. Placas de los trafos de Mazar

Las placas de los trafos. de la central hidroeléctrica Mazar se presentan a continuación en las siguientes figuras:

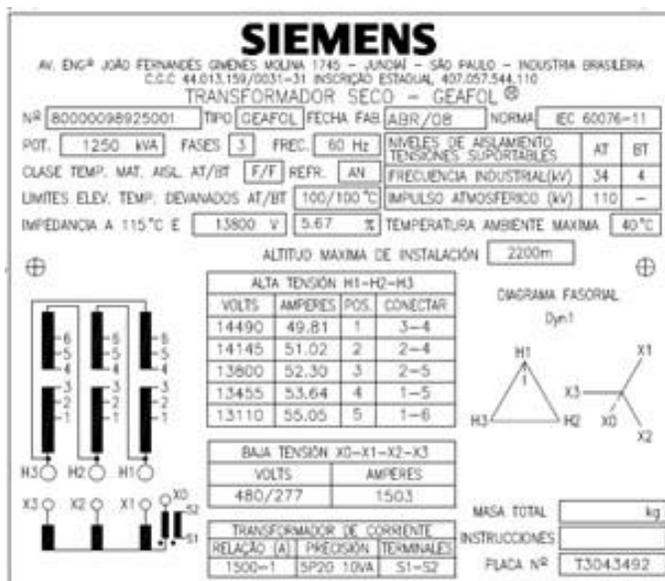


Figura 3.4: Placa del transformador TSA1 Fuente: CELEC EP[11]

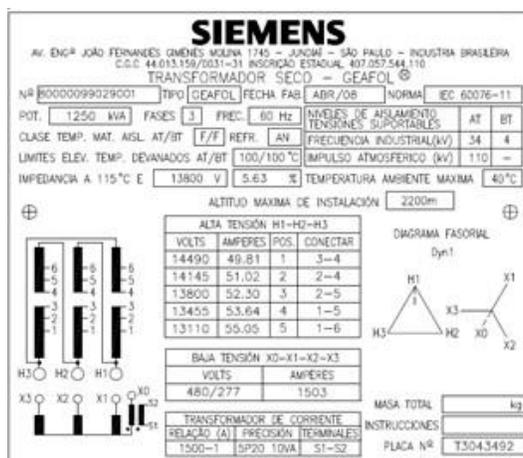


Figura 3.5: Placa del transformador TSA2 Fuente: CELEC EP[11]

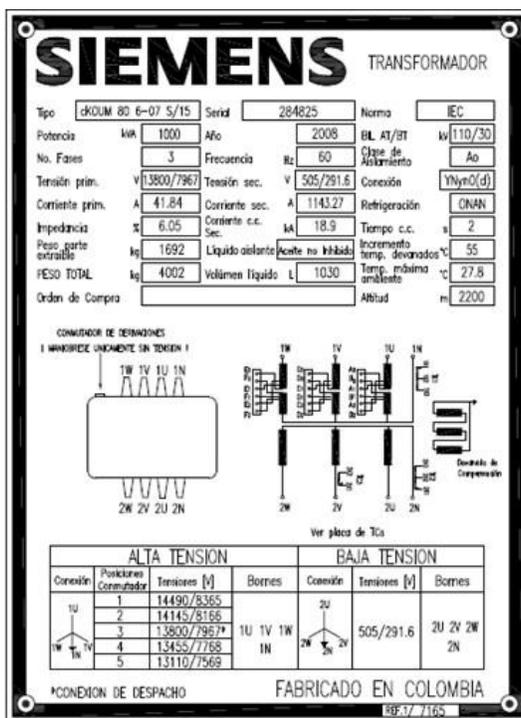


Figura 3.6: Placa del transformador TES Fuente: CELEC EP[11]

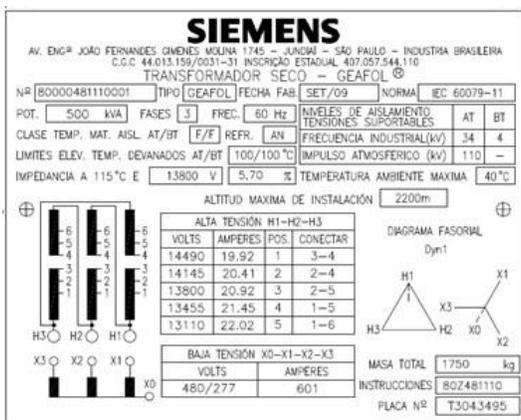


Figura 3.7: Placa del transformador TPR Fuente: CELEC EP[11]

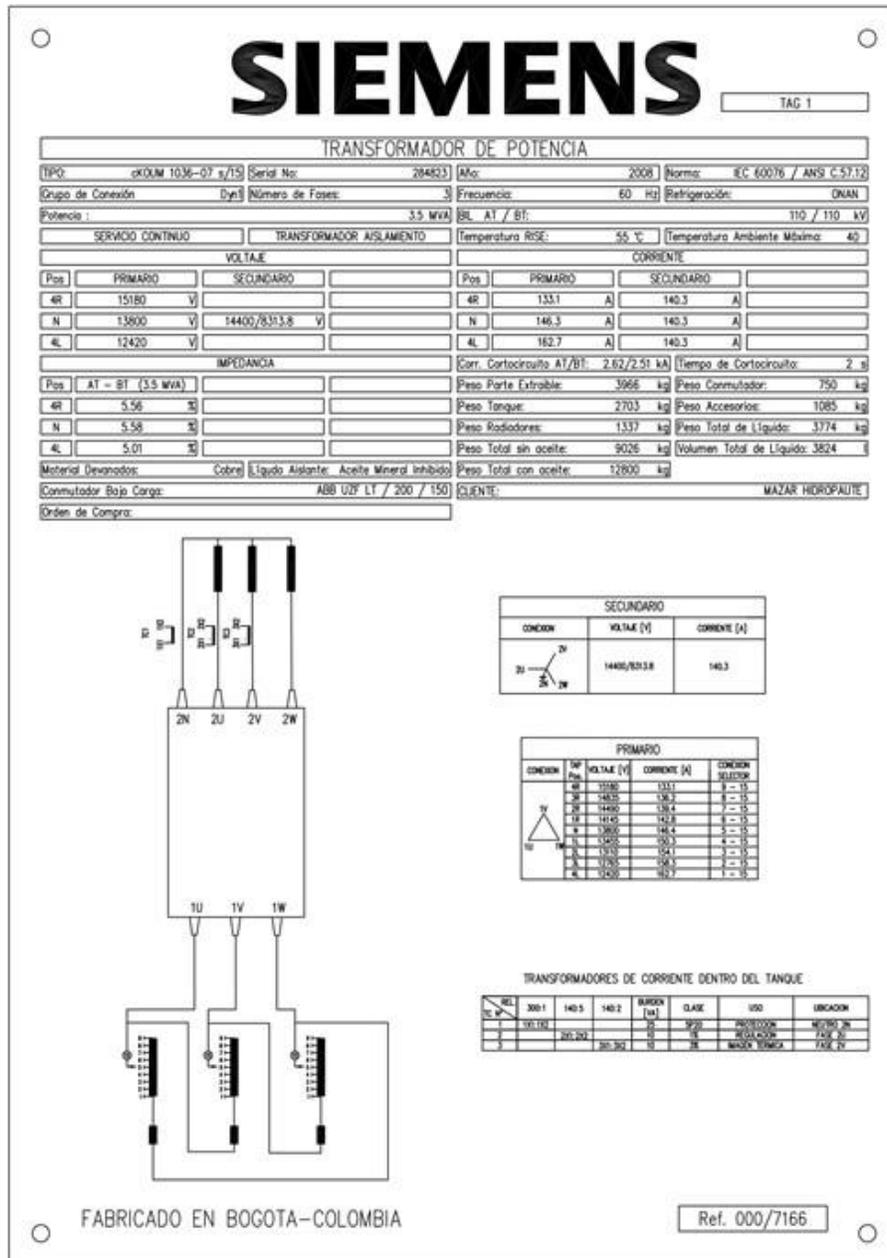


Figura 3.8: Placa del transformador TAG1 Fuente: CELEC EP[11]

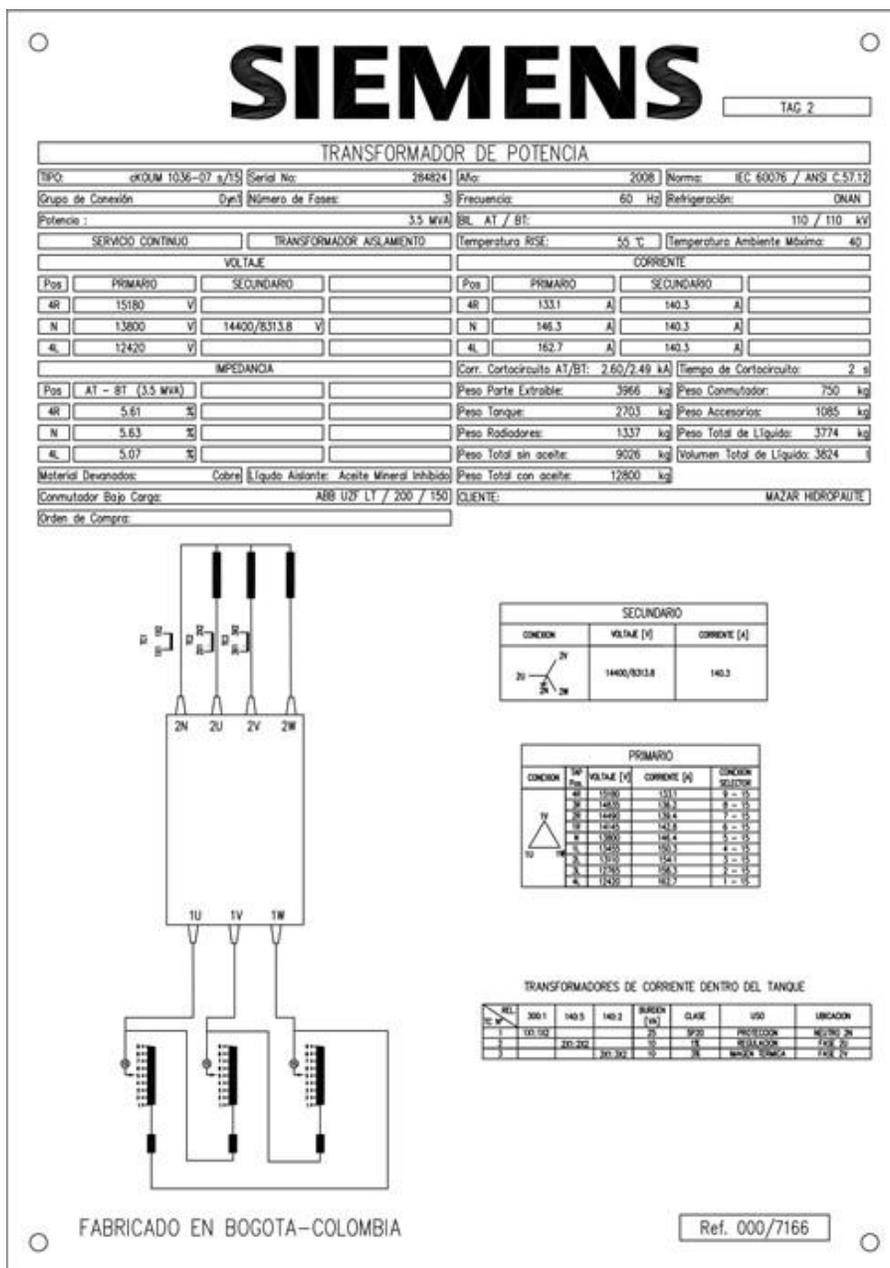


Figura 3.9: Placa del transformador TAG2 Fuente: CELEC EP[11]

Conexión Transformadores de Sistemas Auxiliares Mazar

Los sistemas auxiliares ayudan a tener energía para la misma unidad y casa de máquinas. La Figura 3.10 muestra la conexión de transformadores de Sistemas Auxiliares.

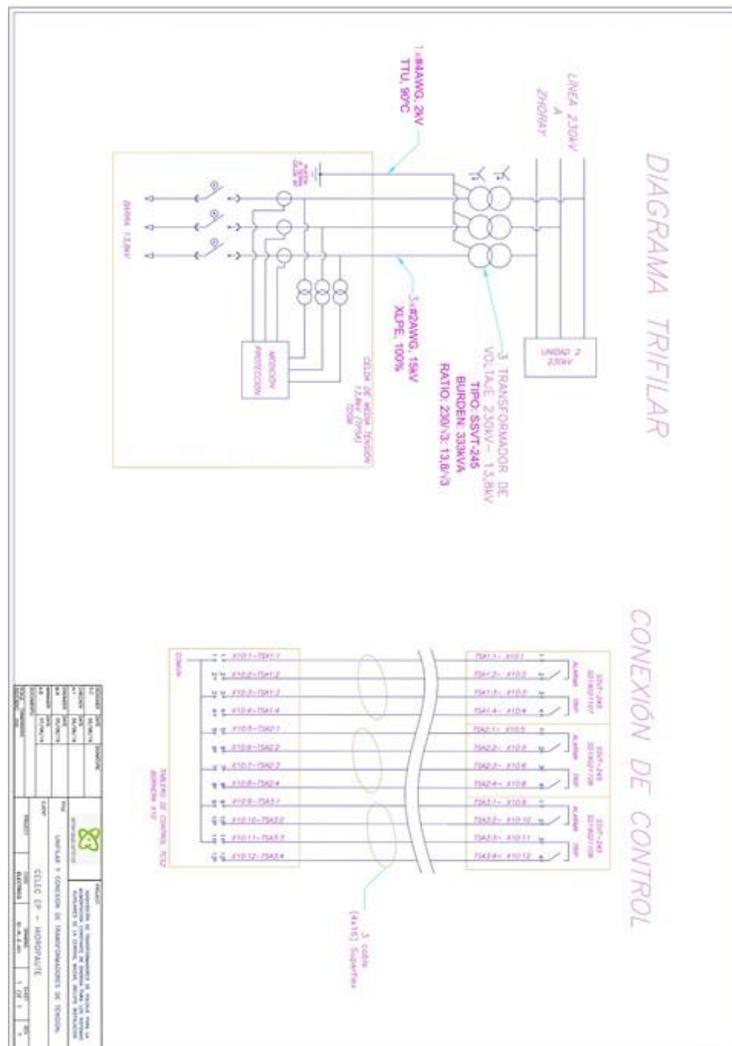


Figura 3.10: Conexión transformadores de sistemas auxiliares. Fuente: CELEC EP.[11]

Presa Mazar La construcción de la presa se detalla en la siguiente tabla

Tabla 3.12: Presa. Fuente: CELEC EP[11]

Clase	Enrocado con cara de hormigon
Ubicación	2166 metros
Cota Lecho(proyecto)	1990 metros
Espesor Çara"	0.77/0.30 metros
Espesor Plinto	0.90 metros/0.50 metros
Ancho Plinto Derecho(max/min)	9.00 metros/7.00 metros
Ancho Base(presa)	500 metros
Vol. de hormigon	36.130 metros cúbicos
Vol. de relleno	5'483.000 metros cúbicos

3.2.7. Cable de 230kV 1x500mm² XLPE de Mazar

Se puede distinguir los Materiales de construcción y geometría del cable de evacuación de energía a 230kV. Por otra parte, el espesor medido en cualquier punto puede ser menos en acuerdo con la tolerancia definidas en la norma CEI 62067 [26]. Las características del conductor como distancia, voltaje, etc. pueden ser ingresados en el software tal como lo indica el manual Power factory [13].

1-CONDUCTOR OBTURADO

Sección: 500 mm²

Material: Aluminio

Diámetro indicativo: 26.6 mm

2- PANTALLA SEMICONDUCTORA

Espesor indicativo: 1.5 mm

3- AISLAMIENTO

Material: polietileno reticulado

Espesor promedio mínimo: 22 mm*

4- PANTALLA SEMICONDUCTORA

Espesor indicativo: 1.5 mm

5- CINTAS SEMICONDUCTORAS HINCHABLES

Espesor indicativo: 0.46 mm

6-PANTALLA DE ALAMBRES DE ALUMINIO

7- CINTAS SEMICONDUCTORAS HINCHABLES

Espesor indicativo: 0.46 mm

8-CINTA METALICA LAMINADA



Figura 3.11: Corte del cable 1x500mm² aluminio XLPE 230 Kv. Fuente: CELEC EP.[11]

Material: Aluminio

Tipo: capa continua lisa de tipo longitudinal solapada y sellada

Espesor: 0.5 mm

9- CUBIERTA EXTERIOR (NEGRA) ESTRIADA

Material: PEAD Tipo ST7

Espesor promedio mínimo: 5 mm*

DIAMETRO EXTERIOR INDICATIVO: 98 mm

PESO INDICATIVO: 7800 kg/km

RADIO DE CURVATURA MINIMO:

- en permanente: 1.8 m

- durante el tendido: 2 m

Las características de los distintos conductores de Central Mazar se presentan en las siguientes tablas:

Tabla 3.13: Datos de los conductores de los TPSA (fases). Fuente: CELEC EP.

Datos de los conductores de los TPSA(fases)	
Conductor	Cobre XLPE
Calibre del conductor	2 AWG
Tensión máxima de servicio	15 kV
No. de conductores	3
Sección nominal	33,6 mm ²
Longitud de la línea hasta el TDSM	70 metros

Tabla 3.14: Datos del conductor de los TPSA (neutro). Fuente: CELEC EP

Datos del conductor de los TPSA(neutro)	
Conductor	Cobre XLPE
Calibre del conductor	4 AWG
Tensión máxima de servicio	15 kV
Sección nominal	21,15 mm ²
Longitud de la línea hasta el TDSM	70 metros

Tabla 3.15: Datos del conductor de los TSA (desde el TDSM hacia el TDCM).
Fuente: CELEC EP[11]

Datos del conductor de los TSA(desde el TDSM hacia el TDCM)	
Conductor	Cobre XLPE
Sección nominal	35 mm ²
Tensión máxima de servicio	15 kV
Longitud de la línea hasta el TDCM	850 metros aprox.

Tabla 3.16: Cables Aislados. Fuente: CELEC EP.[11]

Secuencia y	$0,10 + j0,017\Omega/kil \acute{o}metro$
Secuencia 0	$0,21 + j0,103\Omega/kil \acute{o}metro$

3.2.8. Cargas de Mazar

Los siguientes datos son de algunas de las cargas (motores) de mayor dimensión instalados en la central y que se derivan de la alimentación del tablero

de distribución de casa de máquinas TDCM.

Tabla 3.17: Datos de cargas instaladas en la central Mazar. Fuente: CELEC EP[11]

Bomba del SAE BWR1	
Potencia	110 kW
Voltaje	460 V
Corriente	169 A
N0. de fases	3
Bomba de la SAE UH BOIR1	
Potencia	18,5 kW
Voltaje	460 V
Corriente	30,8 A
N0. de fases	3
Bomba del Sello de la turbina BFSET1	
Potencia	3,7 kW
Voltaje	460 V
Corriente	6,22 A
N0. de fases	3
Bomba de Drenaje BDR1	
Potencia	55 kW
Voltaje	460 V
Corriente	118,4 A
N0. de fases	3

El tablero que mayor carga tiene es el TDCGCM.

Consumo promedio diario	3,5 MWh	1,3 MVARh
-------------------------	---------	-----------

El levantamiento de cargas del tablero de distribución de cargas generales de casa de máquinas TDCGM se presenta en la siguiente figura.

Tabla 3.18: Tablero TDCGCM. Fuente: CELEC EP[11]

TABLERO DE DISTRIBUCIÓN DE CARGAS GENERALES DE CASA DE MÁQUINAS(TDCGCM) Nivel: 2000,8 msnm				
CODIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	GAVETA	POTENCIA(KW)	CORRIENTE(A)
1	R13	Gaveta de reserva	N12F.5	16
2	TFACA1	Sistema de Energía Ininterrumpida Fuente Alternativa CA	N12F.6	16
3	R2	Gaveta de reserva	N12F.7	25
4	INVS14	Inversor para Sistema de Vigilancia Electrónica e Iluminación de Emergencia de Casa de Máquinas	N12F.8	28
5	CB2	Cargador de Baterías 125Vcc N°2	N12F.9	80
6	R3	Gaveta de reserva	N12F.10	63
7	CB1	Cargador de Baterías 125Vcc N°1	N12F.11	80
8	GM1	Grúa Monoriel Eléctrica 120KN.	N14F.3	74
9	SRAS1	Secador de aire servicios	N14F.4	16
10	CRAS1	Compresor 1 de Aire Servicio	N14F.5	60
11	CRAS2	Compresor 2 de Aire servicio	N14F.6	60
12	PGCM	Puente Grúa - Capacidad 2000/200KN	N14F.7	32
13	BCSS1	Bomba N°1 del Sistema de Cloaca Sanitaria	N14F.8	15
14	BMP3	Boomba de Recalque 1 para abastecimiento Edificio de Servicios	N14F.9	15
15	TIN6	Tablero de iluminación normal 6 Túnel de acceso Casa de Maquinas	N15F.2	50
16	TIN7	Tablero de iluminación normal 7 Túnel de acceso Desague de Fondo	N15F.3	40
17	TN11	Tablero de iluminación normal 11 Túnel de acceso Cresta de la Presa	N15F.4	50
18	TTC1	Caja de Distribución de Fuerza de Toma Corrientes 1 Casa de Máquinas	N15F.5	32
19	R4	Gaveta de Reserva	N15F.6	0,37
20	BCSS2	Bomba N°2 del Sistema de Cloaca Sanitaria	N15F.7	0,37
21	BWP4	Bomba de Reciclaje 2 para abastecimiento Edificio de Servicios	N15F.8	15
22	TTC2	Caja de Distribución de Fuerza de Toma Corrientes 2 Casa de Máquinas	N16F.3	150
23	TTC3	Caja de Distribución de Fuerza de Toma Corrientes 3 Casa de Máquinas	N16F.4	100
24	CB2	Caja de Distribución de Fuerza de Toma Corrientes 4 Casa de Máquinas	N16F.5	125
25	CB2	Caja de Distribución de Fuerza de Toma Corrientes 5 Casa de Máquinas	N16F.6	100
26	ASCM	Ascensor para el personal Casa de Máquinas	N16F.7	50
27	BCSS3	Bomba N°3 del Sistema de Cloaca Sanitaria	N16F.8	v0,37

El TDES (tablero de distribución del edificio de servicios) alimenta todas las cargas que se encuentran en el sector del centro de fuerza y edificio administrativo.

Consumo promedio diario	0,33 MWh	0,23 MVARh
-------------------------	----------	------------

El cuadro es el siguiente

Tabla 3.19: Cargas del TDES. Fuente: CELEC EP[11]

TABLERO DE DISTRIBUCIÓN DE SERVICIOS AUXILIARES DEL EDIFICIO DE SERVICIOS(TDES) Nivel: 2213.3 msnm				
CODIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	GAVETA	POTENCIA(KW)	CORRIENTE(A)
1	TNES	Tablero del Sistema de Iluminación Normal Edificio de Servicios	N61F.2	44
2	INVS13	Inversor para el Sistema de Vigilancia Electrónica	N61F.3	28
3	CB3	Cargador de Baterías 125Vcc N°3-Edificio de Servicios	N61F.4	32
4	CB4	Cargador de Baterías 125Vcc N°4-Edificio de Servicios	N61F.5	32
5	R1	Gabeta de reserva	N61F.6	1,12KW
6	BOAL101	Bomba Eléctrica Llenado Tanques-Respaldo	N61F.7	3KW
7	BOAL102	Bomba Eléctrica Llenado Tanques-Principal	N61F.8	3KW
8	TTC6	Caja de Distribución Fuerza Toma Corrientes-Edificio de Servicios	N61P.6	100
9	CW1	Unidad Enfriamiento de aire N°1-Unidad Acondicionadora Aire Edi. Administración	N61P.7	63
10	CW2	Unidad Enfriamiento de aire N°2-Unidad Acondicionadora Aire Edi. Administración	N61P.8	63
11	CW5	Unidad Enfriamiento de aire N°5-Unidad Acondicionadora Aire Edi. Servicios	N61P.9	57
12	CW6	Unidad Enfriamiento de aire N°6-Unidad Acondicionadora Aire Edi. Servicios	N61P.10	57
13	TDTD	Tablero Distribución Tunel de Descarga	N61P.11	160

El TDTA (tablero de distribución de la toma de agua) alimenta todas las cargas que se encuentran en el sector de la presa y desagüe de fondo.

