

SISTEMA GRÁFICO DEMOSTRATIVO DE ESQUEMAS Y DISPOSICIÓN FÍSICA
DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

BRIAN FELIPE REBOLLEDO PAZ
CAMILO ANDRÉS PEÑA GUTIÉRREZ



UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2012

SISTEMA GRÁFICO DEMOSTRATIVO DE ESQUEMAS Y DISPOSICIÓN FÍSICA
DE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

BRIAN FELIPE REBOLLEDO PAZ
CAMILO ANDRÉS PEÑA GUTIÉRREZ

Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Electricista

Director GUILLERMO APONTE MAYOR
Ingeniero Electricista Ph.D

Director IVÁN FELIPE ORDUÑA
Ingeniero Electricista

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2012

Nota de aceptación:

Jurado

Jurado

ING. GUILLERMO APONTE Ph.D
Director del Proyecto

ING. IVÁN ORDUÑA
Director del Proyecto

Cali, 05 de Junio de 2012

DEDICATORIA

*A Dios, por permitirme ser lo que soy y estar acompañado de personas maravillosas.
A mi madre Miryan, por su paciencia y esfuerzo incondicional en todos estos años, guiándome a
ser una mejor persona y logrando la materialización de este logro.
A mi hermana Marcela y mi novia Karen que con su ternura y cariño han sido un apoyo
incondicional, esperando que tomen este logro como incentivo para alcanzar los suyos.*

Brian Felipe R.

*A Dios por guiarme en cada momento y darme fortaleza para continuar, a mis padres Consuelo y
Armando, a mi hermano Daniel y a mi abuelo Gonzalo, quienes a lo largo de mi vida han velado
por mi bienestar y educación, y me han brindado su apoyo incondicional en todo momento.*

Camilo Andrés.

AGRADECIMIENTOS

Los Autores expresan sus agradecimientos a:

Al profesor GUILLERMO APONTE MAYOR Ph.D y al ingeniero IVAN FELIPE ORDUÑA, directores de este proyecto, por su orientación y apoyo para la culminación de este trabajo.

A la señora OFELIA ARIAS, por facilitarnos los equipos de cómputo en el Piso Informático, de la Facultad de Artes Integradas.

Al tecnólogo OSCAR RICARDO HURTADO, por su apoyo en la culminación de este proyecto.

Al grupo de investigación de Alta Tensión GRALTA, a la UNIVERSIDAD DEL VALLE y a los profesores por su formación académica y personal.

CONTENIDO

pág

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO UNO	2
1. CONCEPTOS GENERALES SOBRE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS	3
1.1 CARACTERÍSTICAS DE UNA SUBESTACIÓN	4
1.1.1 Confiabilidad	4
1.1.2 Seguridad	5
1.1.3 Flexibilidad	5
1.2 CLASIFICACIÓN DE LAS SUBESTACIONES	5
1.2.1 Forma constructiva	5
1.2.1.1 Subestaciones convencionales aisladas por aire (AIS)	5
1.2.1.2 Subestaciones interiores o exteriores encapsuladas en gas SF6 (GIS)	6
1.2.2 Por su operación en el sistema de potencia	6
1.2.2.1 Subestación de maniobra o de conmutación	6
1.2.2.2 Subestación de transformación	6
1.2.2.3 Subestación convertidora	7
1.2.3 Por su nivel de tensión y función en el sistema de potencia	7
1.2.3.1 Subestación de generación	7
1.2.3.2 Subestación de transmisión	7
1.2.3.3 Subestaciones de distribución	7
1.3 EQUIPOS DE PATIO DE UNA SUBESTACIÓN	8
1.3.1 Transformador de potencia	8
1.3.1.1 Capacidad nominal	9
1.3.1.2 Devanados	9
1.3.1.3 Cambiador de derivaciones	9

1.3.1.4	Sistema de refrigeración.....	9
1.3.2	Transformadores de potencial	10
1.3.3	Transformadores de corriente	10
1.3.4	Interruptores de potencia.....	12
1.3.4.1	Aire comprimido.....	12
1.3.4.2	Aceite.....	13
1.3.4.3	Hexafluoruro de azufre SF6.....	13
1.3.5	Seccionadores.....	14
1.3.5.1	Tipos constructivos	14
1.3.6	Descargadores de sobretensiones	16
1.4	DISTANCIAS DE SEGURIDAD	17
1.4.1	Valor básico.....	17
1.4.2	Determinación zonas de seguridad	17
1.4.3	Distancias para el dimensionamiento de subestaciones	18
1.4.3.1	Ancho de barras	18
1.4.3.2	Ancho de campo.....	19
1.4.3.3	Altura de campo.....	19
1.4.3.4	Longitud de campo	19
	CAPÍTULO DOS	21
2.	PRINCIPALES CONFIGURACIONES DE LAS SUBESTACIONES ELÉCTRICAS	22
2.1	BARRAJE SIMPLE	27
2.1.1	Disposición física.....	28
2.1.2	Secuencias de operación	29
2.2	BARRAJE SIMPLE CON SECCIONADOR DE BARRAS.....	31
2.2.1	Disposición física.....	32
2.2.2	Secuencias de operación	33
2.3	BARRAJE SIMPLE CON BY-PASS.....	35
2.3.1	Disposición física.....	36
2.3.2	Secuencias de operación	38

2.4	BARRAJE SIMPLE CON BY-PASS DE LÍNEA	40
2.4.1	Disposición física	41
2.4.2	Secuencias de operación	42
2.5	BARRAJE SIMPLE CON TRANSFERENCIA	44
2.5.1	Disposición física	45
2.5.2	Secuencias de operación	46
2.6	BARRAJE DOBLE	49
2.6.1	Disposición física	50
2.6.2	Secuencias de operación	51
2.7	BARRAJE DOBLE CON BY-PASS.....	54
2.7.1	Disposición física	55
2.7.2	Secuencias de operación	57
2.8	BARRAJE DOBLE CON TRANSFERENCIA.....	59
2.8.1	Disposición física	60
2.8.2	Secuencias de operación	62
2.9	BARRAJE EN ANILLO	65
2.9.1	Disposición física	65
2.9.2	Secuencias de operación	66
2.10	DOBLE INTERRUPTOR.....	68
2.10.1	Disposición física	69
2.10.2	Secuencias de operación	70
2.11	INTERRUPTOR Y MEDIO.....	72
2.11.1	Disposición física	73
2.11.2	Secuencias de operación	74
CAPÍTULO TRES		77
3.	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SUBVIRT	78
3.1	ELEMENTOS RELEVANTES DE DISEÑO	78
3.1.1	Descripción del problema	78
3.1.1.1	Objetivo general.....	78
3.1.1.2	Objetivos específicos.....	79

3.1.1.3	Malla de temas y subtemas	79
3.1.1.4	Perfil de usuario.....	80
3.1.2	Definición de requerimientos	80
3.1.2.1	Requerimientos funcionales	80
3.1.2.2	Requerimientos no funcionales	80
3.1.3	Diseño computacional	82
3.1.3.1	Estructura general de SUBVIRT 1.0	82
3.1.3.2	Especificación de los formatos patrón	84
3.2	DISEÑO DE LA VENTANA ESQUEMAS	88
3.3	CREACIÓN DE LAS SECUENCIAS DE OPERACIÓN	89
3.3.1	Diseño del entorno gráfico.....	89
3.3.2	Implementación de las secuencias.....	92
3.3.3	Ejemplo secuencia de operación.....	95
3.4	CREACIÓN DE LA DISPOSICIÓN FÍSICA 3D	97
3.4.1	Diseño de modelos 3D	97
3.4.1.1	Aisladores.....	98
3.4.1.2	Celosía	99
3.4.1.3	Conductores	99
3.4.1.4	Equipos de patio.....	100
3.4.2	Vistas 360º.....	103
3.4.3	Creación de la visita virtual 3D	104
3.5	DESCRIPCIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE SUBVIRT	110
3.5.1	Instalación	110
3.5.2	Interfaz de usuario.....	111
3.5.3	Desinstalación	119
4.	CONCLUSIONES.....	120
5.	TRABAJOS FUTUROS	121
	BIBLIOGRAFÍA.....	122

LISTA DE TABLAS

pág

Tabla 1. Distancia típica entre equipos de patio.....	20
Tabla 2. Simple, estado original de la subestación.....	29
Tabla 3. Simple, secuencias para bahías L1 y L2.	29
Tabla 4. Simple, secuencias para bahía T1.	30
Tabla 5. Simple, secuencias para elementos 3 y 6.	30
Tabla 6. Simple, secuencias para el barraje.....	31
Tabla 7. Simple con secc. de barras, estado original de la subestación.	34
Tabla 8. Simple con secc. de barras, secuencias para L1 y L2.....	34
Tabla 9. Simple con secc. de barras, secuencias para T1.	34
Tabla 10. Simple con secc. de barras, secuencias para elementos 3 y 6.	35
Tabla 11. Simple con secc. de barras, secuencias para el barraje.....	35
Tabla 12. Simple con by-pass, estado original de la subestación.	38
Tabla 13. Simple con by-pass, secuencias para L1 y L2.....	38
Tabla 14. Simple con by-pass, secuencias para T1.	38
Tabla 15. Simple con by-pass, secuencias para elementos 4 y 9.	39
Tabla 16. Simple con by-pass, secuencias para el barraje.	39
Tabla 17. Simple con by-pass de línea, estado original de la subestación.....	42
Tabla 18. Simple con by-pass de línea, secuencias para L1 y L2.....	42
Tabla 19. Simple con by-pass de línea, secuencias para T1 y T2.....	42
Tabla 20. Simple con by-pass de línea, secuencias para elementos 5 y 8.	43
Tabla 21. Simple con by-pass de línea, secuencias para el barraje.....	44
Tabla 22. Simple con transferencia, estado original de la subestación.	47
Tabla 23. Simple con transferencia, secuencias para L1 y L2.	47
Tabla 24. Simple con transferencia, secuencias para T1.	47

Tabla 25. Simple con transferencia, secuencias para transferencia.....	48
Tabla 26. Simple con transferencia, secuencias para elementos 2 y 8.	48
Tabla 27. Simple con transferencia, secuencias para el barraje.	49
Tabla 28. Doble, estado original de la subestación.	52
Tabla 29. Doble, secuencias para L1 y L2.	52
Tabla 30. Doble, secuencias para acople.....	52
Tabla 31. Doble, secuencias para T1.....	53
Tabla 32. Doble, secuencias para elementos 3 y 8.	53
Tabla 33. Doble, secuencias para el barraje 1.	54
Tabla 34. Doble con by-pass, estado original de la subestación.	57
Tabla 35. Doble con by-pass, secuencias para L1 y L2.	57
Tabla 36. Doble con by-pass, secuencias para acople.	58
Tabla 37. Doble con by-pass, secuencias para T1.....	58
Tabla 38. Doble con by-pass, secuencias para elementos 4 y 13.....	59
Tabla 39. Doble con by-pass, secuencias para el barraje 1.	59
Tabla 40. Doble con transferencia, estado original de la subestación.....	62
Tabla 41. Doble con transferencia, secuencias para L1 y L2.	63
Tabla 42. Doble con transferencia, secuencias para acople y transferencia.....	63
Tabla 43. Doble con transferencia, secuencias para T1.....	63
Tabla 44. Doble con transferencia, secuencias para elementos 4 y 11.....	64
Tabla 45. Doble con transferencia, secuencias para el barraje 2.	64
Tabla 46. Anillo, estado original de la subestación.....	67
Tabla 47. Anillo, secuencias para L1.....	67
Tabla 48. Anillo, secuencias para T1.....	67
Tabla 49. Anillo, secuencias para elemento 19.	68
Tabla 50. Doble Interruptor, estado original de la subestación.....	70
Tabla 51. Doble Interruptor, secuencias para L1.....	71
Tabla 52. Doble Interruptor, secuencias para T1.....	71
Tabla 53. Doble Interruptor, secuencias para elemento 11.	72
Tabla 54. Doble Interruptor, secuencias para el barraje 2.....	72

Tabla 55. Interruptor y Medio, estado original de la subestación.....	74
Tabla 56. Interruptor y Medio, secuencias para L1.....	75
Tabla 57. Interruptor y Medio, secuencias para T1.	75
Tabla 58. Interruptor y Medio, secuencias para elemento 5.....	76
Tabla 59. Interruptor y Medio, secuencias para el barraje 2.....	76

LISTA DE FIGURAS

pág

Figura 1. Sistema interconectado de potencia.	4
Figura 2. Transformador de potencia trifásico.	8
Figura 3. Transformadores de potencial.	11
Figura 4. Transformador de corriente.	11
Figura 5. Interruptor en SF6 de tanque vivo.	13
Figura 6. Seccionador de apertura central.	15
Figura 7. Seccionador tipo pantógrafo.	16
Figura 8. Descargador de sobretensiones de ZnO.	17
Figura 9. Convenciones.	26
Figura 10. Simple, diagrama unifilar.	27
Figura 11. Simple, vista en planta.	28
Figura 12. Simple, bahía de transformador (1-1).	28
Figura 13. Simple, bahía de línea (2-2).	28
Figura 14. Simple con secc. de barras, diagrama unifilar.	32
Figura 15. Simple con secc. de barras, vista en planta.	32
Figura 16. Simple con secc. de barras, bahía de transformador (1-1).	33
Figura 17. Simple con secc. de barras, bahía de línea (2-2).	33
Figura 18. Seccionador de barras (3-3).	33
Figura 19. Simple con by-pass, diagrama unifilar.	36
Figura 20. Simple con by-pass, vista en planta.	37
Figura 21. Simple con by-pass, bahía de transformador (1-1).	37
Figura 22. Simple con by-pass, bahía de línea (2-2).	37
Figura 23. Simple con by-pass de línea, diagrama unifilar.	40
Figura 24. Simple con by-pass de línea, vista en planta.	41

Figura 25. Simple con by-pass de línea, bahía de transformador (1-1).	41
Figura 26. Simple con by-pass de línea, bahía de línea (2-2).	41
Figura 27. Simple con transferencia, diagrama unifilar.	45
Figura 28. Simple con transferencia, vista en planta.	45
Figura 29. Simple con transferencia, bahía de transformador (1-1).	46
Figura 30. Simple con transferencia, bahía de línea (2-2).	46
Figura 31. Simple con transferencia, bahía de transferencia (3-3).	46
Figura 32. Doble, diagrama unifilar.	50
Figura 33. Doble, vista en planta.	50
Figura 34. Doble, bahía de transformador (1-1).	51
Figura 35. Doble, bahía de línea (2-2).	51
Figura 36. Doble, bahía de acople (3-3).	51
Figura 37. Doble con by-pass, diagrama unifilar.	55
Figura 38. Doble con by-pass, vista en planta.	56
Figura 39. Doble con by-pass, bahía de transformador (1-1).	56
Figura 40. Doble con by-pass, bahía de línea (2-2).	56
Figura 41. Doble con by-pass, bahía de acople (3-3).	57
Figura 42. Doble con transferencia, diagrama unifilar.	60
Figura 43. Doble con transferencia, vista en planta.	61
Figura 44. Doble con transferencia, bahía de transformador (1-1).	61
Figura 45. Doble con transferencia, bahía de línea (2-2).	61
Figura 46. Doble con transferencia, bahía de transferencia (3-3).	62
Figura 47. Doble con transferencia, bahía de acople (4-4).	62
Figura 48. Anillo, diagrama unifilar.	65
Figura 49. Anillo, vista en planta.	66
Figura 50. Anillo, bahías de transformador y de línea (1-1).	66
Figura 51. Doble Interruptor, diagrama unifilar.	69
Figura 52. Doble Interruptor, vista en planta.	69
Figura 53. Doble Interruptor, bahía de transformador (1-1).	70
Figura 54. Doble Interruptor, bahía de línea (2-2).	70

Figura 55. Interruptor y Medio, diagrama unifilar.....	73
Figura 56. Interruptor y Medio, vista en planta.	74
Figura 57. Interruptor y Medio, bahías de transformador y de línea (1-1).	74
Figura 58. Malla de temas y subtemas.	79
Figura 59. Estructura general de SUBVIRT 1.0.	83
Figura 60. Formato base de SUBVIRT 1.0.	84
Figura 61. Formato presentación de la aplicación nodo N.0.	85
Figura 62. Formato pantalla inicial de la aplicación, nodo N.1.	85
Figura 63. Formato Introducción, nodo N.2.....	86
Figura 64. Formato Equipos de Patio, nodos N.2.1 al N. 2.6.	86
Figura 65. Formato Vista 360° Equipo, nodos N.2.2.1, N. 2.3.1 y N. 2.3.2.	87
Figura 66. Formato Barraje Simple, nodo N.3.....	87
Figura 67. Formato Esquemas, nodo N.3.1.	87
Figura 68. Ventana esquemas de la configuración barraje simple con by-pass. ..	88
Figura 69. Ventana esquemas CORTE 2-2 de la configuración barraje simple con by-pass.	89
Figura 70. Tablero de mando típico.	90
Figura 71. Diseño elementos de mando.	90
Figura 72. Diseño de monitor de estado de la subestación.	91
Figura 73. Pantalla inicial de las secuencias de operación.	92
Figura 74. Algoritmo para la desconexión de I3.	93
Figura 75. Selección interruptor I3.	95
Figura 76. Aprobación de la desconexión del interruptor I3.	96
Figura 77. Advertencia desconexión del seccionador S3.....	96
Figura 78. Finalización de la secuencia de desconexión del interruptor I3.	97
Figura 79. Construcción del aislador 3D usando el modificador <i>Lathe</i>	98
Figura 80. Forma y cantidad de aisladores según el equipo.....	98
Figura 81. Construcción de la celosía usando <i>L-Ext</i>	99
Figura 82. Construcción de los conductores usando <i>Hose</i>	100
Figura 83. Transformador 3D.....	101

Figura 84. Interruptor 3D.....	101
Figura 85. Seccionadores 3D.....	101
Figura 86. Transformador de Corriente 3D.	102
Figura 87. Transformador de Potencial y Trampa de Onda 3D.....	102
Figura 88. Descargador de Sobretensiones 3D.	102
Figura 89. Ajuste de cámara para crear animación de 360°.	103
Figura 90. Vistas del interruptor, resultado del <i>Render</i>	103
Figura 91. Subestación Barraje Doble en 3ds Max.	104
Figura 92. Creación del terreno y del entorno en Unity.....	105
Figura 93. Creación de un personaje en primera persona.	105
Figura 94. Creación de colisiones.	106
Figura 95. Subestación Barraje Doble en Unity, ubicación inicial del personaje.	107
Figura 96. Subestación Barraje Doble en Unity, detalle de las conexiones.	107
Figura 97. Subestación Barraje Doble en Unity, TP´s de barra.	108
Figura 98. Subestación Barraje Doble en Unity, transformador de potencia.....	108
Figura 99. Subestación Barraje Doble en Unity, llegada de las líneas.....	109
Figura 100. Subestación Barraje Doble en Unity, vista lateral.	109
Figura 101. Ventana principal del asistente de instalación.	110
Figura 102. Ubicación del directorio donde se instalará la herramienta.....	111
Figura 103. Acceso directo de la herramienta.....	111
Figura 104. Videoclip de introducción a la herramienta.	112
Figura 105. Ventana inicial de la aplicación.	112
Figura 106. Ventana Introducción.	114
Figura 107. Ventana Equipos de Patio.....	114
Figura 108. Ventana Vista 360º Equipo.	115
Figura 109. Ventana Configuraciones, subestación barraje simple.	115
Figura 110. Ventana Esquemas.....	116
Figura 111. Parámetros de la visita virtual.	117
Figura 112. Ventana Secuencias de Operación.....	118
Figura 113. Menú de ayuda de la Ventana Secuencias de Operación.	119

INTRODUCCIÓN

Unas de las principales y más arduas temáticas relacionadas con las subestaciones eléctricas, son las configuraciones, secuencias de operación y disposición física de los equipos de patio. El objetivo principal de este proyecto fue desarrollar un software o herramienta multimedia que permita conocer las configuraciones de las principales subestaciones eléctricas y sus secuencias de operación, además que presente la disposición física en 3D para subestaciones de 115 kV.

El software se desarrolló con un aspecto real del entorno y de los equipos, lo que permite que el aprendizaje sea más ameno e interesante para el usuario. El software fue implementado en el programa Adobe Flash CS4, el cual tiene licencia en la Universidad del Valle en la Facultad de Artes Integradas (Piso Informático).

En este documento se describe el proceso de construcción del software SUBVIRT. En el primer capítulo, se muestran los conceptos generales acerca de las subestaciones. En el segundo capítulo, se describen cada una de las once configuraciones que estarán disponibles en el software, donde se muestran los esquemas y los criterios para realizar las secuencias de operación implementadas en SUBVIRT. En el tercer capítulo, se describe el proceso de diseño e implementación del software.

CAPÍTULO UNO

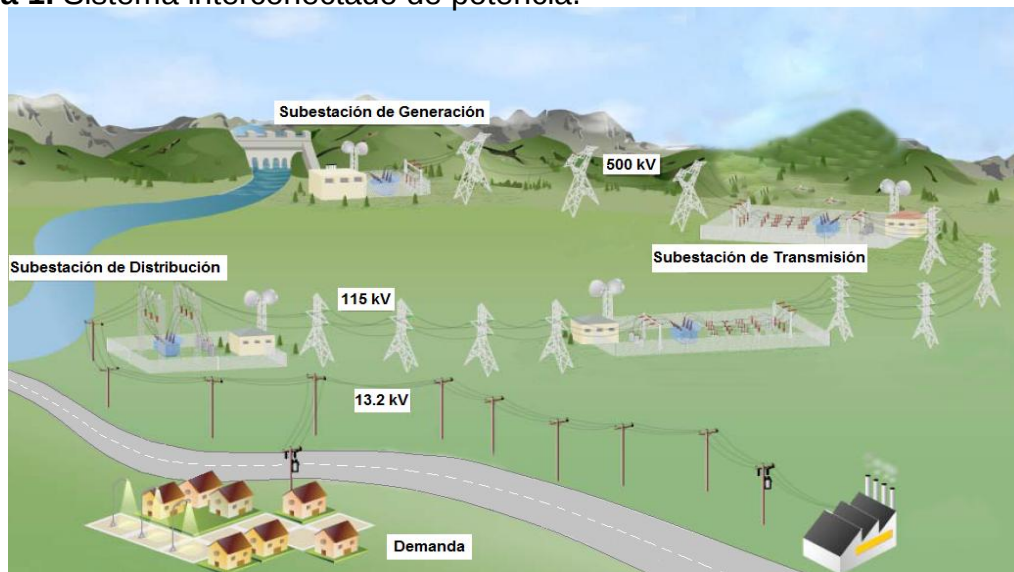
Conceptos generales sobre subestaciones eléctricas

1. CONCEPTOS GENERALES SOBRE SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

Una subestación eléctrica es un punto del sistema de potencia donde la energía de las fuentes de generación se agrupa, se distribuye y se envía a los centros de consumo, aquí son conectadas las líneas de transmisión y distribución a un punto en común o barraje por medio de interruptores y seccionadores. Adicionalmente la subestación cuenta con descargadores de sobretensión y transformadores de instrumentación en lo correspondiente a equipos de alta tensión, y con sistemas secundarios como son el de control, protección, comunicaciones y servicios auxiliares. Esto permite el control del flujo de potencia en la red, además de realizar operaciones con propósitos de mantenimiento logrando así transformar los niveles de tensión y de corriente, de tal manera que se garanticen determinados niveles de seguridad y calidad en la energía.

En un sistema de potencia, las subestaciones son conectadas unas con otras de tal forma que toda la red del sistema forma una malla, esto aumenta la confiabilidad en la red debido a que proporciona caminos alternos para el flujo de potencia enfrentando así cualquier contingencia a fin de evitar cortes en el suministro de energía. En la Figura 1, se puede observar un sistema interconectado de potencia.

Figura 1. Sistema interconectado de potencia.



Fuente: Compañía de Expertos en Mercados XM, La operación del sistema interconectado nacional, 2008.

1.1 CARACTERÍSTICAS DE UNA SUBESTACIÓN

Se denomina configuración a la forma como se disponen los equipos principales de una subestación eléctrica, de tal forma que su operación permita dar a la subestación diferentes grados de confiabilidad, seguridad, flexibilidad en el manejo de potencia¹. En el siguiente capítulo se estudiarán las principales configuraciones de las subestaciones.

1.1.1 Confiabilidad

Es la probabilidad que tiene una subestación para garantizar el suministro de energía a los puntos de consumo durante un tiempo determinado con niveles aceptables de calidad y seguridad, bajo la condición de que al menos un elemento de la subestación se encuentre fuera de servicio, ya sea por mantenimiento o por fallas.

¹ RAMÍREZ, Carlos. Subestaciones de alta y extra alta tensión Colombia: Segunda edición: HMV Ingenieros y Mejía Villegas S.A, 2003. p 26. Villegas S.A, 2003. p 26.

1.1.2 Seguridad

Capacidad de una subestación de responder al impacto de disturbios repentinos, es decir, continuar con el suministro energía sin interrupción alguna durante fallas de los equipos de potencia. La seguridad implica confiabilidad.

1.1.3 Flexibilidad

Es la capacidad de una subestación de adaptarse a diferentes condiciones que se puedan presentar especialmente por cambios operativos, por contingencias o por mantenimiento.

Las subestaciones se deben diseñar de tal manera que cuando sea necesario aumentar o cambiar los equipos se pueda realizar sin ningún problema, esto incluye a cada nivel de voltaje, desde los tableros y hacia arriba. Se debe proporcionar espacios para ampliaciones futuras, los transformadores deben ser dimensionados con suficiente capacidad para aumentos futuros.

1.2 CLASIFICACIÓN DE LAS SUBESTACIONES

Las subestaciones eléctricas se pueden clasificar de acuerdo a su forma constructiva, su tipo de función que desarrollan en el sistema y por su nivel de tensión.

1.2.1 Forma constructiva

Existen dos tipos básicos de diseños:

1.2.1.1 Subestaciones convencionales aisladas por aire (AIS)

Son subestaciones donde su principal medio aislante es el aire y, por lo tanto, se usan principalmente en exteriores. En el caso de subestaciones de alta y extra alta tensión, tienen el inconveniente de que se necesitan grandes espacios para su construcción, por lo que su aplicación en urbes densamente pobladas queda

restringida a la disponibilidad de terrenos. Este trabajo está enfocado en este tipo de subestaciones.

1.2.1.2 Subestaciones interiores o exteriores encapsuladas en gas SF6 (GIS)

Una subestación encapsulada utiliza un gas dieléctrico, el Hexafluoruro de azufre a presiones moderadas como medio aislante. Los conductores de alto voltaje, interruptores, seccionadores y transformadores de medida se encapsulan en este gas dentro de recintos metálicos o tuberías conectadas a tierra.

1.2.2 Por su operación en el sistema de potencia

Las subestaciones se pueden clasificar por su tipo de operación dentro del sistema de potencia en²:

1.2.2.1 Subestación de maniobra o de conmutación

Subestación que incluye aparatos de corte, conexión y usualmente barrajes, pero no incluye transformadores de potencia. Su función es conectar dos o más circuitos para realizar maniobras y de esta manera dar mayor continuidad y confiabilidad al sistema de potencia.

1.2.2.2 Subestación de transformación

Subestaciones que contienen transformadores de potencia, permitiendo de esta manera aumentar o reducir la tensión ya sea para su transporte o distribución.

² INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION (ICONTEC). NTC 2545, ELECTROTECNIA: Generación, Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica. SUBESTACIONES VOCABULARIO Bogotá D.C., 2003. p 1.

1.2.2.3 Subestación convertidora

Subestación que posee elementos rectificadores o inversores con el propósito de convertir corriente alterna en continua o viceversa, se usa principalmente en el transporte de alta tensión en DC (HVDC).

1.2.3 Por su nivel de tensión y función en el sistema de potencia

Los sistemas interconectados están constituidos por redes de diferentes niveles de tensión.