Consumo promedio diario	0,60 MWh	0,09 MVARh
-------------------------	----------	------------

Las cargas son

Tabla 3.20: Cargas del TDTA. Fuente: CELEC EP[11]

TABLERO DE DISTRIBUCIÓN DE SERVICIOS AUXILIARES DE LA CÁMARA DE LA COMPUERTA DE LA TOMA DE AGUA(TDTA) Nivel: 2161 msnm				
CODIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	GAVETA	POTENCIA(KW)	CORRIENTE(A)
1	TPR	Transformado zona Presa(interruptor)	N71.2	630
2	TDDF	Tablero Distribución desagüe de Fondo(interruptor)	N71.3	400
3	TDPS	Tablero Distribución servicios Auxiliares CA presa	N72.2	67
4	GM3	Puente Grúa compuerta mantenimiento Túnel Carga 300kn	N72.3	94
5	MLR1	Máquina Limpia rejillas de la toma de agua	N72.4	106
6	UPSTA	Sistema de Emergencia Interrumpida(UPS) Uni. Term. Rema. Cam.	N72.5	16
7	TTC7	Caja de Distribución Fuerza Toma Corrientes cámara compuertas del tunel de carga	N72.6	67
8	R1	Gaveta de reserva	N72.7	16
9	R2	Gaveta de reserva	N72.8	16
10	TIN15	Tablero Iluminación Normal Cámara de Compuertas del Túnel de Carga	N72.9	47
11	VETA	Ventilador Centrifugo de la cámara de compuertas del tunel de carga	N72.10	0.95KW

3.2.9. Torres

Con la condición del conductor a la máxima temperatura y de acuerdo a las características del terreno se ha procedido a ubicar las estructuras en los vértices y en los sitios intermedios obteniéndose el resultado en la siguiente tabla.

Con lo que resulta que se utilizarán: Torres AR2-MS y 2 Torres SP2-MS

Tabla 3.21: ubicación de estructuras. Fuente: CELEC EP[11]

Estructura		Abcisa	Cota	Altura al punto de amarre(APA)	Vano adelante	Vano Medio	Vano Peso	Angulo de Línea	Extensión de cuerpo
N°	Tipo	mts	mts	mts	mts	mts	mts		mts
Pórtico de Shoray		0	2728,8	18,0	61,53	30,8	136,0		-
1	AR2-MS	61,5	2715,7	21,00	349,20	205,4	509,7	79°11'09"	-
2	SP2-MS	410,7	2613,7	31,00	680,73	515,0	522,3	12°53'51"	-
3	SP2-MS	1091,5	2420,9	40,00	492,13	586,4	828,5	-2°04'04"	9,00
4	AR2-MS	1583,6	22228,5	19,50	876,05	684,1	84,4	9°52'11"	-
5	AR2-MS	2459,6	2195,6	19,50	48,80	462,4	232,7	-8°52'58"	-
Pórtico de Mazar		2508,4	2212,3,	18,00	0,00	24,4	194,8		-

Los parámetros eléctricos de la LT Paute Cuenca a 230kv y el cálculo de parámetros electromagnéticos se representan a continuación.

Distribución de conductores en la torre de suspensión:

Código: ACAR 750

Calibre: 750 kcmil

Composición: 37 Hilos, 18 de Aluminio y 19 de Aleación de Aluminio

Diámetro: 25.32 mm

Resistencia Eléctrica: $0.0817 \Omega/km(a20^{\circ}C)$

Características de Cable de Guardia:

Tipo: OPGW

Calibre: 12.5 mm de diámetro

Resistencia Eléctrica: 1.7

omega/km

Frecuencia: 60 Hz

Resistividad promedio: $450 \Omega - m$

Longitud de la L/T : 2,5Km.

Para este Cálculo se utilizó un programa computacional que usa el método matricial, en el caso del doble circuito los resultados son:

Capacitancia de Secuencia Positiva $42.1 \times 10^{-9} f$

Capacitancia de Secuencia Cero: $16.85 \times 10^{-9} f$

Impedancia de Secuencia Positiva: $0.105 + j 0.6625 \Omega$

Impedancia de Secuencia Cero: $1.003 + j 2.82 \Omega$

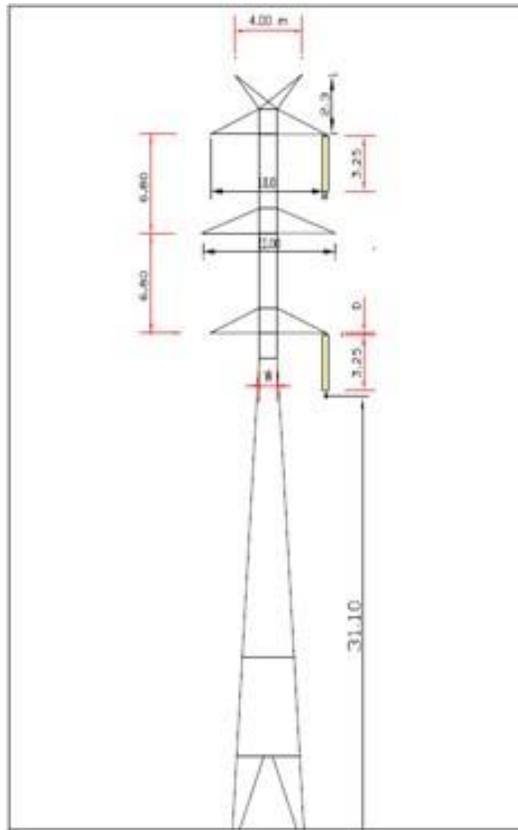


Figura 3.12: Medidas de torre de suspensión. Fuente: CELEC EP[11]

La Línea de interconexión Mazar - S/E Shoray a 230 kV, consta de doble circuito en estructura auto soportante de acero galvanizado, reticulado de 40 metros de altura aproximadamente. Cabe señalar que los conductores son de aluminio reforzados en su núcleo con alambres de aleación de Aluminio (ACAR) de 750 Kcmil, además contienen dos cables de guardia en material de acero con alma de fibra óptica OPGW como se muestra en la siguiente figura 3.14.

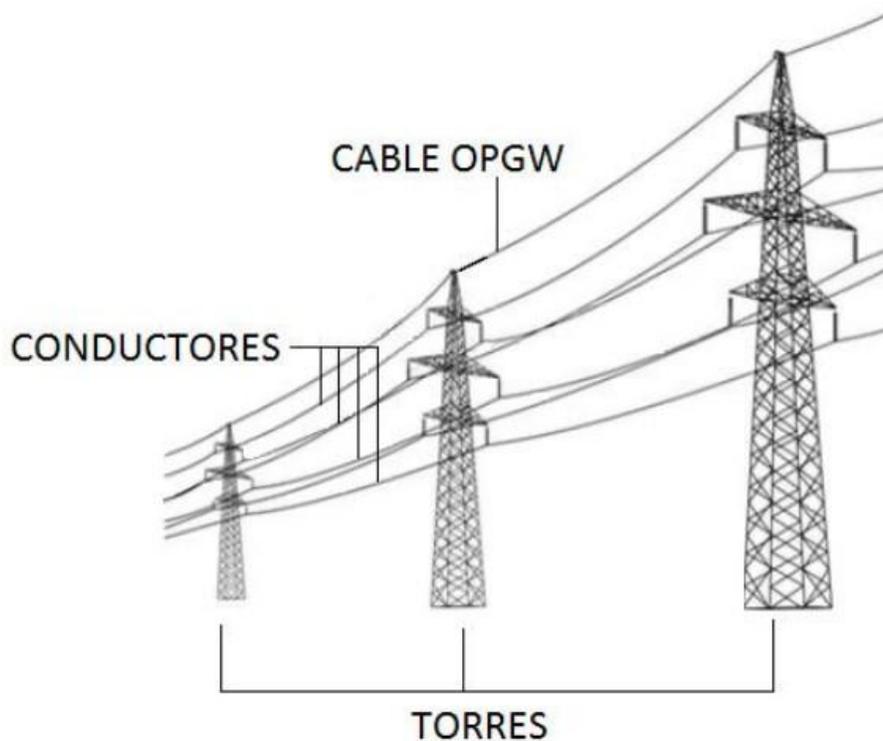


Figura 3.13: Torre suspensión desde presa hasta las centrales: Fuente el Autor

3.2.10. Cargas Presa

Servicios Auxiliares de C.A. de la Central

Tenemos un centro de fuerza a 480V con dos barras y 2 centros de carga a 480 V para el trabajo propio de la unidad.

Servicios Auxiliares de C.C. de la Central

Tenemos 2 centros de cargas a 125 Vcc con bancos de baterías de 400 y 500 Ah. Las cargas son

Tabla 3.22: Cargas de Servicios Auxiliares del desague de fondo. Fuente: CELEC EP[11]

TABLERO DISTRIBUCIÓN DE SERVICIOS AUXILIARES DEL DESAGUE DE FONDO(TDDF)-Nivel:2064.85 msnm				
CODIFICACIÓN	DESCRIPCIÓN	GAVETA	POTENCIA(KW)	CORRIENTE(A)
1	PGDF	Puente Grúa-Capacidad 220 KN	N66.2	75
2	TIN12	Tablero de Iluminacion Normal Cámara Compuertas Desague de Fondo	N66.3	45
3	UPSDF	Sistema Energia Ininterrumpida(UPS)	N66.4	16
4	R1	Gaveta de Reserva	N67.2	16
5	R2	Gaveta de Reserva	N67.3	16
6	TCDF	Tablero de Control Local de las Compuertas del Desague de Fondo	N67.4	16
7	TTC9	Caja de Distribución de Fuerza Toma Corrientes Compuertas DF	N67.5	80
8	VEDF	Ventilador Centrifugo Succión Simple para Exitación Compuertas DF	N67.6	2.2KW
9	UHDF	Unidad Oleo.Hidráulica Compuertas Desague de Fondo	N67.8	312

Tabla 3.23: Cargas de Servicios Auxiliares en el área de la Presa. Fuente: CELEC EP[11]

TABLERO DE DISTRIBUCION DE SERVICIOS AUXILIARES CA EN EL AREA DE LA PRESA(TDPS)-Nivel:2167.00 msnm				
CODIFICACION	DESCRIPCION	GAVETA	POTENCIA(KW)	CORRIENTE(A)
1	TIN16	Tablero de Iluminacion Normal Vertedero	N76.4	47
2	R1	Gaveta de Reserva	N76.5	32
3	R2	Gaveta de Reserva	N76.6	16

3.3. Central Hidroeléctrica Molino

3.3.1. Generadores de Molino

Se presenta a continuación, los datos de los generadores de Molino.

Tabla 3.24: Central hidroeléctrica Molino. Fuente: CELEC EP[11]

GENERADORES				
Hidroeléctrica		Molino		
Máquinas			fase AB	fase C
Tipo de rotor			Polos Salientes	Polos Salientes
Potencia Nominal		MVA	111	127,7
Capacidad efectiva		MW	100	115
Potencia Reactiva	max	MVAR	45	50
	min	MVAR	-45	-55
Factor de potencia			0,9	0,9
Voltaje Nominal		kV	13,8	13,8
Secuencia cero	R ₀	pu		
		pu	0,11	0,15
Secuencia negativa	R ₁	pu	0,00042	0,008
	X ₁	pu	0,195	0,211
Reactancias Subtransitorias	X _d "	pu	0,0975	0,1992
	X _q "	pu	0,0975	0,2404
Constantes transitorias c.c.	Td0	s	7,03	6,95
	Tq0"	s		
Resistencia de campo	R _f	ω	0,156	0,379
Factor de amortiguamiento con carga	D	pu	2	2
Capacidad térmica del rotor	I ² T	pu		
Momento de inercia	WR ²	lb.ft ²	12,3 x 10 ⁶	



Figura 3.14: Generador Molino. Fuente: CELEC EP[11]

3.3.2. Transformadores de Molino

Transformador Principal.

En la Tabla 3.22 se puede observar la fase AB del transformador principal de la Central Molino, donde se considera los siguientes parámetros:

* Corresponde a unidades 1,2,3,4,5

** Impedancia AT 114MVA, Relación 13.8/138kV; 11.4 %

Tabla 3.25: Transformador principal Fase AB. Fuente: CELEC EP[11]

FASE AB		
Subestación		Molino
Nombre del transformador		TU*
Pot. nominal(MVA)		114
Cantidad de devanados		2
Grupo de conexión	HV	Yn1
	LV	D
	Ángulo de fase	30
Voltaje nominal	HV	138000
	LV	13800
TAP	en el lado de	HV
	tensión adicional por TAP%	2,5
	desfase	ND
	posición nominal	D
	posición mínima	E
	posición máxima	A
	posición actual	C
Temperatura Aceite	grados centigrados	55°C
Secuencia Positiva	R1 %	**
	X1 %	**
Secuencia Cero	R0 %	**
	X0 %	**

En la siguiente tabla (Tabla 3.23) se puede observar la fase C del transformador principal de la central Molino, donde se considera los siguientes parámetros:

* Corresponde a unidades 6, 7, 8, 9, 10

** Impedancia AT 134MVA, Relación 13.8/246.3kV; 13.06 %

Tabla 3.26: Transformador principal Fase C. Fuente: CELEC EP

FASE C		
Subestación		Molino
Nombre del transformador		TU*
Pot. nominal(MVA)		134
Número de devanados		2
Grupo de conexión	HV	Yn11
	LV	D
	Ángulo de fase	330
Voltaje nominal	HV	230000
	LV	13800
TAP	en el lado de	HV
	tensión adicional por TAP%	2,5
	desfase	ND
Temperatura Aceite	grados centigrados	60°C
Secuencia Positiva	R1 %	**
	X1 %	**
Secuencia Cero	R0 %	**
	X0 %	**

Transformadores TRJ-TRK

Tabla 3.27: Transformador TRJ. Fuente: CELEC EP[11]

Cantidad	1
Potencia Nominal	15,8MVA
Voltaje nominal	13,8/13,8kV
Grupo de conexión	Dyn1
Impedancia	10%
No. de fases	3

Tabla 3.28: Transformador TRK. Fuente: CELEC EP[11]

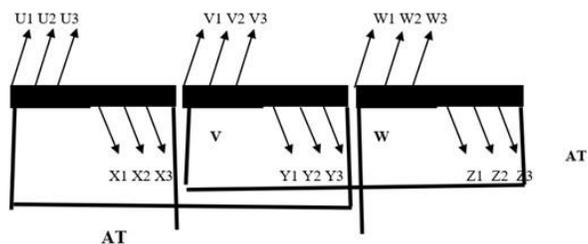
Cantidad	2.
Potencia Nominal	3,75kVA
Voltaje nominal	13,8/13,8kV
Grupo de conexión	Dyn1
Impedancia	4.76%
No. de fases	3

Transformadores auxiliares Fase AB

Se muestran los datos y características de la Fase AB de los transformadores auxiliares de la Central Hidroeléctrica Molino.

Tabla 3.29: Transformadores auxiliares Fase AB. Fuente: CELEC EP.[11]

TAP ACTUAL "13800V"							
multirow 1 em BAJA TENSIÓN TENSIÓN V 480 ALTA TENSIÓN	CORRIENTE A 379						
TENSIÓN V	CORRIENTE A	CONMUTADOR CONEXIONES					
14145	13,2 aprox.	U-U2	X-X1	V-V2	Y-Y1	W-W2	Z-Z1
13455	13,2 aprox.	U-U3	X-X2	V-V3	Y-Y2	W-W3	Z-Z2
13110	13,2 aprox.	U-U3	X-X3	V-V3	Y-Y3	W-W3	Z-Z3



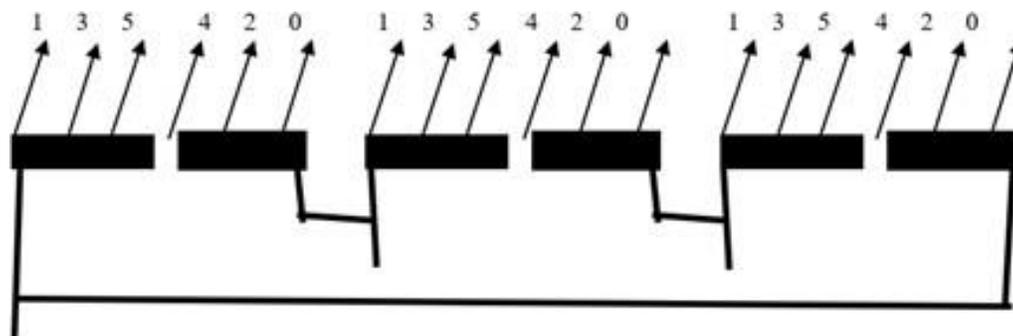
315kVA, 13.8/0.48kVA, AN, DYn1.

Transformadores auxiliares Fase C

Se presenta los datos y características de la Fase C de los transformadores auxiliares de la Central Hidroeléctrica Molino.

Tabla 3.30: Transformadores de servicios auxiliares de Fase C. Fuente: CELEC EP.[11]

TAP ACTUAL "2 3"		
BAJA TENSION TENSION V 480 vacío	CORRIENTE A 481,1	
ALTA TENSION TENSION V 13110 13455 13800 14145 14490	CORRIENTE A 17,6 17,2 16,7 16,3 15,9	CONMUTADOR CONEXIONES 0-1 1-2 2-3 3-4 4-5



AT

400kVA, 13,8/0,48 kV, DYn1, Impedancia 4%

Transformadores de excitación

La Tabla 3. presenta los datos y características de la siguiente manera.

Tabla 3.31: Transformadores de Excitación. Fuente: CELEC EP[11]

	FASE AB	FASE C
Relación de Transformación	28,75	32,093
Potencia	195 kilovoltamperios	270 kilovoltamperios
Voltaje de Alta	13,8 kilovoltios	13,8 kilovoltios
Voltaje de Baja	324 kiloVoltios	430 voltios

3.3.3. Cables de Molino

Los cables de fuerza conectan el transformador principal que se encuentra a una elevación de 1333m el cual en el lado de baja se conecta a la salida del generador a 13.8kV y el cable de fuerza inicia en el lado de alta del transformador mediante cables monopolares de aceite fluido(OF) de 230kV hasta unirse con la sub estación ubicada a 1640m. para el caso de la fase C y en el caso de la fase AB el cable es un EPR de 138kV.

Tabla 3.32: Cables de conexión. Fuente: CELEC EP

Características	FASE C	FASE AB
Sección	240 mm ²	400 mm ²
Número de conductores	5	5
Tensión nominal del cable	230 kilovoltios	138 kilovoltios
f	60 Hertz	60 Hertz
Capacidad por fase	0,2 uF/kilómetro	0,145 uF/kilómetro
Resistencia	0,075 Ω /kilómetro	0,073 Ω /kilómetro

Los cables de 230KV de la fase C básicamente está constituido por un conductor circular de cobre suave con sección del conductor de 240mm², con ducto central de aceite, pantalla electrostática sobre el conductor, aislamiento de papel, pantalla electrostática sobre el aislamiento, funda ondulada de aluminio y funda protectora a extrusión de PVC.

- a) Tipo de cable: Cable lleno de aceite a baja presión, monopolar, aislamiento de papel, conductor hueco de cobre.
- b) Longitud aproximada: 428 metros
- c) Condiciones y criterios básicos de diseño.

- Tensión nominal del sistema(entre fases) 230kV
- Tensión máxima de servicio (entre fases) 245kV
- Tensión máxima temporal(entre fases) 256kV
- Tensión nominal del cable 133/230kV
- Frecuencia nominal 60 Hz
- Nivel básico de aislamiento(BIL) 1050kVpico
- Capacidad de Aceite 2,6 l/m
- Esfuerzo dieléctrico máximo sobre el conductor a la tensión máxima de servicio, no mayor de 12kV/mm
- Espesor nominal de aislamiento 19.3mm
- Espesor mínimo del aislamiento no menor de 18.3mm
- Corriente máxima de régimen continuo 350A
- Factor de carga 100 %
- Corriente de cortocircuito simétrica r.m.s. 30kA
- Duración del cortocircuito 1 s
- Corriente dinámica de cortocircuito 75kAp
- Conexión del neutro del sistema Sólidamente a tierra
- Conexión a tierra de la funda metálica del cable Sólo en un extremo del cable
- Temperatura máxima de trabajo del conductor a la corriente máxima de régimen continuo 70°C

- Temperatura del aire ambiente 30°C
- Diferencia aproximada de nivel entre los extremos del cable 300m
- Presión hidrostática máxima del aceite en el cable 3000kPa
- Elevación de la instalación sobre el nivel del mar 1650m

d) Dimensiones principales del cable

- Diámetro del ducto de aceite 15mm
- Diámetro interior/exterior del conductor de cable apantallado 15/23,2mm
- Diámetro de la pantalla sobre el conductor 24,1 mm
- Espesor medio del aislamiento 19,9mm
- Espesor mínimo del aislamiento 19,9mm
- Espesor de la vaina de aluminio 5mm
- Espesor de la funda exterior termoplástica 4,4mm
- Espesor del papel aislante 0,05+0,17mm
- Diámetro del aislamiento 64,5mm
- Diámetro sobre la funda de aluminio 94,4mm

- Diámetro exterior del cable 104mm
- Peso por metro 14,7kg

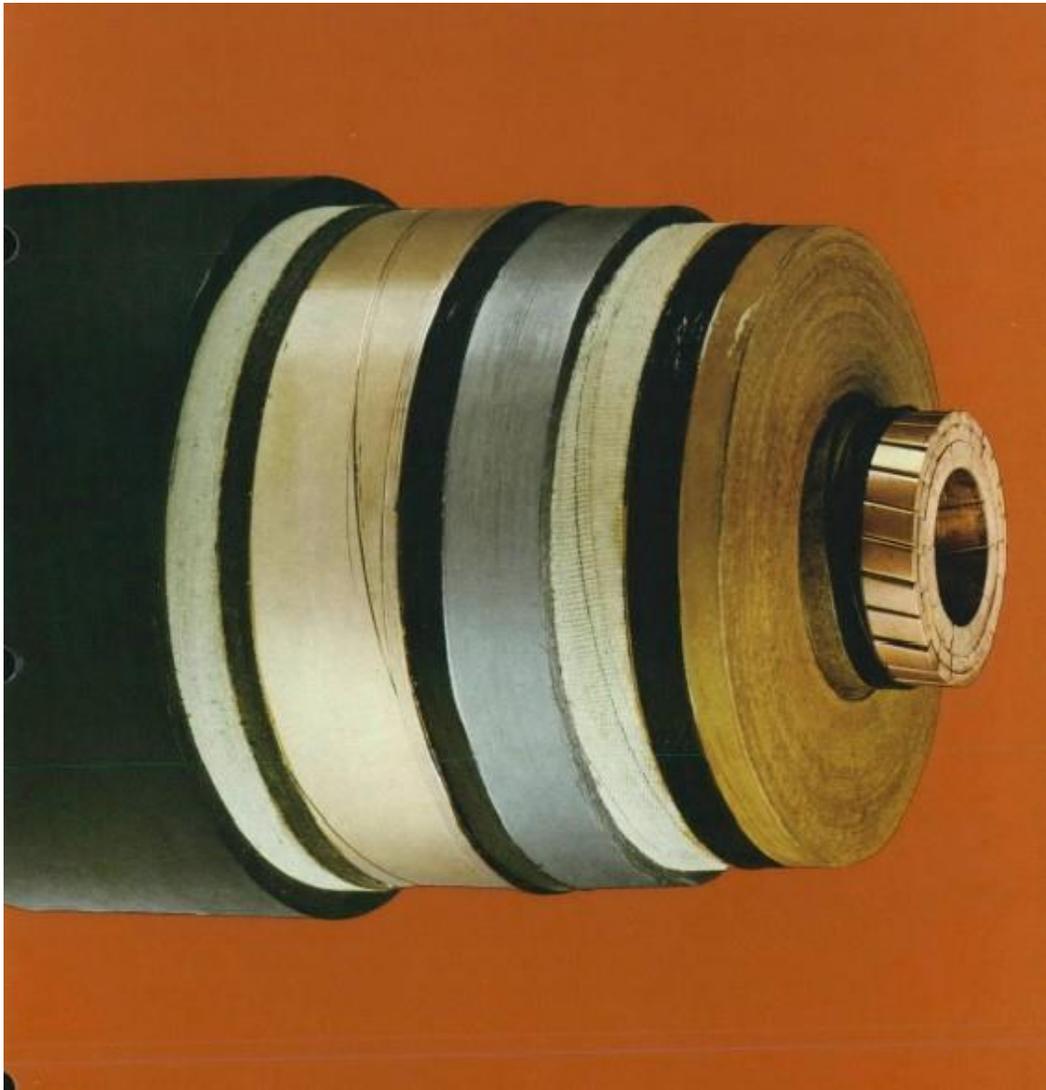


Figura 3.15: Vista del cable a 230KV. Fuente: Celec

En la siguiente figura se muestra las especificaciones del cable

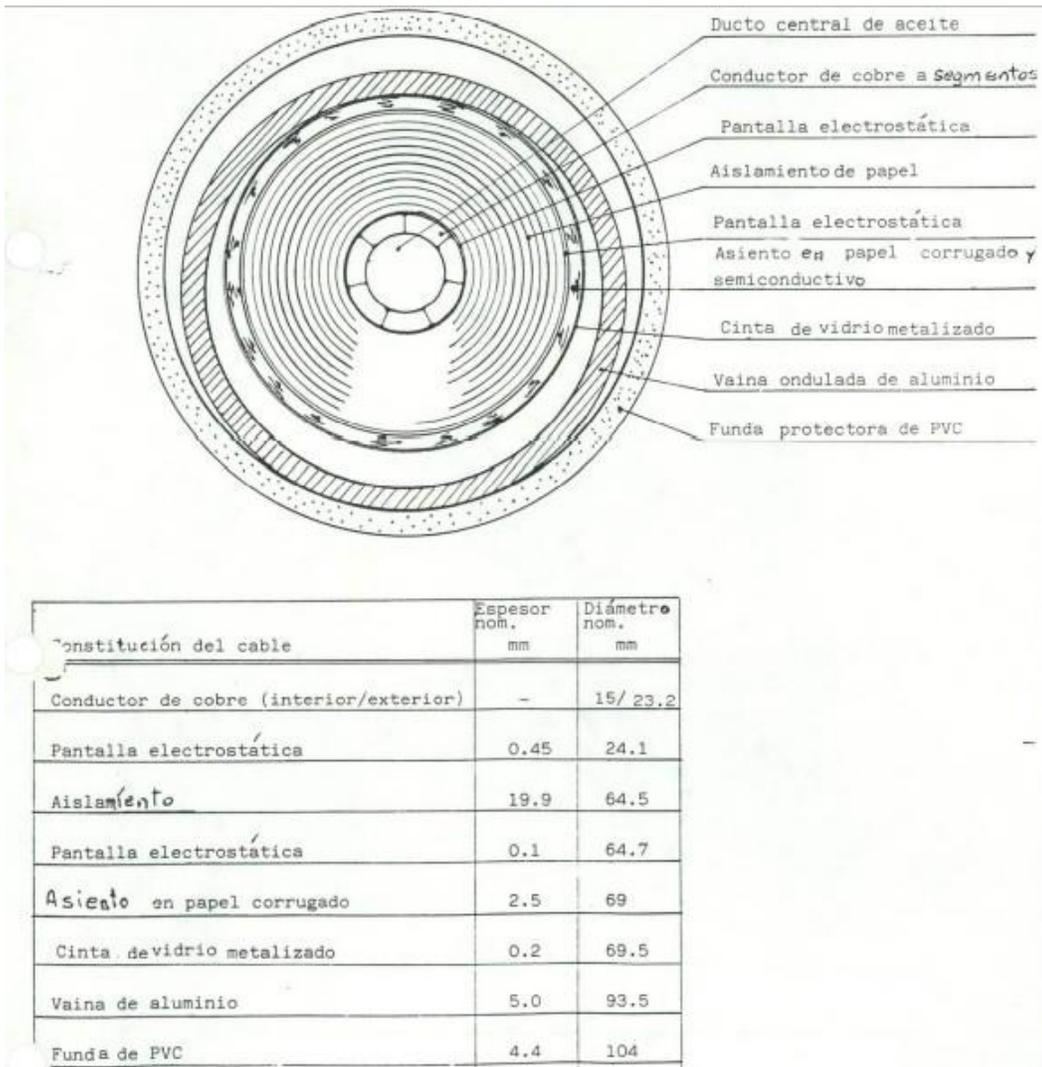


Figura 3.16: Especificaciones del cable a 230KV. Fuente: Celtec

La disposición de los cables en el pozo se la visualiza en la siguiente figura.

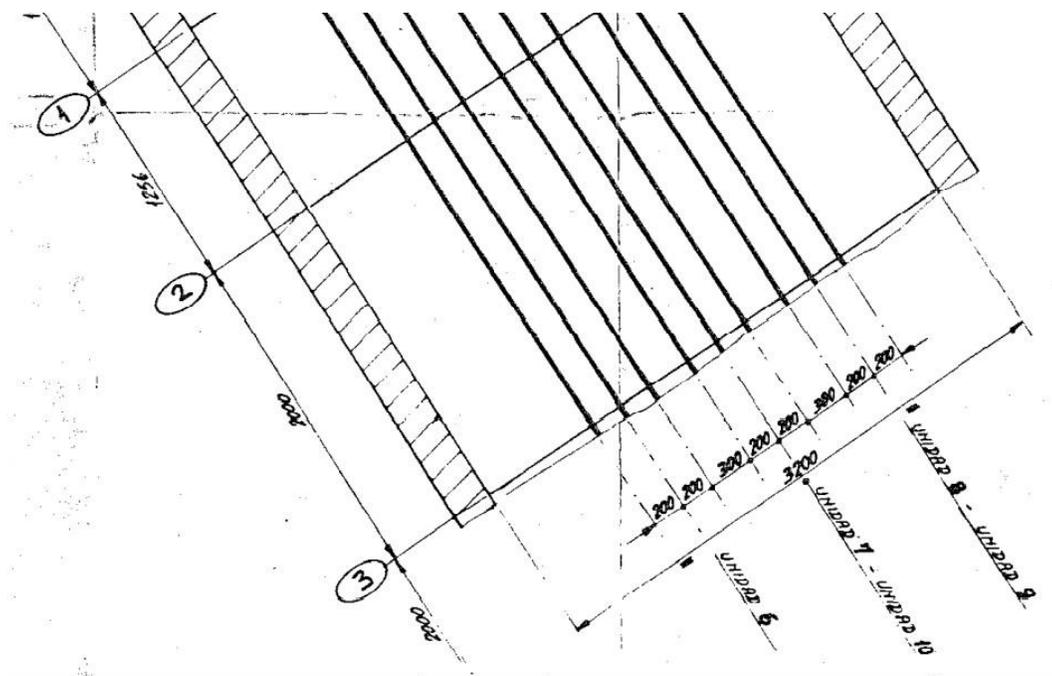


Figura 3.17: Disposición de cables a 230KV. Fuente: Celec

Los cables de 138KV son monofásicos con aislamiento del tipo EPR con una sección de 400mm^2 y capacidad de 565 Amperios para la face AB es decir de las unidades 1 a la 5, se muestra con las siguientes características.

a) Dimensiones principales del cable

- Diámetro externo 85,30mm
- Espesor de la cubierta media 4,15mm
- Espesor de la cubierta minimo 3,80mm
- Cinta de cobre 1x15x0,10mm

- Pantalla del cable de cobre 130x0,50mm
- Espesor del aislamiento medio 22,87mm
- Espesor del aislamiento mínimo 22,00mm
- Diámetro del conductor 24,50mm
- Número de hilos 60

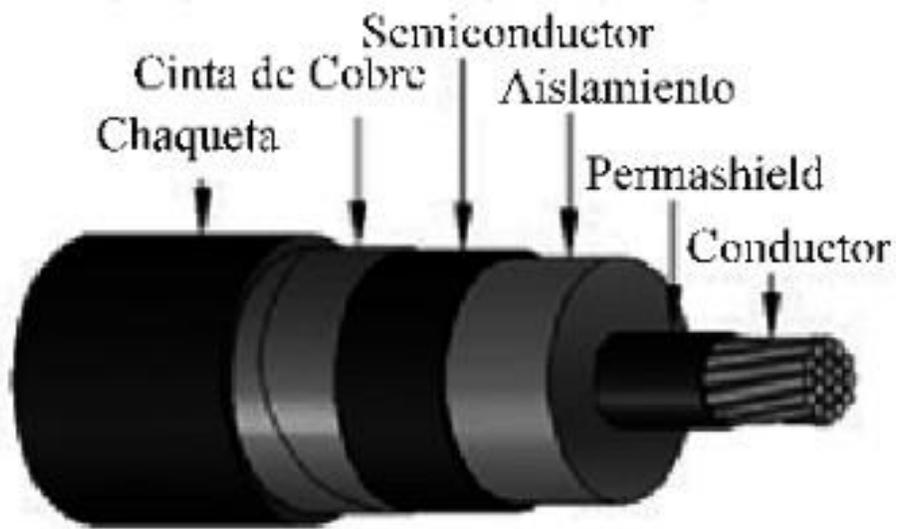


Figura 3.18: Corte transversal del cable a 138KV. Fuente: Elmecca



Figura 3.19: Corte real del cable a 138KV de la unidad 4. Fuente: Celec

La disposición de los cables en el pozo es la misma que para la fase C como se indica en la figura.

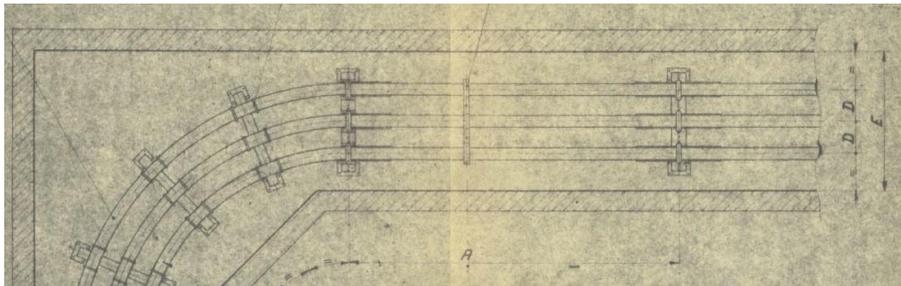


Figura 3.20: Disposición del cable a 138KV. Fuente: Celec

3.3.4. Autotransformadores.

La compensación de energía se realiza a través de la s/e Molino, que consta de dos líneas de 138 kV que se asocian a las líneas de 230 kV utilizando autotransformadores (AT1 y AT2).

Los datos y características de los autotransformadores de la Hidroeléctrica Molino nos ayudan a representar cada una de las especificaciones que tiene el autotransformador dandonos una idea general de la conformación del mismo, en la tabla podemos darnos cuenta como varia la corriente dependiendo de la posición que se ubique el TAP.

Tabla 3.33: Autotransformador. Fuente: CELEC EP[11]

Voltaje(V)	Corriente(A)			Posición Tap
	75MVA	100MVA	125MVA	
241500Grdy/139400	538	717	897	1
235750Grdy/136100	551	735	918	2
230000Grdy/132800	565	753	941	3
224250Grdy/129500	579	772	965	4
218500Grdy/126200	595	793	991	5

3.3.5. Interconexión Molino - Daniel Palacios.

Los datos de la interconexión son

Tabla 3.34: Línea presa 1. Interconexión Molino – Presa Daniel Palacios. Fuente: CELEC EP.[11]

Lin. Presa 1	
Forma	AR
Longitud	7 km
Voltaje	13,8 kilovoltios
Potencia	8 Megavoltamperios

Tabla 3.35: Línea presa 2. Interconexión Molino – Presa Daniel Palacios. Fuente: CELEC EP[11]

Lin. Presa 2	
Forma	AR
Longitud	7 km
Voltaje	13,8 kilovoltios

El sistema de interconexión Molino, Daniel Palacios y Mazar se detallan en la siguiente figura donde se puede observar las líneas Presa 1 y Presa 2, Molino 1 y Molino 2.

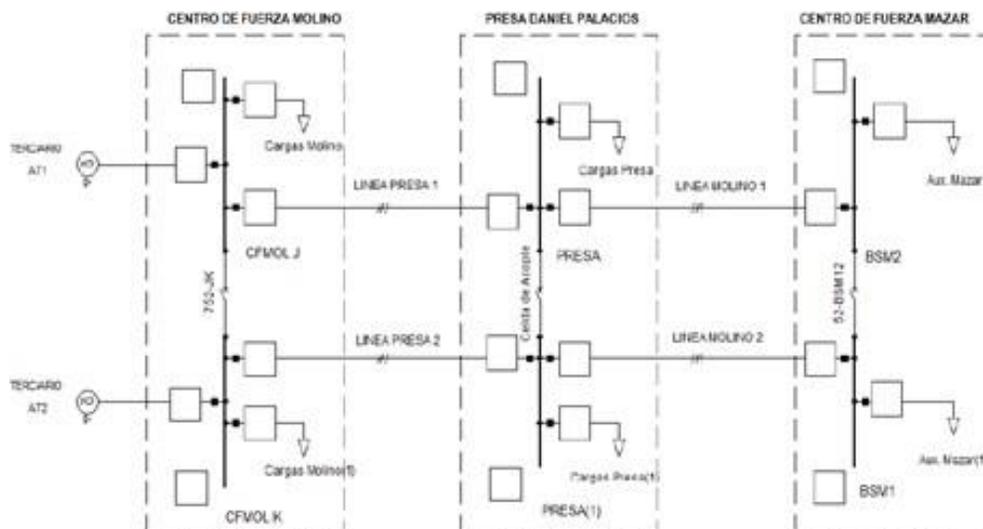


Figura 3.21: Sistema Molino-Presa-Mazar[12]

3.3.6. Subestación Molino

La Subestación Molino consta de un bus doble de 230kV con siete bahías, un bus doble de 138kV con diez bahías y una casa de control.

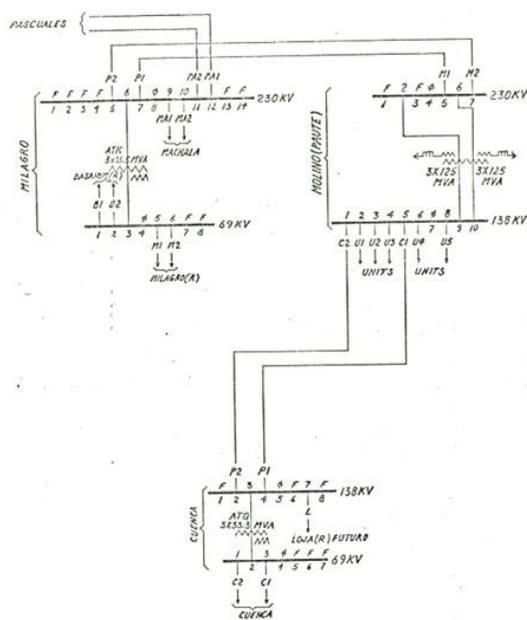


Figura 3.22: S/E Molino dentro del SNI. Fuente: CELEC EP.[11]

3.3.7. Interconexión Daniel Palacios - Mazar.

Las cargas son alimentadas desde el C.F. de la Presa así como también existe una LT como se indica en las siguientes tablas

Tabla 3.36: Línea Molino 1. Interconexión desde Presa Daniel Palacios hacia Mazar. Fuente: CELEC EP.[11]

Línea Molino 1	
Tipo	AR
Longitud	7,2 kilómetros
Voltaje	13,8 kilovoltios
Potencia	1,5 Megavoltamperios

Tabla 3.37: Línea Molino 2. Interconexión desde la Presa Daniel Palacios a Mazar. Fuente: CELEC EP.[11]

Línea Molino 2	
Tipo	AR
Longitud	7,2 kilómetros
Voltaje	13,8 kilovoltios
Potencia	1,5 Megavoltamperios

3.3.8. Cargas Molino

En la central hidroeléctrica Molino tenemos el sistema de alimentación de Servicios Auxiliares con los cuales funcionan las unidades generadoras y Casa de Máquinas. Éstas cargas se detallan a continuación.

Tabla 3.38: Centro de Cargas de las unidades de la fase C . Fuente: CELEC EP[11]

CCU Unidades Fase C				
CODIFICACIÓN		DESCRIPCIÓN	POTENCIA(KW)	CORRIENTE(A)
1	R1	Gaveta de reserva		16
2	R2	Gaveta de reserva		16
3	R3	Gaveta de reserva		16
4	B1RV	Bomba 1 del Reg. de Velocidad		50
5	CRV	Compresor del Regulador de Velocidad		30
6	PBAP	Panel de Bomba de Alta Presión		20
7	PVUT	Panel de Ventilación Unidad y Trafo		40
8	CG	Calentadores del Generador	25kW	
9	SE	Sistema de Excitación		40
10	VSE	Ventiladores del Sistema de Excitación		15
11	PBAT	Panel de Bomba de Aceite del Trafo		20
12	B1RV	Bomba 1 del Reg. de Velocidad		100
13	PSAE1	Panel de Bombas de Enfriamiento 1		225
14	PSAE2	Panel de Bombas de Enfriamiento 2		225
15	R4	Gaveta de reserva		16
16	R5	Gaveta de reserva		16
17	R6	Gaveta de reserva		16
18	ECT	Extractor CO2 Trafo.		40
19	ECG	Extractor CO2 Generador		40
20	R7	Gaveta de reserva		16

Tabla 3.39: Centro de Cargas de las Unidades de la fase AB. Fuente: CELEC EP[11]

CCU Unidades Fase AB				
CODIFICACION		DESCRIPCION	POTENCIA(KW)	CORRIENTE(A)
1	B1RV	Bomba 1 del Reg. de Velocidad		100
2	B2RV	Bomba 2 del Reg. de Velocidad		100
3	TF	Tomas de Fuerza		50
4	TF	Tomas de Fuerza		50
5	PEX	Panel de Exitación		40
6	R1	Gaveta de reserva		16
7	PSAE1	Panel de Bombas de Agua de Enfriamiento 1		150
8	PSAE2	Panel de Bombas de Agua de Enfriamiento 2		150
9	CG	Calentadores del Generador	25kW	
10	R2	Gaveta de reserva		16
11	PBG	Panel de Bomba de Gatos		20
12	R3	Gaveta de reserva		16
13	PBAT	Panel de Bomba de Aceite del Trafo.		20
14	PBAP	Panel de Bomba de Alta Presión		20
15	PVUT	Panel de Ventilación de Unidad y Trafo		20
16	R4	Gaveta de reserva		16
17	CRV	Compresor del Regulador de Velocidad		30
18	R6	Gaveta de reserva		16

Tabla 3.40: Centro de Cargas de Casa de Máquinas. Fuente: CELEC EP[11]

CCCM				
CODIFICACION		DESCRIPCION	POTENCIA(KW)	CORRIENTE(A)
BARRA AA				
1	PC1	Panel de Compresor 1		100
2	TF	Tomas de Fuerza		50
3	CB1A	Cargador de Baterías 1A CPR1 Fase C	20kW	
4	CB2A	Cargador de Baterías 1A N°2 Fase AB	20kW	
5	SCIT	Sistema Contra Incendios Transf. Fase C		150
6	TF	Tomas de Fuerza		50
7	CA	Calentador de Agua	6kW	
8	GMR	Grua monoriel(1322)		15
9	TIS	Transf. de Iluminación 2T-S		150
10	TI4	Transf. de Iluminación 2T-4		150
11	TI2	Transf. de Iluminación 2T-2		150
12	PVA	Panel de Ventilación A (D-G-H)		100
13	PVB	Panel de Ventilación B1 A1-C1		100
14	B1VG	Bomba 1 de Ventilación General Fase C		100
BARRA BB				
15	CA	Calentador de Agua		15
16	BD	Bombas de Drenaje		42
17	PC2	Panel de Compresor 2		100
18	BAS	Bombas de Aguas Servidas		15
19	CB1B	Cargador de Baterías 1B CPR2 Fase C	20kW	
20	CB2B	Cargador de Baterías 2B 1 Fase AB	20kW	
21	TIE	Trafo. de Iluminación Externa		20
22	BRGE	Bomba del Regulador-Generador de Emerg.		100
23	TI7	Trafo. de Iluminación 2T-7		150
24	TI9	Trafo. de Iluminación 2T-9		150
25	UPSI	UPS Instrumentación Fase C		75
26	PVB2	Panel de Ventilación B2 A1		100
27	PC3	Panel de Compresor 3		100
28	B2VG	Bomba 2 de Ventilación General Fase C		150

3.3.9. Análisis de Flujo de potencia y cortocircuito.

Flujo de Potencia.

El análisis de los flujos de energía, o la investigación de los flujos de carga es muy apreciada en los estudios de energía. El objetivo de ésta investigación es decidir si los componentes del aparataje del sistema de energía actual están trabajando regularmente y la generación accesible es comparable con la carga de todo lo que se demanda, es decir, la estimación de los flujos de energía del sistema permite calcular los infortunios sucitados en varias partes de la red eléctrica, así como los infortunios sucitados en toda la red y los niveles de tensión adecuados con la capacidad de carga de cada uno de los componentes del marco de influencia.

Cortocircuito

Un cortocircuito es la asociación deliberada o no, a través de una oposición o impedancia de bajo valor. Para los diferentes nodos o barras de cada unidad generadora se realiza el cálculo correspondiente.

Capítulo 4

Diagramas unifilares y parametrización

4.1. Introducción

En éste capítulo se representan los diagramas unifilares que servirán para la creación del diseño en el software de simulación donde se cargarán los parámetros de cada elemento como generadores, transformadores, líneas de transmisión, etc.

4.2. Desarrollo

Los diagramas unifilares han sido elaborados con información reportada por la CELEC, éstos diagramas, contienen información relevante respecto a los componentes de las áreas operativas, principalmente líneas de transmisión, transformadores, generadores, proyectos futuros, sistemas eléctricos de transmisión y el vínculo con los sistemas eléctricos de distribución que serán base para la carga de datos en el software Power Factory.

Diagrama Unifilar Central Hidroeléctrica Mazar

Se representa en la Figura 4.1 el diagrama Unifilar de la Central Hidroeléctrica Mazar detallando cada componente. Donde se puede observar las líneas de transmisión Molino 1 y Molino 2.