1.2.3.1 Subestación de generación

Es la que se encuentra en el primer eslabón de la cadena productora de energía, son encargadas de elevar la tensión, disponible en los bornes de las máquinas generadoras con el fin de transportar potencia a grandes distancias con las menores pérdidas posibles.

1.2.3.2 Subestación de transmisión

Son las encargadas de interconectar líneas de transmisión con el fin de dar mayor confiabilidad y continuidad en el servicio, en Colombia comprenden niveles de tensión entre 110 y 500 kV.

1.2.3.3 Subestaciones de distribución

Se encargan de transformar los niveles de tensión de transmisión a través de transformadores de potencia a niveles de distribución primaria. De esta manera la potencia es llevada a los centros de consumo donde posteriormente es reducida por medio de transformadores de distribución.

1.3 EQUIPOS DE PATIO DE UNA SUBESTACIÓN

La disposición física de una subestación está determinada por la posición y conexión entre cada uno de los equipos primarios de una subestación. Para esto es necesario conocer de manera general las características más importantes de los principales equipos de patio.

1.3.1 Transformador de potencia

Se encarga de transformar un nivel de tensión del sistema en otro y debe ser capaz de transportar el flujo de potencia de manera continua hacia una parte del sistema o hacia las cargas. En la Figura 2, se observa un transformador de potencia trifásico de 15 MVA 110/34.5 kV de la subestación La Cabaña (Puerto Tejada - Cauca). En el software SUBVIRT se utilizó un transformador trifásico de dos devanados con potencias de 63/100 MVA y con refrigeración ONAN/ONAF.

Figura 2. Transformador de potencia trifásico.



1.3.1.1 Capacidad nominal

La capacidad nominal de los transformadores son los kilovoltampers (kVA) continuos que el devanado secundario del mismo debe proporcionar a su tensión y corriente nominal. La Norma Técnica Colombiana (NTC 1057) establece las potencias nominales de transformadores de potencia³.

1.3.1.2 Devanados

Por lo general el material de los devanados de potencia es de cobre de sección normalmente rectangular. Existen dos tipos de devanados, su utilización depende de la potencia y la tensión del transformador. Los devanados en disco son preferiblemente usados para altas tensiones, Consisten en discos de arrollamiento continuo con ductos axiales y radiales para ayudar a la refrigeración por aceite.

1.3.1.3 Cambiador de derivaciones

Con el fin de adaptar las relaciones de tensión a las condiciones del sistema, el transformador es previsto generalmente de un devanado especial con derivaciones. Existen dos tipos de cambiadores: los operables bajo carga que por lo general están provistos de accionamientos motorizados y pueden ser operados localmente o por control remoto estando el transformador energizado, también están los operables sin carga que usualmente son operados manualmente cuando se ha desenergizado el transformador por completo.

1.3.1.4 Sistema de refrigeración⁴

La eficiencia de la refrigeración es un factor fundamental, determinando la seguridad operacional y el periodo de vida del transformador.

³ INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION (ICONTEC). NTC 317, ELECTROTECNIA: Transformadores de Potencia y Distribución. TERMINOLOGIA Bogotá D.C., Tercera actualización. p 6.

⁴ SIEMENS, Power Engineering Guide. Erlangen, Germany., Quinta Edición, 2008. p 196.

El tipo más utilizado con mayor frecuencia en unidades pequeñas es la refrigeración natural ONAN, en la cual el calor es absorbido por el aceite del transformador y disipado en el aire que circula alrededor del radiador. También existe el tipo ONAF, en la cual los radiadores son adicionalmente refrigerados por intermedio de ventiladores. El sistema de refrigeración puede también constituirse de bancos de radiadores (FOA) separados o con intercambiador por agua. La refrigeración puede ser aumentada por flujo direccionado de aceite (ODAF).

1.3.2 Transformadores de potencial

Los transformadores de potencial son usados para reducir niveles de tensión muy altos a niveles seguros de trabajo. Son usados principalmente en sistemas con tensiones superiores a 600V. Estos equipos tienen las siguientes finalidades:

- Aislar el circuito de baja tensión (secundario) del circuito de alta tensión (primario).
- Procurar que los efectos transitorios y de régimen permanente producidos en el circuito de alta tensión, sean reproducidos lo más fielmente posible en el circuito de baja tensión.

En la Figura 3, se observan unos transformadores de potencial de la subestación La Cabaña 115 kV (Puerto Tejada - Cauca). Para el software SUBVIRT se utilizó un transformador de potencial de 115 kV.

1.3.3 Transformadores de corriente

Son usados para transformar altos niveles de corriente a valores reducidos para alimentar equipos de medición y protección, generalmente el valor de corriente para alimentar estos equipos son 5 A. Tienen un devanado primario, que consta de pocas espiras, conectado en serie con el circuito de alta tensión al cual se le desea medir la corriente y el secundario se conecta en serie con las bobinas de corriente de los aparatos de medición y protección que requieran ser energizados.

En la Figura 4, se observa un transformador de corriente de la subestación Calima 115 kV (Darién - Valle del Cauca).

En el software SUBVIRT se utilizó un transformador de corriente con tensión nominal de 123 kV y con corriente nominal de 1 kA.

Figura 3. Transformadores de potencial.



Figura 4. Transformador de corriente.



1.3.4 Interruptores de potencia

Los interruptores automáticos son dispositivos mecánicos de interrupción capaces de conducir, interrumpir y establecer corrientes en condiciones normales, así como conducir durante un tiempo especificado e interrumpir corrientes en condiciones anormales, como son las producidas durante un cortocircuito. Su función básica es conectar o desconectar de un sistema o circuito energizado líneas de transmisión, transformadores, reactores o barrajes⁵. Existen interruptores de tanque vivo y de tanque muerto. Los interruptores de tanque vivo tienen su mecanismo de interrupción de arco en tanques de diámetro pequeño llamado polos, ubicados sobre soportes aislantes; los polos se encuentran conectados directamente al circuito de alta tensión, por lo anterior están a un potencial superior al de tierra (compartimiento sin aterrizar). Los interruptores de tanque muerto poseen su medio de extinción dentro de un tanque a potencial de tierra (compartimiento aterrizado) y a través de cuya tapa pasan aisladores de porcelana para conectarse al circuito de alta tensión⁶. Los interruptores generalmente son clasificados de acuerdo al medio de extinción del arco.

1.3.4.1 Aire comprimido

Los interruptores de aire comprimido, ya no se fabrican, fueron usados para tensiones superiores a 345 kV. Sus desventajas radican en el alto costo y frecuente mantenimiento debido a gran número de válvulas y equipos de compresión, además del fuerte ruido en su operación debido a las altas presiones al que es almacenado el aire.

⁵ MCDONALD, John D. Electric Power Substations Engineering. Second Edition: USA, CRC Press, 2007. p 73.

⁶ RAMÍREZ, Carlos. Subestaciones de alta y extra alta tensión Colombia: Segunda edición: HMV Ingenieros y Mejía Villegas S.A, 2003. p 240.

1.3.4.2 Aceite

Al presentarse el arco eléctrico, el aceite en contacto se vaporiza rápidamente produciendo una burbuja de gas, compuesta principalmente de hidrógeno, el cual es un excelente medio de extinción y refrigerante, debido a su baja constante de tiempo de des-ionización, además esta gasificación crea una turbulencia en el aceite que contribuye a la des-ionización del medio. Existen de dos tipos: Interruptores de gran volumen de aceite y los de pequeño volumen de aceite.

1.3.4.3 Hexafluoruro de azufre SF6

Las propiedades químicas de este gas lo hacen un medio excelente de aislamiento y enfriamiento del arco eléctrico. Estos interruptores han tenido una gran acogida, al punto de hacer obsoletas las tecnologías anteriormente mencionadas. Se fabrican de tanque vivo o de tanque muerto, pero sus dimensiones son más reducidas en comparación con los interruptores de aceite. Para el software SUBVIRT, se escogió un interruptor de 123 kV en SF6 de tanque vivo. En la Figura 5, se observa un interruptor de 245 kV en SF6.

Figura 5. Interruptor en SF6 de tanque vivo.



Fuente: ABB. Live Tank Circuit Breakers, Buyer's Guide. 5ª ed. 2009, p 46.

1.3.5 Seccionadores

Es un dispositivo mecánico que conduce corriente eléctrica y proporciona un punto de apertura en un circuito para aislar uno de los siguientes equipos: Interruptores de potencia, transformadores de potencia, banco de capacitores, reactores y otros equipos de subestaciones⁷.

Los seccionadores se utilizan normalmente para proporcionar un punto de aislamiento visual para el mantenimiento de los equipos de la subestación. Los seccionadores abiertos que aíslan componentes en mantenimiento deben tener una resistencia entre terminales a los esfuerzos dieléctricos en tal forma que el personal de campo pueda ejecutar el servicio de mantenimiento en condiciones adecuadas de seguridad.

1.3.5.1 Tipos constructivos⁸

Existen diversos tipos constructivos, algunos de los factores que influyen en la escogencia del tipo de seccionador a usar son: el nivel de tensión, el esquema de maniobra de la subestación, la limitación de espacio, función del seccionador, entre otros.

- **Seccionadores de apertura central.** Pueden ser monopolares o tripolares, Son los más económicos pero determinan un mayor espacio, debido a que en posición abierta las cuchillas quedan energizadas, además en esta posición sus cuchillas quedan sometidas a esfuerzos, requieren mantenimiento periódico y no se recomiendan para tensiones superiores a 245 kV.
- **Seccionadores de rotación central.** Son más costosos que los anteriores, requieren de menos espacio en su instalación y sus cuchillas en posición abierta quedan desenergizadas.

⁷ MCDONALD, John D. Electric Power Substations Engineering. Second Edition: USA, CRC Press, 2007. p 51.

⁸ RAMÍREZ, Carlos. Subestaciones de alta y extra alta tensión Colombia: Segunda edición: HMV Ingenieros y Mejía Villegas S.A, 2003. p 257

- **Seccionadores de apertura vertical.** Son utilizados para tensiones entre 300 y 800 kV, pero implican alturas de campo mayores que con otros seccionadores.
- **Seccionadores tipo pantógrafo.** Ejecutan su conexión de manera horizontal o vertical dependiendo su tipo, se recomiendan para tensiones superiores a 245 kV, Son los que determinan una menor área de subestación, son los más costosos y requieren frecuente mantenimiento debido a sus articulaciones mecánicas.

Para el software SUBVIRT, se escogieron seccionadores de apertura central y tipo pantógrafo. En la Figura 6, se observa un seccionador de apertura central de la subestación Pance 115 kV (Cali - Valle del Cauca). En la Figura 7, se observa un seccionador tipo pantógrafo.

Figura 6. Seccionador de apertura central.



Figura 7. Seccionador tipo pantógrafo.



Fuente: SIEMENS, Disconnectors and Earthing Switches 36 kV up to 800 kV.

1.3.6 Descargadores de sobretensiones

Son dispositivos diseñados para limitar tensiones de línea a tierra en eventos como descargas atmosféricas o en condiciones de voltajes transitorios elevados, que en otros casos se descargarían sobre aisladores o perforarían el aislamiento ocasionando interrupciones en el servicio eléctrico. Para su correcto funcionamiento, los descargadores de sobretensiones se hallan conectados permanentemente entre línea y tierra, y se deben escoger de manera tal que actúen antes de que el valor de la sobretensión alcance el valor del aislamiento de los equipos a proteger, pero nunca para valores de tensiones normales. Inicialmente se fabricaban con cuernos de arqueo y resistencias no lineales de carburo de silicio (SiC), pero en los últimos años han sido desplazados por descargadores de sobretensión de resistencias no lineales de óxido de Zinc (ZnO) sin cuernos de arqueo.

Para el software SUBVIRT, se escogió un descargador de sobretensiones de 123 kV de ZnO. En la Figura 8, se observa un descargador de 145 kV de ZnO.

Figura 8. Descargador de sobretensiones de ZnO.



Fuente: ABB. High Voltage Surge Arresters, Buyer's Guide. 2012, p 83

1.4 DISTANCIAS DE SEGURIDAD

Es necesario dejar distancias adecuadas entre los diferentes elementos que constituyen una subestación, con el fin de reducir accidentes y evitar daños en los equipos.

1.4.1 Valor básico

El valor básico debe garantizar el espaciamiento adecuado para prevenir cualquier riesgo de flameo aun bajo las condiciones más desfavorables.

1.4.2 Determinación zonas de seguridad

Es necesario incrementar el valor básico en un valor que depende de la altura del personal de mantenimiento y de la naturaleza del trabajo sobre el equipo, incluyendo los requerimientos de movimiento y acceso. Por lo anterior, el Anexo General del Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas, RETIE⁹, exige cumplir las distancias y lineamientos aquí expresados.

⁹ MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Anexo General Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE. 2008. p 125.

1.4.3 Distancias para el dimensionamiento de subestaciones¹⁰

El dimensionamiento de una subestación está condicionado básicamente por lo siguiente.

- Ancho de barras
- Ancho de campo
- Altura de campo
- Longitud de campo

Estos aspectos resultan de la aplicación directa de las distancias mínimas y distancias de seguridad, descritas anteriormente. En esta sección se pretende ilustrar algunas pautas generales para facilitar la determinación de dimensiones de una subestación.

1.4.3.1 Ancho de barras

Las barras de una subestación pueden ser de tipo rígido (tubos conductores) o de tipo flexibles (cables conductores). En el primer caso se usan las distancias mínimas fase-fase en el aire entre conductores, tomando un factor de seguridad de entre el 5% y 10%. En las fases exteriores se debe conservar una distancia mínima fase-tierra a cualquier elemento alrededor de ésta. Si existe otro barraje adyacente entre las fases más cercanas se debe conservar una distancia fase-fase más un 25% ya que los barrajes pueden estar sometidos a sobre tensiones diferentes.

¹⁰ RAMÍREZ, Carlos. Subestaciones de alta y extra alta tensión Colombia: Segunda edición: HMV Ingenieros y Mejía Villegas S.A, 2003. p 106.

1.4.3.2 Ancho de campo

El ancho de campo se refiere a la distancia entre los ejes de los pórticos de entrada de las líneas. El ancho de campo de una subestación está determinado por la configuración y las dimensiones de los barrajes y equipos utilizados.

1.4.3.3 Altura de campo

Ésta determinada por el tipo de conductores usados así como también por el número de niveles de conexión que requiera la configuración de la subestación.

El primer nivel de conexión corresponde al conformado por la conexión entre equipos cuya altura se encuentra determinada por las distancias de seguridad descritas anteriormente.

El segundo nivel de conexión está conformado por los barrajes, cuya altura debe estar por encima del primer nivel en una distancia por lo menos igual a la distancia mínima fase-fase, cable-cable.

El tercer nivel de conexión corresponde a las templas superiores, cuya altura debe ser superior a los barrajes en como mínimo, la distancia fase-fase, cable-cable, aumentada en la flecha máxima de la templa.

A las distancias mínimas que determinaron la altura del campo es conveniente aplicarles un factor de seguridad de por lo menos 10%. Cuando las templas superiores y barrajes tienen entre sí tensiones de circuitos distintos durante ciertas operaciones de la subestación, se recomienda incrementar un factor de 25%.

1.4.3.4 Longitud de campo

La longitud de la configuración está determinada por la configuración de la subestación y por la distancia entre los diferentes equipos.

En la Tabla 1 se muestran los intervalos típicos de separación entre equipos para diferentes niveles de tensión.

Tabla 1. Distancia típica entre equipos de patio.

Equipos	Distancia típica [m]				
	72.5 kV	123 kV	245 kV	550 kV	800 kV
Transformador de instrumentación y seccionador	2.0	3.0	4.0	6.0	7.5
Interruptor y seccionador	2.0	3.0	4.5 - 5.5	7.0 - 8.0	9.0 - 10.0
Interruptor y seccionador con vía de circulación	5.5	7.5	8.0 - 9.5	12.0 - 14.0	14.0 - 16.0
Interruptor y transformador de instrumentación	1.5	2.0	3.5 - 4.5	6.5	8.5
Interruptor y transformador de instrumentación con vía de circulación	5.0	6.5	6.5	10.0 - 12.0	12.0 - 14.0
Seccionador y seccionador	3.0	3.5	6.0	7.0 - 8.0	9.0 - 10.0
Seccionador pantógrafo y seccionador pantógrafo	-	3.0	4.5	6.5	8.0
Seccionador pantógrafo y transformador de instrumentación	-	2.5	3.5	5.5	7.0
Interruptor y seccionador pantógrafo	-	3.0	5.0	10.0	13.0
Interruptor y seccionador pantógrafo con vía de circulación	-	7.0	7.5 - 9.0	11.0 - 13.0	13.0 - 15.0
Seccionador y seccionador pantógrafo	-	3.5	4.5	7.0	9.0
Entre transformadores de instrumentación	1.5	2.0	3.0	4.0 - 5.0	6.0
Descargador de sobretensiones y transformador de instrumentación	1.5	2.0	3.0	5.0	6.0
Entre cualquier equipo y el cerco perimetral [IEEE Std 1119]	3.7	4.0	4.9	6.4	7

Fuente: Carlos Felipe Ramírez. Subestaciones de Alta y Extra Alta Tensión. 2 ed. Colombia, 2003.

CAPÍTULO DOS

Principales configuraciones de las subestaciones eléctricas

2. PRINCIPALES CONFIGURACIONES DE LAS SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

El funcionamiento normal de una subestación, repentinamente puede verse afectado debido a fallas que puedan ocurrir en el sistema, o porque se necesita hacer mantenimiento en algún elemento de la subestación. Sacar de servicio una línea, un barraje, un interruptor, un transformador o algún otro elemento puede ser obligatorio para llevar a cabo el mantenimiento. Para esto, es necesario seguir una serie de pasos de modo que el servicio de la subestación sea interrumpido lo menos posible.

Secuencia de operación se le denomina a los pasos que se siguen para conectar o desconectar cualquier elemento de la subestación. Estos pasos deben realizarse, además de que la interrupción sea mínima, teniendo en cuenta una serie de recomendaciones que permitan mejorar la seguridad de los operarios y disminuir el daño en los equipos, las cuales serán la base del software SUBVIRT.

Para realizar correctamente una secuencia de operación en el software, se deben seguir cinco reglas básicas. Estas son:

- ✓ Para la **Desconexión**, se debe garantizar la confiabilidad de la subestación, cuando su configuración así lo permita.
- ✓ Para la **Conexión**, se debe reconectar la subestación a su estado original.
- ✓ **Las conexiones y desconexiones se deben realizar por bahías.** Por ejemplo: después de desconectar un interruptor de alguna bahía, se deben abrir los seccionadores asociados a ésta, antes de desconectar un interruptor de otra bahía.

- ✓ **Seccionadores no deben abrir ni cerrar bajo carga.** Por ejemplo: para conectar un interruptor, se deben cerrar primero los seccionadores de su misma bahía.
- ✓ **Transformadores deben desconectarse por BT y AT.** Por ejemplo: desconectar la bahía del lado de alta tensión (AT) del transformador, implica desconectar inmediatamente después la bahía del lado de baja tensión (BT), o viceversa.

Se entiende por **bahía**, al conjunto de equipos de una subestación para la maniobra, protección y medida de un circuito que se conecta a ella¹¹. A continuación se detalla un poco acerca de las bahías que se mencionarán más adelante para las secuencias de operación y la disposición física:

- **Bahía de transformador:** corresponde a los equipos que conectan el transformador con el barraje o algún circuito de la subestación. Este a su vez, puede dividirse en dos bahías: AT y BT correspondientes a los niveles de baja y alta tensión que están conectados igualmente con el barraje o algún circuito de la subestación.
- **Bahía de línea:** corresponde a los equipos que conectan la línea o circuito con la subestación.
- **Bahía de transferencia:** corresponde a los equipos que conectan dos o más barrajes de la subestación.
- **Bahía de acople:** corresponde a los equipos que conectan dos barrajes de la subestación.

¹¹ RAMÍREZ, Carlos. Subestaciones de alta y extra alta tensión Colombia: Segunda edición: HMV Ingenieros y Mejía Villegas S.A, 2003. p 1.

En el software SUBVIRT, se puede realizar mantenimiento en un barraje y en interruptores de bahía de línea y de transformador, para cada configuración.

Los diagramas y las secuencias de operación que se presentan en este capítulo, corresponden a las empleadas en el software. La disposición física corresponde, en cuanto a distancias de seguridad y dimensionamiento de los equipos, a subestaciones exteriores típicas de 115 kV.

Hay varios factores que afectan la confiabilidad de una subestación, entre los que se encuentran el arreglo de las barras y los dispositivos de conmutación (interruptores y seccionadores). Además de la confiabilidad, estos factores causan impacto sobre el mantenimiento, la protección, y el costo de la subestación.

Hay seis tipos configuraciones usadas comúnmente en subestaciones exteriores¹²:

- Barraje simple
- Doble interruptor
- Barraje simple con transferencia
- Barraje doble
- Barraje en anillo
- Interruptor y medio

Sin embargo, para aumentar la confiabilidad se realizan algunas modificaciones sobre éstas, agregando seccionadores o barras, conformando así otras configuraciones. Entre estas se encuentran: barraje simple con seccionador de barras, barraje simple con by-pass, barraje simple con by-pass de línea, barraje doble con by-pass y barraje doble con transferencia.

¹² BIO, Michael J. Air-Insulated Substations — Bus/Switching Configurations. En: MCDONALD, John D. Electric Power Substations Engineering. Second Edition: USA, CRC Press, 2007.

Las configuraciones se clasifican en¹³:

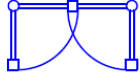
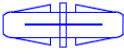
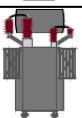
- **Conexión de barras (Tendencia Europea):** son aquellas en las cuales cada circuito tiene un interruptor, con la posibilidad de conectarse a una o más barras por medio de seccionadores. Dentro de estas se encuentran las de barraje simple y barraje doble, incluyendo todas sus variaciones (Secciones 2.1 – 2.8 de este capítulo).
- **Conexión de interruptores (Tendencia Americana):** son aquellas en las cuales los circuitos se conectan a las barras o entre ellas por medio de interruptores. Dentro de estas se encuentran barraje en anillo, doble interruptor e interruptor y medio (Secciones 2.9 – 2.11 de este capítulo).

Las convenciones usadas en este capítulo, pueden observarse en la Figura 9.

Para una mejor comprensión de los esquemas de disposición física, mostrados en este capítulo, las vistas en corte corresponderán a los elementos de primer plano solamente.

¹³ RAMÍREZ, Carlos. Subestaciones de alta y extra alta tensión Colombia: Segunda edición: HMV Ingenieros y Mejía Villegas S.A, 2003. p 33.

Figura 9. Convenciones.

Elemento	Unifilar	Planta	Corte
Barraje			
Conductor			
Celosia			
Interruptor			
Seccionador		Apertura central  Pantógrafo 	 
Descargador de sobretensiones			
Transformador de potencial			
Trampa de onda			
Transformador de corriente			
Transformador de potencia			
Aislador de suspension			
Circuito			

2.1 BARRAJE SIMPLE

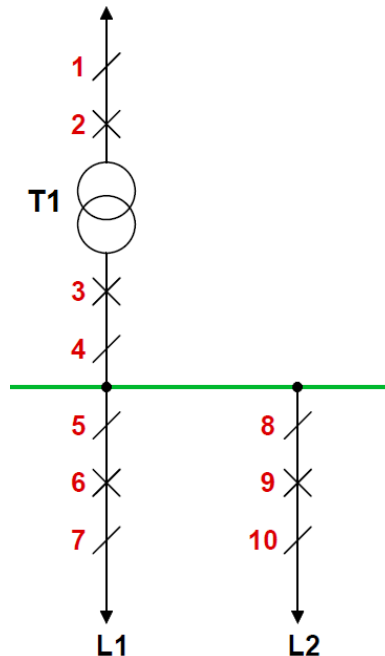
Es la configuración más sencilla y económica, debido a que sólo requiere de un interruptor y dos seccionadores por cada circuito. Tiene muy baja confiabilidad: cuando ocurre una falla en la barra, saca de servicio toda la subestación. Su flexibilidad también es baja: la transferencia de carga de un circuito a otro requiere de dispositivos adicionales de conmutación fuera de la subestación. Debido a esto, la aplicación de esta configuración se ve limitada a instalaciones con bajos niveles de carga y bajos requerimientos de disponibilidad.

Al realizar mantenimiento en:

- **Interruptores:** se ocasiona la suspensión del servicio del circuito correspondiente.
- **Barraje:** se ocasiona la suspensión del servicio de toda la subestación.

En la Figura 10, se observa el diagrama unifilar de la subestación empleada en el software SUBVIRT.

Figura 10. Simple, diagrama unifilar.



2.1.1 Disposición física

En las Figuras 11, 12 y 13 se observan las vistas en planta y en corte de la subestación barraje simple.

Figura 11. Simple, vista en planta.

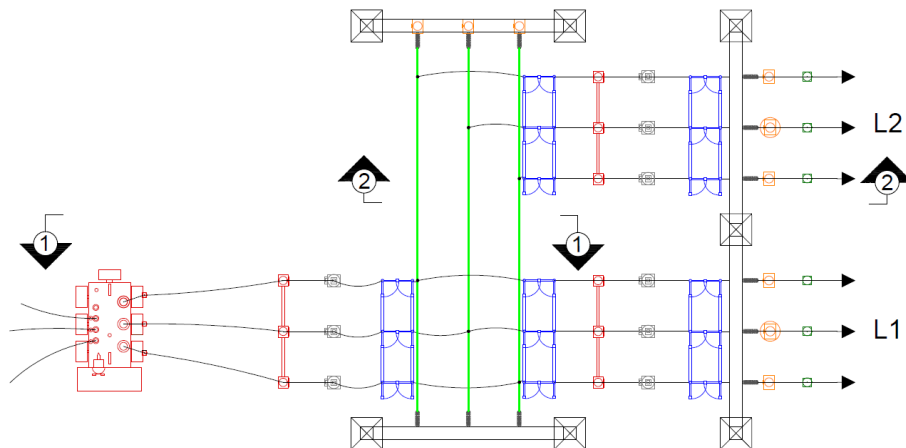


Figura 12. Simple, bahía de transformador (1-1).

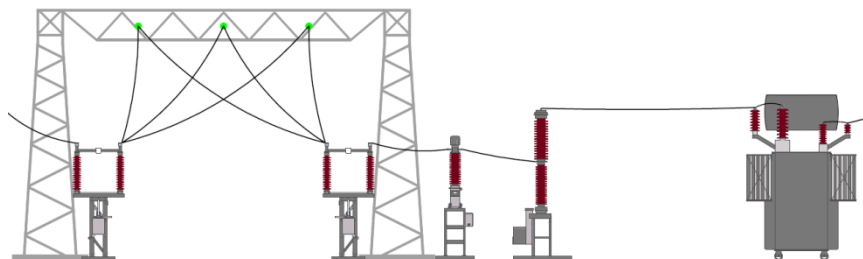
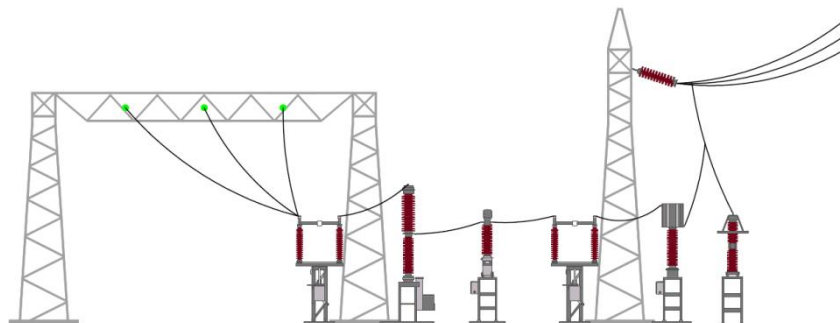


Figura 13. Simple, bahía de línea (2-2).



2.1.2 Secuencias de operación

Con respecto al diagrama unifilar de la Figura 10, a continuación se registra el estado original de la subestación (Ver Tabla 2) y las secuencias de operación para conexión y desconexión de las bahías. Los pasos donde hay más de un elemento significa que es indiferente el orden en que se ejecuten las operaciones.

En la Tabla 3, se registran las secuencias para desconexión y conexión de las bahías L1 y L2. Por ejemplo, para la desconexión del circuito L1 se deben realizar dos pasos: abrir primero el interruptor (elemento 6), y luego abrir los seccionadores (elementos 5 y 7), sin importar el orden de estos últimos.

En la Tabla 4, se registran las secuencias para desconexión y conexión de la bahía de transformador (T1). Por ejemplo, para desconectar T1, se puede abrir primero la bahía de baja tensión (BT) y luego la bahía de alta tensión (AT), o viceversa. Para la apertura de cada bahía, se debe abrir primero el interruptor y luego el seccionador de la misma.

Tabla 2. Simple, estado original de la subestación.

Bahía	Estado	
	Abierto	Cerrado
T1		✓
L1, L2		✓

Tabla 3. Simple, secuencias para bahías L1 y L2.

L1			L2		
Desconexión					
Elemento	Paso 1	Paso 2	Elemento	Paso 1	Paso 2
5,7		Abrir	8,10		Abrir
6	Abrir		9	Abrir	
Conexión					
5,7	Cerrar		8,10	Cerrar	
6		Cerrar	9		Cerrar

Tabla 4. Simple, secuencias para bahía T1.

T1					
Desconexión					
BT			AT		
Elemento	Paso 1	Paso 2	Elemento	Paso 1	Paso 2
1		Abrir	3	Abrir	
2	Abrir		4		Abrir
Conexión					
1	Cerrar		3		Cerrar
2		Cerrar	4	Cerrar	
Nota: El orden en las secuencias de conexión o desconexión de las bahías AT y BT, es indiferente.					

Los elementos disponibles para realizar mantenimiento son:

- Elemento 3
- Elemento 6
- Barraje

Las secuencias de operación para el mantenimiento de dichos elementos están registradas en las Tablas 5 y 6. Con respecto a la Tabla 6, existen 4 secuencias posibles para desconectar o conectar el barraje. A su vez, la secuencia 1 de desconexión tiene 2 maneras de realizarse: abriendo primero la bahía de T1 y luego abriendo la de L1 o la de L2.

Tabla 5. Simple, secuencias para elementos 3 y 6.

Elemento 3		Elemento 6	
Desconexión			
Bahía	Paso 1	Bahía	Paso 1
T1	Abrir	L1	Abrir
Conexión			
T1	Cerrar	L1	Cerrar

Tabla 6. Simple, secuencias para el barraje.

Barraje										
Desconexión										
Bahía	Secuencia 1		Secuencia 2		Secuencia 3			Secuencia 4		
	Paso 1	Pasos 2-3	Pasos 1-2	Paso 3	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 1	Paso 2	Paso 3
T1	Abrir			Abrir		Abrir			Abrir	
L1		Abrir	Abrir		Abrir					Abrir
L2		Abrir	Abrir				Abrir	Abrir		
Conexión										
T1	Cerrar			Cerrar		Cerrar			Cerrar	
L1		Cerrar	Cerrar		Cerrar					Cerrar
L2		Cerrar	Cerrar				Cerrar	Cerrar		
Nota: Hay 4 secuencias posibles para desconexión y conexión del barraje.										

2.2 BARRAJE SIMPLE CON SECCIONADOR DE BARRAS

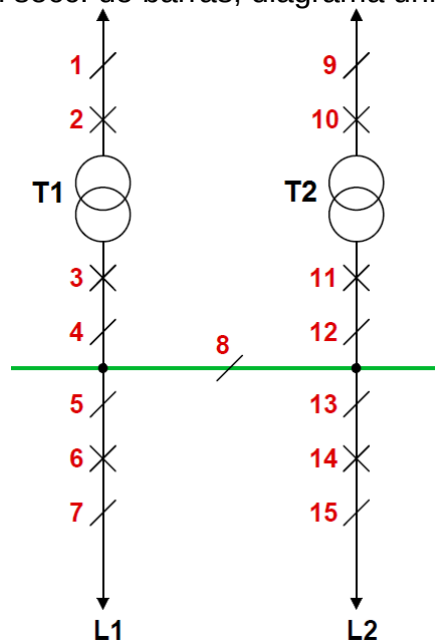
Presenta el mismo esquema de barraje simple, con una modificación: la división del barraje por medio de un seccionador. Presenta mayor confiabilidad que la anterior, en cuanto a fallas en la barra: al ocurrir una falla en ésta, sólo salen de servicio los circuitos que están conectados a la sección de barraje en falla.

Al realizar mantenimiento en:

- **Interruptores:** se ocasiona la suspensión del servicio del circuito correspondiente.
- **Una sección del Barraje:** se suspende el servicio de los circuitos conectados a ella.

En la Figura 14, se observa el diagrama unifilar de la subestación empleada en el software SUBVIRT.

Figura 14. Simple con secc. de barras, diagrama unifilar.



2.2.1 Disposición física

En las Figuras 15, 16 y 17 se observan las vistas en planta y en corte de la subestación barraje simple con seccionador de barras. En la Figura 18 se observa el seccionador de barras.

Figura 15. Simple con secc. de barras, vista en planta.

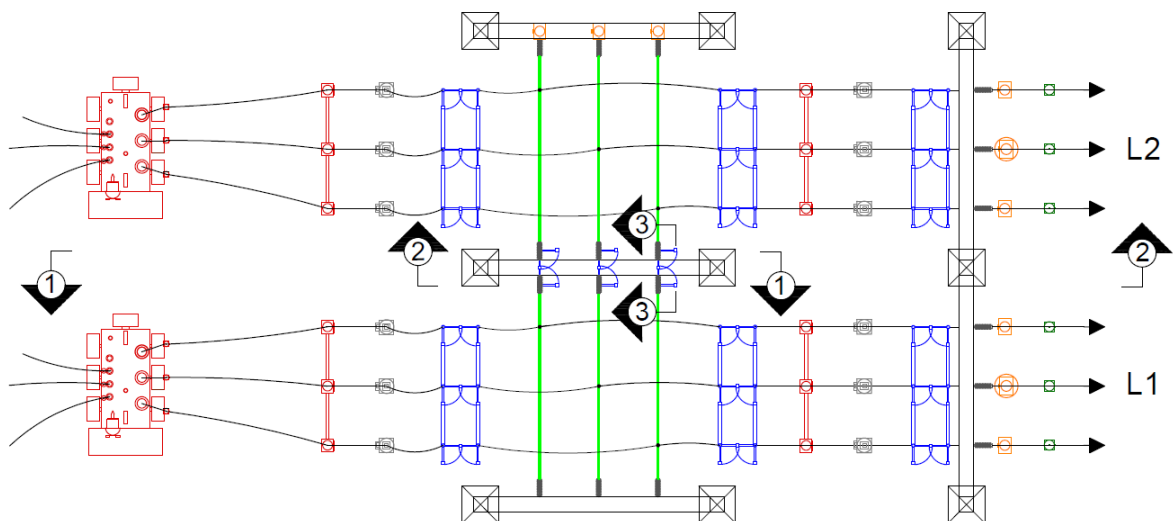


Figura 16. Simple con secc. de barras, bahía de transformador (1-1).

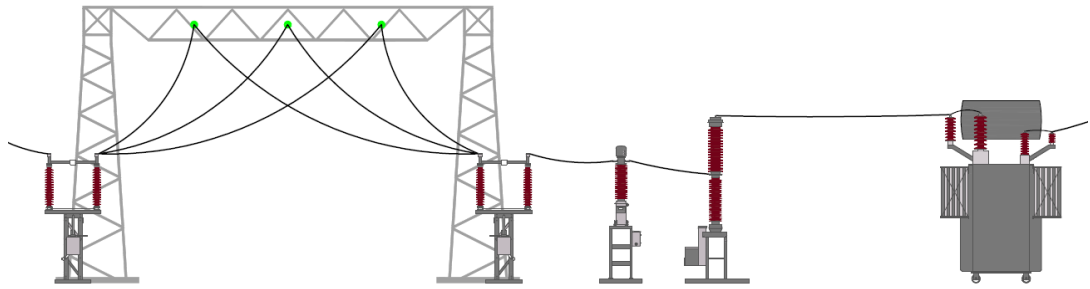


Figura 17. Simple con secc. de barras, bahía de línea (2-2).

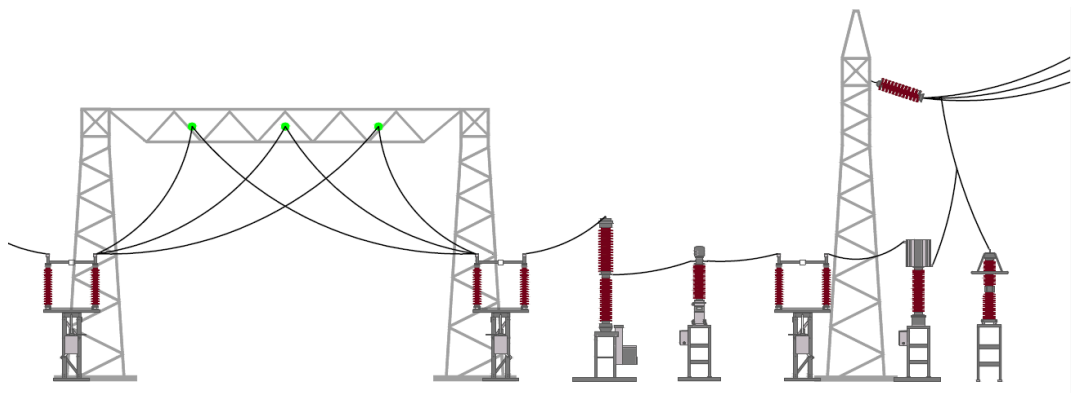
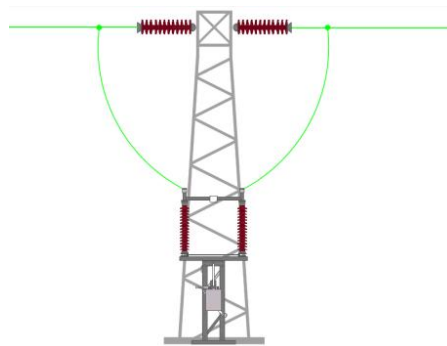


Figura 18. Seccionador de barras (3-3).



2.2.2 Secuencias de operación

A continuación se registra el estado original de la subestación y las secuencias de operación para conexión y desconexión de las bahías.

Tabla 7. Simple con secc. de barras, estado original de la subestación.

Bahía / Elemento	Estado	
	Abierto	Cerrado
T1 ,T2		✓
L1, L2		✓
8		✓

Tabla 8. Simple con secc. de barras, secuencias para L1 y L2.

L1			L2		
Desconexión					
Elemento	Paso 1	Paso 2	Elemento	Paso 1	Paso 2
5,7		Abrir	13,15		Abrir
6	Abrir		14	Abrir	
Conexión					
5,7	Cerrar		13,15	Cerrar	
6		Cerrar	14		Cerrar

Tabla 9. Simple con secc. de barras, secuencias para T1.

T1					
Desconexión					
BT			AT		
Elemento	Paso 1	Paso 2	Elemento	Paso 1	Paso 2
1		Abrir	3	Abrir	
2	Abrir		4		Abrir
Conexión					
1	Cerrar		3		Cerrar
2		Cerrar	4	Cerrar	
Nota: El orden en las secuencias de conexión o desconexión de las bahías AT y BT, es indiferente.					

Los elementos disponibles para realizar mantenimiento son:

- Elemento 3
- Elemento 6
- ½ Barraje (lado izquierdo)

Las secuencias de operación para el mantenimiento de dichos elementos están registradas en las Tablas 10 y 11.

Tabla 10. Simple con secc. de barras, secuencias para elementos 3 y 6.

Elemento 3		Elemento 6	
Desconexión			
Bahía	Paso 1	Bahía	Paso 1
T1	Abrir	L1	Abrir
Conexión			
T1	Cerrar	L1	Cerrar

Tabla 11. Simple con secc. de barras, secuencias para el barraje.

1/2 Barraje (lado izquierdo)												
Desconexión												
Bahía / Elemento	Secuencia 1			Secuencia 2			Secuencia 3			Secuencia 4		
	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 1	Paso 2	Paso 3
T1	Abrir				Abrir			Abrir				Abrir
L1		Abrir		Abrir					Abrir		Abrir	
8			Abrir			Abrir	Abrir			Abrir		
Conexión												
T1	Cerrar				Cerrar			Cerrar				Cerrar
L1		Cerrar		Cerrar					Cerrar		Cerrar	
8			Cerrar			Cerrar	Cerrar			Cerrar		
Nota: -Hay 4 secuencias posibles para desconexión y conexión del 1/2 barraje.												

2.3 BARRAJE SIMPLE CON BY-PASS

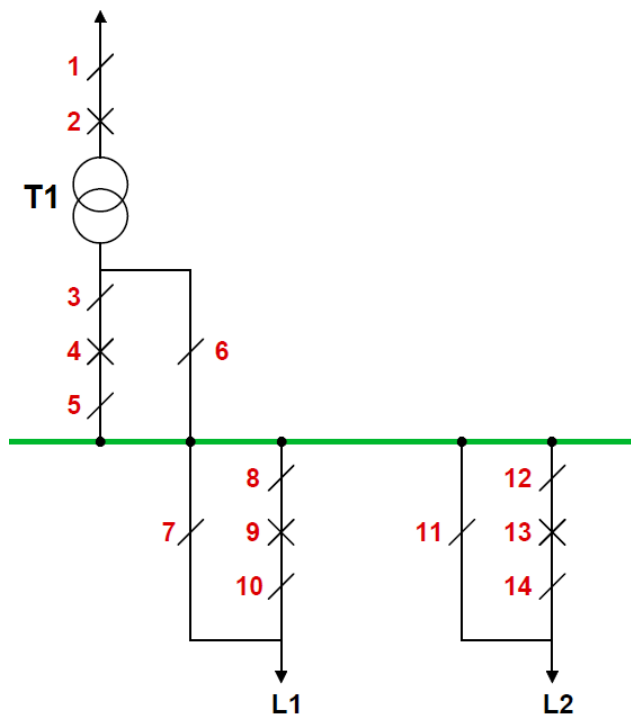
Presenta el mismo esquema de barraje simple, con algunas modificaciones: la adición de seccionadores que conectan cada circuito con la barra principal, y otro para cada interruptor. Esta configuración presenta mayor confiabilidad que la de barraje simple, en cuanto a mantenimiento en interruptores, porque una falla en cualquier elemento también saca de servicio a toda la subestación.

Al realizar mantenimiento en:

- **Interruptores:** no se ocasiona la suspensión del servicio del circuito correspondiente, sin embargo este quedará desprotegido durante el tiempo de mantenimiento.
- **Barraje:** se ocasiona la suspensión del servicio de toda la subestación.

En la Figura 19, se observa el diagrama unifilar de la subestación empleada en el software SUBVIRT.

Figura 19. Simple con by-pass, diagrama unifilar.



2.3.1 Disposición física

En las Figuras 20, 21 y 22 se observan las vistas en planta y en corte de la subestación barraje simple con by-pass.

Figura 20. Simple con by-pass, vista en planta.

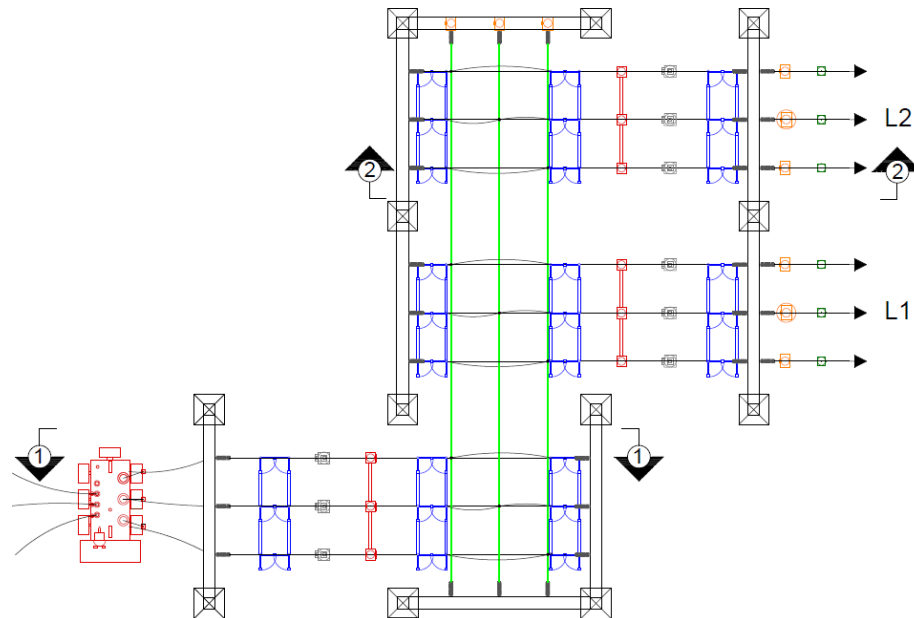


Figura 21. Simple con by-pass, bahía de transformador (1-1).

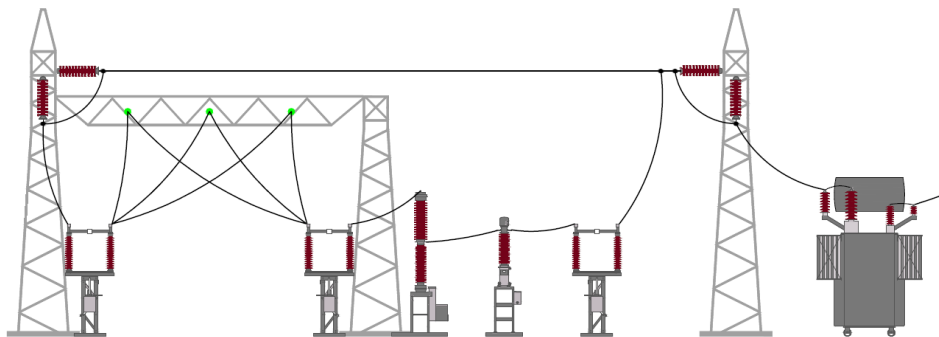
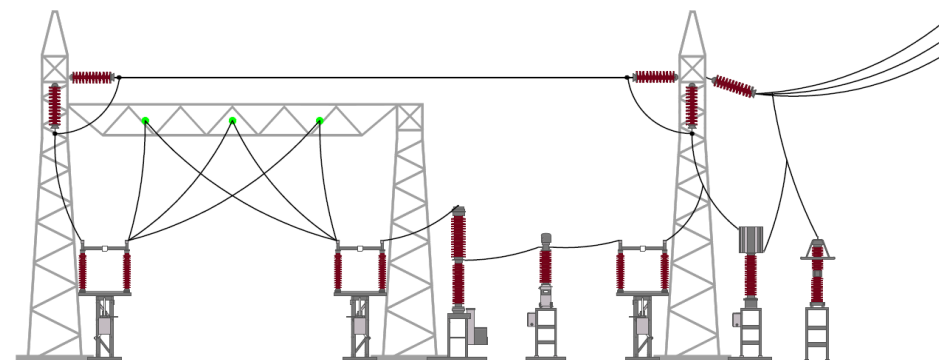


Figura 22. Simple con by-pass, bahía de línea (2-2).



2.3.2 Secuencias de operación

A continuación se registra el estado original de la subestación y las secuencias de operación para conexión y desconexión de las bahías.

Tabla 12. Simple con by-pass, estado original de la subestación.

Bahía / Elemento	Estado	
	Abierto	Cerrado
T1		✓
L1, L2		✓
6,7,11	✓	

Tabla 13. Simple con by-pass, secuencias para L1 y L2.

L1			L2		
Desconexión					
Elemento	Paso 1	Paso 2	Elemento	Paso 1	Paso 2
7			11		
8,10		Abrir	12,14		Abrir
9	Abrir		13	Abrir	
Conexión					
7			11		
8,10	Cerrar		12,14	Cerrar	
9		Cerrar	13		Cerrar

Tabla 14. Simple con by-pass, secuencias para T1.

T1					
Desconexión					
BT			AT		
Elemento	Paso 1	Paso 2	Elemento	Paso 1	Paso 2
1		Abrir	3,5		Abrir
2	Abrir		4	Abrir	
			6		
Conexión					
1	Cerrar		3,5	Cerrar	
2		Cerrar	4		Cerrar
			6		
Nota: El orden en las secuencias de conexión o desconexión de las bahías AT y BT, es indiferente.					

Los elementos disponibles para realizar mantenimiento son:

- Elemento 4
- Elemento 9
- Barraje

Las secuencias de operación para el mantenimiento de dichos elementos están registradas en las Tablas 15 y 16.

Tabla 15. Simple con by-pass, secuencias para elementos 4 y 9.

Elemento 4			Elemento 9		
Desconexión					
Bahía / Elemento	Paso 1	Paso 2	Bahía / Elemento	Paso 1	Paso 2
AT		Abrir	L1		Abrir
6	Cerrar		7	Cerrar	
Conexión					
AT	Cerrar		L1	Cerrar	
6		Abrir	7		Abrir

Tabla 16. Simple con by-pass, secuencias para el barraje.

Barraje										
Desconexión										
Bahía	Secuencia 1		Secuencia 2		Secuencia 3			Secuencia 4		
	Paso 1	Pasos 2-3	Pasos 1-2	Paso 3	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 1	Paso 2	Paso 3
T1	Abrir			Abrir		Abrir			Abrir	
L1		Abrir	Abrir		Abrir					Abrir
L2		Abrir	Abrir				Abrir	Abrir		
Conexión										
T1	Cerrar			Cerrar		Cerrar			Cerrar	
L1		Cerrar	Cerrar		Cerrar					Cerrar
L2		Cerrar	Cerrar				Cerrar	Cerrar		
Nota: -Hay 4 secuencias posibles para desconexión y conexión del barraje.										

2.4 BARRAJE SIMPLE CON BY-PASS DE LÍNEA

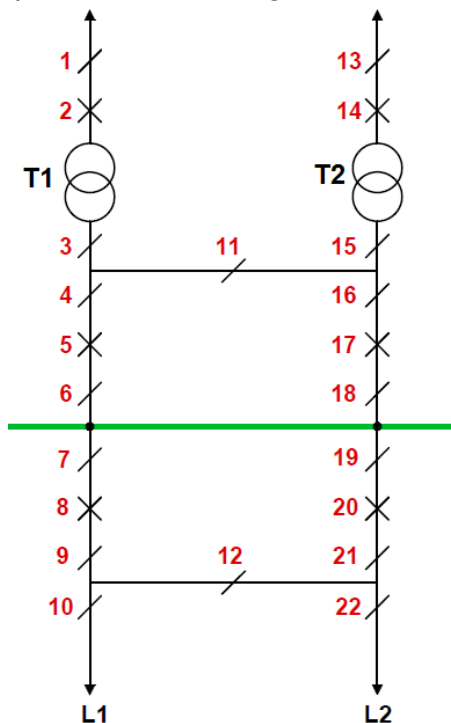
Presenta el esquema básico de barraje simple, con varias modificaciones: la adición de un seccionador de by-pass entre los transformadores y otro para cada una de los circuitos que están conectados al barraje, además de dos seccionadores por cada interruptor. Estos últimos se colocan por seguridad, ya que asegura un corte visible para el operario que esté cerca a esa zona. Esta configuración aumenta la confiabilidad, en cuanto a mantenimiento en interruptores.

Al realizar mantenimiento en:

- **Interruptores:** no se ocasiona la suspensión del servicio. El circuito correspondiente queda protegido por el interruptor del circuito vecino.
- **Barraje:** se ocasiona la suspensión del servicio de toda la subestación.

En la Figura 23, se observa el diagrama unifilar de la subestación empleada en el software SUBVIRT.

Figura 23. Simple con by-pass de línea, diagrama unifilar.



2.4.1 Disposición física

En las Figuras 24, 25 y 26 se observan las vistas en planta y en corte de la subestación barraje simple con by-pass de línea.

Figura 24. Simple con by-pass de línea, vista en planta.

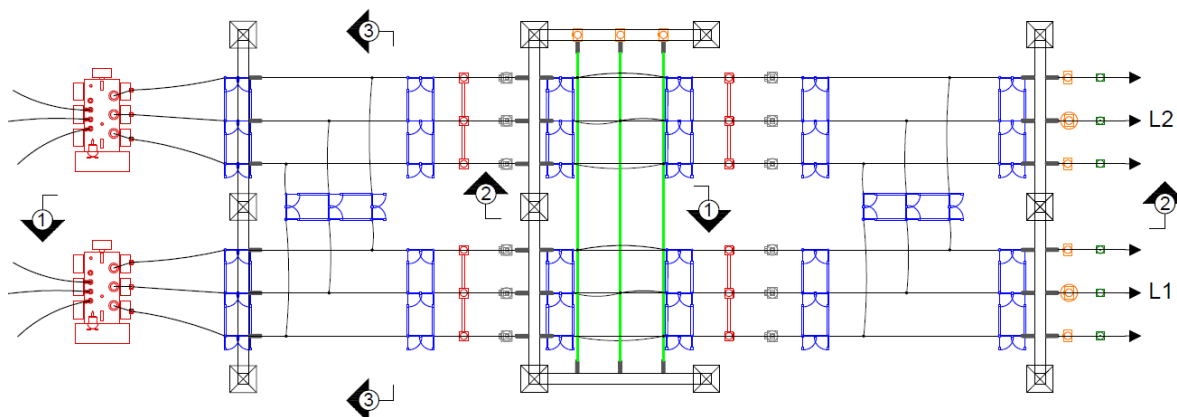


Figura 25. Simple con by-pass de línea, bahía de transformador (1-1).

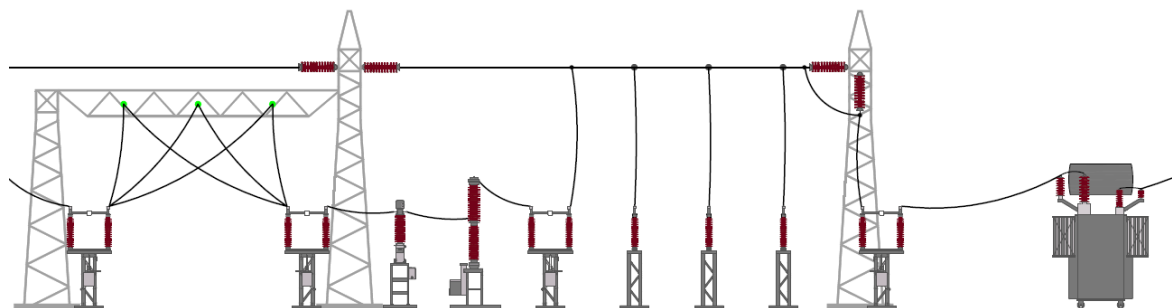
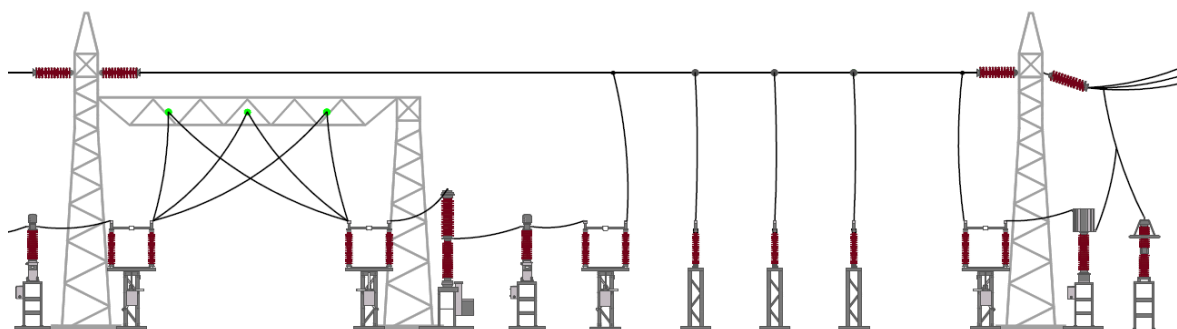


Figura 26. Simple con by-pass de línea, bahía de línea (2-2).