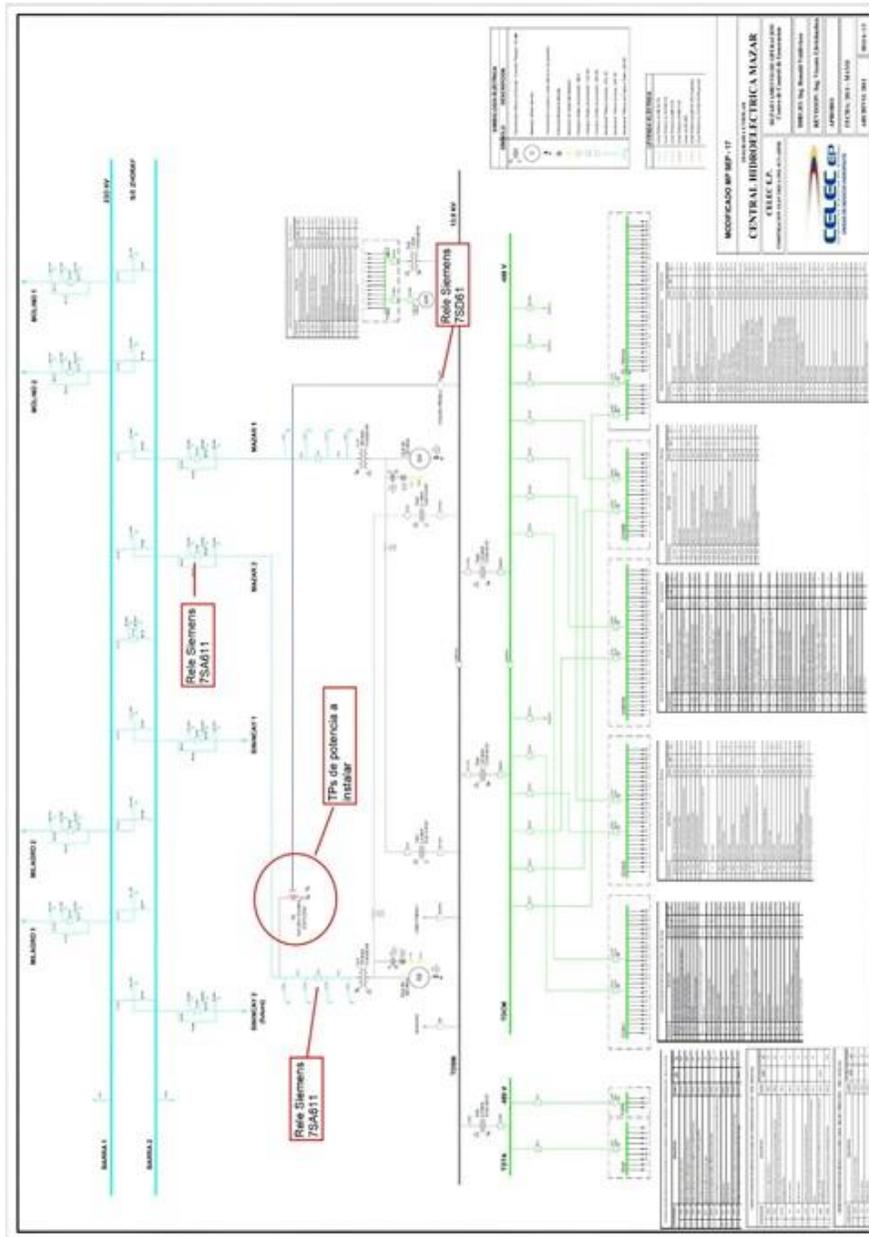


Figura 4.1: Diagrama Unifilar Central Hidroeléctrica Mazar. Fuente: CELEC EP.

Diagrama Unifilar Molino Presa.

La Figura 4.2 se ilustra el Diagrama Unifilar Molino Presa donde se detalla cada elemento, donde se puede observar las líneas de transmisión TERCARIO AT1 y TERCARIO AT2.

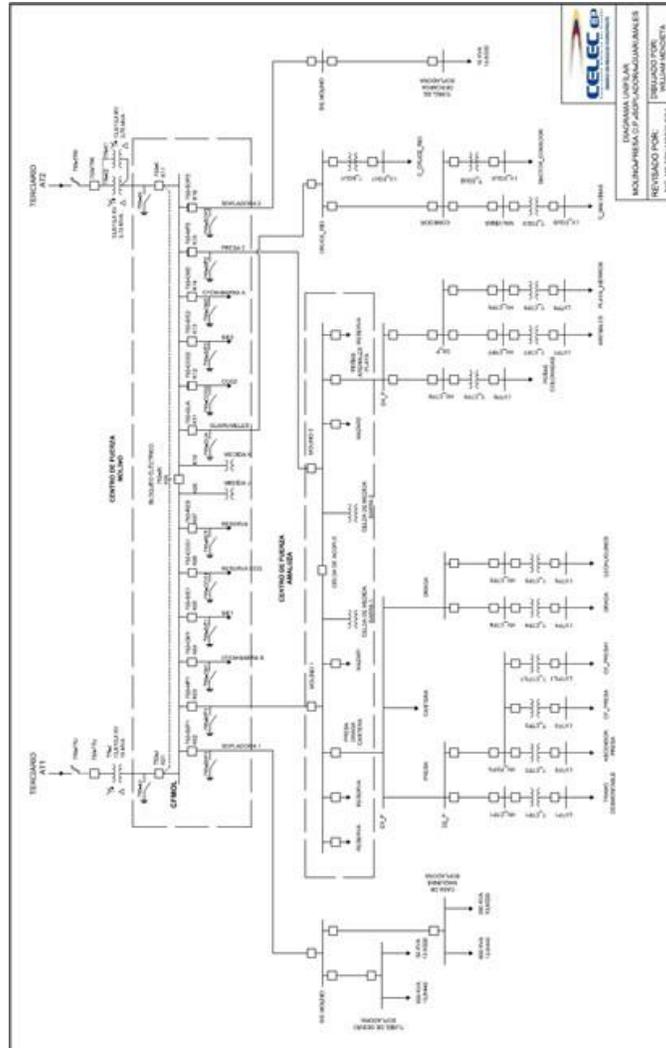


Figura 4.2: Diagrama Unifilar Molino - Presa D:P – Sopladora – Guarumales.
Fuente: CELEC EP

Diagrama Unifilar Central Hidroeléctrica Molino

En la Figura 4.3 se destaca las líneas de transmisión TERCARIO AT1 y TERCARIO AT2.

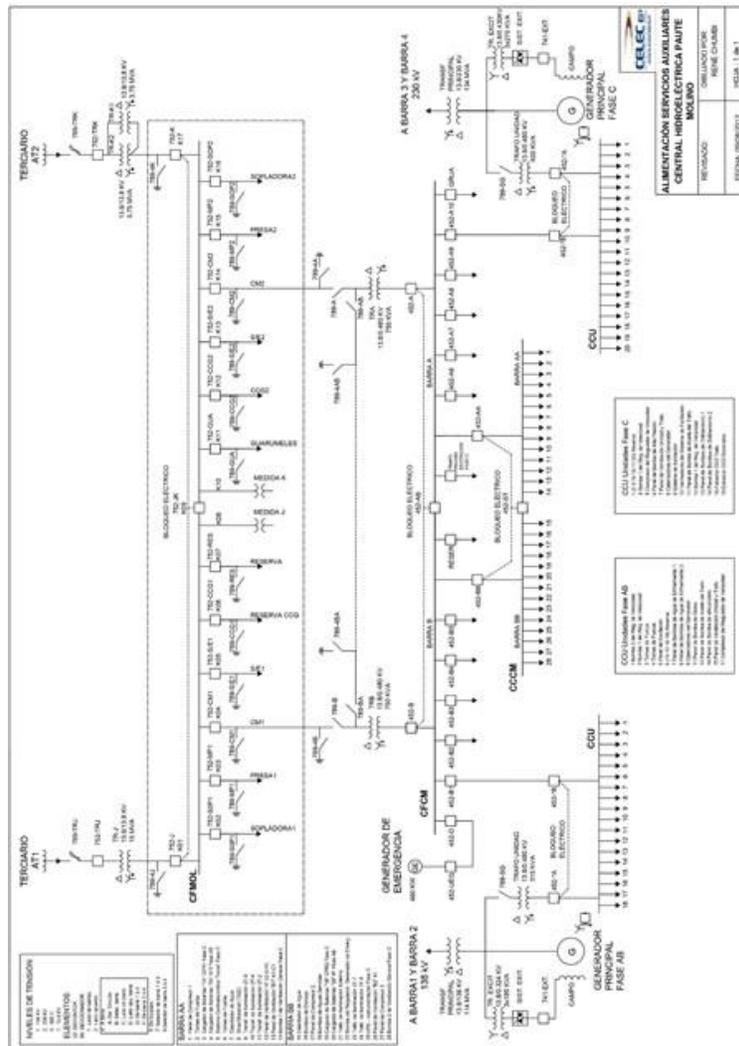


Figura 4.3: Diagrama Unifilar Central Hidroeléctrica Molino. Fuente: CELEC EP.

Diagrama Unifilar subestación Paute Molino

A continuación, se representa el esquema de la Subestación y se especifican las líneas de transmisión SHORAY #1 y SHORAY #2 y las líneas de transmisión a CFMOL1 y a CFMOL2 de las barras B1 y B2.

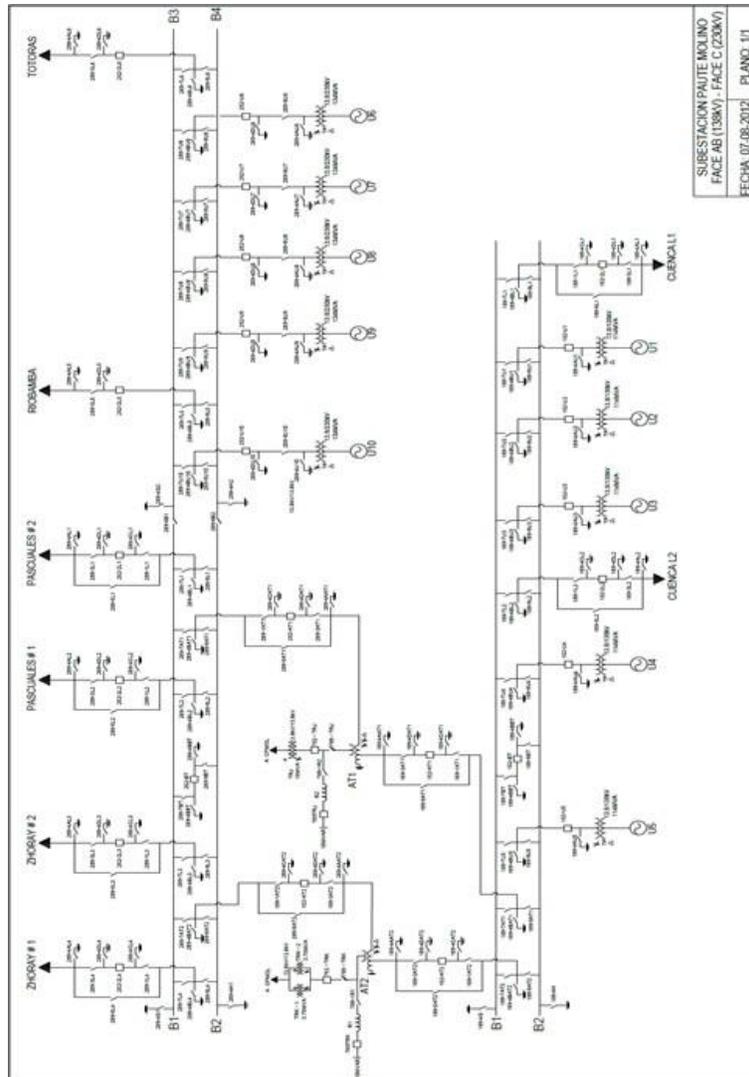


Figura 4.4: Diagrama Unifilar de la S.E. Paute Molino. Fuente: CELEC EP.

4.2.1. Carga de Parámetros de las centrales hidroeléctricas en el programa Power Factory.

Éste software es ideal para diseñar los diagramas unifilares y permitir parametrizar cada elemento que corresponde a las centrales con la finalidad de tener resultados precisos en las simulaciones que se realicen.

Diagrama Unifilar Central Hidroeléctrica Mazar

El siguiente diseño representa la Central Hidroeléctrica Mazar donde se han agregado los elementos necesarios que se encuentran en la caja de herramientas de dibujo a la derecha de la hoja de trabajo. Este diagrama está representado por la barra 1 y barra 2 de 230kV, donde se ha parametrizado sus características principales, por otra parte, la barra TDSM es representada por la tensión de 13.8kV, finalmente las barras TDES, TDTA, TDCM, TDDF, TDPS, CCMU1, CCMU2, CCMVAC, CCMDD y TDCGM cada tensión es de 480V. Se puede observar la conexión con la red hacia molino de la línea de transmisión SHORAY 1 y SHORAY 2 equivalente a 230kV, cabe señalar que éste diagrama cuenta con dos generadores de 13.8kV a 100MVA.

Las características del cable de 230KV que sale desde la subestación de Mazar se encuentran sobre unas estructuras autosoportadas de acero galvanizado, los conductores son de aluminio con alma de acero (ACSR) de 1,200 kcmil, con un cable de acero galvanizado y otro con fibra óptica (OPGW) y cadenas de 20 aisladores de porcelana de 10" de diámetro x 5 3/4" de altura. Las estructuras ubicadas en los terrenos por donde cruza la línea de transmisión tienen fundiciones de tipo zapatas de hormigón.

La subestación Zhoray está ubicada a la altura de la central Mazar, a un costado de la carretera Pindilig – Zhoray.

La S/E ocupa aproximadamente una superficie de 7,000 m². La S/E Zhoray es una subestación de seccionamiento encapsulada en hexafluoruro de azufre (SF₆) – Sistema GIS (Gas Incapsulated System) a 230 kV.

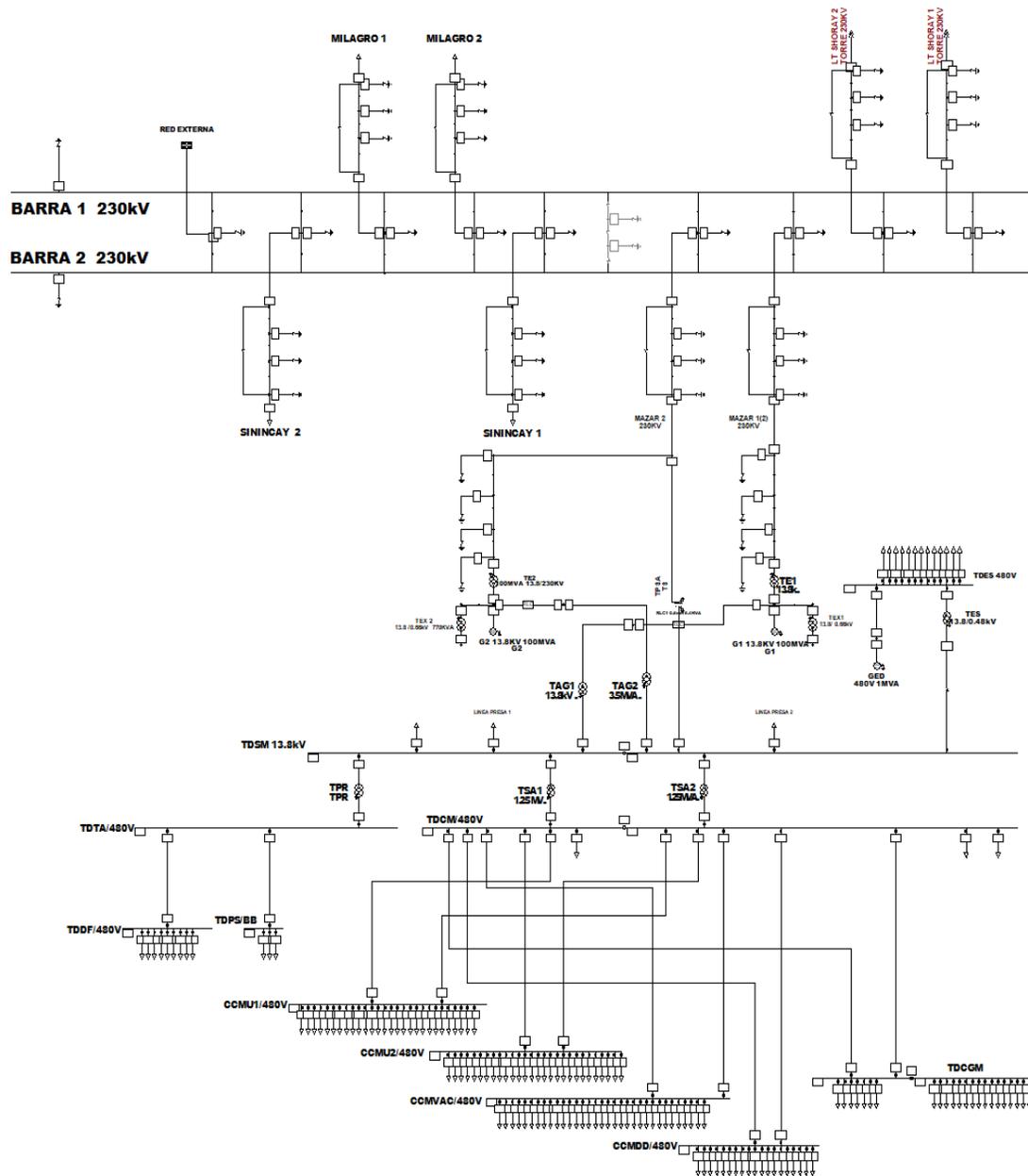


Figura 4.5: Esquema unifilar de la Hidroeléctrica Mazar. Fuente: El autor.

Para poder apreciar con más detalle cada uno de los diagramas se los a dividido en secciones por barras de voltaje quedando de la siguiente forma. En la barra de 230KV tenemos la siguiente figura

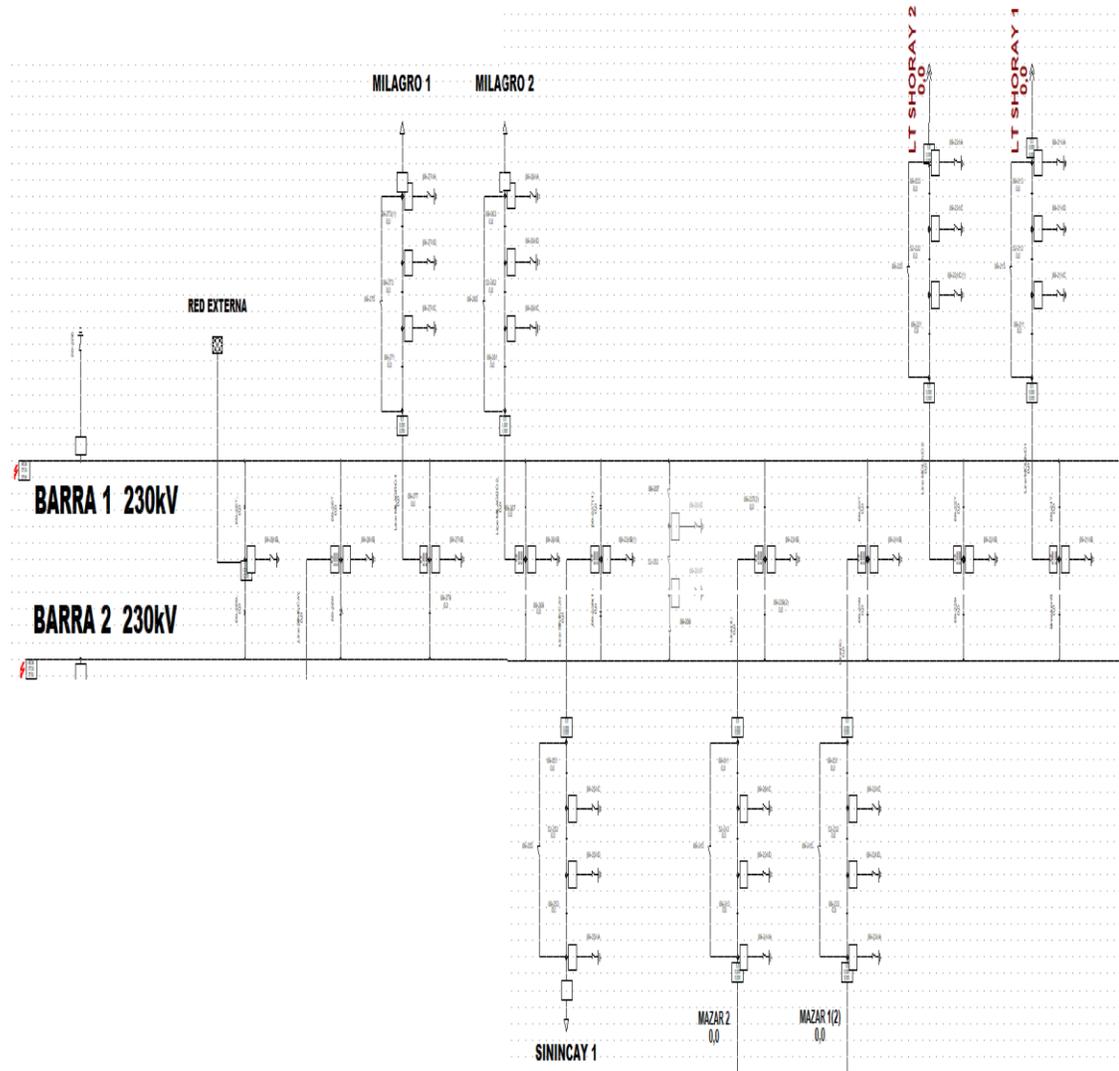


Figura 4.6: Esquema Mazar barra de 230KV. Fuente: El autor.

Luego siguiendo el diagrama llegamos a la barra de 13.8 KV.

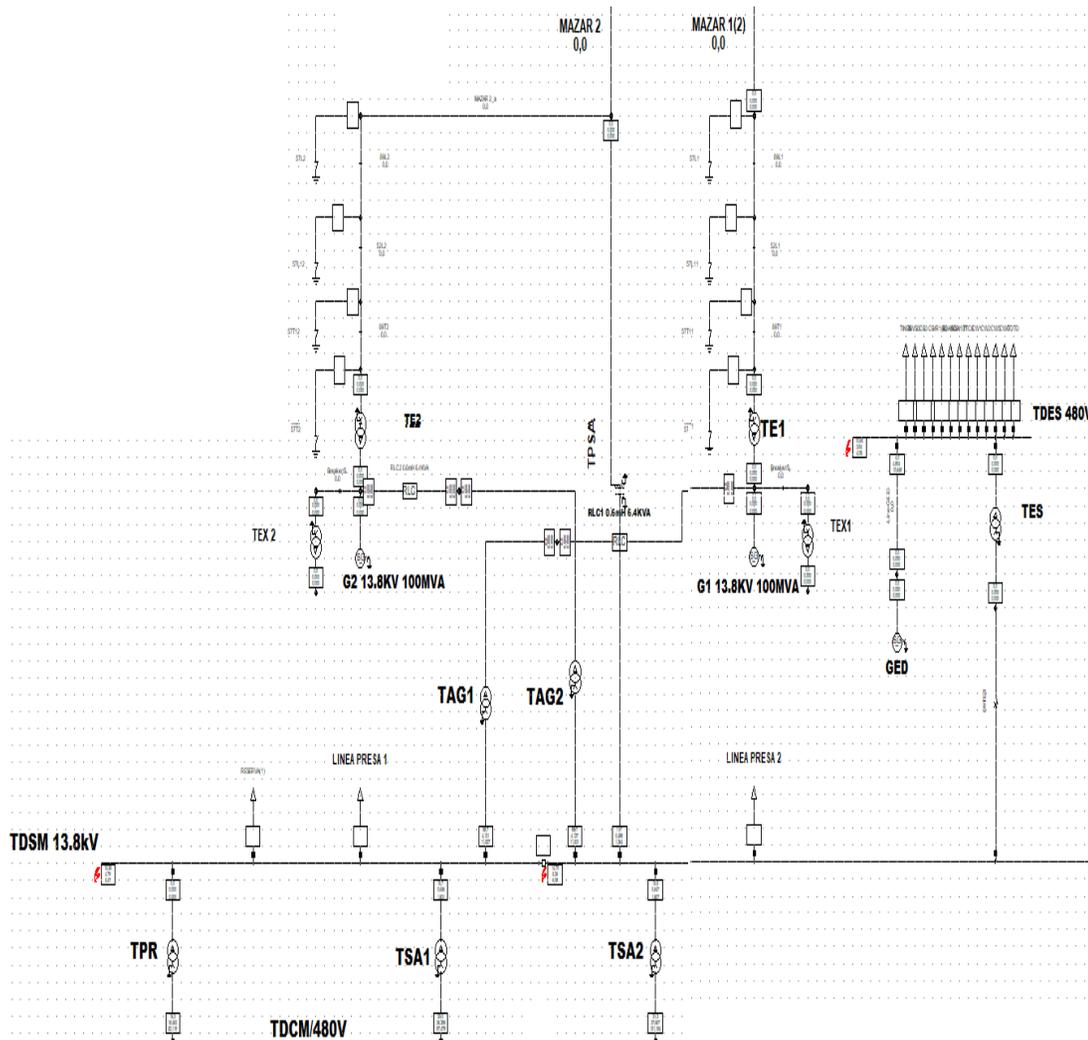


Figura 4.7: Esquema Mazar barra de 13.8KV. Fuente: El autor.

Para finalmente llegar a las barras de 480V quedando el siguiente diagrama.