2.4.2 Secuencias de operación

A continuación se registra el estado original de la subestación y las secuencias de operación para conexión y desconexión de las bahías.

Tabla 17. Simple con by-pass de línea, estado original de la subestación.

Bahía / Elemento	Estado	
	Abierto	Cerrado
T1, T2		✓
L1, L2		✓
11, 12	✓	

Tabla 18. Simple con by-pass de línea, secuencias para L1 y L2.

L1			L2		
Desconexión					
Elemento	Paso 1	Paso 2	Elemento	Paso 1	Paso 2
7,9,10		Abrir	19,21,22		Abrir
8	Abrir		20	Abrir	
Conexión					
7,9,10	Cerrar		19,21,22	Cerrar	
8		Cerrar	20		Cerrar

Tabla 19. Simple con by-pass de línea, secuencias para T1 y T2.

T1						T2					
Desconexión											
BT1			AT1			BT2			AT2		
Elemento	Paso 1	Paso 2	Elemento	Paso 1	Paso 2	Elemento	Paso 1	Paso 2	Elemento	Paso 1	Paso 2
1		Abrir	3,4,6		Abrir	13		Abrir	15,16,18		Abrir
2	Abrir		5	Abrir		14	Abrir		17	Abrir	
Conexión											
1	Cerrar		3,4,6	Cerrar		13	Cerrar		15,16,18	Cerrar	
2		Cerrar	5		Cerrar	14		Cerrar	17		Cerrar
Nota: El orden en las secuencias de conexión o desconexión de las bahías AT y BT, es indiferente.											

Los elementos disponibles para realizar mantenimiento son:

- Elemento 5
- Elemento 8
- Barraje

Las secuencias de operación para el mantenimiento de dichos elementos están registradas en las Tablas 20 y 21. Con respecto a la Tabla 21, hay 4 pasos necesarios para culminar las secuencias de desconexión y conexión del barraje, los cuales a su vez tienen varias posibilidades. Por ejemplo, para la desconexión del barraje, el primer paso tiene 4 posibilidades: abrir cualquiera de las bahías (L1, L2, T1 o T2). El segundo paso tiene 3 posibilidades: abrir cualquiera de las 3 bahías que faltan. El tercer paso tiene 2 posibilidades: abrir cualquiera de las 2 bahías que faltan. El cuarto paso finalmente sería abrir la última bahía que falta y de esta manera, habrían 24 secuencias posibles para la desconexión y conexión del barraje.

Tabla 20. Simple con by-pass de línea, secuencias para elementos 5 y 8.

Elemento 5				Elemento 8			
Desconexión							
Elemento	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Elemento	Paso 1	Paso 2	Paso 3
4,6			Abrir	7,9			Abrir
5		Abrir		8		Abrir	
11	Cerrar			12	Cerrar		
Conexión							
4,6	Cerrar			7,9	Cerrar		
5		Cerrar		8		Cerrar	
11			Abrir	12			Abrir

Tabla 21. Simple con by-pass de línea, secuencias para el barraje.

Barraje	
Desconexión	
Bahía	Pasos 1-4
L1	Abrir
L2	Abrir
T1	Abrir
T2	Abrir
Conexión	
L1	Cerrar
L2	Cerrar
T1	Cerrar
T2	Cerrar
Nota: El orden en los pasos 1-4 es indiferente. Es decir, hay 24 secuencias posibles.	

2.5 BARRAJE SIMPLE CON TRANSFERENCIA

Presenta el esquema básico de barraje simple, con algunas modificaciones: la adición de una barra auxiliar, un seccionador de by-pass para cada circuito que permite realizar la transferencia a la barra auxiliar, un interruptor de acople entre las barras y un seccionador adicional para cada interruptor.

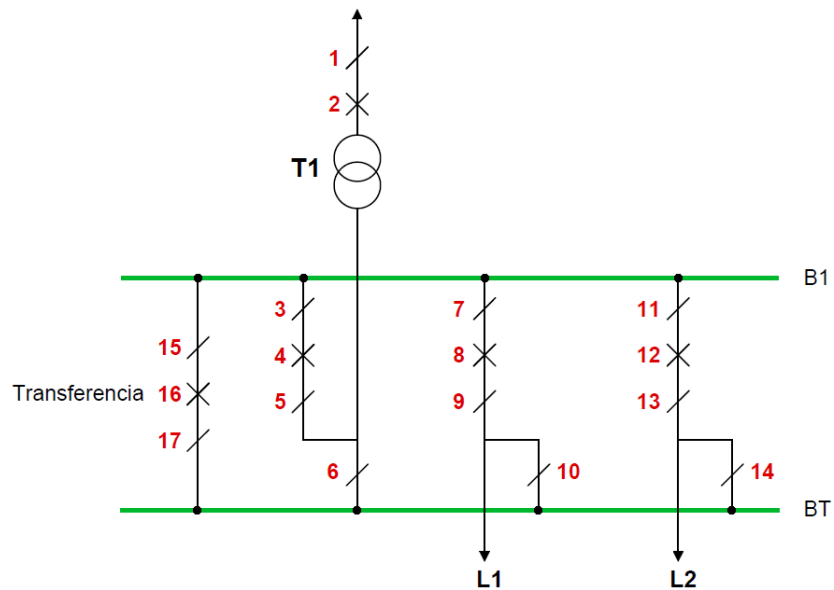
En la operación normal de la subestación, todos los circuitos están conectados a la barra principal, lo que muestra una baja confiabilidad, debido a que una falla en este barraje saca de servicio toda la subestación. Esta configuración se usa generalmente con la barra auxiliar desenergizada, y su objetivo principal es para realizar mantenimiento en interruptores.

Al realizar mantenimiento en:

- **Interruptores:** no se ocasiona la suspensión del servicio. El circuito correspondiente queda protegido por el interruptor de transferencia.
- **Barraje:** se ocasiona la suspensión del servicio de toda la subestación.

En la Figura 27, se observa el diagrama unifilar de la subestación empleada en el software SUBVIRT.

Figura 27. Simple con transferencia, diagrama unifilar.



2.5.1 Disposición física

En las Figuras 28, 29, 30 y 31 se observan las vistas en planta y en corte de la subestación barraje simple con transferencia.

Figura 28. Simple con transferencia, vista en planta.

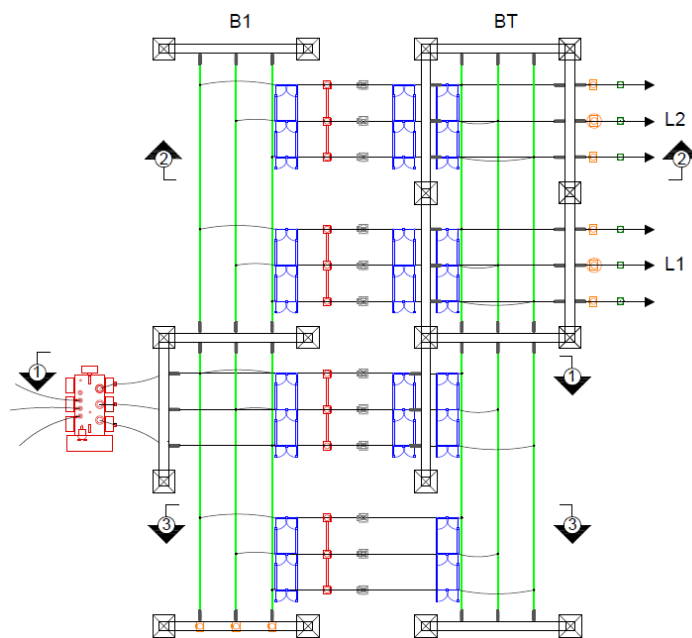


Figura 29. Simple con transferencia, bahía de transformador (1-1).

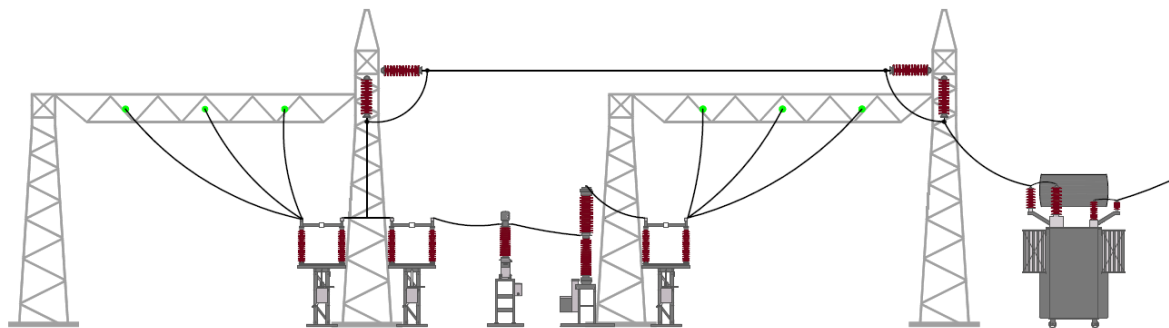
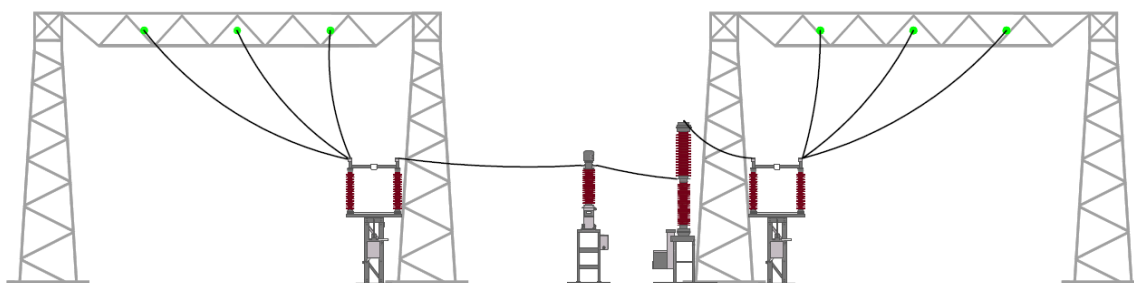


Figura 30. Simple con transferencia, bahía de línea (2-2).



Figura 31. Simple con transferencia, bahía de transferencia (3-3).



2.5.2 Secuencias de operación

A continuación se registra el estado original de la subestación y las secuencias de operación para conexión y desconexión de las bahías.

Tabla 22. Simple con transferencia, estado original de la subestación.

Bahía / Elemento	Estado	
	Abierto	Cerrado
T1		✓
L1, L2		✓
6,10,14	✓	
Transferencia	✓	

Tabla 23. Simple con transferencia, secuencias para L1 y L2.

L1			L2		
Desconexión					
Elemento	Paso 1	Paso 2	Elemento	Paso 1	Paso 2
7,9		Abrir	11,13		Abrir
8	Abrir		12	Abrir	
10			14		
Conexión					
7,9	Cerrar		11,13	Cerrar	
8		Cerrar	12		Cerrar
10			14		

Tabla 24. Simple con transferencia, secuencias para T1.

T1					
Desconexión					
BT			AT		
Elemento	Paso 1	Paso 2	Elemento	Paso 1	Paso 2
1		Abrir	3,5		Abrir
2	Abrir		4	Abrir	
			6		
Conexión					
1	Cerrar		3,5	Cerrar	
2		Cerrar	4		Cerrar
			6		
Nota: El orden en las secuencias de conexión o desconexión de las bahías AT y BT, es indiferente.					

Tabla 25. Simple con transferencia, secuencias para transferencia.

Transferencia		
Desconexión		
Elemento	Paso 1	Paso 2
15,17		Abrir
16	Abrir	
Conexión		
15,17	Cerrar	
16		Cerrar

Los elementos disponibles para realizar mantenimiento son:

- Elemento 2
- Elemento 8
- Barraje

Las secuencias de operación para el mantenimiento de dichos elementos están registradas en las Tablas 26 y 27.

Tabla 26. Simple con transferencia, secuencias para elementos 2 y 8.

Elemento 2		Elemento 8			
Desconexión					
Bahía / Elemento	Paso 1	Bahía / Elemento	Paso 1	Paso 2	Paso 3
T1	Abrir	L1			Abrir
		10		Cerrar	
		Transferencia	Cerrar		
Conexión					
T1	Cerrar	L1	Cerrar		
		10		Abrir	
		Transferencia			Abrir

Tabla 27. Simple con transferencia, secuencias para el barraje.

Barraje										
Desconexión										
Bahía	Secuencia 1		Secuencia 2		Secuencia 3			Secuencia 4		
	Paso 1	Pasos 2-3	Pasos 1-2	Paso 3	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 1	Paso 2	Paso 3
T1	Abrir			Abrir		Abrir			Abrir	
L1		Abrir	Abrir		Abrir					Abrir
L2		Abrir	Abrir				Abrir	Abrir		
Conexión										
T1	Cerrar			Cerrar		Cerrar			Cerrar	
L1		Cerrar	Cerrar		Cerrar					Cerrar
L2		Cerrar	Cerrar				Cerrar	Cerrar		
Nota: -Hay 4 secuencias posibles para desconexión y conexión del barraje.										

2.6 BARRAJE DOBLE

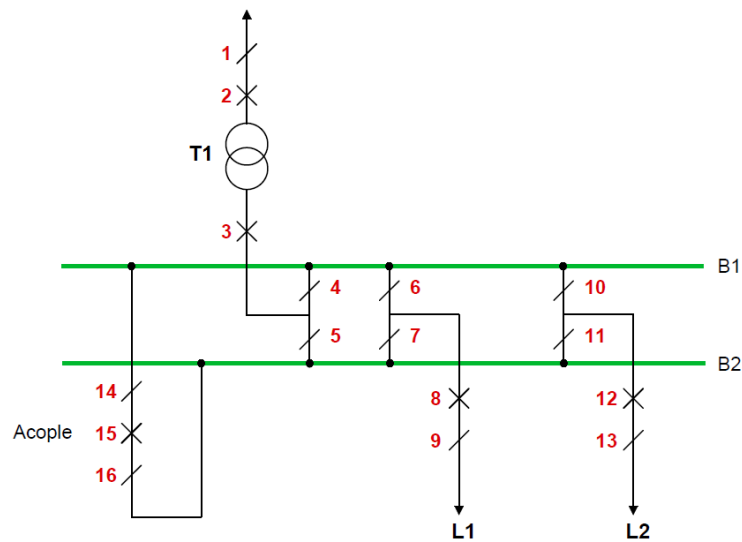
Esta configuración tiene dos barras principales conectadas a cada circuito y un interruptor de acople entre ellas. Cuando el interruptor de acople está cerrado, permite que cada circuito se conecte a una u otra barra, lo cual proporciona una mayor flexibilidad y confiabilidad: una falla en cualquier barra no tendrá impacto en la otra barra. Sin embargo, una falla en el interruptor de acople saca de servicio toda la subestación. Con el interruptor de acople normalmente abierto, se eliminan las ventajas mencionadas anteriormente. La aplicación de esta configuración es adecuada donde se requiere transferencia de carga y una buena confiabilidad.

Al realizar mantenimiento en:

- **Interruptores:** se ocasiona la suspensión del servicio del circuito correspondiente.
- **Barraje:** se sostiene el servicio de la subestación a través del otro barraje. Ambos barrajes deben tener la capacidad total de la subestación.

En la Figura 32, se observa el diagrama unifilar de la subestación empleada en el software SUBVIRT.

Figura 32. Doble, diagrama unifilar.



2.6.1 Disposición física

En las Figuras 33, 34, 35 y 36 se observan las vistas en planta y en corte de la subestación barraje doble.

Figura 33. Doble, vista en planta.

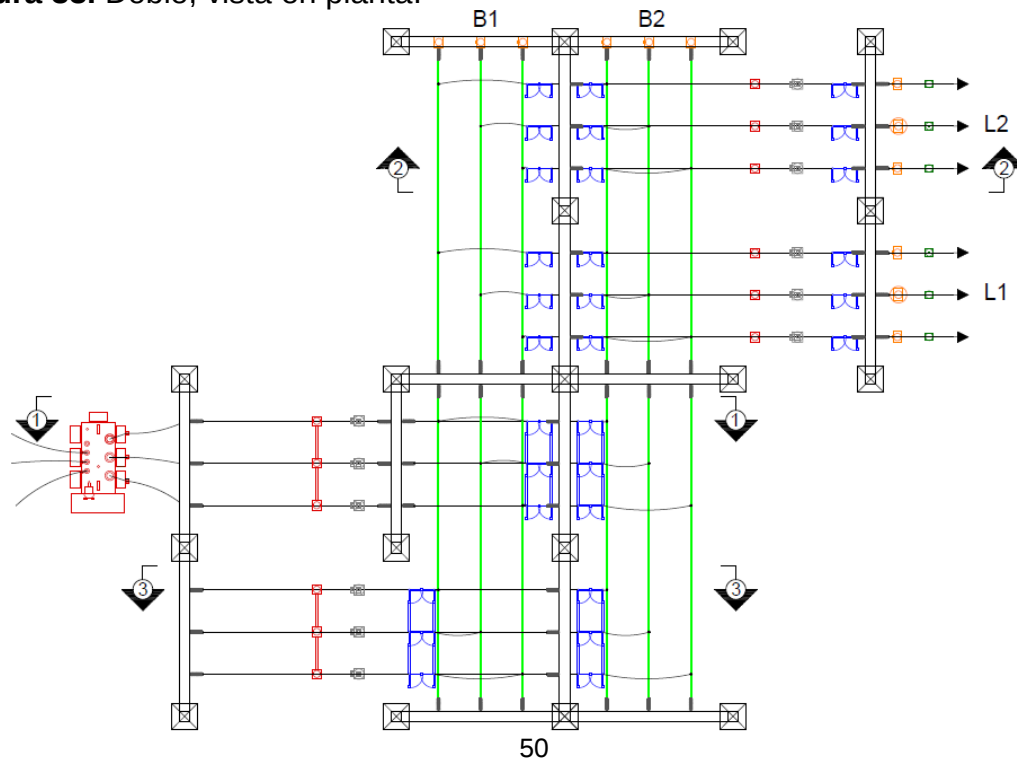


Figura 34. Doble, bahía de transformador (1-1).

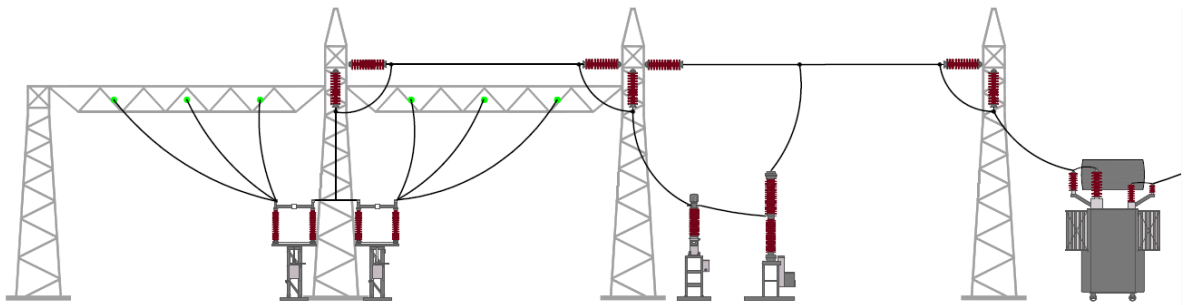


Figura 35. Doble, bahía de línea (2-2).

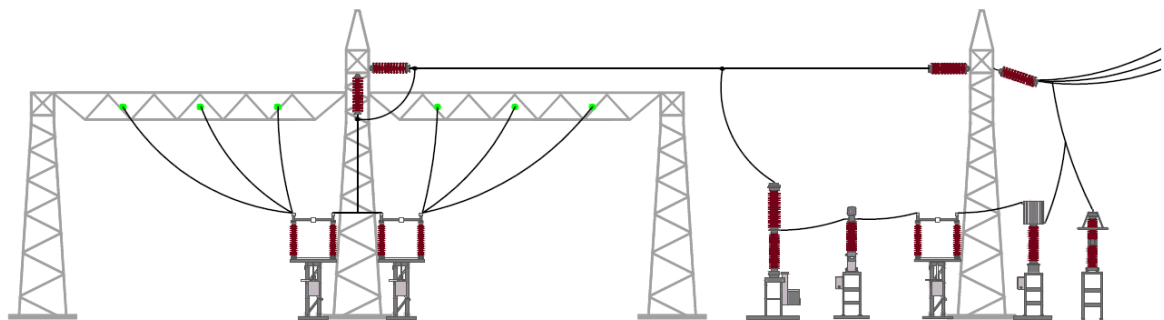
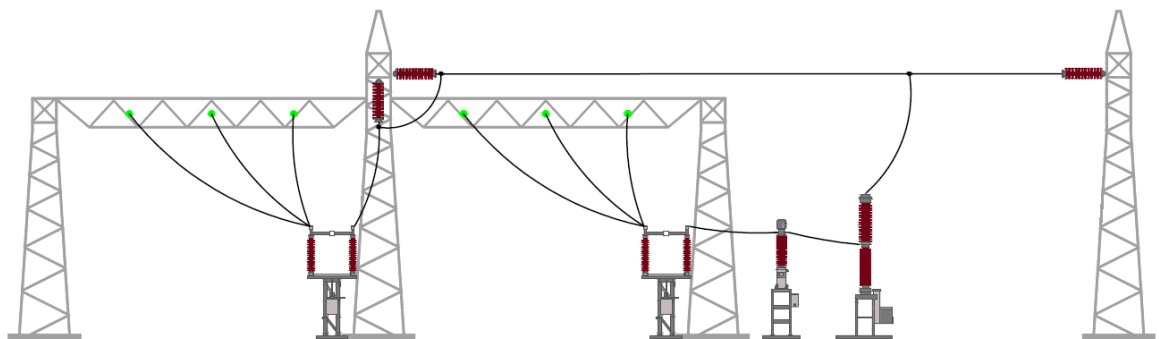


Figura 36. Doble, bahía de acople (3-3).



2.6.2 Secuencias de operación

A continuación se registra el estado original de la subestación y las secuencias de operación para conexión y desconexión de las bahías.

Tabla 28. Doble, estado original de la subestación.

Bahía / Elemento	Estado	
	Abierto	Cerrado
T1		✓
L1, L2		✓
4,7,10		✓
5,6,11	✓	
Acople		✓

Tabla 29. Doble, secuencias para L1 y L2.

L1			L2		
Desconexión					
Elemento	Paso 1	Paso 2	Elemento	Paso 1	Paso 2
6			10,13		Abrir
7,9		Abrir	11		
8	Abrir		12	Abrir	
Conexión					
6			10,13	Cerrar	
7,9	Cerrar		11		
8		Cerrar	12		Cerrar

Tabla 30. Doble, secuencias para acople.

Acople		
Desconexión		
Elemento	Paso 1	Paso 2
14,16		Abrir
15	Abrir	
Conexión		
14,16	Cerrar	
15		Cerrar

Tabla 31. Doble, secuencias para T1.

T1					
Desconexión					
BT			AT		
Elemento	Paso 1	Paso 2	Elemento	Paso 1	Paso 2
1		Abrir	3	Abrir	
2	Abrir		4		Abrir
			5		
Conexión					
1	Cerrar		3		Cerrar
2		Cerrar	4	Cerrar	
			5		
Nota: El orden en las secuencias de conexión o desconexión de las bahías AT y BT, es indiferente.					

Los elementos disponibles para realizar mantenimiento son:

- Elemento 3
- Elemento 8
- Barraje 1

Las secuencias de operación para el mantenimiento de dichos elementos están registradas en las Tablas 32 y 33.

Tabla 32. Doble, secuencias para elementos 3 y 8.

Elemento 3		Elemento 8	
Desconexión			
Bahía	Paso 1	Bahía	Paso 1
T1	Abrir	L1	Abrir
Conexión			
T1	Cerrar	L1	Cerrar

Tabla 33. Doble, secuencias para el barraje 1.

Barraje 1										
Desconexión										
Bahía / Elemento	Secuencia 1					Secuencia 2				
	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4	Paso 5	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4	Paso 5
4		Abrir							Abrir	
5	Cerrar							Cerrar		
10				Abrir			Abrir			
11			Cerrar			Cerrar				
Acople					Abrir					Abrir
Conexión										
4		Cerrar							Cerrar	
5			Abrir							Abrir
10				Cerrar			Cerrar			
11					Abrir			Abrir		
Acople	Cerrar					Cerrar				
Nota: -Hay 2 secuencias posibles para desconexión y conexión del barraje.										

2.7 BARRAJE DOBLE CON BY-PASS

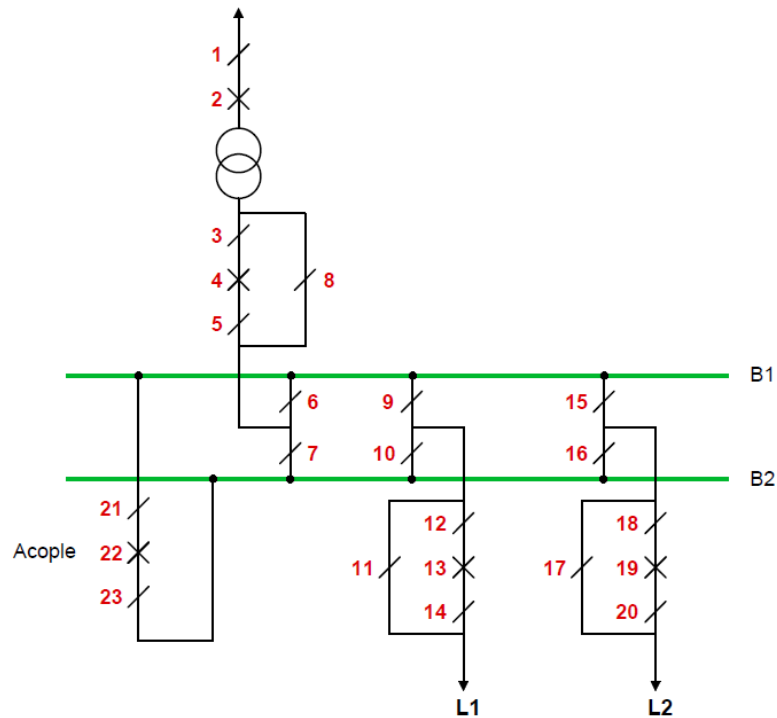
Presenta el mismo esquema básico de barraje doble, con algunas modificaciones: la adición de un seccionador de by-pass a cada una de los circuitos y otro seccionador para cada interruptor. Reúne las ventajas de las configuraciones barraje simple con transferencia y barraje doble, pero no simultáneamente: si hay circuitos conectados a ambas barras no es posible hacer mantenimiento a interruptores, sin suspender el servicio, ya que para ello se necesitaría una barra adicional que estuviera libre para emplearse como barra de transferencia. En esta configuración, como en barraje doble, normalmente se usa una de las barras como barra de reserva y/o de transferencia.

Al realizar mantenimiento en:

- **Interruptores:** no se ocasiona la suspensión del servicio. El circuito correspondiente queda protegido por el interruptor de acople.
- **Barraje:** se sostiene el servicio de la subestación a través del otro barraje. Ambos barrajes deben tener la capacidad total de la subestación.

En la Figura 37, se observa el diagrama unifilar de la subestación empleada en el software SUBVIRT.

Figura 37. Doble con by-pass, diagrama unifilar.



2.7.1 Disposición física

En las Figuras 38, 39, 40 y 41 se observan las vistas en planta y en corte de la subestación barraje doble con by-pass.

Figura 38. Doble con by-pass, vista en planta.

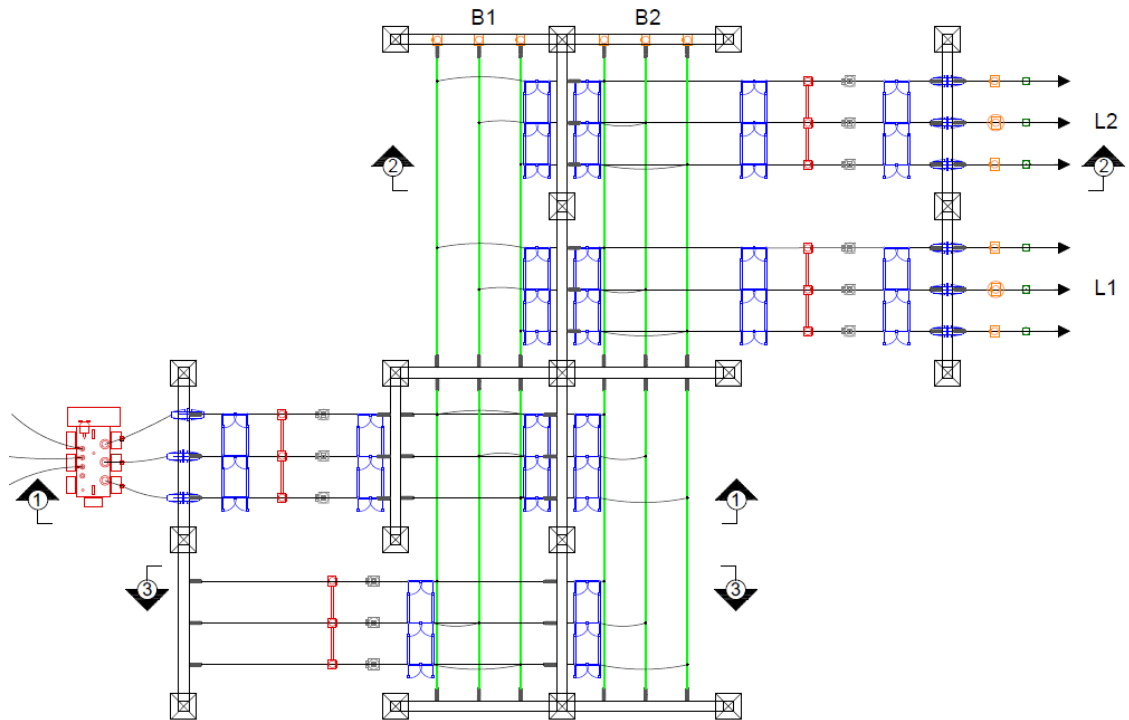


Figura 39. Doble con by-pass, bahía de transformador (1-1).

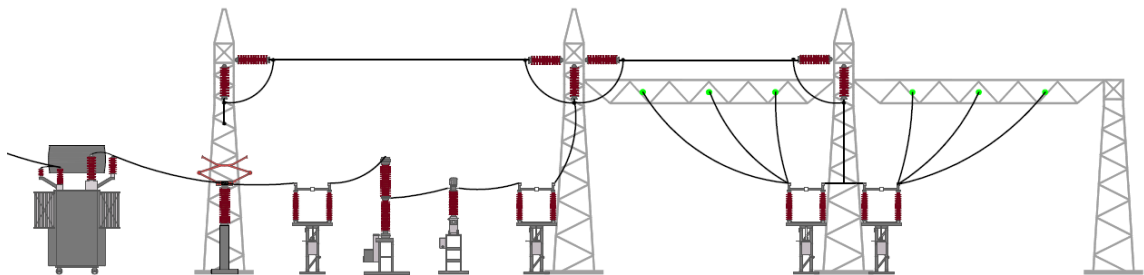
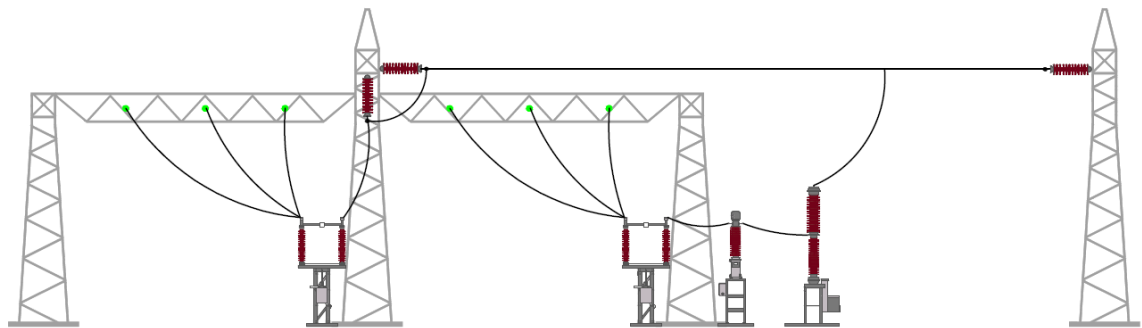


Figura 40. Doble con by-pass, bahía de línea (2-2).



Figura 41. Doble con by-pass, bahía de acople (3-3).



2.7.2 Secuencias de operación

A continuación se registra el estado original de la subestación y las secuencias de operación para conexión y desconexión de las bahías.

Tabla 34. Doble con by-pass, estado original de la subestación.

Bahía / Elemento	Estado	
	Abierto	Cerrado
T1		✓
L1, L2		✓
6, 9, 15		✓
7, 10, 16	✓	
8, 11, 17	✓	
Acople	✓	

Tabla 35. Doble con by-pass, secuencias para L1 y L2.

L1			L2		
Desconexión					
Elemento	Paso 1	Paso 2	Elemento	Paso 1	Paso 2
9,12,14		Abrir	15,18,20		Abrir
10			16		
11			17		
13	Abrir		19	Abrir	
Conexión					
9,12,14	Cerrar		15,18,20	Cerrar	
10			16		
11			17		
13		Cerrar	19		Cerrar

Tabla 36. Doble con by-pass, secuencias para acople.

Acople		
Conexión		
Elemento	Paso 1	Paso 2
21,23	Cerrar	
22		Cerrar
Desconexión		
21,23		Abrir
22	Abrir	

Tabla 37. Doble con by-pass, secuencias para T1.

T1					
Desconexión					
BT			AT		
Elemento	Paso 1	Paso 2	Elemento	Paso 1	Paso 2
1		Abrir	3,5,6		Abrir
			4		Abrir
2	Abrir		7		
			8		
Conexión					
1	Cerrar		3,5,6	Cerrar	
			4		
2		Cerrar	7		
			8		
Nota: El orden en las secuencias de conexión o desconexión de las bahías AT y BT, es indiferente.					

Los elementos disponibles para realizar mantenimiento son:

- Elemento 4
- Elemento 13
- Barraje 1

Las secuencias de operación para el mantenimiento de dichos elementos están registradas en las Tablas 38 y 39. Con respecto a la Tabla 39, los pasos que tienen 2 maniobras deben ejecutarse en el orden descrito, por ejemplo para los Elementos 7 y 6, en la desconexión, se debe cerrar 7 y enseguida abrir 6.

Tabla 38. Doble con by-pass, secuencias para elementos 4 y 13.

Elemento 4						Elemento 13					
Desconexión											
Bahía / Elemento	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4	Paso 5	Bahía / Elemento	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4	Paso 5
6			Abrir			9			Abrir		
7		Cerrar				10		Cerrar			
8				Cerrar		11				Cerrar	
Acople	Cerrar					Acople	Cerrar				
AT					Abrir	L1					Abrir
Conexión											
6			Cerrar			9			Cerrar		
7				Abrir		10				Abrir	
8		Abrir				11		Abrir			
Acople					Abrir	Acople					Abrir
AT	Cerrar					L1	Cerrar				

Tabla 39. Doble con by-pass, secuencias para el barraje 1.

Barraje 1			
Desconexión			
Bahía / Elemento	Paso 1	Pasos 2-4	Paso 5
7, 6		Cerrar, Abrir	
10, 9		Cerrar, Abrir	
16, 15		Cerrar, Abrir	
Acople	Cerrar		Abrir
Conexión			
6, 7		Cerrar, Abrir	
9, 10		Cerrar, Abrir	
15, 16		Cerrar, Abrir	
Acople	Cerrar		Abrir
Nota: El orden en los pasos 2-4, es indiferente. Es decir, hay 6 secuencias posibles.			

2.8 BARRAJE DOBLE CON TRANSFERENCIA

Presenta el mismo esquema de barraje doble, con algunas modificaciones: la adición de una barra de transferencia, un seccionador by-pass para cada circuito, y dos bahías: una de acople entre las barras principales y otra de transferencia entre las barras principales y la de transferencia. Reúne las ventajas de las configuraciones barraje simple con transferencia y barraje doble, simultáneamente: si hay circuitos conectados a ambas barras es posible hacer

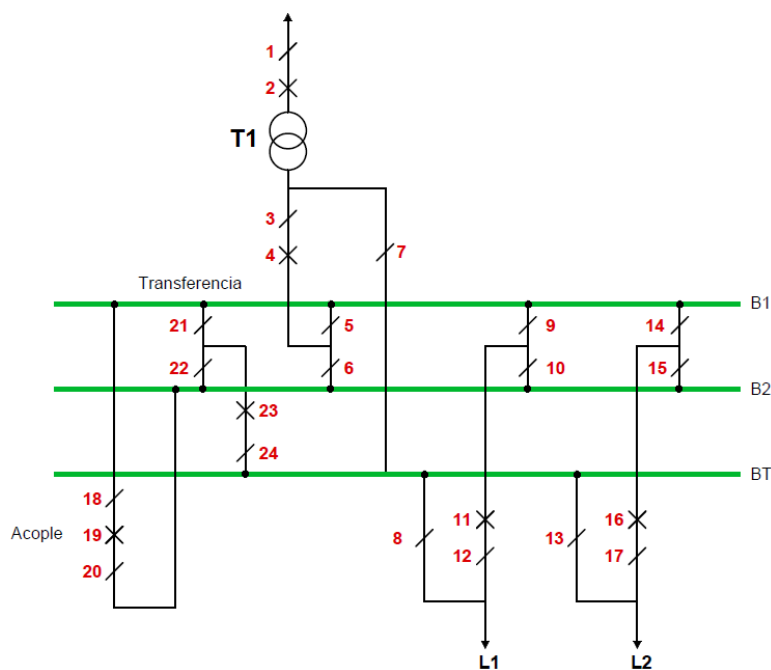
mantenimiento a interruptores, sin suspender el servicio. Por lo anterior, esta configuración presenta alta confiabilidad y flexibilidad.

Al realizar mantenimiento en:

- **Interruptores:** no se ocasiona la suspensión del servicio. El circuito correspondiente queda protegido por el interruptor de transferencia.
- **Barraje:** se sostiene el servicio de la subestación a través del otro barraje principal. Los barrajes principales deben tener la capacidad total de la subestación.

En la Figura 42, se observa el diagrama unifilar de la subestación empleada en el software SUBVIRT.

Figura 42. Doble con transferencia, diagrama unifilar.



2.8.1 Disposición física

En las Figuras 43, 44, 45, 46 y 47 se observan las vistas en planta y en corte de la subestación barraje doble con transferencia.

Figura 43. Doble con transferencia, vista en planta.

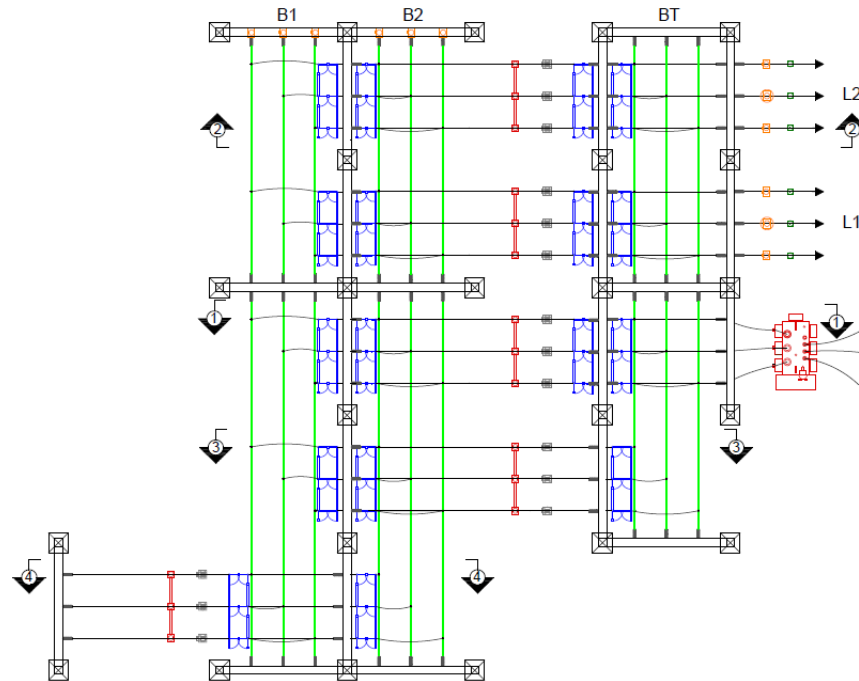


Figura 44. Doble con transferencia, bahía de transformador (1-1).

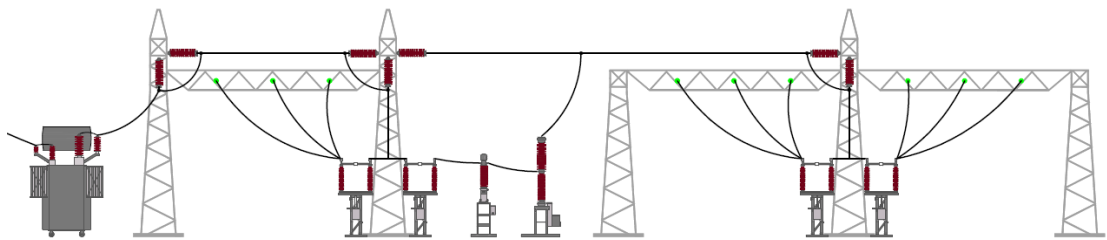


Figura 45. Doble con transferencia, bahía de línea (2-2).

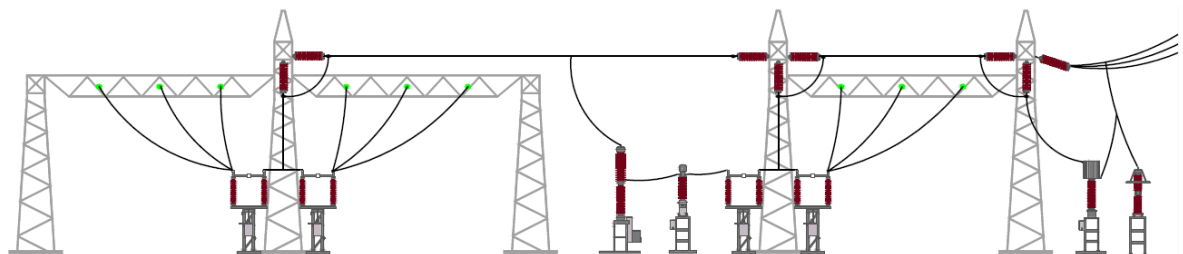


Figura 46. Doble con transferencia, bahía de transferencia (3-3).

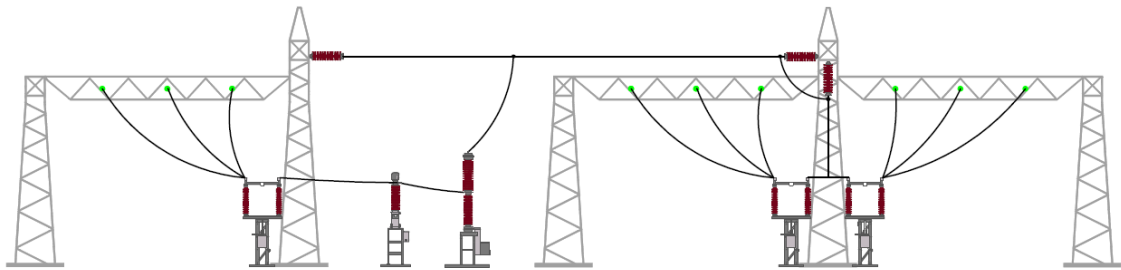
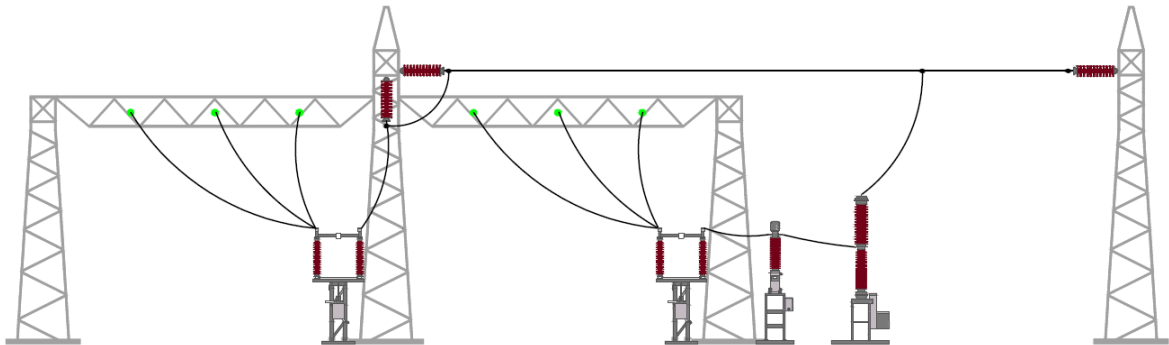


Figura 47. Doble con transferencia, bahía de acople (4-4).



2.8.2 Secuencias de operación

A continuación se registra el estado original de la subestación y las secuencias de operación para conexión y desconexión de las bahías.

Tabla 40. Doble con transferencia, estado original de la subestación.

Bahía / Elemento	Estado	
	Abierto	Cerrado
T1		✓
L1, L2		✓
6, 10, 15		✓
5, 9, 14	✓	
7, 8, 13	✓	
Acople	✓	
Transferencia	✓	

Tabla 41. Doble con transferencia, secuencias para L1 y L2.

L1			L2		
Desconexión					
Elemento	Paso 1	Paso 2	Elemento	Paso 1	Paso 2
8			13		
9			14		
10,12		Abrir	15,17		Abrir
11	Abrir		16	Abrir	
Conexión					
8			13		
9			14		
10,12	Cerrar		15,17	Cerrar	
11		Cerrar	16		Cerrar

Tabla 42. Doble con transferencia, secuencias para acople y transferencia.

Acople			Transferencia		
Conexión					
Elemento	Paso 1	Paso 2	Elemento	Paso 1	Paso 2
18,20	Cerrar		21	Cerrar	
			22,24		
19		Cerrar	23		Cerrar
Desconexión					
18,20		Abrir	21		Abrir
			22,24		
19	Abrir		23	Abrir	

Tabla 43. Doble con transferencia, secuencias para T1.

T1					
Desconexión					
BT			AT		
Elemento	Paso 1	Paso 2	Elemento	Paso 1	Paso 2
1		Abrir	3,6		Abrir
			4	Abrir	
2	Abrir		5		
			7		
Conexión					
1	Cerrar		3,6	Cerrar	
			4		Cerrar
2		Cerrar	5		
			7		
Nota: El orden en las secuencias de conexión o desconexión de las bahías AT y BT, es indiferente.					

Los elementos disponibles para realizar mantenimiento son:

- Elemento 4
- Elemento 11
- Barraje 2

Las secuencias de operación para el mantenimiento de dichos elementos están registradas en las Tablas 44 y 45.

Tabla 44. Doble con transferencia, secuencias para elementos 4 y 11.

Elemento 4				Elemento 11			
Desconexión							
Bahía / Elemento	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Bahía / Elemento	Paso 1	Paso 2	Paso 3
7		Cerrar		8		Cerrar	
Transferencia	Cerrar			Transferencia	Cerrar		
AT			Abrir	L1			Abrir
Conexión							
7		Abrir		8		Abrir	
Transferencia			Abrir	Transferencia			Abrir
AT	Cerrar			L1	Cerrar		

Tabla 45. Doble con transferencia, secuencias para el barraje 2.

Barraje 2			
Desconexión			
Bahía / Elemento	Paso 1	Pasos 2-4	Paso 5
5, 6		Cerrar, Abrir	
9, 10		Cerrar, Abrir	
14, 15		Cerrar, Abrir	
Acople	Cerrar		Abrir
Conexión			
6, 5		Cerrar, Abrir	
10, 9		Cerrar, Abrir	
15, 14		Cerrar, Abrir	
Acople	Cerrar		Abrir
Nota: El orden en los pasos 2-4, es indiferente. Es decir, hay 6 secuencias posibles.			

2.9 BARRAJE EN ANILLO

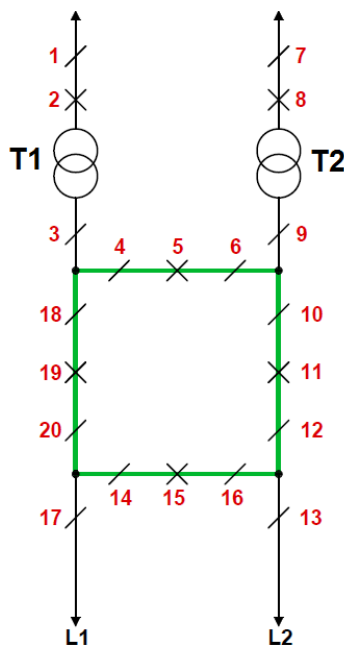
En esta configuración, todos los interruptores están dispuestos en forma de anillo, de tal modo que los circuitos están conectados entre dos interruptores. Esta ofrece una alta confiabilidad: si ocurre falla en una sección del barraje afectará sólo al circuito conectado a ésta, y si ocurre un fallo en algún circuito no afectará a ningún otro circuito.

Al realizar mantenimiento en:

- **Interruptores:** no se ocasiona la suspensión del servicio de algún circuito.
- **Sección de barraje:** no se ocasiona la suspensión del servicio de algún circuito.

En la Figura 48, se observa el diagrama unifilar de la subestación empleada en el software SUBVIRT.

Figura 48. Anillo, diagrama unifilar.



2.9.1 Disposición física

En las Figuras 49 y 50 se observan las vistas en planta y en corte de la subestación barraje en anillo.

Figura 49. Anillo, vista en planta.

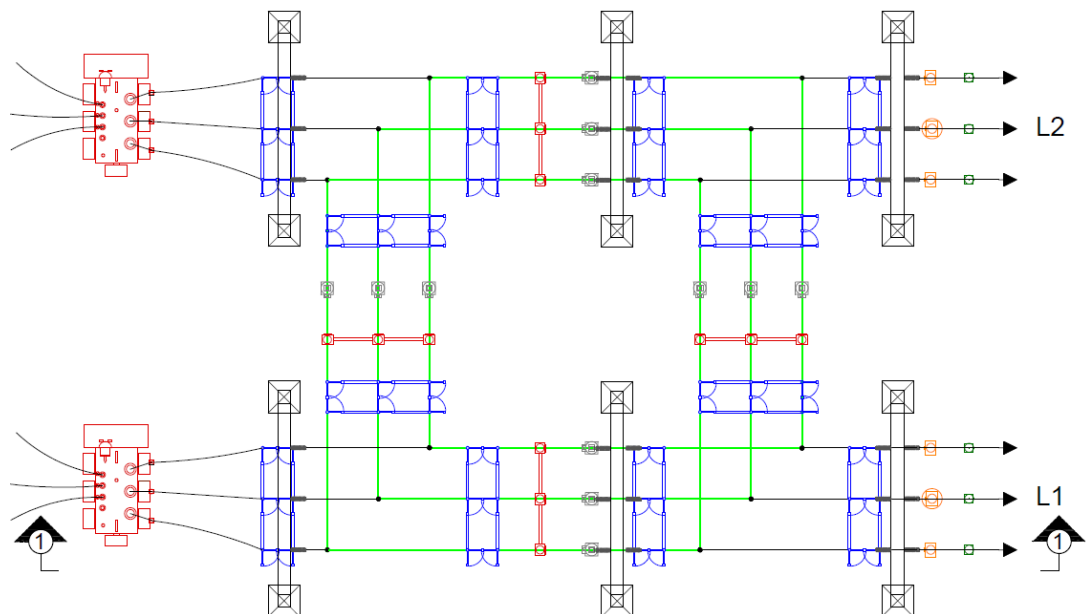
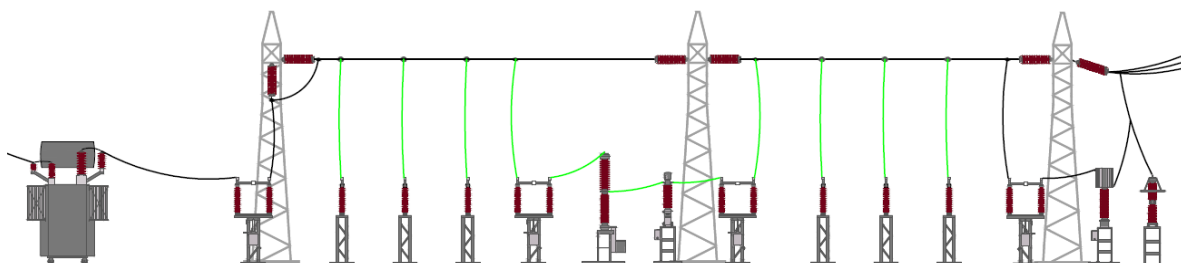


Figura 50. Anillo, bahías de transformador y de línea (1-1).



2.9.2 Secuencias de operación

En la Tabla 46, se registra el estado original de la subestación, mientras que en las Tablas 47 y 48, se registran las secuencias de operación para conexión y desconexión de las bahías. Con respecto a estas últimas, donde hay 3 elementos que incluyen un interruptor se debe aplicar la cuarta regla básica de SUBVIRT: **Seccionadores no deben abrir ni cerrar bajo carga**. Por ejemplo, en la desconexión de L1 (Tabla 47): para abrir los elementos 14, 15 y 16, primero se debe abrir el elemento 15 (interruptor) y luego los elementos 14 y 16 (seccionadores).

Tabla 46. Anillo, estado original de la subestación.

Bahía	Estado	
	Abierto	Cerrado
T1, T2		✓
L1, L2		✓

Tabla 47. Anillo, secuencias para L1.

L1			
Desconexión			
Elemento	Pasos 1-2	Paso 3	Pasos 4-5
14,15,16	Abrir		Cerrar
17		Abrir	
18,19,20	Abrir		Cerrar
Conexión			
14,15,16	Abrir		Cerrar
17		Cerrar	
18,19,20	Abrir		Cerrar
Nota: El orden en los pasos 1-2 y 4-5, es indiferente. Es decir, hay 4 secuencias posibles.			

Tabla 48. Anillo, secuencias para T1.

T1						
Desconexión						
BT			AT			
Elemento	Paso 1	Paso 2	Elemento	Pasos 1-2	Paso 3	Pasos 4-5
1		Abrir	4,5,6	Abrir		Cerrar
			3		Abrir	
2	Abrir		18,19,20	Abrir		Cerrar
Conexión						
1	Cerrar		4,5,6	Abrir		Cerrar
			3		Cerrar	
2		Cerrar	18,19,20	Abrir		Cerrar
Notas: -Para el transformador: El orden en las secuencias de conexión o desconexión de las bahías AT y BT, es indiferente. -Para la bahía de AT: El orden en los pasos 1-2 y 4-5, es indiferente. Es decir, hay 4 secuencias posibles.						

Los elementos disponibles para realizar mantenimiento son:

- Transformador
- Elemento 19

Las secuencias de operación para el mantenimiento del elemento 19, se encuentran registradas en la Tabla 49.

Tabla 49. Anillo, secuencias para elemento 19.