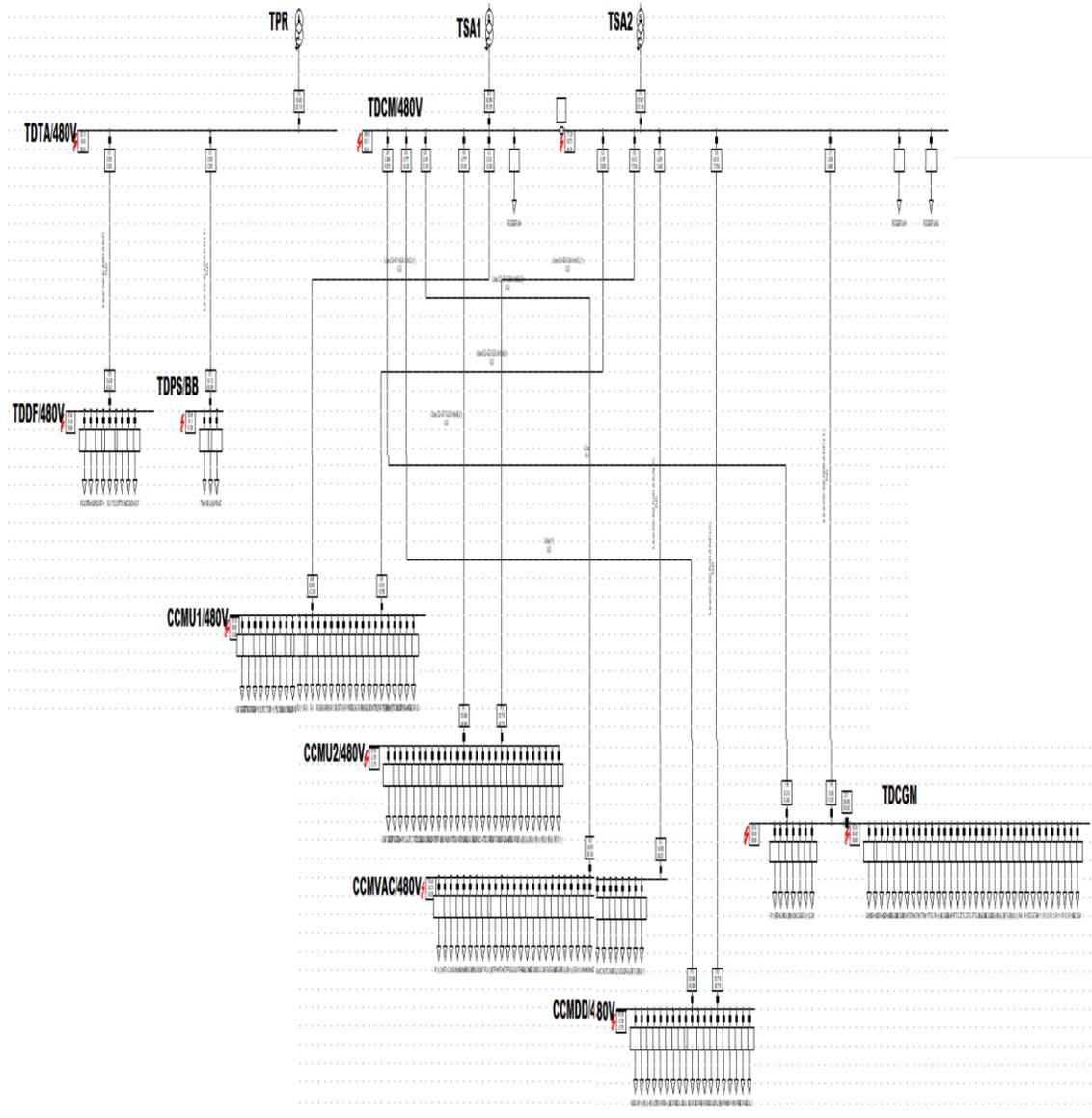


Figura 4.8: Esquema Mazar barra de 480V. Fuente: El autor.

Diagrama Unifilar Central Hidroeléctrica Molino Presa.

El siguiente diseño está conformado por el centro de fuerza Molino cuya barra CFMOL es de 13.8kV, en los terminales de los transformadores TR-J y TR-K1 y TR-K2 se interconectan con la Subestación Paute Molino mediante las líneas de transmisión Terciario AT1 y Terciario AT2 con tensión de 13.8kV.

El Centro de Fuerza Amaluzza se interconecta con el centro de fuerza Molino mediante líneas de transmisión (LT Molino 1 y LT Molino 2) de 13.8kV donde la barra es de 13.8kV

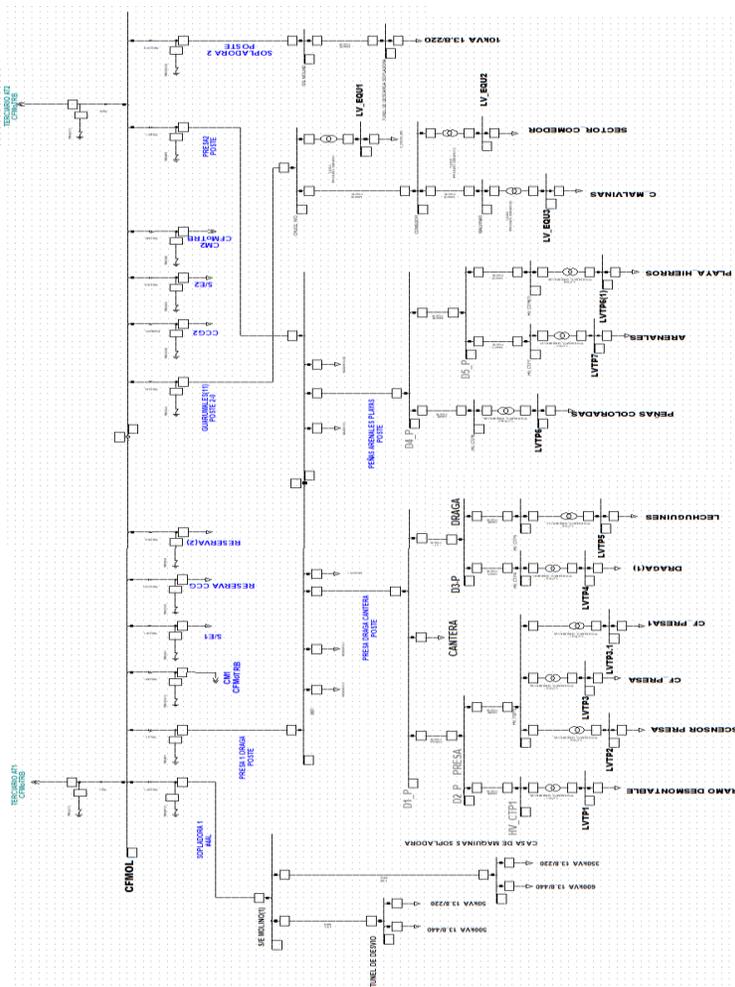


Figura 4.9: Diagrama Central Hidroeléctrica Molino Presa. Fuente: El autor.

Para observar más en detalle cada elemento del diagrama se lo divide en secciones de las barras empezando con las barras de 13.8KV.

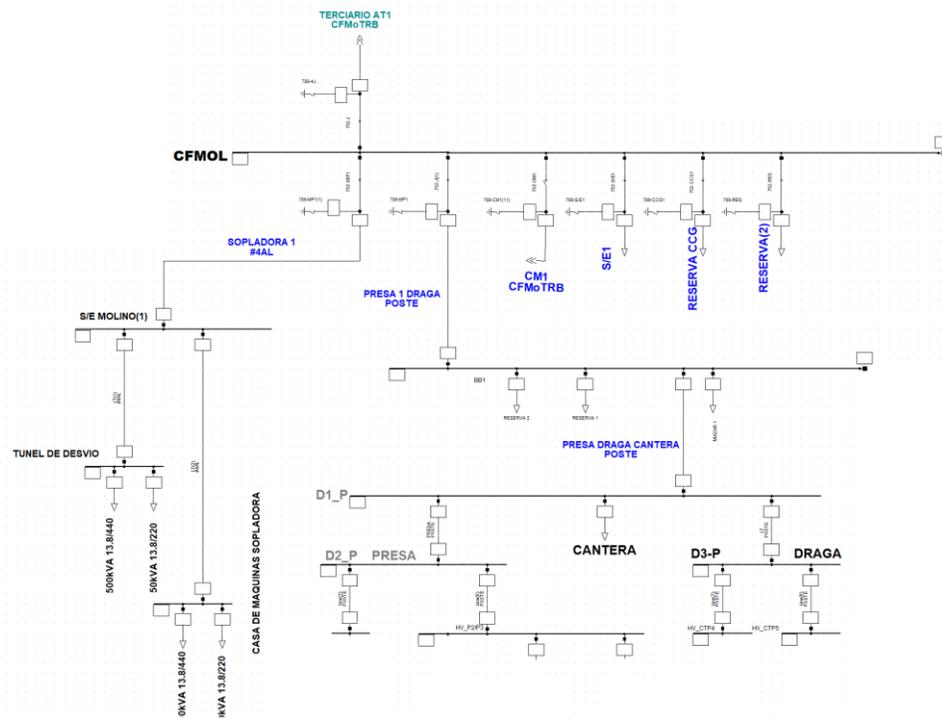


Figura 4.10: Diagrama Central Hidroeléctrico Molino Presa barras de 13.8KV sección izquierda. Fuente: El autor.

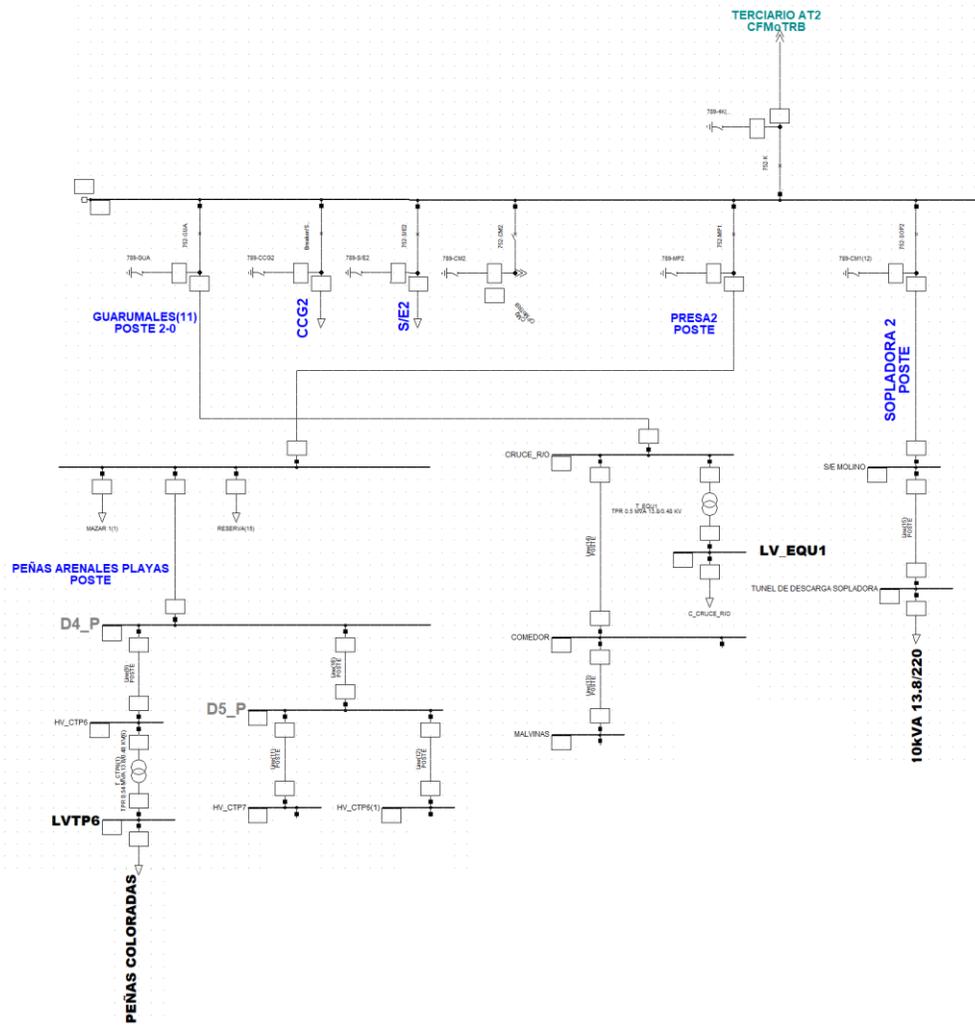


Figura 4.11: Diagrama Central Hidroeléctrica Molino Presa barras de 13.8KV sección derecha. Fuente: El autor.

A continuación tenemos las barras de 480V

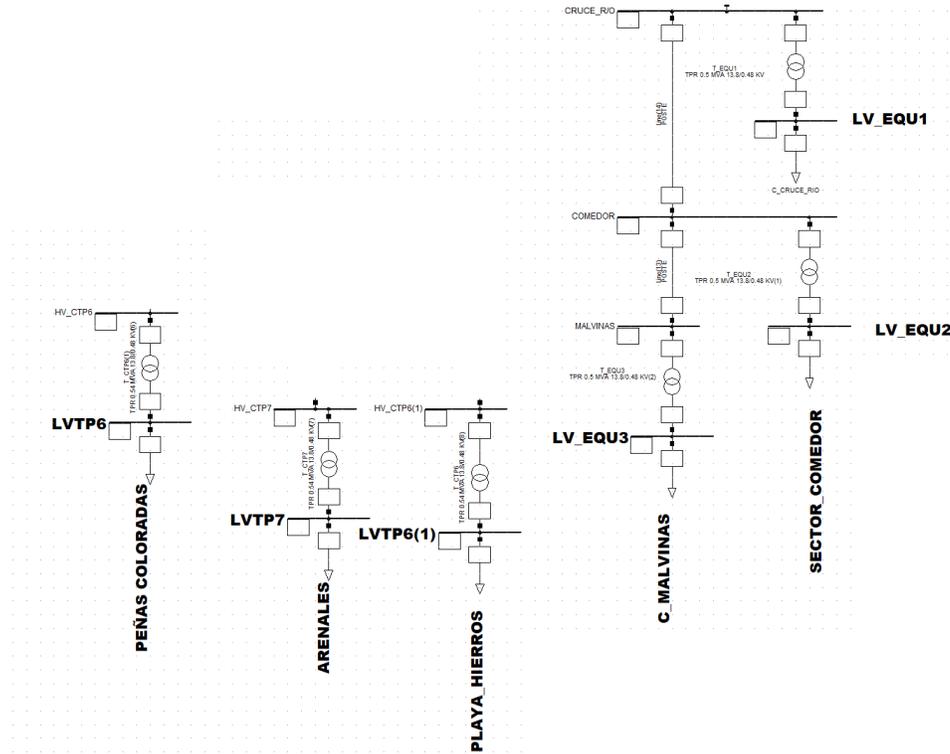


Figura 4.12: Diagrama Central Hidroeléctrica Molino Presa barra 480V sección izquierda. Fuente: El autor.

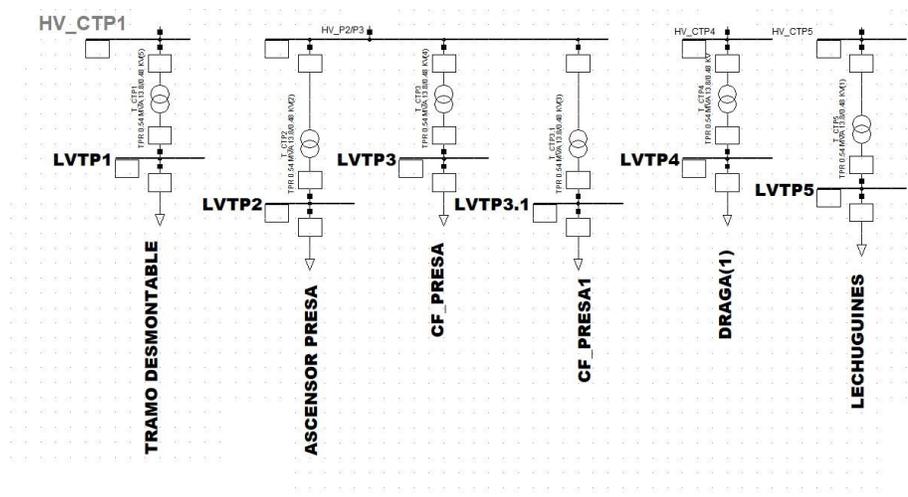


Figura 4.13: Diagrama Central Hidroeléctrica Molino Presa barra de 480V sección derecha. Fuente: El autor.

Diagrama Unifilar Subestación Paute Molino.

Se representa el siguiente diagrama unifilar mediante dos Barras B1 y B2 en la parte superior del diagrama siendo la tensión de 230kV respectivamente. Dichas barras con sus protecciones se conectan con la pestaña de la Central Hidroeléctrica Mazar mediante dos líneas de transmisión SHORAY #1 y SHORAY #2 equivalente a 230kV. Este diagrama cuenta con 10 unidades de generación de 13.8kV/230kV a 134MVA.

En la parte inferior del diseño se puede observar las Barras B1 y B2 con una tensión de 138kV, donde se conforma un sistema de protección para conectarse con los transformadores AT1 y AT2 con tensión de salida de 13.8kV conectándose mediante sus protecciones a los transformadores TRK-1 y TRK-2 a CFMOL1 y TRJ a CFMOL2, mediante las líneas de transmisión AT1 y AT2 con la pestaña Molino Presa, cabe señalar que la tensión es de 13.8kV.

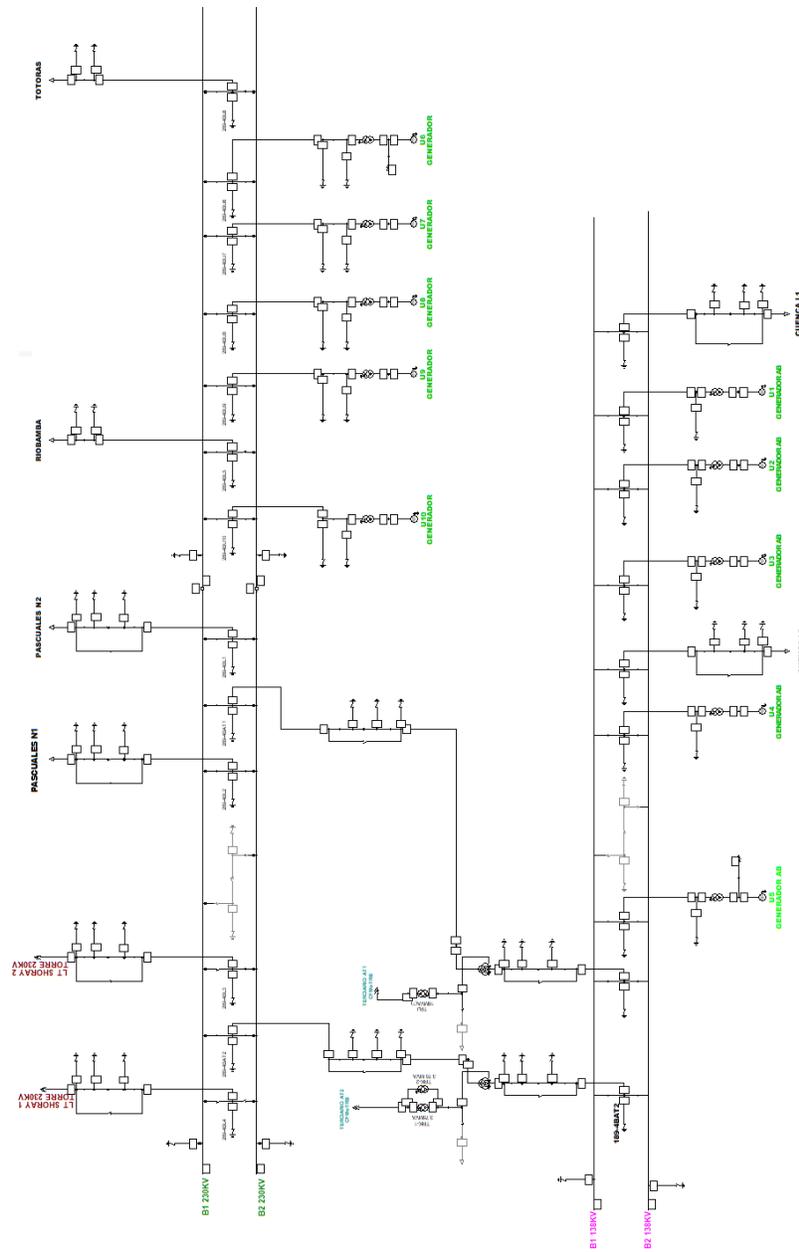


Figura 4.14: Diagrama Unifilar subestación Paute Molino. Fuente: el Autor

Diagrama Unifilar Molino 480V

El diagrama representa las barras que tienen un voltaje de 480V que se encuentran distribuidas con las correspondientes cargas de la Central Molino.

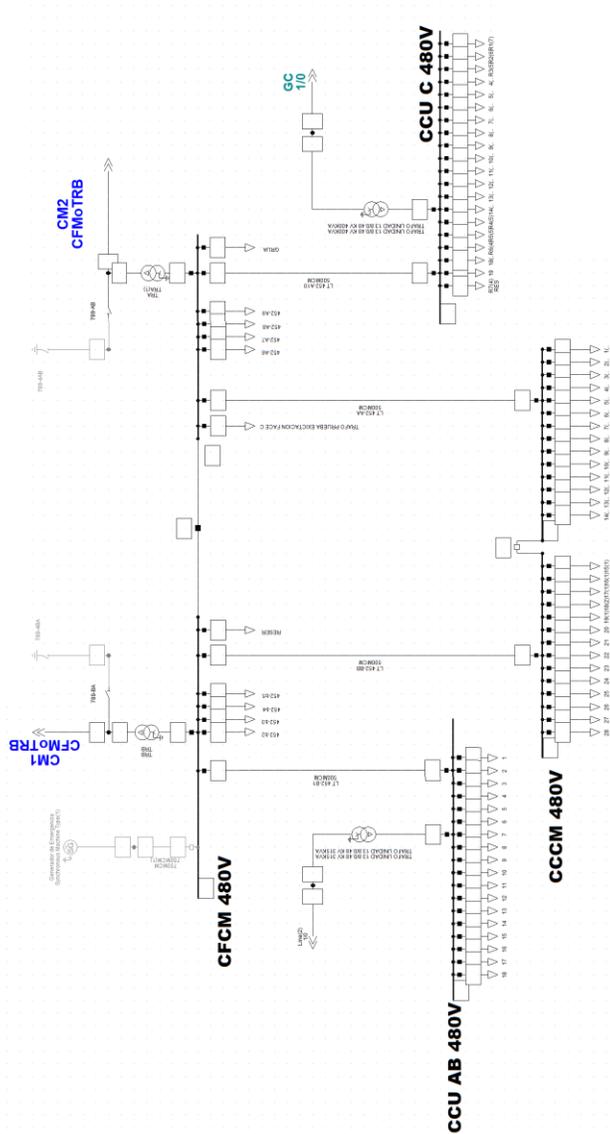


Figura 4.15: Diagrama Unifilar Molino 480V. Fuente: el Autor

Modelación de cables

En las simulaciones una parte importante que se debe tomar en cuenta es el modelado de los cables, ya que se pueden añadir las características particulares de cada cable ya que para cada nivel de voltaje se tiene un adecuado tipo de cable, una modelación especial es la de los cables desde los transformadores a la subestación.

Por ejemplo en el diagrama Subestación Paute Molino se tiene el cable a 138KV que va desde el transformador de cada unidad hasta la barra de la subestación, con los catálogos proporcionados por cada fabricante se tienen las características del mismo y esos datos se los especifica en el programa el cual al momento de realizar una simulación nos presenta un cuadro resumen con los valores calculados dependiendo de las especificaciones ingresadas en el programa, se escoge el cable y se pueden ver los datos cargados y eso se lo aprecia en las siguientes figuras.