Elemento 19		
Desconexión		
Elemento	Paso 1	Paso 2
18,20		Abrir
19	Abrir	
Conexión		
18,20	Cerrar	
19		Cerrar

2.10 DOBLE INTERRUPTOR

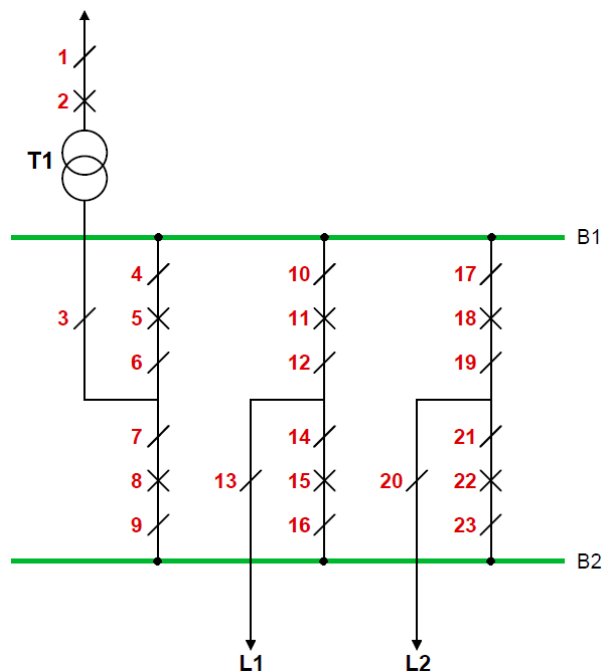
Esta configuración consta de dos interruptores y dos barras para cada circuito. Posee la mayor confiabilidad y costo de todas las configuraciones: si ocurre una falla en un interruptor o en una barra, no afectará a ningún circuito ya que se realiza la transferencia automática hacia la otra barra.

Al realizar mantenimiento en:

- **Interruptores:** no se ocasiona la suspensión del servicio de algún circuito.
- **Barraje:** no se ocasiona la suspensión del servicio de algún circuito.

En la Figura 51, se observa el diagrama unifilar de la subestación empleada en el software SUBVIRT.

Figura 51. Doble Interruptor, diagrama unifilar.



2.10.1 Disposición física

En las Figuras 52, 53 y 54 se observan las vistas en planta y en corte de la subestación doble interruptor.

Figura 52. Doble Interruptor, vista en planta.

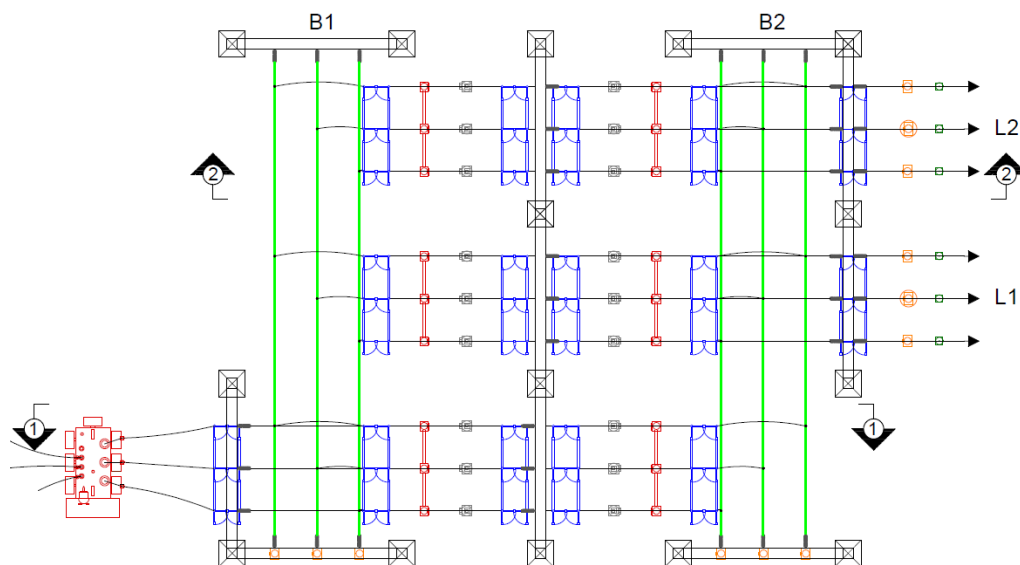


Figura 53. Doble Interruptor, bahía de transformador (1-1).

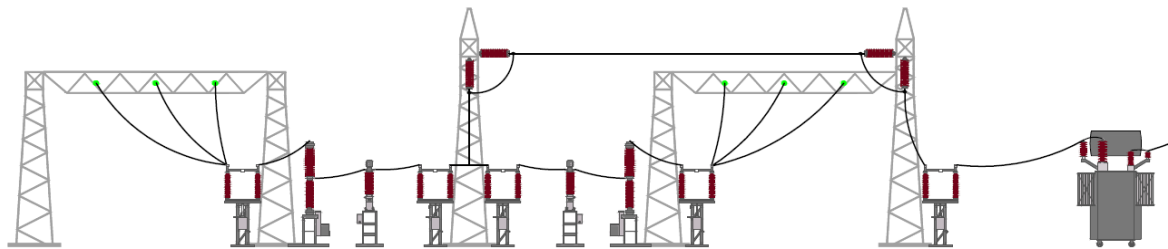


Figura 54. Doble Interruptor, bahía de línea (2-2).



2.10.2 Secuencias de operación

A continuación se registra el estado original de la subestación y las secuencias de operación para conexión y desconexión de las bahías.

Tabla 50. Doble Interruptor, estado original de la subestación.

Bahía	Estado	
	Abierto	Cerrado
T1		✓
L1, L2		✓

Tabla 51. Doble Interruptor, secuencias para L1.

L1		
Desconexión		
Elemento	Pasos 1-2	Paso 3
10,11,12	Abrir	
13		Abrir
14,15,16	Abrir	
Conexión		
Elemento	Paso 1	Pasos 2-3
10,11,12		Cerrar
13	Cerrar	
14,15,16		Cerrar
Nota: -Para desconexión: El orden en los pasos 1-2, es indiferente. Es decir, hay 2 secuencias posibles. -Para conexión: El orden en los pasos 2-3, es indiferente. Es decir, hay 2 secuencias posibles.		

Tabla 52. Doble Interruptor, secuencias para T1.

T1					
Desconexión					
BT			AT		
Elemento	Paso 1	Paso 2	Elemento	Pasos 1-2	Paso 3
1		Abrir	4,5,6	Abrir	
2	Abrir		3		Abrir
			7,8,9	Abrir	
Conexión					
1	Cerrar		4,5,6		Cerrar
2		Cerrar	3	Cerrar	
			7,8,9		Cerrar
Notas: -Para el transformador: El orden en las secuencias de conexión o desconexión de las bahías AT y BT, es indiferente. -Para la bahía de AT: El orden en los pasos 1-2, es indiferente. Es decir, hay 2 secuencias posibles.					

Los elementos disponibles para realizar mantenimiento son:

- Transformador
- Elemento 11
- Barraje 2

Las secuencias de operación para el mantenimiento del elemento 11 y el barraje 2 están registradas en las Tablas 53 y 54.

Tabla 53. Doble Interruptor, secuencias para elemento 11.

Elemento 11		
Desconexión		
Elemento	Paso 1	Paso 2
10,12		Abrir
11	Abrir	
Conexión		
10,12	Cerrar	
11		Cerrar

Tabla 54. Doble Interruptor, secuencias para el barraje 2.

Barraje 2	
Desconexión	
Elemento	Pasos 1-3
7,8,9	Abrir
14,15,16	Abrir
21,22,23	Abrir
Conexión	
7,8,9	Cerrar
14,15,16	Cerrar
21,22,23	Cerrar
Nota: El orden en los pasos 1-3, es indiferente. Es decir, hay 6 secuencias posibles.	

2.11 INTERRUPTOR Y MEDIO

Esta configuración presenta tres interruptores por cada dos circuitos, es decir, un interruptor y medio por cada circuito. Generalmente, esta es la siguiente etapa de desarrollo de la configuración en anillo, y al igual que ésta presenta una alta confiabilidad¹⁴.

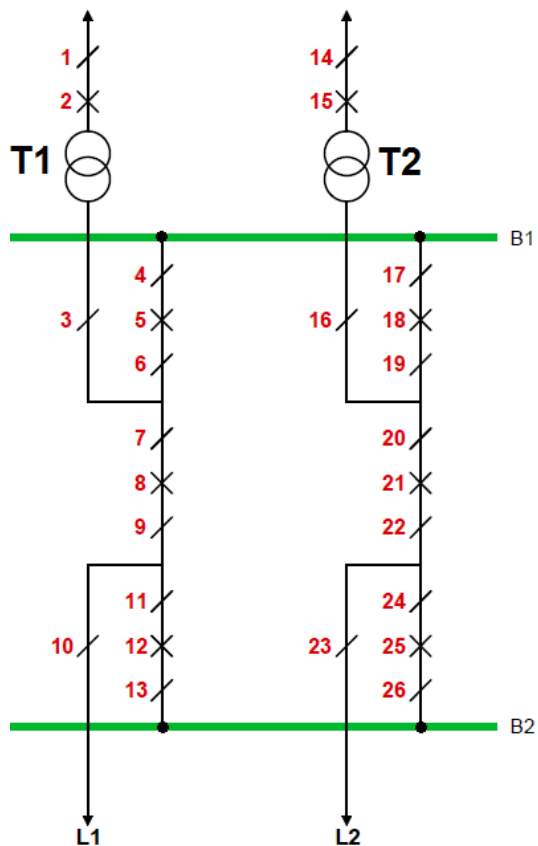
¹⁴ BIO, Michael J. Air-Insulated Substations — Bus/Switching Configurations. En: MCDONALD, John D. Electric Power Substations Engineering. Second Edition: USA, CRC Press, 2007.

Al realizar mantenimiento en:

- **Interruptores:** no se ocasiona la suspensión del servicio de algún circuito.
- **Barraje:** no se ocasiona la suspensión del servicio de algún circuito.

En la Figura 55, se observa el diagrama unifilar de la subestación empleada en el software SUBVIRT.

Figura 55. Interruptor y Medio, diagrama unifilar.



2.11.1 Disposición física

En las Figuras 56 y 57 se observan las vistas en planta y en corte de la subestación interruptor y medio.

Figura 56. Interruptor y Medio, vista en planta.

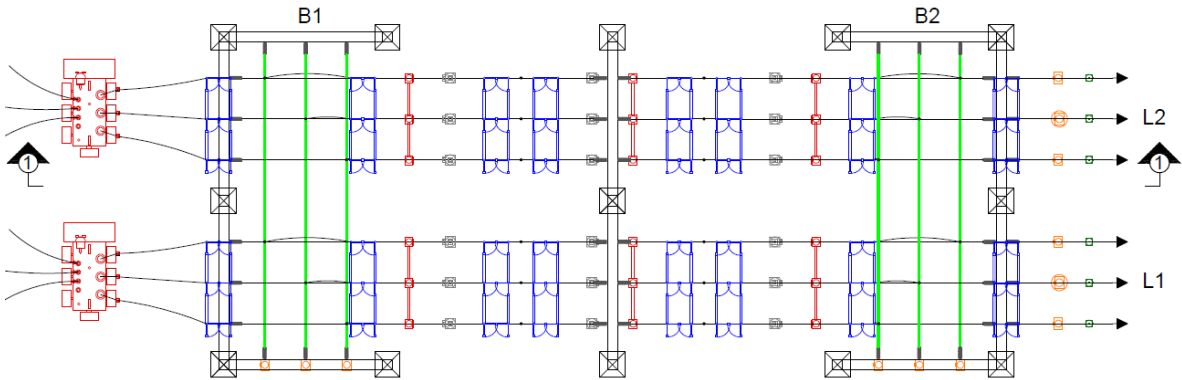
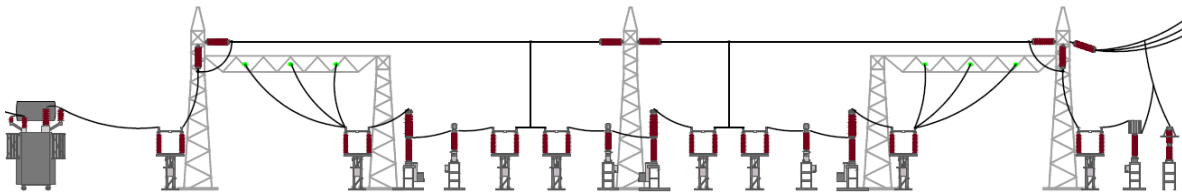


Figura 57. Interruptor y Medio, bahías de transformador y de línea (1-1).



2.11.2 Secuencias de operación

A continuación se registran el estado original de la subestación y las secuencias de operación para conexión y desconexión de las bahías.

Tabla 55. Interruptor y Medio, estado original de la subestación.

Bahía	Estado	
	Abierto	Cerrado
T1, T2		✓
L1, L2		✓

Tabla 56. Interruptor y Medio, secuencias para L1.

L1			
Desconexión			
Elemento	Pasos 1-2	Paso 3	Pasos 4-5
7,8,9	Abrir		Cerrar
10		Abrir	
11,12,13	Abrir		Cerrar
Conexión			
7,8,9	Abrir		Cerrar
10		Cerrar	
11,12,13	Abrir		Cerrar
Nota: El orden en los pasos 1-2 y 4-5, es indiferente. Es decir, hay 4 secuencias posibles.			

Tabla 57. Interruptor y Medio, secuencias para T1.

T1						
Desconexión						
BT			AT			
Elemento	Secuencia		Elemento	Secuencia		
	Paso 1	Paso 2		Pasos 1-2	Paso 3	Pasos 4-5
1		Abrir	4,5,6	Abrir		Cerrar
			3		Abrir	
2	Abrir		7,8,9	Abrir		Cerrar
Conexión						
1	Cerrar		4,5,6	Abrir		Cerrar
			3		Cerrar	
2		Cerrar	7,8,9	Abrir		Cerrar
Notas: -Para el transformador: El orden en las secuencias de conexión o desconexión de las bahías AT y BT, es indiferente. -Para la bahía de AT: El orden en los pasos 1-2 y 4-5, es indiferente. Es decir, hay 4 secuencias posibles.						

Los elementos disponibles para realizar mantenimiento son:

- Transformador
- Elemento 5
- Barraje 2

Las secuencias de operación para el mantenimiento del elemento 5 y el barraje 2 están registradas en las Tablas 58 y 59.

Tabla 58. Interruptor y Medio, secuencias para elemento 5.

Elemento 5		
Desconexión		
Elemento	Paso 1	Paso 2
4,6		Abrir
5	Abrir	
Conexión		
4,6	Cerrar	
5		Cerrar

Tabla 59. Interruptor y Medio, secuencias para el barraje 2.

Barraje 2								
Desconexión								
Elemento	Secuencia 1				Secuencia 2			
	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4
11,13		Abrir						Abrir
12	Abrir						Abrir	
24,26				Abrir		Abrir		
25			Abrir		Abrir			
Conexión								
11,13	Cerrar						Cerrar	
12		Cerrar						Cerrar
24,26			Cerrar		Cerrar			
25				Cerrar		Cerrar		
Nota: -Hay 2 secuencias posibles para desconexión y conexión del barraje.								

CAPÍTULO TRES

Diseño e implementación de SUBVIRT

3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE SUBVIRT

La elaboración de cualquier producto de software requiere varias fases de desarrollo para lograr una mejor calidad y una mayor satisfacción de los usuarios¹⁵. Para la construcción de SUBVIRT, se tuvo en cuenta diseñar una herramienta multimedia que contara con una interfaz sencilla e intuitiva. Fue necesario recurrir a diferentes programas computacionales como Adobe Flash CS4, Autodesk 3ds Max 2012 y Unity 3.5.0.

En este capítulo se mostrará los aspectos más importantes de las fases de diseño, además se justificará el uso y el nivel de intervención de los programas computacionales ya mencionados y por último se describirá el funcionamiento de SUBVIRT.

3.1 ELEMENTOS RELEVANTES DE DISEÑO

3.1.1 Descripción del problema

En esta fase se establecen los objetivos y el contenido temático de la herramienta multimedia, además se realiza un perfil de los potenciales usuarios.

3.1.1.1 Objetivo general

Implementar un sistema interactivo en un software de desarrollo gráfico o de animación para presentar los esquemas y la disposición física de subestaciones eléctricas.

¹⁵ VALENCIA, María Eugenia. Un método de desarrollo de aplicaciones educativas hipermedia. En: Congreso Colombia de Informática Educativa (4:1-4, Abril, 1998, Manizales, Colombia) Grupo de Investigación y Desarrollo de Software Educativo Universidad del Valle, Cali, Colombia.

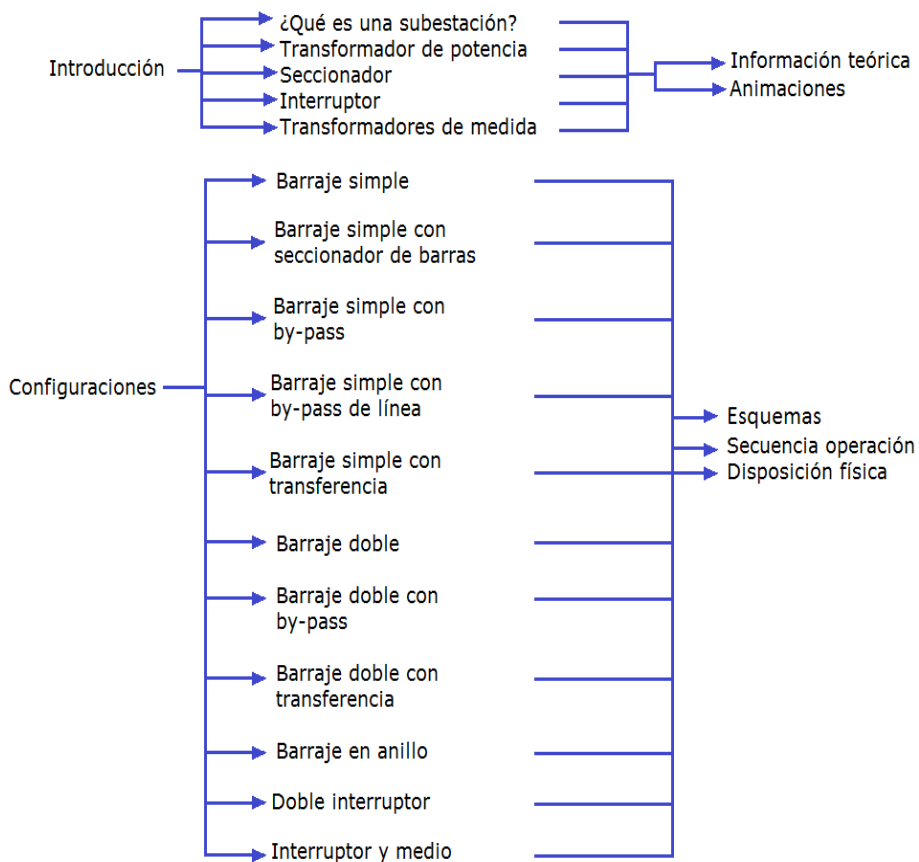
3.1.1.2 Objetivos específicos

- ✓ Desarrollar un sistema gráfico para conocer las diferentes configuraciones de subestaciones eléctricas y sus secuencias de operación.
- ✓ Presentar los tipos de disposición física, utilizados generalmente en subestaciones eléctricas de 115 kV.

3.1.1.3 Malla de temas y subtemas

Es un esquema que muestra el contenido temático que contendrá el software, con el objetivo de facilitar el diseño y la selección de información. Este se observa en la Figura 58.

Figura 58. Malla de temas y subtemas.



3.1.1.4 Perfil de usuario

SUBVIRT 1.0 va dirigida principalmente a profesores y estudiantes de ingeniería eléctrica o a las personas interesadas en ampliar sus conocimientos sobre subestaciones eléctricas.

3.1.2 Definición de requerimientos

3.1.2.1 Requerimientos funcionales

Son las características que se espera encontrar en el software para garantizar que se reúnen las condiciones necesarias para su utilización. En este sentido SUBVIRT 1.0 contará con:

- ✓ Indicador para observar en que opción se encuentra el usuario.
- ✓ Simulaciones de secuencias de operación para todas las configuraciones de las subestaciones eléctricas presentadas en la aplicación.
- ✓ Entorno virtual donde se pueda observar en tres dimensiones (3D) la disposición física de las principales subestaciones de 115 kV.
- ✓ Navegación libre, es decir, no debe presentar los temas secuencialmente.

3.1.2.2 Requerimientos no funcionales

Requerimientos de equipo y software para el desarrollo y la operación del software.

- **Herramientas de autor.** El software fue desarrollado con los siguientes programas:

Adobe Flash CS4. Es un programa para creación de animaciones y contenido interactivo multimedia de gran impacto visual, que permite la creación de modo fácil y rápido todo tipo de animaciones. Además sus desarrolladores están apostando muy fuerte por ActionScript, el lenguaje de programación Flash. Este es un lenguaje de programación orientado a objetos, que se ha diseñado con el fin de

crear aplicaciones complejas con conjuntos de datos voluminosos y bases de código reutilizables. El software SUBVIRT fue desarrollado con ActionScript 3.

Autodesk 3ds Max 2012. Es un programa de modelado tridimensional asistido por computador, que cuenta con una cantidad muy amplia de herramientas que permiten el desarrollo de cualquier tipo de modelo 3D, logrando niveles de complejidad bastante amplios. Es muy utilizado por los desarrolladores de videojuegos, también en el desarrollo de proyectos de animación como películas, efectos especiales y en arquitectura.

Unity 3.5.0. Es una herramienta empleada para la creación de videojuegos u otro tipo de contenido interactivo tales como visualizaciones arquitectónicas y animaciones en tiempo real. A diferencia de otros motores de videojuegos, su principal ventaja radica en el entorno gráfico intuitivo que combina el aspecto de programación y el diseño eficientemente, además de contar con un gran soporte multiplataforma que va desde plataformas Windows, Android, consolas de última generación como Xbox 360, PS3 y Nintendo Wii hasta dispositivos electrónicos como el iPhone y el iPad.

Para hacer uso de los programas Adobe Flash CS4 y Autodesk 3ds Max 2012, se contó con la autorización del uso de las salas de sistemas del área de piso informático de la facultad de artes integradas de la Universidad del Valle, en la cual estos programas están debidamente licenciados. Para el uso de Unity 3.5.0, se recurrió a su versión gratuita disponible en la página del producto <http://unity3d.com/>.

- **Requerimientos computacionales.** Es necesario establecer los requerimientos computacionales tanto para desarrollo como para ejecución.

Para la elaboración de SUBVIRT los recursos computacionales fueron:

- ✓ Procesador con doble núcleo de 2.8 GHz
- ✓ Memoria RAM: 2 GB
- ✓ Sistema operativo Windows 7
- ✓ Tarjeta de video con 256 MB de memoria

Para la correcta ejecución de SUBVIRT1.0 es necesario:

- ✓ Procesador de 2.8 GHz o superior
- ✓ Memoria RAM: 1.25 GB o superior
- ✓ Espacio disponible en el disco duro: 1,6 GB
- ✓ Resolución mínima de 1024 x 720 píxeles
- ✓ Tarjeta de video con 128 MB de memoria o superior
- ✓ Flash Player 9 o superior, disponible en: <http://get.adobe.com/es/flashplayer/>
- ✓ Adobe Reader, disponible en: <http://get.adobe.com/es/reader/>
- ✓ Navegador Web recomendado: Google Chrome, disponible en: <https://www.google.com/chrome>
- ✓ Sistema operativo Windows XP / Vista / 7.

3.1.3 Diseño computacional

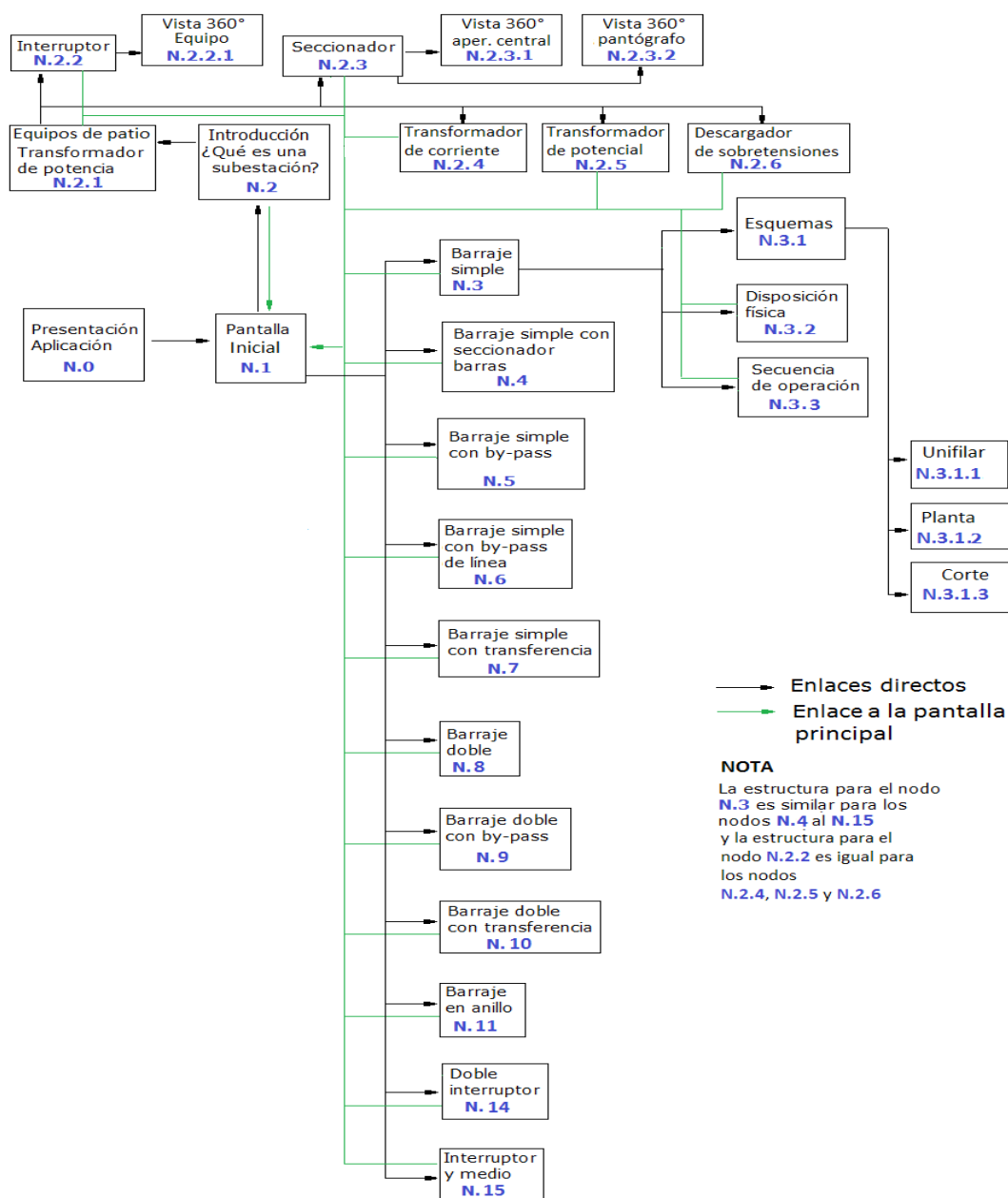
En esta fase se produce la estructura general de SUBVIRT y los diseños de los formatos patrón de las unidades de información con el fin de estandarizar la interfaz de usuario.

3.1.3.1 Estructura general de SUBVIRT 1.0

Aquí se especifica la estructura de navegación entre los diferentes nodos de información del software los cuales se identifican con la letra N y su respectivo índice. Un nodo de información hace referencia a una página o ventana del

software, la cual puede estar constituida por un conjunto de ítems de información multimedia y por un conjunto de botones, cada uno de éstos asociados con un enlace. Los ítems de información multimedia pueden ser: texto, sonido, gráficas, imágenes, un programa ejecutable o un video. En la Figura 59 se muestra la estructura de navegación de SUBVIRT.

Figura 59. Estructura general de SUBVIRT 1.0.



3.1.3.2 Especificación de los formatos patrón

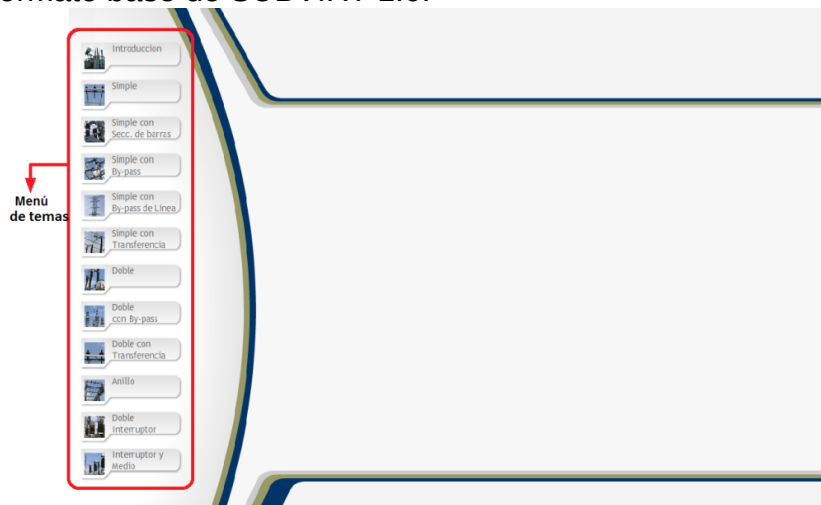
Aquí se establecen los formatos de diseño que tendrá cada nodo de información en la herramienta multimedia. En esta etapa del diseño, se recurrió a la página <http://www.flashmo.com/>, donde se encuentran plantillas de uso libre para presentaciones web. Después de seleccionar una plantilla base, se adecuó a las necesidades del software.

Entre las modificaciones más importantes realizadas se encuentran:

- ✓ Cambio de la navegación entre nodos de información, pues esta se realizaba con hojas de estilo en código XML por fuera del archivo principal, lo que aumentaba la cantidad de archivos del software.
- ✓ Adición de botones al menú y reducción del código.
- ✓ Adición de un video de introducción a la herramienta.

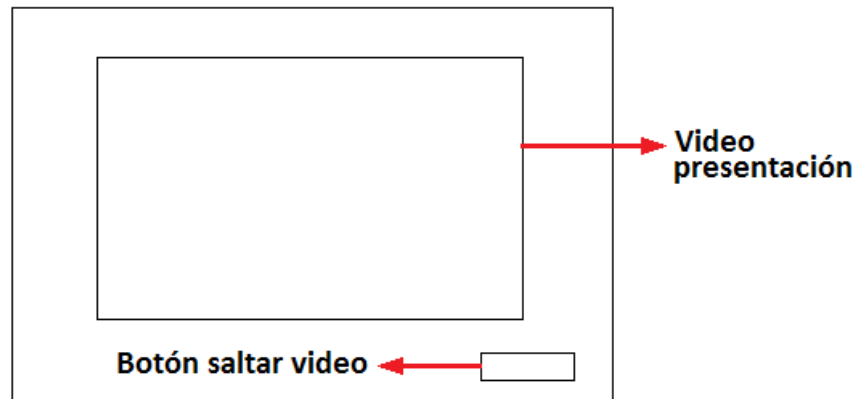
El formato base o la plantilla mostrada en la Figura 60, se encontrará presente durante la mayor parte del recorrido del software, esto con el fin de facilitar la navegación. Debido a que todos los formatos fueron elaborados durante las fases de diseño, sólo contienen los temas planteados en la malla de temas y éstos pueden presentar pequeñas variaciones respecto a los formatos finales.

Figura 60. Formato base de SUBVIRT 1.0.



El formato para la presentación del software, nodo N.0, se puede ver en la Figura 61.

Figura 61. Formato presentación de la aplicación nodo N.0.



De la Figura 62 a la 67, se muestran los formatos de los diferentes nodos de información.

Figura 62. Formato pantalla inicial de la aplicación, nodo N.1.

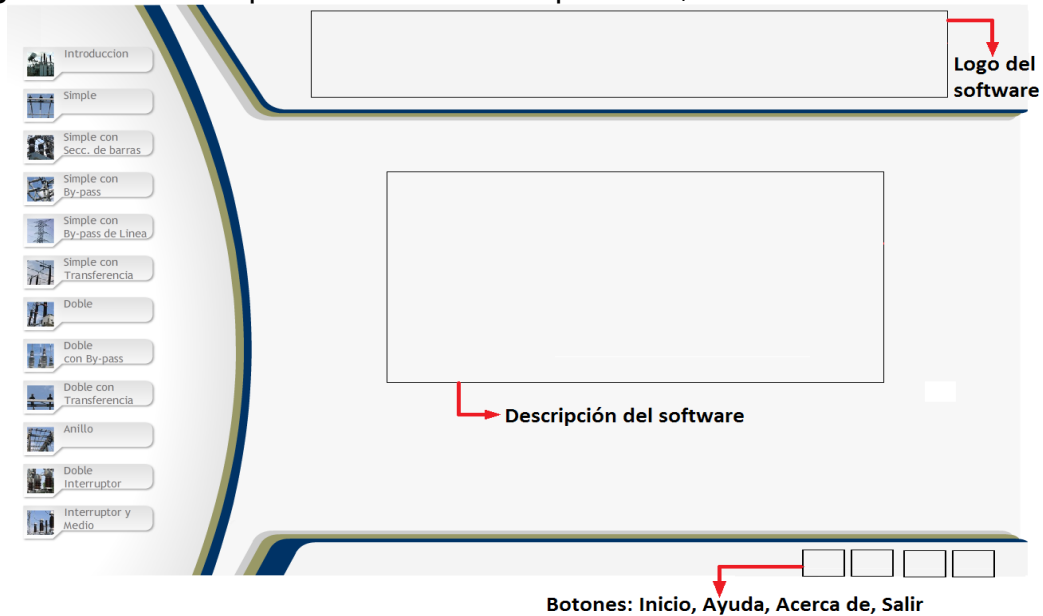


Figura 63. Formato Introducción, nodo N.2.

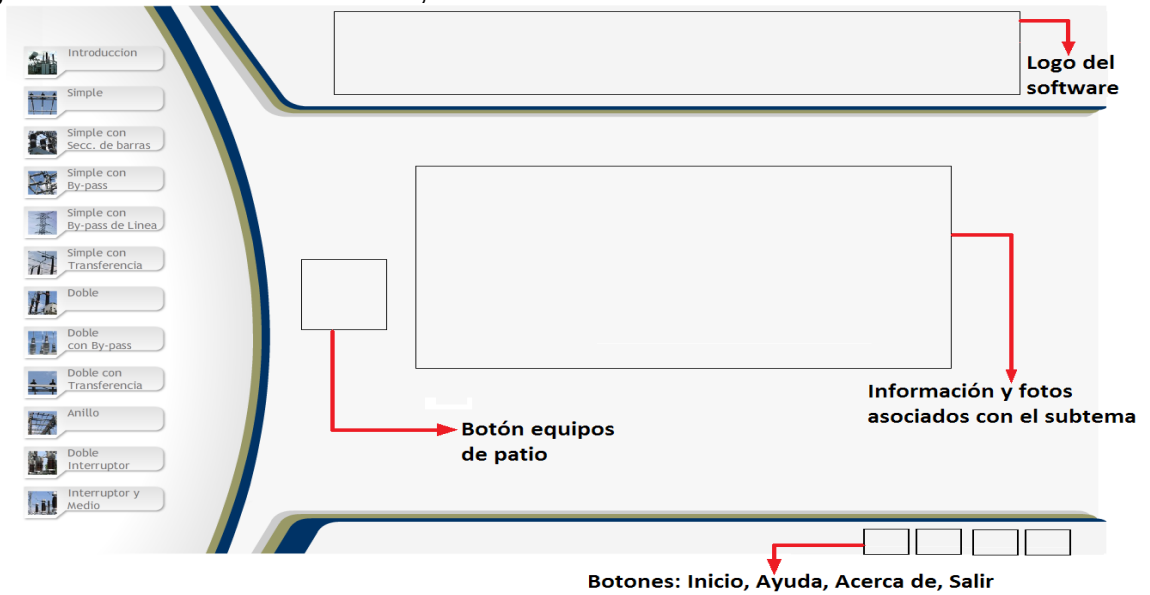


Figura 64. Formato Equipos de Patio, nodos N.2.1 al N. 2.6.

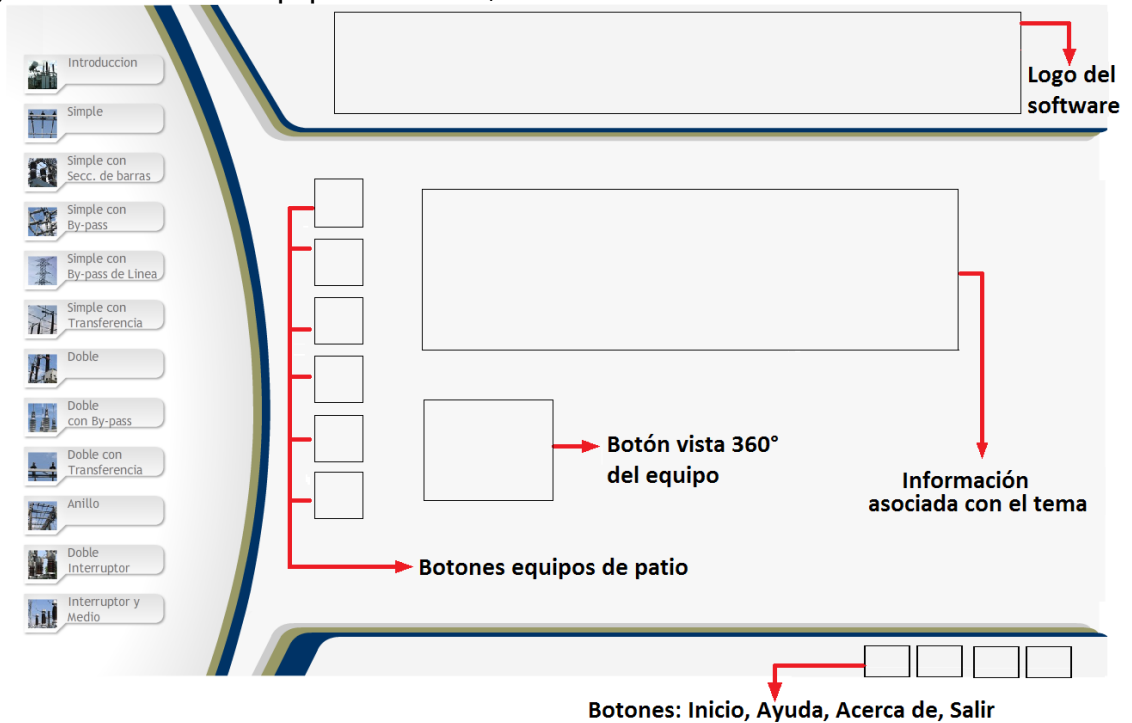


Figura 65. Formato Vista 360° Equipo, nodos N.2.2.1, N. 2.3.1 y N. 2.3.2.

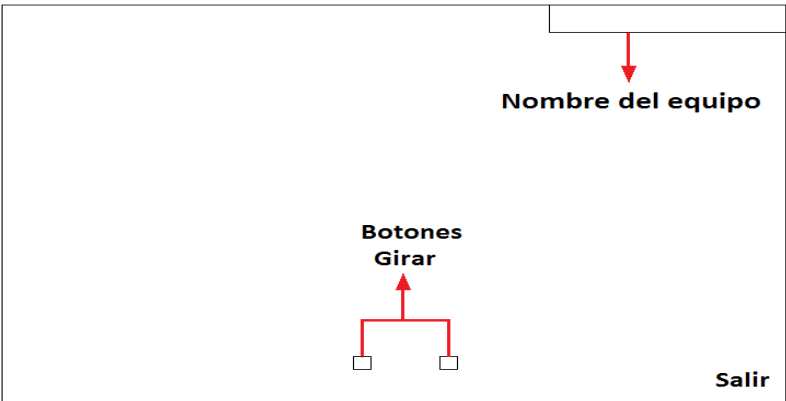


Figura 66. Formato Barraje Simple, nodo N.3.

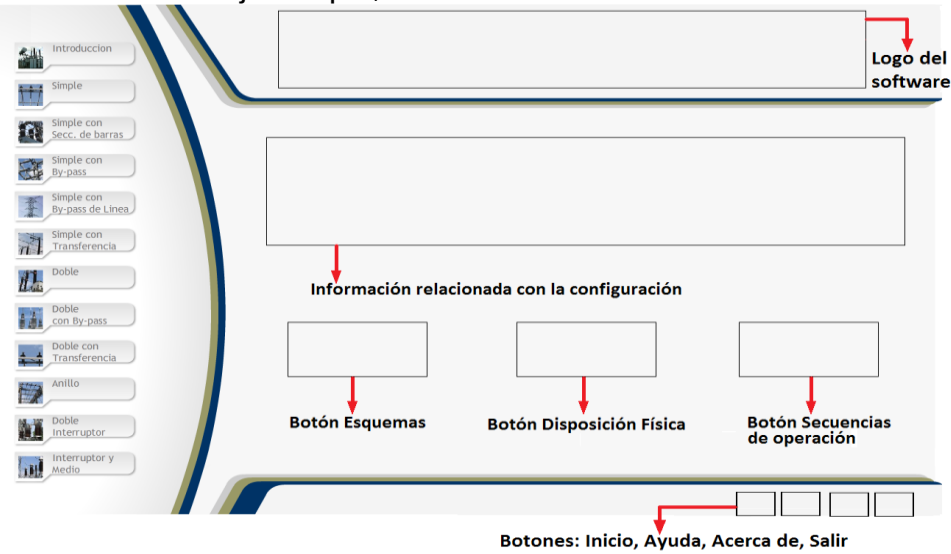
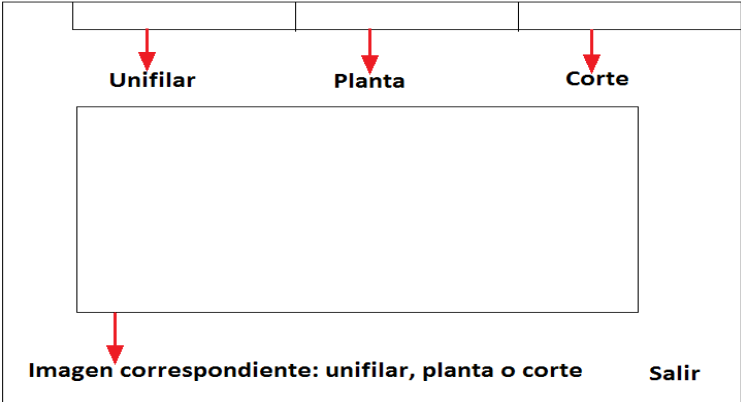


Figura 67. Formato Esquemas, nodo N.3.1.

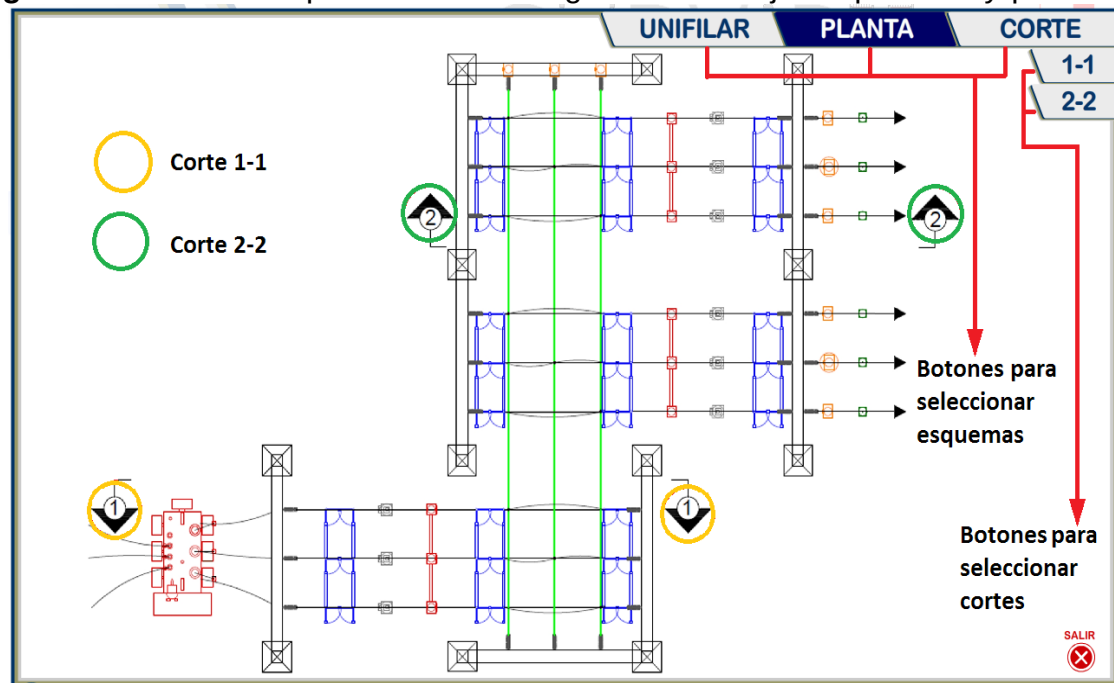


Los nodos N.3.1 (Esquemas) N.3.2 (Disposición física) y N.3.3 (Secuencias de operación) se mostrarán en profundidad en las secciones 3.2, 3.3 y 3.4 de este capítulo.

3.2 DISEÑO DE LA VENTANA ESQUEMAS

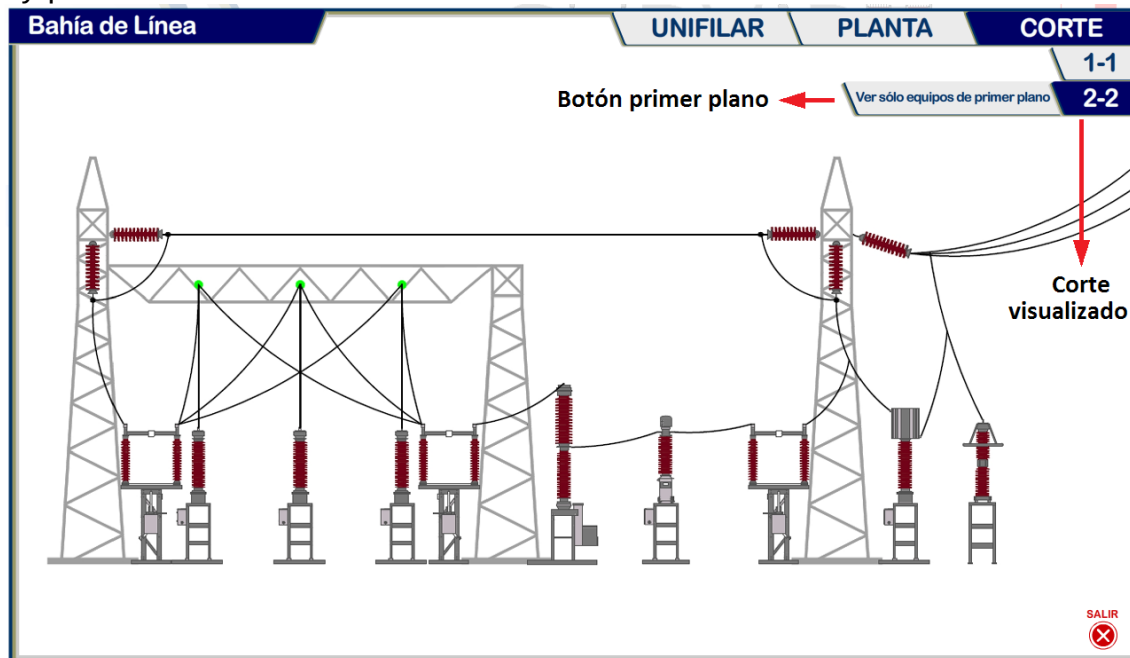
La ventana Esquemas contiene tres botones en la parte superior, como se muestra en la Figura 68. Estos permiten visualizar los diagramas: unifilar, planta y cortes.

Figura 68. Ventana esquemas de la configuración barraje simple con by-pass.



En la Figura 69, se observa la vista CORTE 2-2 señalada en la vista en planta de la Figura 68. En la parte izquierda de la ventana se encuentra el Botón **Ver sólo equipos de primer plano**, el cual oculta los equipos que no hacen parte del primer plano.

Figura 69. Ventana esquemas CORTE 2-2 de la configuración barraje simple con by-pass.



3.3 CREACIÓN DE LAS SECUENCIAS DE OPERACIÓN

Al hacer clic en el **Botón Secuencias de operación** (Figura 66), se abre una ventana, la cual contiene un módulo virtual que simula un tablero de mando de una subestación real. A continuación se muestran los aspectos más importantes en su realización.

3.3.1 Diseño del entorno gráfico

Como su nombre lo indica, SUBVIRT, hace referencia a subestaciones virtuales, razón por la cual el entorno de las secuencias de operaciones se diseñó lo más cercano a la realidad. En una subestación real, las secuencias de operación se pueden realizar sobre tableros de mando, los cuales poseen esquemas y dispositivos de control que permiten la apertura y cierre de interruptores y seccionadores. Su estado, abierto o cerrado, puede ser visualizado por medio de

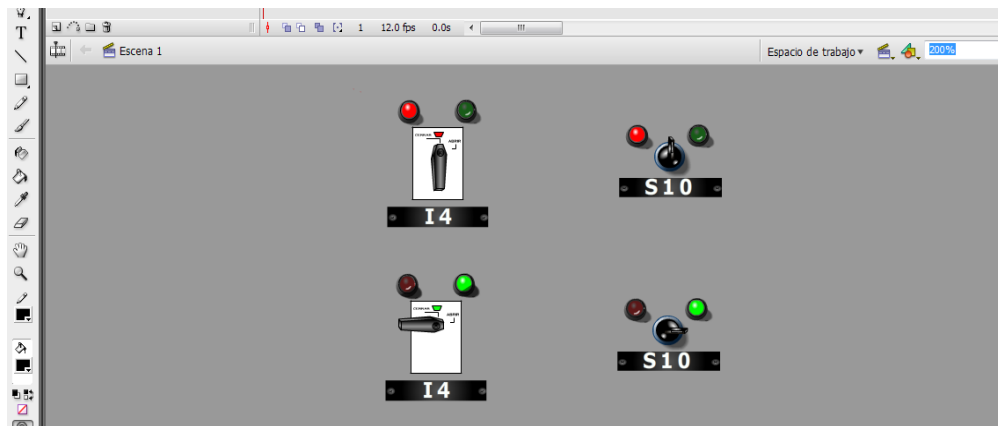
luces pilotos o en una pantalla. En la Figura 70, se puede observar un tablero de mando típico de una subestación.

Figura 70. Tablero de mando típico.



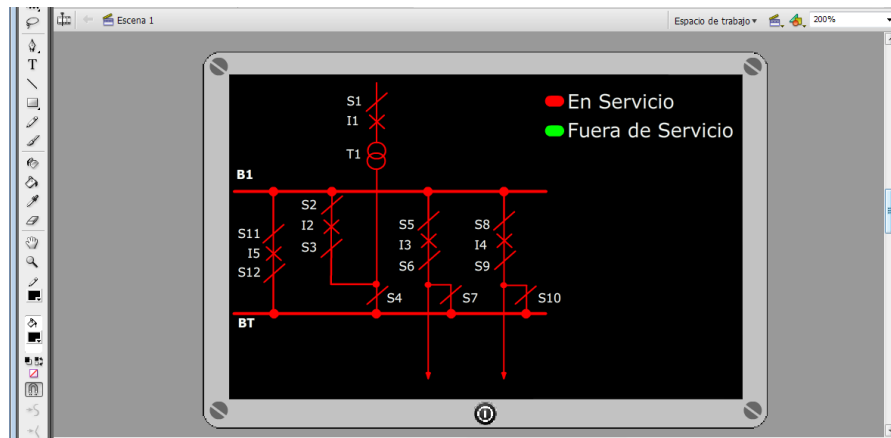
En la Figura 71, se pueden apreciar los dispositivos de control diseñados en SUBVIRT para el interruptor (I4) y el seccionador (S10), con sus dos estados: cerrado (luz piloto rojo) y abierto (luz piloto verde).

Figura 71. Diseño elementos de mando.



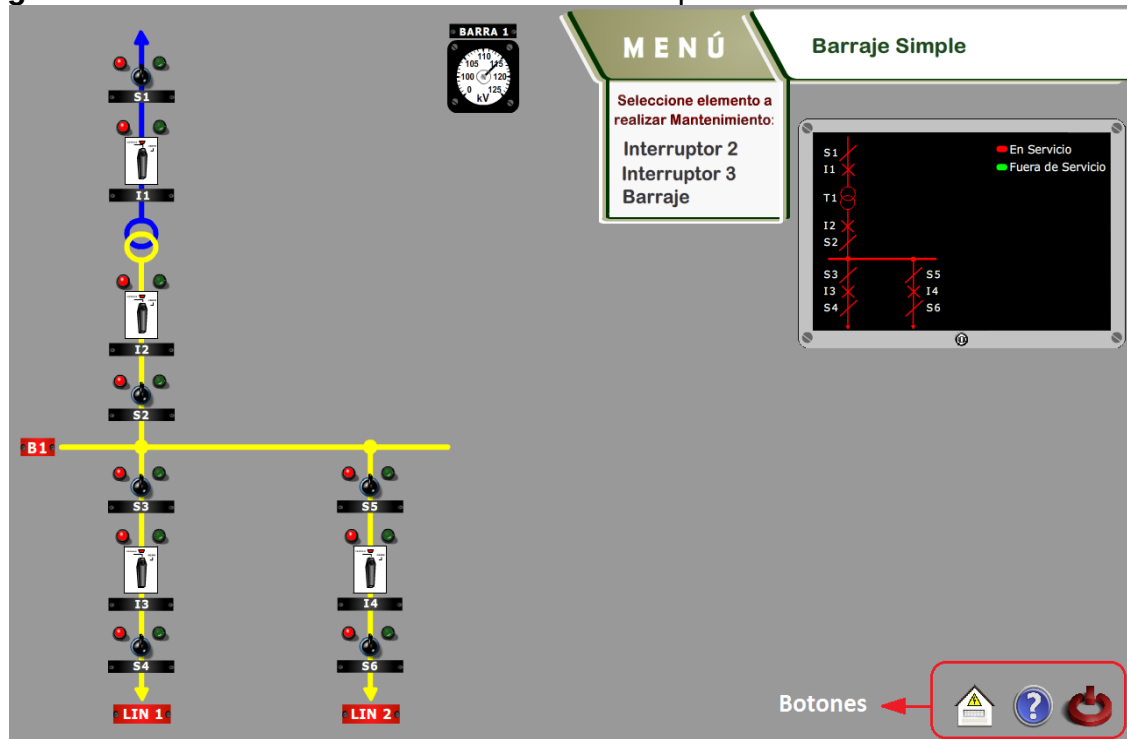
Se diseñó un monitor, que por medio de colores (rojo y verde) y un diagrama unifilar, muestra el estado actual de la subestación. Esto se puede observar en la Figura 72.

Figura 72. Diseño de monitor de estado de la subestación.



La pantalla inicial de la Ventana de Secuencias de Operación se puede observar en la Figura 73, donde se muestra el tablero de mando con su respectivo voltímetro de barras y el menú, en el cual se selecciona el elemento a realizar mantenimiento para proceder a realizar la secuencia de operación. En la parte derecha se tiene el monitor de estado de la subestación y en la esquina inferior derecha se encuentran unos botones, los cuales se describirán más adelante (sección 3.5.2).