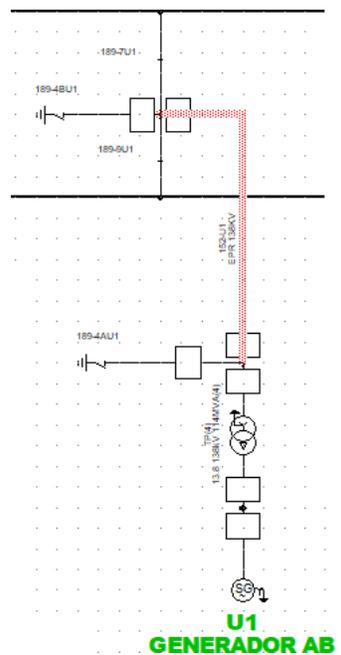


Figura 4.16: Modelación del Cable para la Fase AB. Fuente: el Autor

Line - Grid\152-U1.ElmLine

Basic Data	Name	152-U1	
Load Flow	Type	Equipment Type Library\EPR 138KV	
VDE/IEC Short-Circuit	Terminal i	Grid\Terminal(495)\Cub_4	Terminal(495)
Complete Short-Circuit	Terminal j	Grid\Terminal(496)\Cub_5	Terminal(496)
ANSI Short-Circuit	Zone	Terminal i	...
IEC 61363	Area	Terminal i	...
DC Short-Circuit	<input type="checkbox"/> Out of Service		
RMS-Simulation	Number of parallel Lines	1	
EMT-Simulation	Parameters		
Harmonics/Power Quality	Thermal Rating	...	
Optimal Power Flow	Length of Line	0,5 km	
Reliability	Derating Factor	1.	
Generation Adequacy	Laying	Ground	
Tie Open Point Opt.	Type of Line Cable Definition		
Cable Sizing	Line Model		
Description	<input checked="" type="radio"/> Lumped Parameter (PI) <input type="radio"/> Distributed Parameter		
	Sections/Line Loads		
	Resulting Values		
	Rated Current (act.)	1, kA	
	Pos. Seq. Impedance, Z1	0,1128746 Ohm	
	Pos. Seq. Impedance, Angle	65,06106 deg	
	Pos. Seq. Resistance, R1	0,04759383 Ohm	
	Pos. Seq. Reactance, X1	0,1023499 Ohm	
	Zero Seq. Resistance, R0	0,1413215 Ohm	
	Zero Seq. Reactance, X0	0,09250901 Ohm	
	Earth-Fault Current, Ice	7,120172 A	
	Earth Factor, Magnitude	0,2783114	
	Earth Factor, Angle	-71,05485 deg	

Figura 4.17: Cuadro resumen del Cable. Fuente: el Autor

Single Core Cable Type - Equipment Type Library\EPR 138KV(1).TypCab

Basic Data

Load Flow

VDE/IEC Short-Circuit

Complete Short-Circuit

ANSI Short-Circuit

IEC 61363

DC Short-Circuit

RMS-Simulation

EMT-Simulation

Harmonics/Power Quality

Optimal Power Flow

Reliability

Generation Adequacy

Description

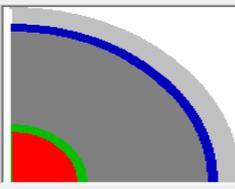
Name:

Rated Voltage: kV

Core Shape:

Outer Diameter: mm

Frequency Characteristic (Ohm/km):



	Exists	Material	Resistivity (... uOhm*cm)	Relative P...	Thickness mm	Filling Factor %	DC-Resista... Ohm/km	T
▶ Conductor	<input checked="" type="checkbox"/>	Copper	1,7241	1,	12,25	100,	0,0365713	▲
Sheath	<input checked="" type="checkbox"/>	Bronze	3,5	1,	0,5	100,	0,3140921	
Armour	<input type="checkbox"/>	Unknown	2,84	1,	1,	100,	0,	

	Exists	Material	Dielectric L...	Relative P...	Thickness mm
▶ 1 (Insulation)	<input checked="" type="checkbox"/>	EPR (> 18/30)	0,005	3,	22,87
2 (Oversheath)	<input checked="" type="checkbox"/>	PVC	0,1	8,	4,15
3 (Serving)	<input type="checkbox"/>	Unknown	0,02	3,	1,

	Exists	Resistivity uOhm*cm	Relative Pemea...	Relative Permitti...	Thickness mm
▶ Core Outer	<input checked="" type="checkbox"/>	1000000	1,	3,	0,1
Ins. Outer	<input type="checkbox"/>	1000000	1,	3,	1,

Overall Cable Diameter: **79,74001 mm**

Figura 4.18: Datos ingresados al programa del Cable. Fuente: el Autor

Cable Definition - Equipment Type Library\EPR 138KV.TypCabSys

Basic Data

Load Flow

VDE/IEC Short-Circuit

Complete Short-Circuit

ANSI Short-Circuit

IEC 61363

DC Short-Circuit

RMS-Simulation

EMT-Simulation

Harmonics/Power Quality

Optimal Power Flow

Reliability

Generation Adequacy

Description

Name:

Nom. Frequency: Hz

Earth:

Resistivity: Ohm*m Conductivity: uS/cm

Buried: Circuits:

	Single Core Cable Type	Num. of Phases	Rated Current kA	Reduced	Cross Bonded	Colour
▶ Circuit 1	EPR 138KV(1)	3,	1,	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Red

	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
▶ Circuit 1	0,2	0,	0,2	0,2	0,2	0,2



Figura 4.19: Disposición del Cable. Fuente: el Autor

Para el caso de los cables de la fase C que trabaja a 230KV la modelación queda de la siguiente manera.

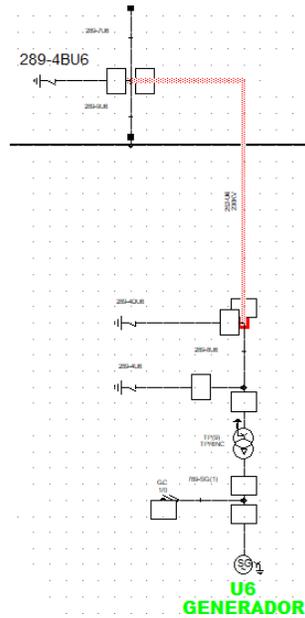


Figura 4.20: Modelación del Cable para la Fase C. Fuente: el Autor

Line - Grid\L10.ElmLine

Basic Data	Name	L10	
Load Flow	Type	Equipment Type Library\230KV	
VDE/IEC Short-Circuit	Terminal i	Grid\Terminal(556)\Cub_4	Terminal(556)
Complete Short-Circuit	Terminal j	Grid\Terminal(564)\Cub_4	Terminal(564)
ANSI Short-Circuit	Zone	Terminal i	...
IEC 61363	Area	Terminal i	...
DC Short-Circuit	<input type="checkbox"/> Out of Service		
RMS-Simulation	Number of parallel Lines	1	
EMT-Simulation	Parameters		
Harmonics/Power Quality	Thermal Rating	...	
Optimal Power Flow	Length of Line	0,5 km	
Reliability	Derating Factor	1.	
Generation Adequacy	Laying	Ground	
Tie Open Point Opt.	Type of Line	Cable Definition	
Cable Sizing	Line Model		
Description	<input checked="" type="radio"/> Lumped Parameter (PI) <input type="radio"/> Distributed Parameter		
		Resulting Values	
		Rated Current (act.)	1, kA
		Pos. Seq. Impedance, Z1	0,09728564 Ohm
		Pos. Seq. Impedance, Angle	38,55449 deg
		Pos. Seq. Resistance, R1	0,07607891 Ohm
		Pos. Seq. Reactance, X1	0,06063412 Ohm
		Zero Seq. Resistance, R0	0,07621162 Ohm
		Zero Seq. Reactance, X0	0,05884932 Ohm
		Earth-Fault Current, Ice	12,36444 A
		Earth Factor, Magnitude	0,00613222
		Earth Factor, Angle	-124,3018 deg

Figura 4.21: Cuadro resumen del Cable de 230kV Fase C. Fuente: el Autor

Single Core Cable Type - Equipment Type Library\230KV(1).TypCab

Basic Data

Name: 230KV(1)
 Rated Voltage: 245. kV
 Core Shape: Hollow
 Outer Diameter: 15. mm
 Inner Diameter: 6,8 mm
 Frequency Characteristic (Ohm/km): ...

Conducting Layers:

	Exists	Material	Resistivity (... uOhm*cm	Relative P...	Thickness mm	Filling Factor %	DC-Resista... Ohm/km	T
▶ Conductor	<input checked="" type="checkbox"/>	Copper	1,7241	1,	4,1	100,	0,1228011	▲
Sheath	<input checked="" type="checkbox"/>	Aluminium	2,84	1,	5,	100,	0,0302341	▲
Amour	<input type="checkbox"/>	Bronze	3,5	1,	0,1	100,	0,	▼

Insulation Layers:

	Exists	Material	Dielectric L...	Relative P...	Thickness mm
▶ 1 (Insulation)	<input checked="" type="checkbox"/>	Oil-filled (U0>1)	0,0028	3,6	19,9
2 (Oversheath)	<input checked="" type="checkbox"/>	PVC	0,1	8,	4,4
3 (Serving)	<input type="checkbox"/>	Unknown	0,02	3,	1,

Semiconducting Layers:

	Exists	Resistivity uOhm*cm	Relative Permea...	Relative Permitti...	Thickness mm
▶ Core Outer	<input type="checkbox"/>	1000000	1,	3,	0,45
Ins. Outer	<input type="checkbox"/>	1000000	1,	3,	1,

Overall Cable Diameter: 73.6 mm

Figura 4.22: Datos ingresados del Cable de 230kV Fase C. Fuente: el Autor

Cable Definition - Equipment Type Library\230KV.TypCabsys

Basic Data

Name: 230KV
 Nom. Frequency: 60. Hz
 Earth: ...
 Resistivity: 0,0000168 Ohm*m Conductivity: 595238080 uS/cm
 Buried: direct in Ground Circuits: 1

Single Core Cable Types of Line Circuits:

	Single Core Cable Type TypCab	Num. of Phases	Rated Current kA	Reduced	Cross Bonded	Colour
▶ Circuit 1	230KV(1) TypCab	3,	1,	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Red

Coordinate of Line Circuits [m]:

	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3
▶ Circuit 1	-0,2	0,	0,2	0,2	0,2	0,2

Figura 4.23: Disposición del Cable de 230kV Fase C. Fuente: el Autor

De la misma manera tenemos la descripción de los datos que se ingresó en el programa los cuales representan el cable a 230kV 1x500mm² XLPE perteneciente a la central Mazar cuya modelación es

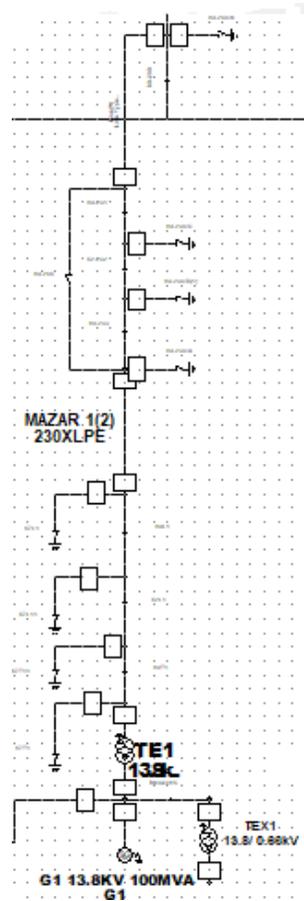


Figura 4.24: Modelación del Cable a 230kV Mazar. Fuente: el Autor

Line - Grid\MAZAR 2.ElmLine

Basic Data	Name	MAZAR 2	
Load Flow	Type	Equipment Type Library\230XLPE	
VDE/IEC Short-Circuit	Terminal i	Grid\Terminal(27)\Cub_8	Terminal(27)
Complete Short-Circuit	Terminal j	Grid\Terminal(3)\Cub_1	Terminal(3)
ANSI Short-Circuit	Zone	Terminal i	...
IEC 61363	Area	Terminal i	...
DC Short-Circuit	<input type="checkbox"/> Out of Service		
RMS-Simulation	Number of parallel Lines	1	
EMT-Simulation	Parameters		
Harmonics/Power Quality	Thermal Rating	...	
Optimal Power Flow	Length of Line	0,3 km	
Reliability	Derating Factor	1.	
Generation Adequacy	Laying	Ground	
Tie Open Point Opt.	Type of Line	Cable Definition	
Cable Sizing	Line Model	<input checked="" type="radio"/> Lumped Parameter (PI) <input type="radio"/> Distributed Parameter	
Description	Sections/Line Loads		

Resulting Values	
Rated Current (act.)	1, kA
Pos. Seq. Impedance, Z1	0,06288298 Ohm
Pos. Seq. Impedance, Angle	56,681 deg
Pos. Seq. Resistance, R1	0,03454161 Ohm
Pos. Seq. Reactance, X1	0,05254661 Ohm
Zero Seq. Resistance, R0	0,06871855 Ohm
Zero Seq. Reactance, X0	0,04501866 Ohm
Earth-Fault Current, Ice	6,266756 A
Earth Factor, Magnitude	0,1855095
Earth Factor, Angle	-69,10284 deg

Figura 4.25: Cuadro resumen del Cable de 230kV Mazar. Fuente: el Autor

Single Core Cable Type - Equipment Type Library\230kV XLPE.TypeCab

Basic Data

Load Flow

VDE/IEC Short-Circuit

Complete Short-Circuit

ANSI Short-Circuit

IEC 61363

DC Short-Circuit

RMS-Simulation

EMT-Simulation

Harmonics/Power Quality

Optimal Power Flow

Reliability

Generation Adequacy

Description

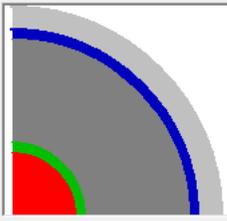
Name:

Rated Voltage: kV

Core Shape:

Outer Diameter: mm

Frequency Characteristic (Ohm/km):



Conducting Layers:

	Exists	Material	Resistivity (... uOhm*cm	Relative P...	Thickness mm	Filling Factor %	DC-Resista... Ohm/km	T
▶ Conductor	<input checked="" type="checkbox"/>	Aluminium	2,8264	1,	13,3	100,	0,05086048	▲
Sheath	<input checked="" type="checkbox"/>	Aluminium	2,84	1,	0,5	100,	0,2439946	
Amour	<input type="checkbox"/>	Unknown	2,84	1,	1,	100,	0,	▼

Insulation Layers:

	Exists	Material	Dielectric L...	Relative P...	Thickness mm	
▶ 1 (Insulation)	<input checked="" type="checkbox"/>	XLPE (> 18/3)	0,001	2,5	22,	▲
2 (Oversheath)	<input checked="" type="checkbox"/>	PE (HD/LD)	0,001	2,3	5,	
3 (Serving)	<input type="checkbox"/>	Unknown	0,02	3,	1,	▼

Semiconducting Layers:

	Exists	Resistivity uOhm*cm	Relative Permea...	Relative Permitti...	Thickness mm	
▶ Core Outer	<input checked="" type="checkbox"/>	1000000	1,	3,	1,5	▲
Ins. Outer	<input type="checkbox"/>	1000000	1,	3,	1,	▼

Overall Cable Diameter: **84,6 mm**

Figura 4.26: Datos ingresados al programa del Cable de 230kV Mazar. Fuente: el Autor

Cable Definition - Equipment Type Library\230XLPE.TypCabsys

Basic Data	Name: <input type="text" value="230XLPE"/>														
Load Flow	Nom. Frequency: <input type="text" value="60."/> Hz														
VDE/IEC Short-Circuit	Earth														
Complete Short-Circuit	Resistivity: <input type="text" value="0,0000781"/> Ohm*m Conductivity: <input type="text" value="128040976"/> uS/cm														
ANSI Short-Circuit	Buried: <input type="text" value="direct in Ground"/> Circuits: <input type="text" value="1"/>														
IEC 61363															
DC Short-Circuit															
RMS-Simulation	Single Core Cable Types of Line Circuits:														
EMT-Simulation	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>Single Core Cable Type TypCab</th> <th>Num. of Phases</th> <th>Rated Current kA</th> <th>Reduced</th> <th>Cross Bonded</th> <th>Colour</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>▶Circuit 1</td> <td>230kV XLPE</td> <td>3,</td> <td>1,</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td>■</td> </tr> </tbody> </table>		Single Core Cable Type TypCab	Num. of Phases	Rated Current kA	Reduced	Cross Bonded	Colour	▶Circuit 1	230kV XLPE	3,	1,	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	■
	Single Core Cable Type TypCab	Num. of Phases	Rated Current kA	Reduced	Cross Bonded	Colour									
▶Circuit 1	230kV XLPE	3,	1,	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	■									
Harmonics/Power Quality															
Optimal Power Flow															
Reliability															
Generation Adequacy															
Description	Coordinate of Line Circuits [m]:														
	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th></th> <th>X1</th> <th>X2</th> <th>X3</th> <th>Y1</th> <th>Y2</th> <th>Y3</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>▶Circuit 1</td> <td>-0,2</td> <td>0,</td> <td>0,2</td> <td>0,2</td> <td>0,2</td> <td>0,2</td> </tr> </tbody> </table>		X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3	▶Circuit 1	-0,2	0,	0,2	0,2	0,2	0,2
	X1	X2	X3	Y1	Y2	Y3									
▶Circuit 1	-0,2	0,	0,2	0,2	0,2	0,2									

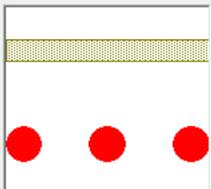


Figura 4.27: Disposición del Cable de 230kV Mazar. Fuente: el Autor

Capítulo 5

Simulaciones del Equipamiento Eléctrico de las Centrales Mazar y Molino

5.1. Introducción

En este capítulo realizamos la simulación de flujo de potencia y cortocircuito.

5.2. Flujo de potencia

Las iteraciones del flujo de potencia se han realizado mediante el algoritmo de Newton-Raphson resuelto en 5 iteraciones.

La demanda de energía eléctrica se la puede dividir en horas pico, horas valle y horas intermedias y para cada uno de estos horarios se realiza las simulaciones correspondientes, en el programa se tiene la opción de simular una red externa que nos ayuda a colocar valores de energía para realizar el análisis correspondiente y obtener los resultados de cada escenario operativo.

Se plantea dos escenarios en cada uno de ellos se tendrá un porcentaje de unidades trabajando así tenemos que en el primer escenario van a trabajar el 100% de las unidades y en el segundo escenario trabajan el 60% de las unidades.

La nomenclatura de los datos presentados en la simulación son:

UI = magnitud del voltaje de secuencia de línea a tierra en kilo voltios

u = magnitud del voltaje de secuencia positiva en p.u.
 ϕ = angulo del voltaje de secuencia positiva en grados

5.2.1. Escenario operativo al 60 %

Para simular este escenario en Mazar se deja fuera de operación la unidad número 2 y a consecuencia de ello se desactiva la carga de las bombas del SAE y tambien el sistema de ventilación de la unidad, además en Molino se pone fuera de operación las unidades 1, 2 y 3 por lo tanto las cargas del SAE, del sistema de ventilación y las vinculadas tambien se las desactiva en cada una de las unidades. En la siguiente figura se puede ver los resultados de la mencionada modelación, el flujo de potencia para el diagrama Molino Presa es.

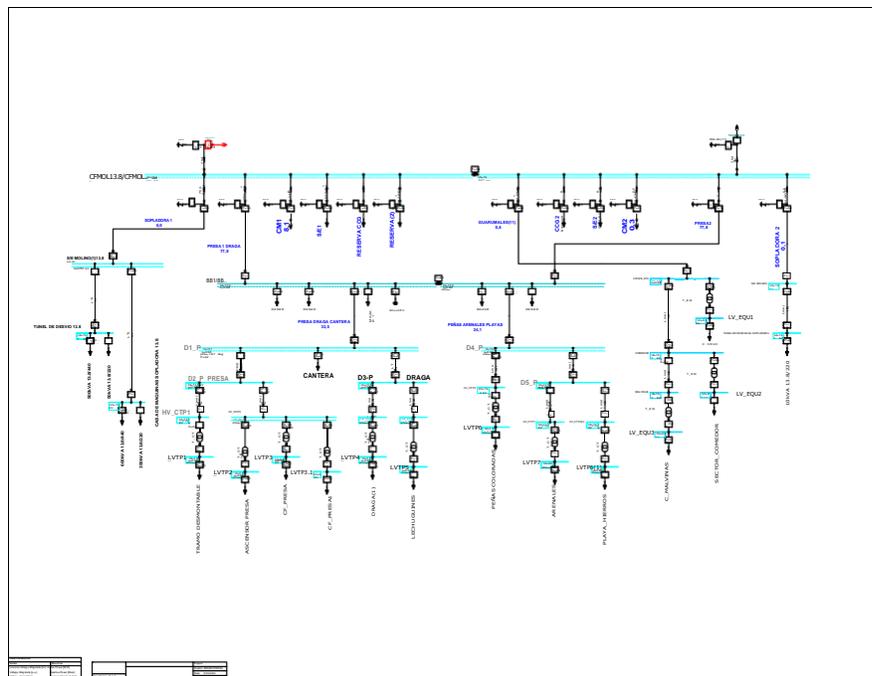


Figura 5.1: Simulación Flujo de Potencia de Molino Presa al 60%. Fuente: el Autor

CAP 5. SIMULACIONES DEL EQUIPAMIENTO ELÉCTRICO DE LAS CENTRALES MAZAR Y MOLINO147

A continuación se muestra la simulación del flujo de potencia de la Central Hidroeléctrica Mazar al 60%.

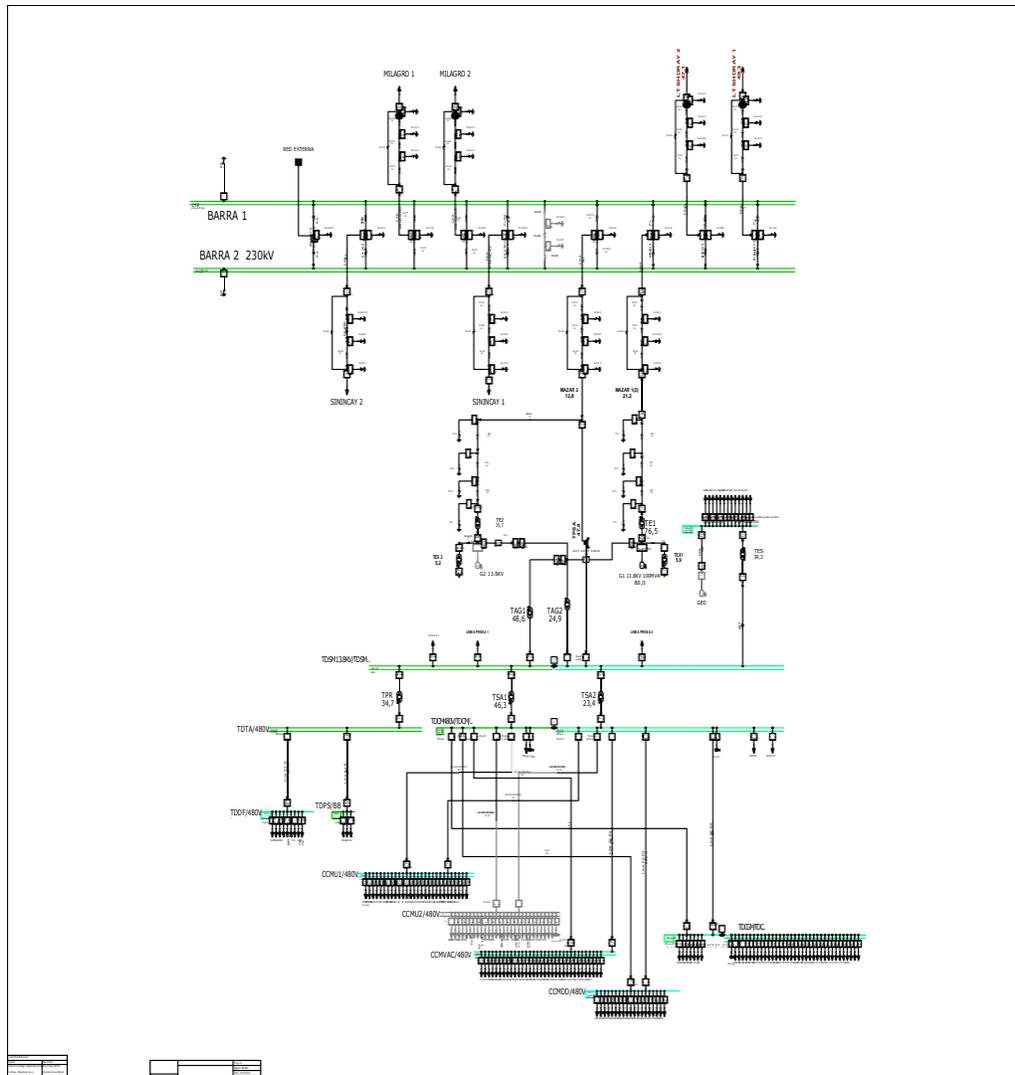


Figura 5.2: Simulación Flujo de Potencia Mazar al 60%. Fuente: el Autor.

La simulación del flujo de potencia para la subestación Paute Molino se puede observar en la siguiente figura para el mismo escenario al 60%.

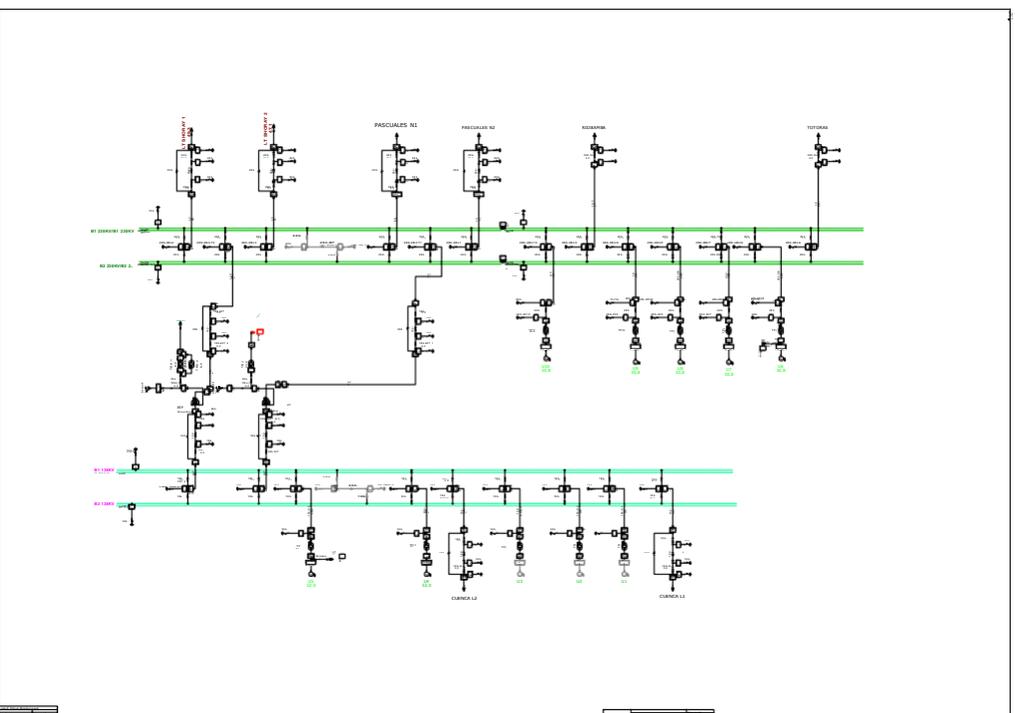


Figura 5.3: Simulación Flujo de Potencia de la Subestación Paute Molino al 60%. Fuente: el Autor.

La simulación de Molino 480V queda de la siguiente forma

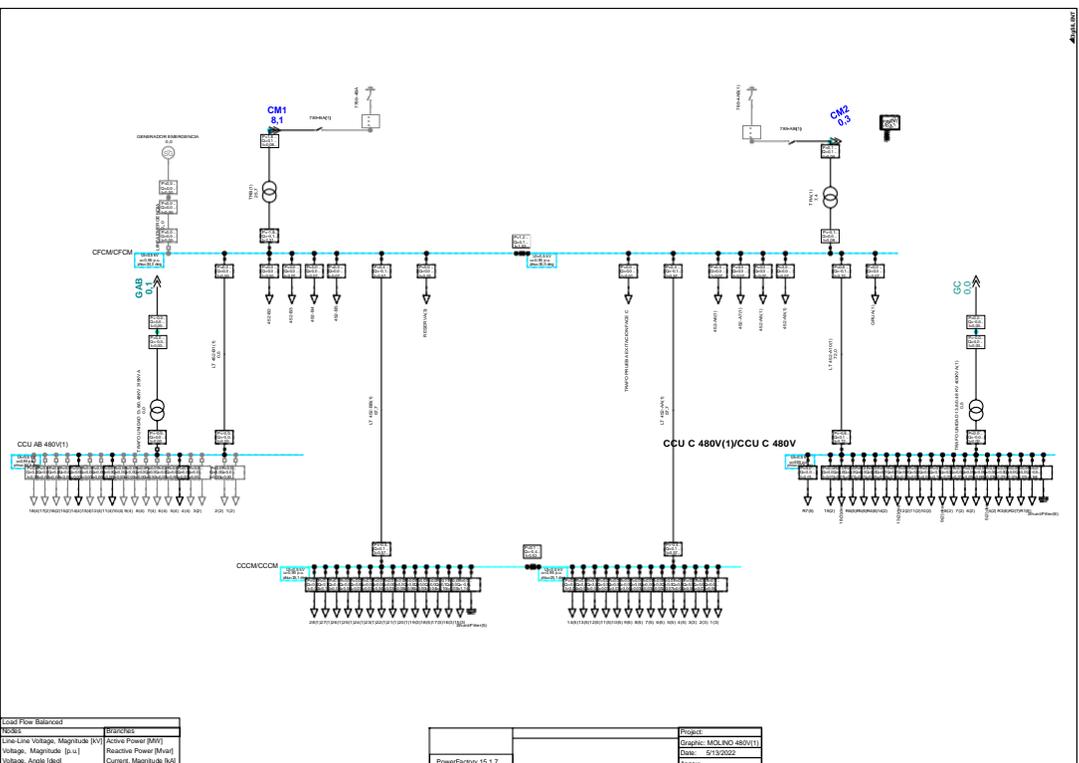


Figura 5.4: Simulación Flujo de Potencia Molino 480V al 60%. Fuente: el Autor.

5.2.2. Escenario operativo al 100 %

Para éste escenario se tiene operativas todas las unidades y también funcionando todas las cargas con lo cual trabajan en conjunto todos los esquemas simulados en el presente trabajo.

En la siguiente figura se puede ver los resultados de la mencionada modelación donde el flujo de potencia para el diagrama Molino Presa es.

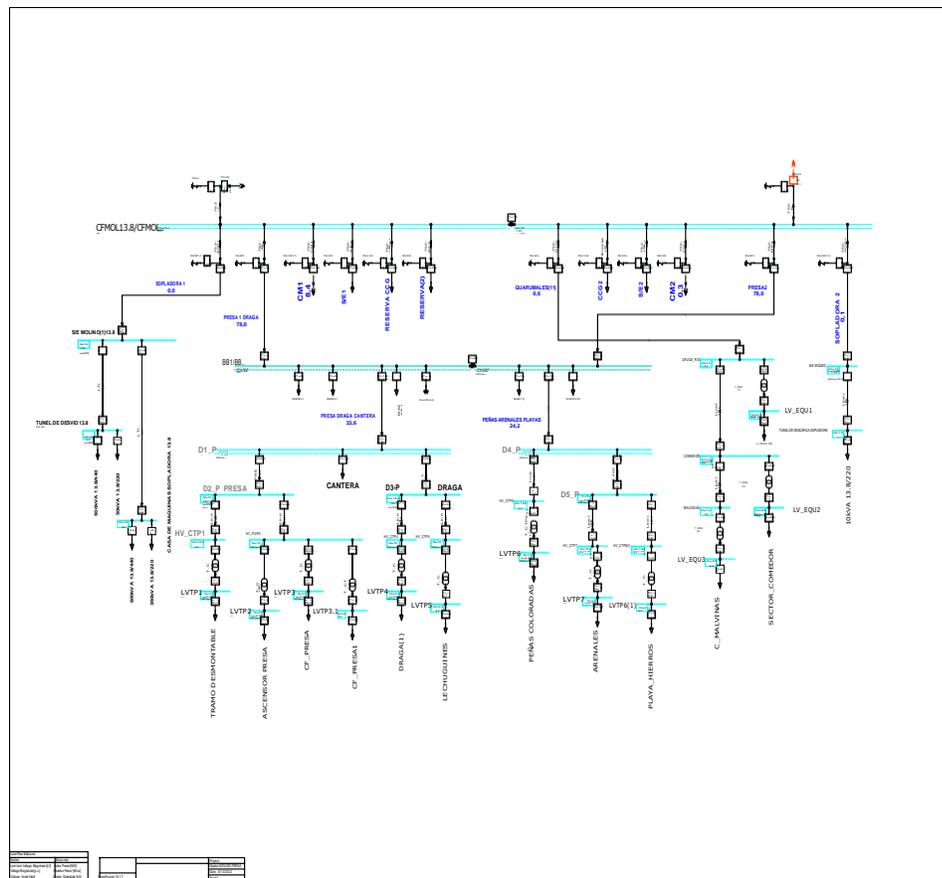


Figura 5.5: Modelación Flujo de Potencia de Molino Presa 100 %. Fuente: el Autor

CAP 5. SIMULACIONES DEL EQUIPAMIENTO ELÉCTRICO DE LAS CENTRALES MAZAR Y MOLINO151

A continuación se muestra la modelación del flujo de potencia de la Central Hidroeléctrica Mazar al 100%.

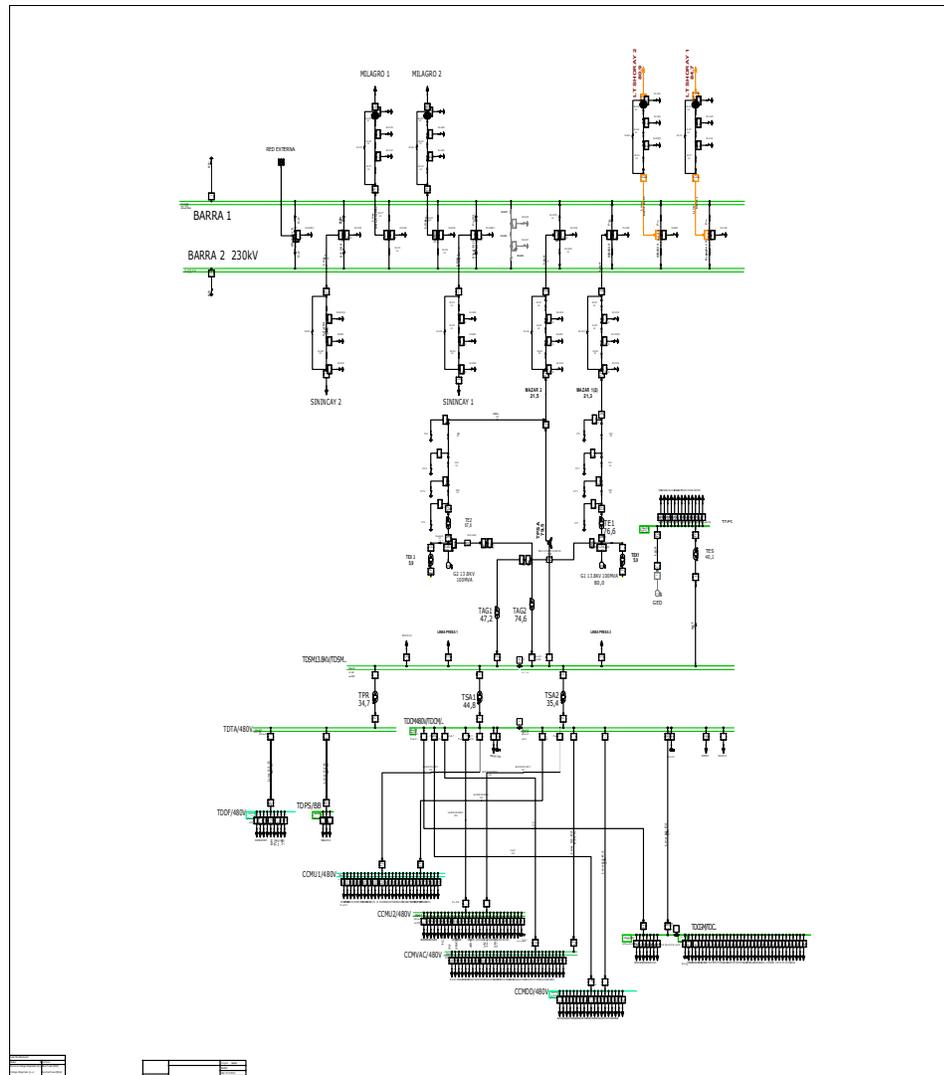


Figura 5.6: Simulación Flujo de Potencia de Mazar 100%. Fuente: el Autor.

La simulación del flujo de potencia para la subestación Paute Molino se puede observar en la siguiente figura para el mismo escenario del 100%.

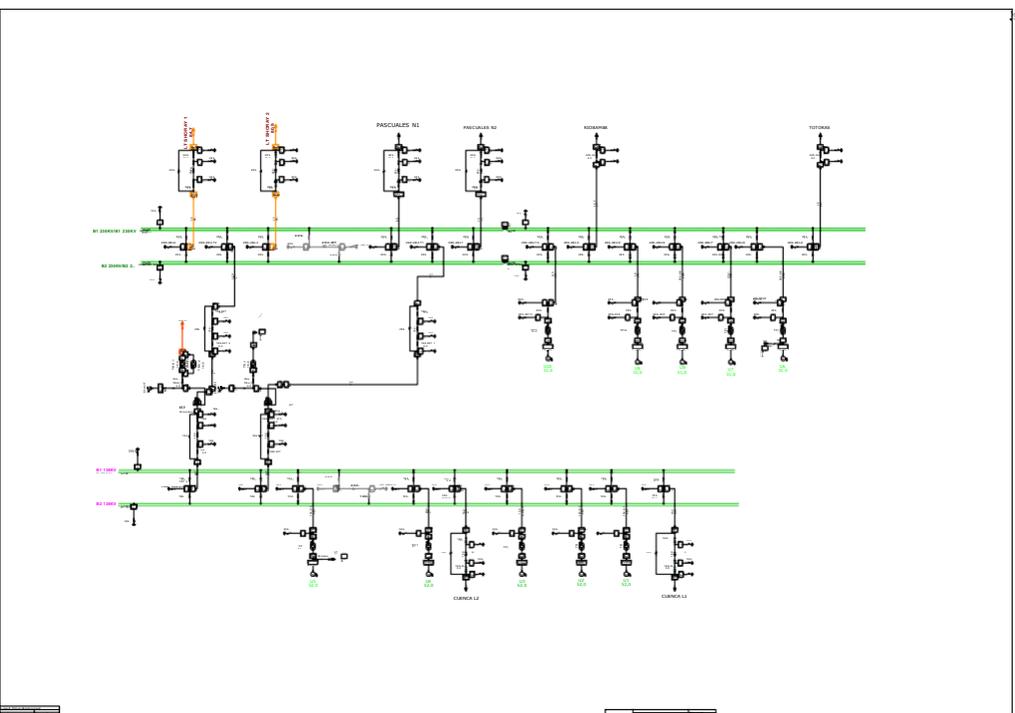


Figura 5.7: Simulación Flujo de Potencia de la Subestación Paute Molino 100%.

Fuente: el Autor.

La simulación de Molino 480V queda de la siguiente forma

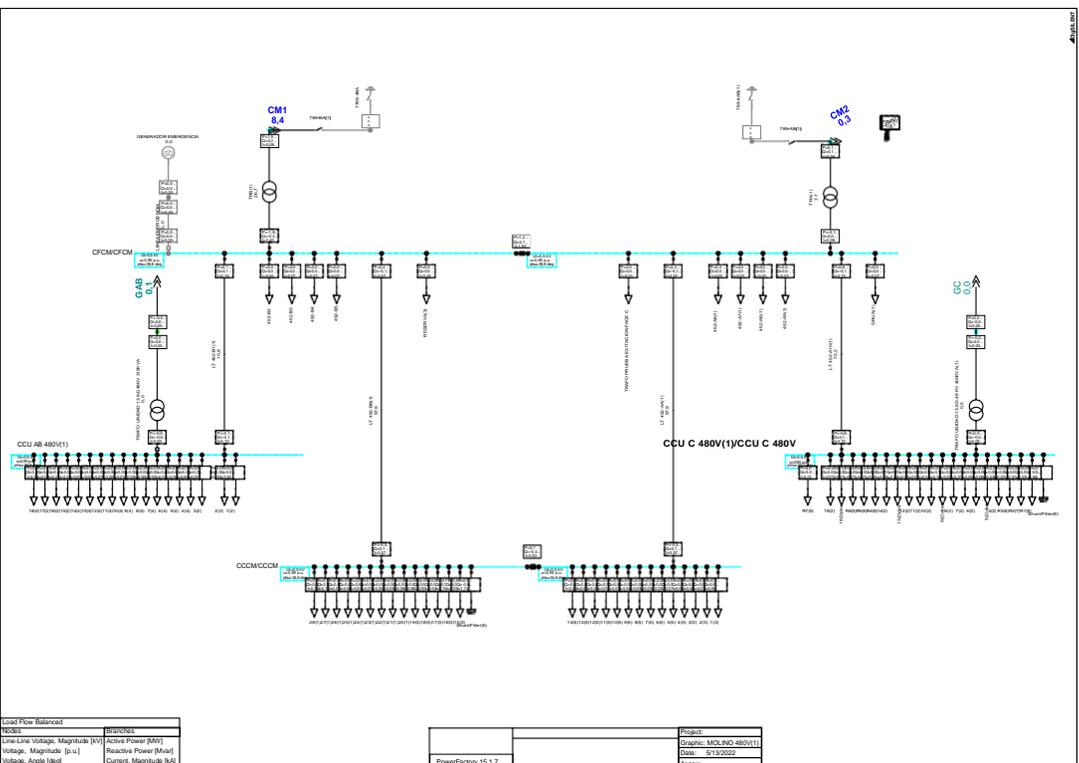


Figura 5.8: Simulación Flujo de Potencia Molino 480V al 100%. Fuente: el Autor.

5.2.3. Corto circuito norma IEC 60909 Trifásico

La nomenclatura que utiliza el programa al momento de dar los resultados es

Skss=potencia aparente de la corriente de corto circuito

I_{kss}=componente AC de la corriente de corto circuito permanente

i_p=corriente pico

Se puede observar en la siguiente figura la modelación del diagrama unifilar Molino Presa.

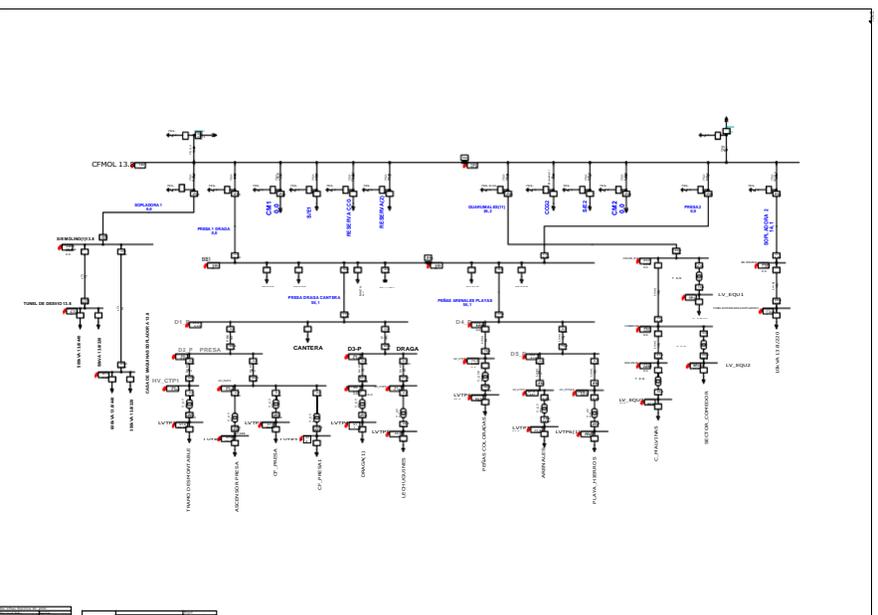


Figura 5.9: Simulación Corto Circuito Molino Presa. Fuente: el Autor

A continuación, se puede observar la simulación de corto circuito de la central hidroeléctrica Mazar.

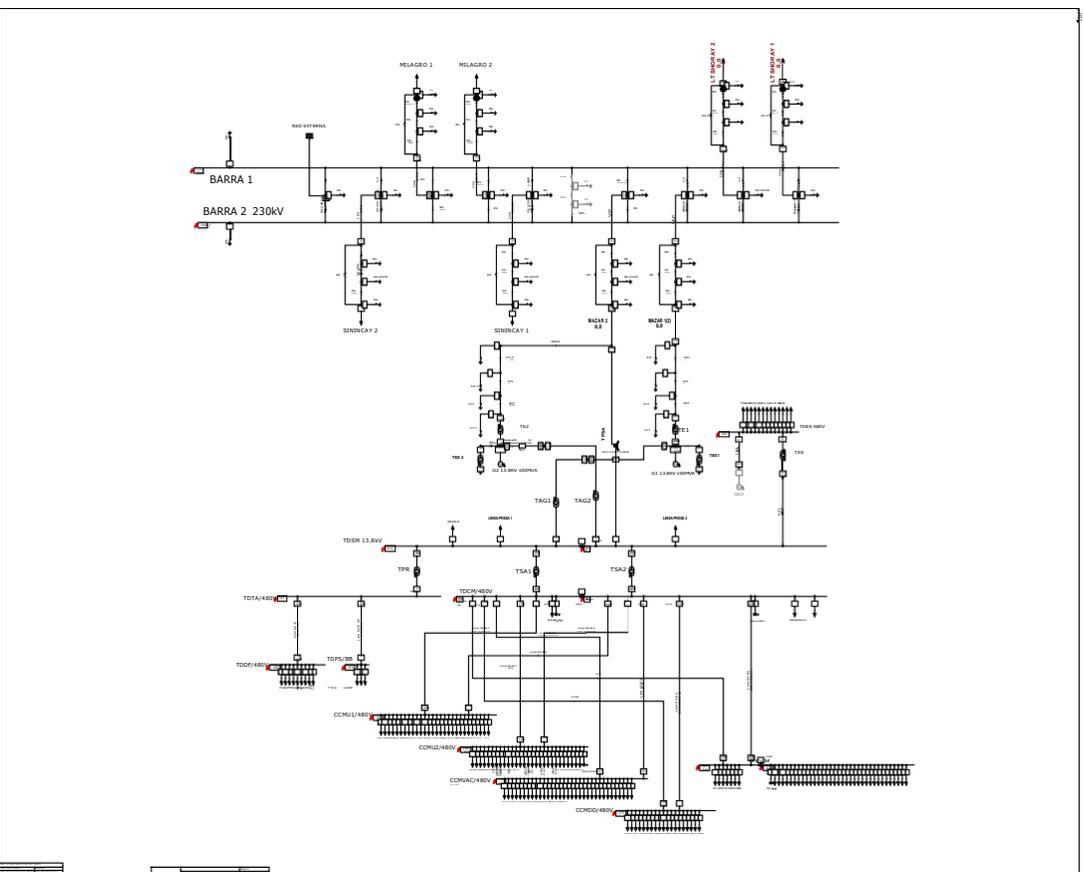


Figura 5.10: Modelación Corto Circuito Central Hidroeléctrica Mazar. Fuente: el Autor.

Finalmente se puede observar la simulación de corto circuito de la Subestación Paute Molino.

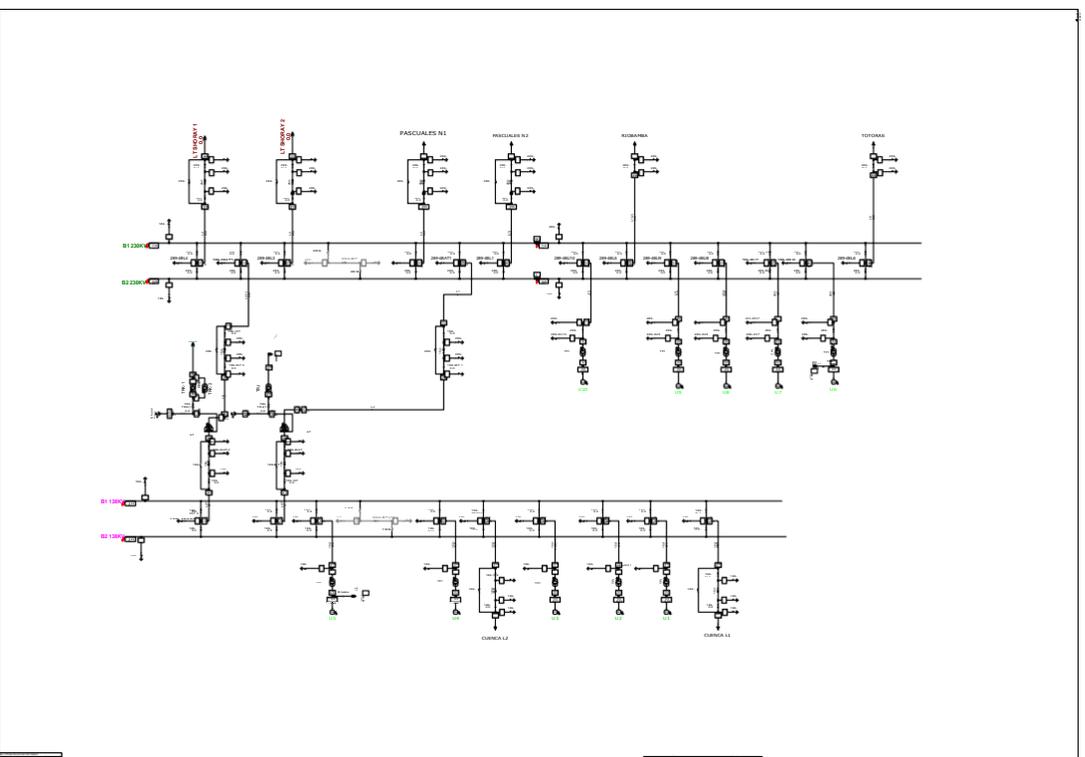


Figura 5.1.1: Simulación Corto Circuito Subestación Paute Molino

5.2.5. Corto circuito norma IEC 60909 Monofásico

En la siguiente figura se realiza un análisis con una falla monofásica.

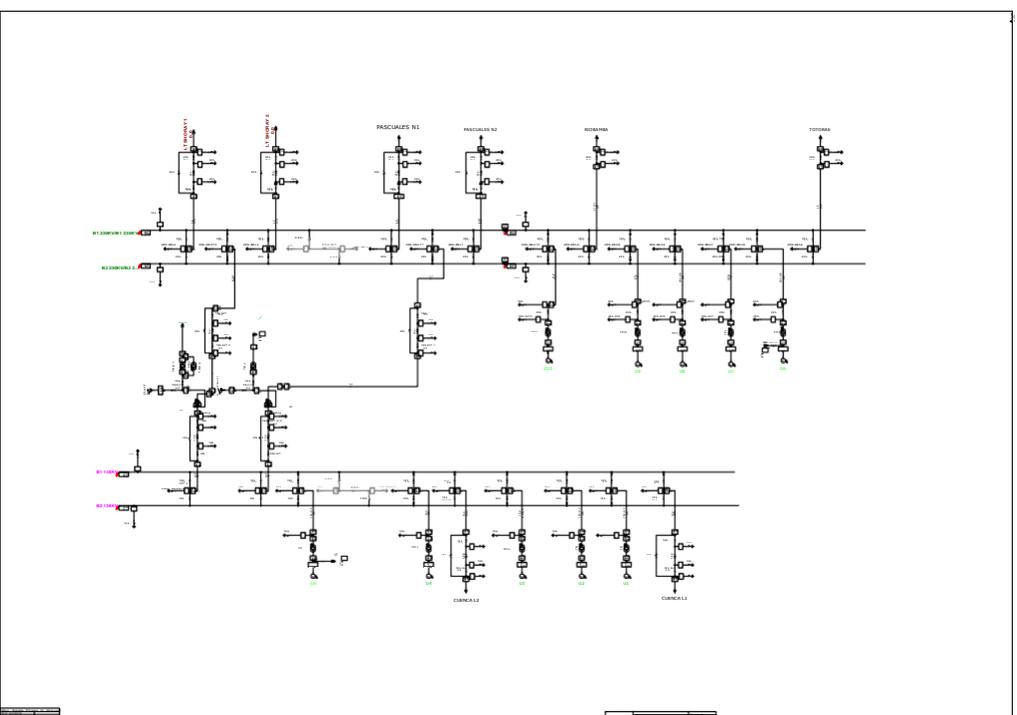


Figura 5.13: Simulación Corto Circuito con una falla monofásica en el diagrama Subestacion Paute Molino

5.2.6. Corto circuito norma ANSI con falla trifásica diagrama Subestacion Paute Molino

La nomenclatura utilizada para ésta norma es

I_{sym_m}=corriente de corto circuito momentánea

I_{asym_m}=corriente de corto circuito asimétrica momentánea

I_{peak_m}=corriente de corto circuito pico momentánea

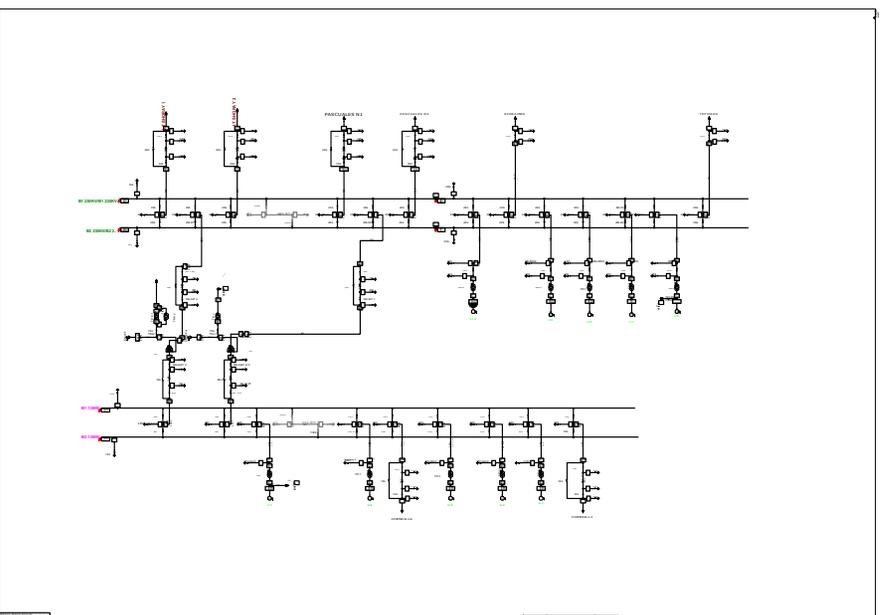


Figura 5.14: Simulación Corto Circuito con una falla trifásica en el diagrama Subestacion Paute Molino

Capítulo 6

Análisis de los Resultados

6.1. Introducción

En éste capítulo se analiza la simulación con respecto a los datos medidos en las centrales.

6.2. Resultados del proceso de simulación

Los análisis se llevaron a cabo utilizando Power Factory escrito por DigSI-LENT.

6.2.1. Flujo de potencia

El Flujo de Potencia se utiliza para la planeación y diseño en proyecciones futuras. Además permite realizar condiciones de operación de los sistemas que han sido implementados. Este estudio se basará en las tensiones simuladas respecto a las tensiones medidas en la central.

Se realizó la simulación en el software Power Factory, utilizando el método de Newton Raphson como se puede observar en las barras de la siguiente figura.

Siendo el caso que se tenga caídas de tensiones menores al 0.95 pu se puede corregir éste problema instalando N cantidades de transformadores en diferentes Taps lo que ayuda a mejorar el factor de potencia, la corriente que se traslada desde la central a la red eléctrica y en sí el mismo voltaje.

En la tabla 6.1, se puede observar los voltajes de los datos simulados mediante la resolución de las ecuaciones del sistema de potencia con la ayuda del método de Newton Raphson aplicando la programación no lineal.

Tabla 6.1: Resultados obtenidos en la modelación de flujo de carga. Fuente: El autor

Flujo de carga				
Escenario	100 %		60 %	
Barra	UI (KV)	u (p.u.)	UI (KV)	u (p.u.)
Barras de la Subestación Paute Molino				
B1 230KV	230.0	1	230.	1
B2 230KV	230.0	1	230.	1
B3 230KV	230.1	1	230.	1
B4 230KV	230.1	1	230.	1
B1 138KV	140.7	1.02	134.1	0.97
B2 138KV	140.7	1.02	134.1	0.97
Barras de Mazar				
BARRA1 230KV	230	1	230	1
BARRA2 230KV	230	1	230	1
TDSM 13.8KV	14.0	1.01	14.0	1.01
TDTA 480V	0.5	1	0.5	1
TDDF 480V	0.5	0.97	0.5	0.97
TDPS 480V	0.5	1	0.5	1
CCMU1 480V	0.5	0.97	0.5	0.97
CCMU2 480V	0.5	0.99	0.0	0.0
CCMVAC 480V	0.5	0.98	0.5	0.98
CCMDD 480V	0.5	0.97	0.5	0.97
TDGCM 480V	0.5	0.99	0.5	0.99
TDES 480V	0.5	0.99	0.5	0.99
Barras de Molino Presa				
CFMOL 13.8KV	13.2	0.95	13.2	0.96
S/E MOLINO(1)13.8KV	13.2	0.95	13.2	0.95
CM SOPLADORA 13.8KV	13.1	0.95	13.1	0.95
BB1 13.8KV	13.3	0.96	13.3	0.96
D1_P 13.8KV	13.1	0.95	13.1	0.95
D2_P PRESA 13.8KV	13.1	0.95	13.1	0.95
HV_CTP1 13.8KV	13.1	0.95	13.1	0.95
HV_CTP5 13.8KV	13.1	0.95	13.1	0.95
LVTP1 480V	0.5	0.95	0.5	0.95
LVTP5 480V	0.5	0.95	0.5	0.95
BB2 13.8KV	13.3	0.96	13.3	0.96
D4_P 13.8 KV	13.2	0.95	13.2	0.96
HV_CTP7 13.8KV	13.1	0.95	13.1	0.95
COMEDOR 13.8KV	13.1	0.95	13.1	0.95
MALVINAS 13.8KV	13.1	0.95	13.1	0.95
Barras de Molino				
CFCM 480V	0.5	0.95	0.5	0.95
BARRA A 480V	0.5	0.95	0.5	0.95
CCUAB 480V	0.5	0.95	0.5	0.95
CCCM 480V	0.5	0.96	0.5	0.97
CCUC 480V	0.5	0.95	0.5	0.96
BARRA AA 480V	0.5	0.96	0.5	0.97

Corto circuito

En el análisis del cálculo de cortocircuito de las centrales hidroeléctricas Molino y Mazar se ha seleccionado la norma IEC 60909. Los cálculos se realizan en cualquier punto de la central y sus respectivas unidades generadoras pertenecientes a cada fase.

Tabla 6.2: Modelación Cortocircuito falla bifásica IEC. Fuente: El autor

Corto circuito falla bifásica IEC			
Barra	Ikss A (KA)	Ikss B (KA)	Ikss C (KA)
Mazar			
BARRA1 230KV	0	29,156	29,156
BARRA2 230KV	0	29,156	29,56
TDSM 13.8KV	0	1,840	1,840
Molino Presa			
CFMOL 13.8KV	0	28,884	28,884
S/E MOLINO(1) 13.8KV	0	16,480	16,480
TUNEL DE DESVIO 13.8KV	0	5,236	5,236
CM SOPLADORA 13.8KV	0	2,214	2,214
BB1 13.8KV	0	3,890	3,890
D1_P 13.8KV	0	2,810	2,810
D2_P PRESA 13.8KV	0	2,528	2,528
HV_CTP1 13.8KV	0	2,198	2,198
HV_P2/P3 13.8KV	0	2,198	2,198
D3_P 13.8 KV	0	2,198	2,198
HV_CTP4 13.8KV	0	1,943	1,943
HV_CTP5 13.8KV	0	1,871	1,871
BB2 13.8KV	0	3,890	3,890
D4_P 13.8 KV	0	2,810	2,810
HV_CTP6 13.8KV	0	2,662	2,662
D5_P 13.8 KV	0	2,734	2,734
HV_CTP7 13.8KV	0	2,466	2,466
HV_CTP6(1) 13.8KV	0	2,528	2,528
CRUCE_R/O 13.8KV	0	2,295	2,295
COMEDOR 13.8KV	0	1,710	1,710
MALVINAS 13.8KV	0	1,505	1,505
LVTP1 480V	0	60.310	60.310
LVTP4 480V	0	53.332	53.332
LVTP5 480V	0	51.351	51.351
Subestación Paute Molino			
B1 230KV	0	28,971	28,971
B2 230KV	0	28,971	28,971
B3 230KV	0	28,971	28,971
B4 230KV	0	28,971	28,971
B1 138KV	0	10,825	10,825
B2 138KV	0	10,825	10,825
Barras de Molino			
CCUAB 480V	0	32.661	32.661
CCCM 480V	0	11.664	11.664
CCUC 480V	0	5.937	5.937
BARRA AA 480V	0	11.664	11.664

Hay que tener en cuenta que la investigación se realiza para la situación de mayor interés, siendo ésta la situación más crítica en la que funciona el sistema. Se puede observar en la tabla anterior una magnitud elevada de corriente de cortocircuito de 60,312 kA. Al realizar el análisis con la norma ANSI y falla trifásica se obtuvieron los siguientes valores

Tabla 6.3: Modelación Cortocircuito norma ANSI falla trifásica. Fuente: El autor

Corto circuito falla trifásica ANSI			
Barra	$I_{sym_m}(KA)$	$I_{asym_m}(KA)$	$I_{peak_m}(KA)$
Mazar			
BARRA1 230KV	31,210	43,556	74,520
BARRA2 230KV	31,210	43,556	74,520
TDSM 13.8KV	2,087	3,256	5,450
Molino Presa			
CFMOL 13.8KV	28,502	30,566	51,349
S/E MOLINO(1) 13.8KV	16,691	17,772	29,708
TUNEL DE DESVIO 13.8KV	5,434	5,751	9,568
CM SOPLADORA 13.8KV	2,313	2,444	4,062
BB1 13.8KV	4,048	4,080	6,235
D1_P 13.8KV	2,931	2,946	4,449
D2_P PRESA 13.8KV	2,639	2,651	3,992
HV_CTP1 13.8KV	2,295	2,305	3,459
HV_P2/P3 13.8KV	2,295	2,305	3,459
D3_P 13.8 KV	2,295	2,305	3,459
HV_CTP4 13.8KV	2,031	2,039	3,052
HV_CTP5 13.8KV	1,956	1,963	2,937
BB2 13.8KV	5,020	5,113	8,172
D4_P 13.8 KV	4,048	4,080	6,235
HV_CTP6 13.8KV	2,777	2,791	4,209
D5_P 13.8 KV	2,852	2,867	4,326
HV_CTP7 13.8KV	2,574	2,587	3,892
HV_CTP6(1) 13.8KV	2,639	2,651	3,992
CRUCE_R/O 13.8KV	2,396	2,404	3,583
COMEDOR 13.8KV	1,788	1,793	2,663
MALVINAS 13.8KV	1,575	1,579	2,342
Subestación Paute Molino			
B1 230KV	27,122	27,531	43,087
B2 230KV	27,122	27,531	43,087
B3 230KV	27,122	27,531	43,087
B4 230KV	27,122	27,531	43,087
B1 138KV	7,014	7,216	11,615
B2 138KV	7,014	7,216	11,615
Molino 480V			
CCCUAB 480v	37,834	45,927	79,403
CCCM 480V	12,816	16,778	28,953
CCUC 480V	6,527	8,596	14,824
BARRA AA 480V	12,816	16,778	28,953

Capítulo 7

Conclusiones y Recomendaciones

7.1. Introducción

Esta sección contiene las conclusiones y recomendaciones adquiridas a partir de la realización del trabajo y se deja las bases para futuras investigaciones que podrían crearse.

7.2. Conclusiones

- En este trabajo, se ha realizado un modelo completo para la red de transmisión Mazar y Molino de 138 kV, 230kV 13.8kV y 480V, que considera el punto principal para simular el estado actual de la red y evaluar las modificaciones deseadas de pruebas presentes. Además, se han realizado estudios básicos como cálculos de flujo de carga e impactos de cortocircuito.
- El SEP con sus elementos y las protecciones de las centrales Mazar y Molino, se encuentra operando normalmente.
- Los cálculos son una herramienta muy importante para determinar las características adecuadas de los componentes del sistema y el diseño óptimo del sistema de protección.
- Cuando se realiza el análisis con la Norma ANSI en el caso de corto circuito por falla bifásica se ve que el valor es menor con relación a realizar el análisis con la norma IEC y con la misma falla de corto circuito bifásica.

- Para el caso de los flujos de potencia cuando se realiza el análisis de diversos escenarios operativos ya sean estos cuando tiene la demanda picos o cuando tienen valles el voltaje varía en proporción al requerimiento evidenciando que se debe tener listos los generadores en caso de que se produzca alguna contingencia.
- Finalmente, gracias al modelo propuesto en este estudio, se analizarían los trabajos futuros que incluyan el impacto de nuevas centrales hidroeléctricas operativas de la red nacional de Ecuador.

7.3. Recomendaciones

- Para lograr un correcto funcionamiento respecto a calidad y continuidad de servicio se recalca que sería necesario obtener los parámetros como: capacidad, resistencia, clase para tener datos más certeros que aporten a una mejor simulación.
- Cuando se realice la compra de equipos, es vital pedir al distribuidor que entregue la documentación necesaria que corresponda al informe de construcción, funcionamiento y garantía, logrando de esta forma la incorporación del equipo a las centrales.
- Con respecto a la versión del programa utilizado en este proyecto es la POWER Factory 15.1 la cual se convierte en una opción factible para muchos usuarios, gracias a su amplia versatilidad.
- Se puede recalcar que el programa utilizado es confiable para modelar en diferentes circunstancias de una red eléctrica y sobre todo que permite interactuar con diseños robustos.

Bibliografía

- [1] C. EP, “Complejo Hidroeléctrico Paute Integral,” [Online]. Available: <https://www.celec.gob.ec/hidropaute/ley-de-transparencia/11-espanol/perfil-corporativo/127-paute-integral.html>., vol. 1, 2009.
- [2] Directindustry, “Generador hidroeléctrico,” [Online]. Available: <https://www.directindustry.es/prod/ge-renewable-energy/product-99475-1716798.html>., 2017.
- [3] M. Leon, “ESCENARIOS DE CONTINGENCIAS PARA LA AUTOMATIZACIÓN DE LA OPERACIÓN DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN PARA LOS ALIMENTADORES PRIMARIOS 0321, 0322 Y 0722 DE LA EMPRESA ELÉCTRICA REGIONAL CENTRO SUR C.A.,” 2017.
- [4] Tecsaqro, “¿Qué es un transformador eléctrico y cómo funciona,” [Online]. Available: <https://www.tecsaqro.com.mx/blog/que-es-un-transformador-electrico/>., 2016.
- [5] J. A. M. Velasco and F. D. León *Rev. Chil. Ing.*, [Online]. mendeley-groups = Zotero - Diaz Publicaciones, number = 1, pages = 93–109, title = Circuito equivalente de un transformador con regulación Equivalent circuit of a regulating transformer, url = <https://ieeexplore.ieee.org/document/7909154/>, volume = 19, year = 2011.
- [6] C. W. A. Cárdenas, “Estudios eléctricos de sistemas de potencia para la carrera de ingeniería eléctrica utilizando el software power factory 13.1 de DigSILENT,” Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/708/1/CD-1655282008-08-05-10-04-5629.pdf>., p. 344, 2015.

- [7] K. Mijas, “Determinación de la Posición de Taps Bajo Carga en Transformadores Conectados en Paralelo Para Minimizar la Corriente Circulante,” 2017.
- [8] Directindustry, “Estudio de la Variación del Voltaje y la Frecuencia de Generación de Una Máquina de Inducción Funcionando como Generador,” 2006.
- [9] Directindustry, “Generador hidroeléctrico,” [Online]. Available: <https://www.dickcostantinosa.com.ar/arranque-de-motores/>, p. 1, 2020.
- [10] P. D. Madrid, “Estudio Y Modelado De Redes De Distribución,” *M. Cristina Camacho Rodríguez Tutora, R. María de Castro Fernández Cotutor, and J. Nájera Álvarez, “Escuela Técnica Superior Ingenieros Industriales*, 2018.
- [11] C. EP, “Manuales de Operación del Sistema de Exitacion Fase ‘C,’” pp. 1–7, apr 2010.
- [12] W. P. Arévalo and D. J. Benavides, “Análisis de alternativas, respecto de la fuente de alimentacion de los servicios auxiliares de la central Mazar,” vol. 1, no. 1, p. 127, 2015.
- [13] F. G. Longatt, “DIgSILENT PowerFactory (Manual de Usuario),” vol. 1, pp. 1–2, 2004.
- [14] L. Bam and W. Jewell, “Review: Power system analysis software tools,” 2005 *IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet.*, vol. 1, pp. 139–144, 2005.
- [15] L. Checa, “Líneas de Transporte de Energía.pdf,” in *2012 IEEE International Conference on Green Computing and Communications (GreenCom)*, p. 591, 2000.
- [16] G. GODINEZ, “Uso De Corrientes De Secuencia Negativa En La Protección De Fallas a Tierra,” 2015.
- [17] I. Gustavo and A. Gómez, “Medición De Impedancia De Secuencia Cero En Transformadores De Potencia,” *doi: 10.15517/jte.v25i2.16895.*, vol. 25, no. 2, pp. 99–108, 2017.
- [18] E. D. E. A. D. E. L. A. Planta and M. San, “EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE LA PLANTA EMBOTELLADORA

DE AGUA MINERAL SAN FELIPE, MEDIANTE LA SIMULACIÓN CON EL SOFTWARE ETAP 12.6,” 2018.

- [19] F. K. Ariyo, “Investigation of Nigerian 330 Kv Electrical Network with Distributed Generation Penetration Part I: Basic Analyses.,” *Int. J. Energy Power Eng.*, doi: 10.11648/j.ijep.20120101.11., vol. 1, no. 1, p. 1, 2012.
- [20] S. Y. M. Kamli and M. Abe, “A 50-150 kHz half-bridge inverter for induction heating applications,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 43, no. 1, pp. 163–172, 1996.
- [21] P. A. P. D. Lima and S. H. L. Cabral, “Computer simulation as an aid in the rating of a transformer on-load tap changer,” [Online]. Available: <https://www.directindustry.es/prod/ge-renewable-energy/product-99475-1716798.html>, vol. 30, no. 4, pp. 34–38, 2014.
- [22] P. A. Achig and D. Carrión, “Compensación óptima de potencia reactiva en sistemas eléctricos de transmisión mediante búsqueda armónica,” vol. 1, pp. 1–37, 2019.
- [23] P. M. V. Granda, “Parametrización, control, determinación y reducción de pérdidas en sistemas de distribución,” pp. 1–136, 2014.
- [24] N. Gomez, “Planificación del sistema de distribución del sector mirador en Quito,” vol. 148, pp. 148–162, 2017.
- [25] C. E. L. Paredes, “Diseño e implementación de un sistema piloto para la automatización de alimentadores de la red de distribución de la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.,” *Repos. Digit. “Universidad Cuenca,”* p. 440, 2016, [Online]. Available: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/23690>, p. 440, 2016.
- [26] IEC, “NORMA IEC 62067,” vol. 2003, 2011.