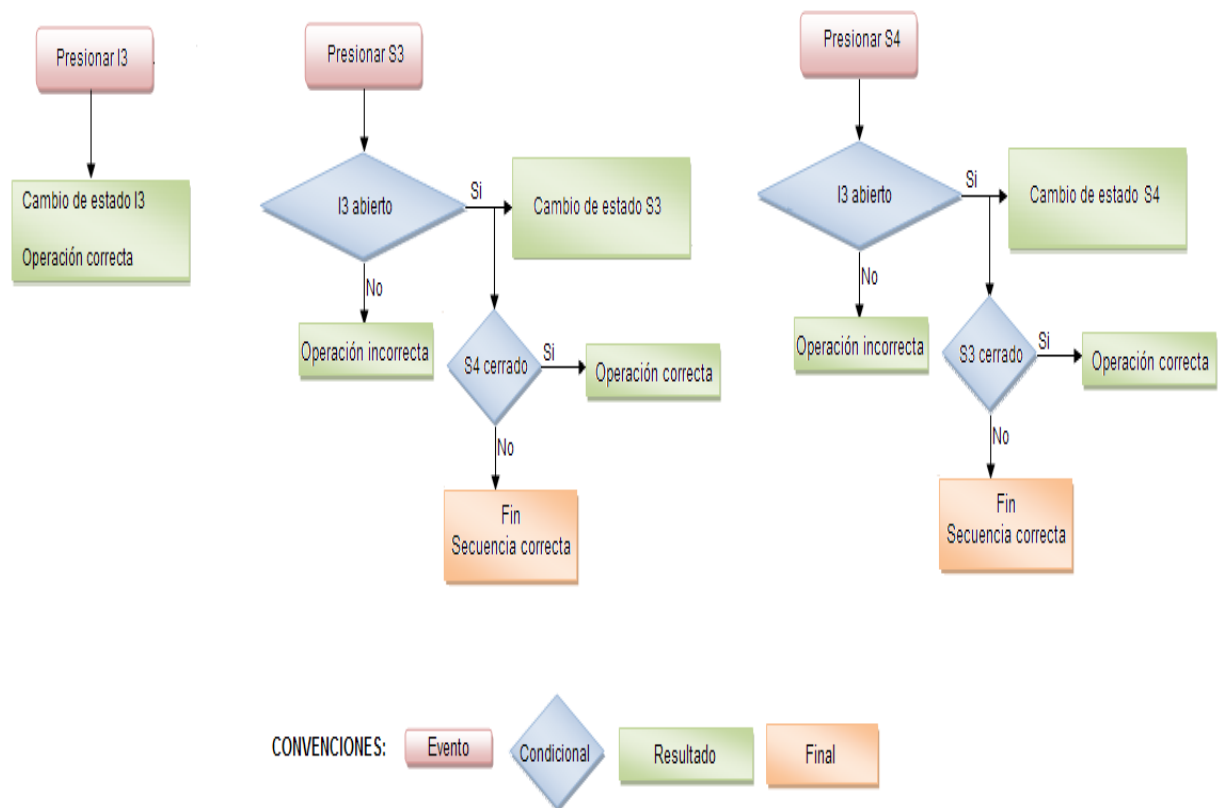
Figura 73. Pantalla inicial de las secuencias de operación.



3.3.2 Implementación de las secuencias

En el capítulo 2, se presentaron las 5 reglas básicas para la realización correcta de las secuencias de operación, en este ítem se muestra cómo se realiza en cada una de las 11 configuraciones disponibles en SUBVIRT.

Todas las secuencias de operación mostradas en el capítulo 2 se implementaron con el lenguaje de programación ActionScript 3.0 de Flash. En la Figura 74, se muestra el algoritmo implementado para la desconexión del Interruptor I3, que corresponde al Elemento 6 de la Tabla 5. El estado inicial de la subestación es con todos sus elementos en servicio.

Figura 74. Algoritmo para la desconexión de I3.

En el código, se empleó la función lógica condicional *if*, para evaluar el estado de los interruptores y seccionadores, que muestra un mensaje de error o de aprobación de la maniobra, según las condiciones evaluadas. Para esto fue necesario que los equipos del tablero de mando contaran con una variable lógica para la verificación de su estado, de esta manera las variables *In3*, *Se3* y *Se4* corresponden a los elementos I3, S3 y S4 de la Figura 73 y sus valores son *true* (si están cerrados o en servicio) y *false* (si están abiertos o fuera de servicio).

A continuación se muestra el código de programación del interruptor 3 (I3) y el seccionador 3 (S3), para la secuencia de desconexión de I3 de la Figura 73. El código de programación del seccionador 4 es similar al del seccionador 3.

Código de programación de I3:

```
function OI3(Event:MouseEvent): void
{
    if(Se3==true && Se4==true && In3==true)
    {
        BtnI3.gotoAndPlay("abierto");
        In3=false;
        IU3.gotoAndStop("Off");
        OK.gotoAndPlay("play");
    }
    if(In3==true)
    {
        X=X+1;
        FAIL.gotoAndPlay("play");
    }
}
```

Código de programación de S3

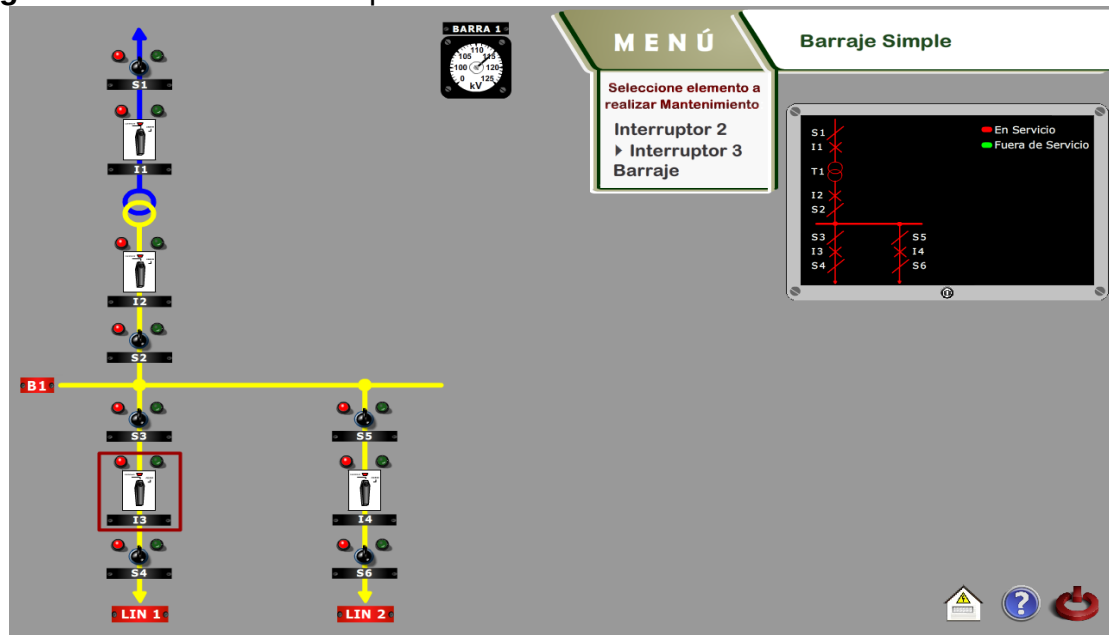
```
function OS3(Event:MouseEvent): void
{
    if(In3==false && Se3==true)
    {
        BtnS3.gotoAndPlay("abierto");
        Se3=false;
        SU3.gotoAndStop("Off");
        LU8.gotoAndStop("Off");
        if (Se4==true)
        {
            OK.gotoAndPlay("play");
        }
        if (Se4==false)
        {
            SECUENCIAOK.gotoAndPlay("play");
            SECUENCIAOK.Correctas.text="Operaciones Incorrectas: "+X;
            gotoAndStop("27");
        }
    }

    if(In3==true)
    {
        X=X+1;
        SECCIONADOR.gotoAndPlay("play");
        gotoAndStop("27");
    }
}
```

3.3.3 Ejemplo secuencia de operación

A continuación se mostrará el proceso de la secuencia de operación para la desconexión del interruptor I3. En la Figura 75, se muestra la selección del Interruptor 3 (I3) del menú, este se identifica con un recuadro rojo en los elementos del tablero.

Figura 75. Selección interruptor I3.



Después de seleccionar el interruptor I3, en la parte superior aparece la secuencia que se va a realizar y en el monitor se puede observar el estado inicial de la subestación. Lo anterior se puede observar en la Figura 76.

De acuerdo a las Tablas 3 y 5, al hacer clic sobre el interruptor I3 se realiza una operación correcta, su estado cambia a **abierto** y SUBVIRT aprueba la operación (ver figura 76). Si se hace clic sobre el seccionador S3 en vez del interruptor I3, se realizaría una mala operación y SUBVIRT lo advierte con un mensaje (ver figura 77).

Figura 76. Aprobación de la desconexión del interruptor I3.

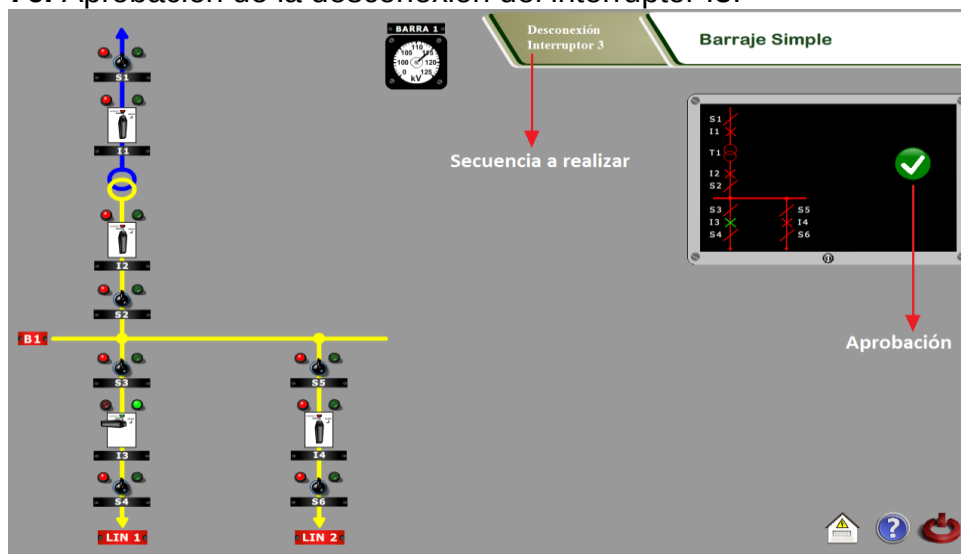
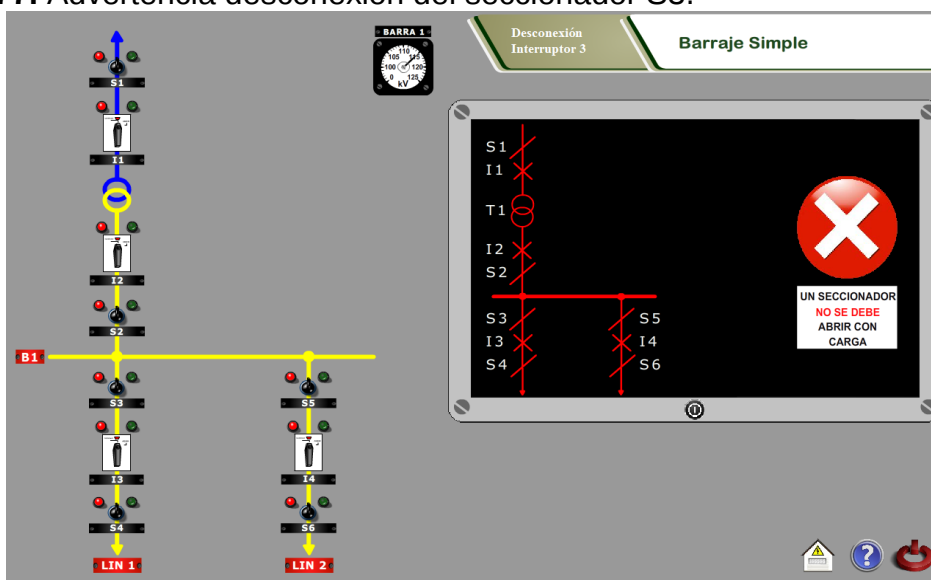
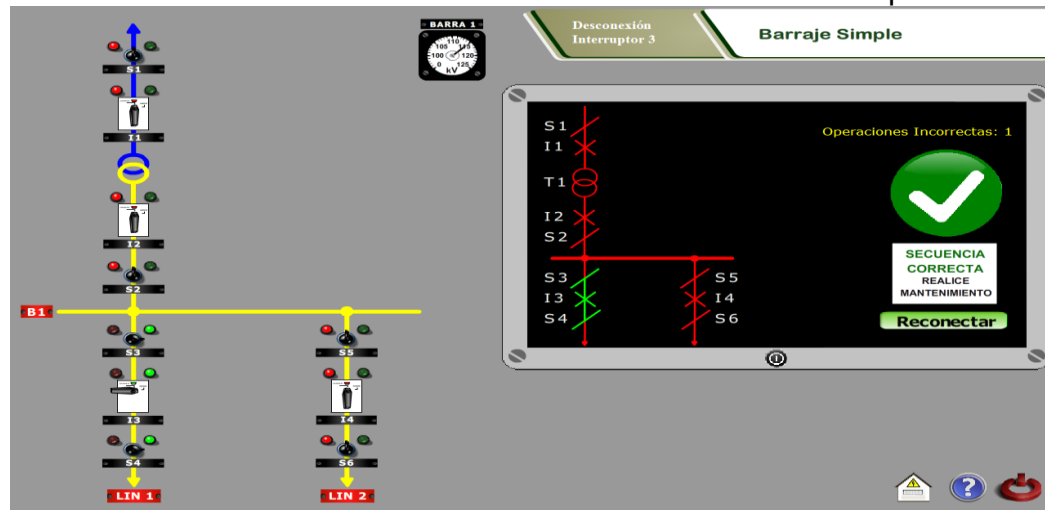


Figura 77. Advertencia desconexión del seccionador S3.



Después de abrir I3, se abren los seccionadores S3 y S4, en cualquier orden, con esto se finaliza la secuencia y aparece un mensaje como se muestra en la Figura 78. Aquí se observa el número de operaciones incorrectas. Para hacer la reconexión se debe hacer clic en el botón **Reconectar** y seguir los pasos descritos en las Tablas 3 y 5.

Figura 78. Finalización de la secuencia de desconexión del interruptor I3.



3.4 CREACIÓN DE LA DISPOSICIÓN FÍSICA 3D

3.4.1 Diseño de modelos 3D

Los equipos 3D fueron creados en el programa 3ds Max con medidas reales para un nivel de tensión de 115 kV, dadas en catálogos de fabricantes¹⁶¹⁷¹⁸. El programa 3ds Max contiene una librería de objetos predeterminados (*Standard Primitives* y *Extended Primitives*) y una herramienta de modificadores (*Modifiers*), los cuales permiten cambiar tanto la geometría de los objetos como sus propiedades. A continuación se describe el proceso de diseño de algunos de los modelos 3D.

¹⁶ <http://www.energy.siemens.com/hq/en/power-transmission/high-voltage-products/>

¹⁷ <http://www.abb.com/ProductGuide/Alphabetical.aspx>

¹⁸ <http://www.trenchgroup.com/Products-Solutions/Product-Portfolio>

3.4.1.1 Aisladores

Se creó un aislador base mediante el modificador *Lathe*, el cual crea un objeto 3D rotando una Figura alrededor de un eje o pivote. En la Figura 79, se observa el aislador 3D originado mediante el modificador *Lathe*. Teniendo construido el aislador base, se escala y se copia tantas veces como sea necesario para formar el conjunto de aisladores de acuerdo al equipo de patio, como se puede observar en la Figura 80.

Figura 79. Construcción del aislador 3D usando el modificador *Lathe*.

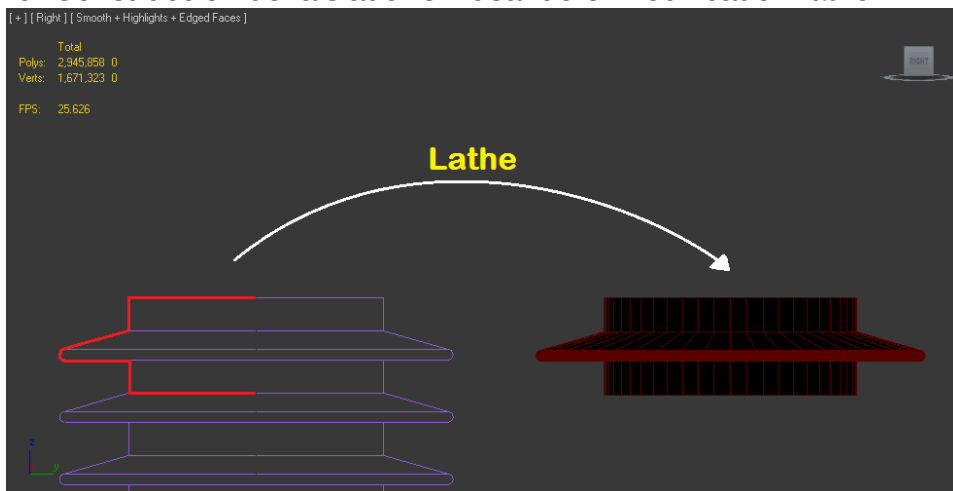
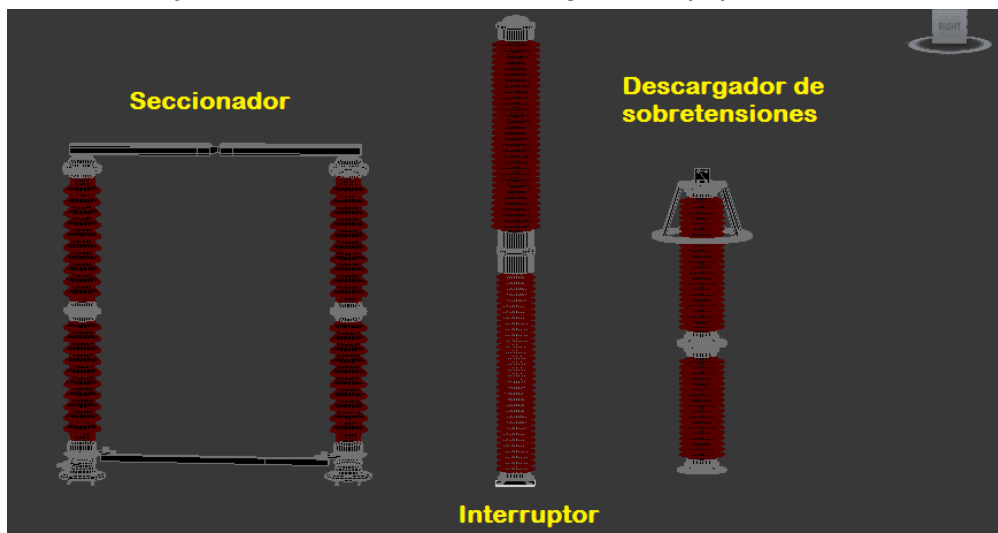


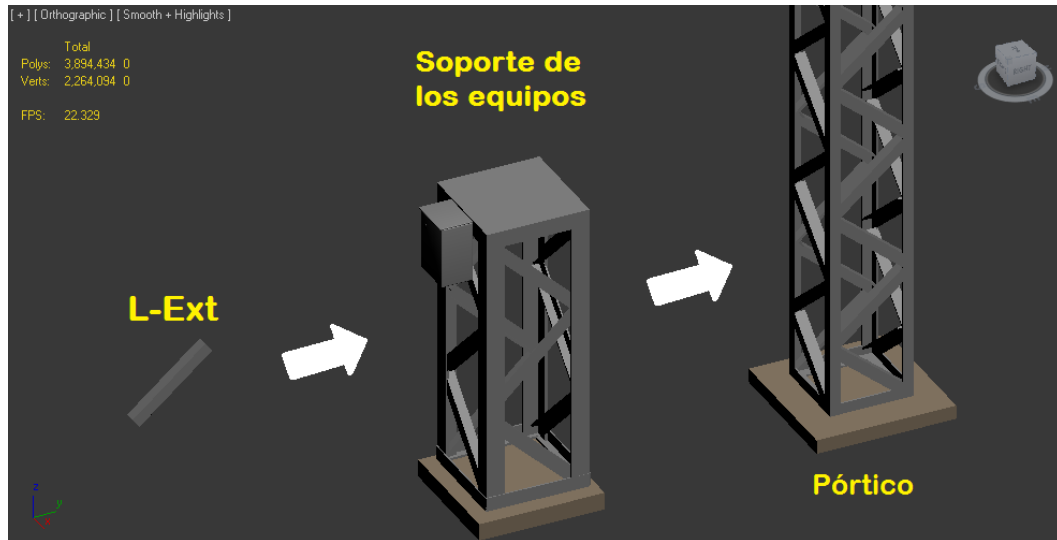
Figura 80. Forma y cantidad de aisladores según el equipo.



3.4.1.2 Celosía

La celosía se construyó mediante un objeto predeterminado de 3ds Max llamado *L-Ext*, el cual crea una extrusión de un objeto en forma de L como se muestra en la Figura 81.

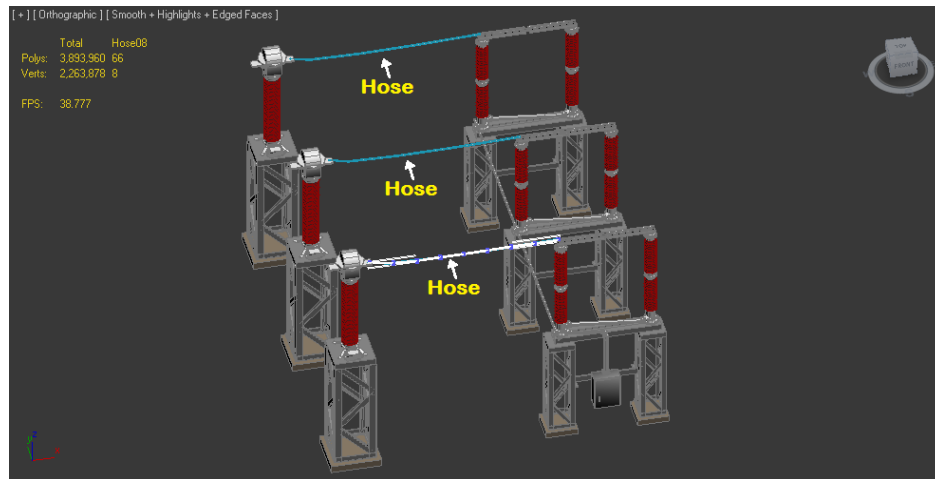
Figura 81. Construcción de la celosía usando *L-Ext*.



3.4.1.3 Conductores

Los conductores se construyeron mediante un objeto predeterminado de 3ds Max llamado *Hose*, el cual crea una manguera entre dos objetos, permitiendo ajustar su diámetro. En la Figura 82, se puede observar las conexiones entre los seccionadores y los transformadores de corriente realizadas con el objeto *Hose*.

Figura 82. Construcción de los conductores usando *Hose*.



3.4.1.4 Equipos de patio

Las demás partes que componen los equipos se realizaron usando los objetos predeterminados de 3ds Max tales como *Box* (caja), *Cone* (cono), *Cylinder* (cilindro), *Line* (línea), *Tube* (tubo), entre otros. Para modificar la geometría, se emplearon modificadores tales como:

- *Edit Poly*: permite modificar distintos niveles del objeto como sus vértices, caras, bordes, polígonos y todo el objeto mismo.
- *Face Extrude*: permite extruir la cara seleccionada del objeto.
- *TurboSmooth*: suaviza la geometría del objeto.

En las Figuras 83, 84, 85, 86, 87 y 88 se observan los equipos de patio creados en 3ds Max.

Figura 83. Transformador 3D.

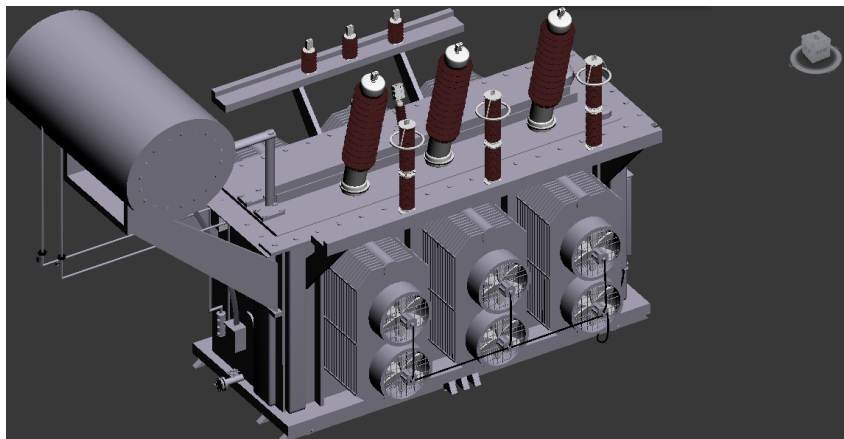


Figura 84. Interruptor 3D.

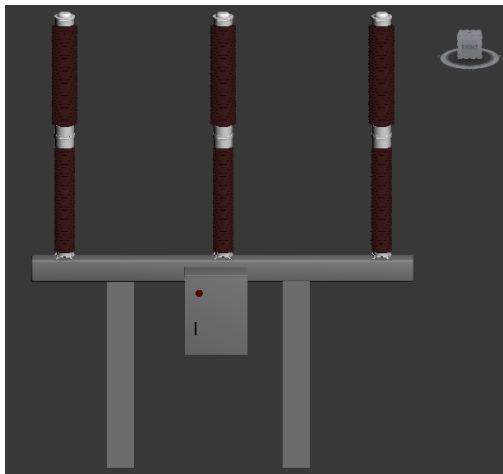


Figura 85. Seccionadores 3D.

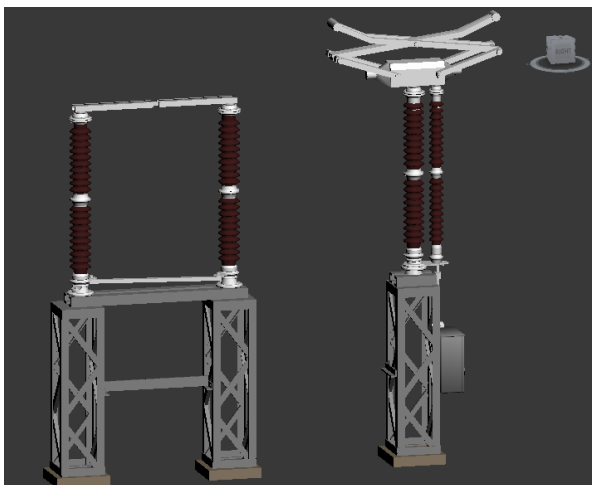


Figura 86. Transformador de Corriente 3D.



Figura 87. Transformador de Potencial y Trampa de Onda 3D.

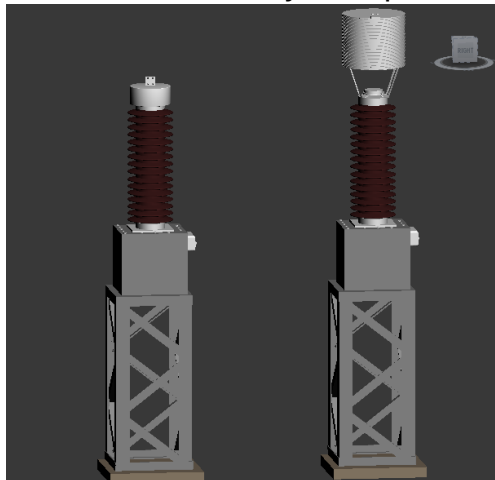


Figura 88. Descargador de Sobretensiones 3D.



3.4.2 Vistas 360°

Después de construir los modelos 3D, se realizó un *Render* (sirve para crear una imagen fija o una animación de la geometría del objeto incluyendo los materiales que se han aplicado, la iluminación y el entorno) para los equipos de patio, con una cámara que hizo un recorrido de 360° alrededor del equipo, como se observa en la Figura 89. El *Render* generó 60 fotos, las cuales se usaron en Flash para crear una animación interactiva de 360°. En la Figura 90, se puede observar algunas fotos del interruptor como resultado del *Render*.

Figura 89. Ajuste de cámara para crear animación de 360°.

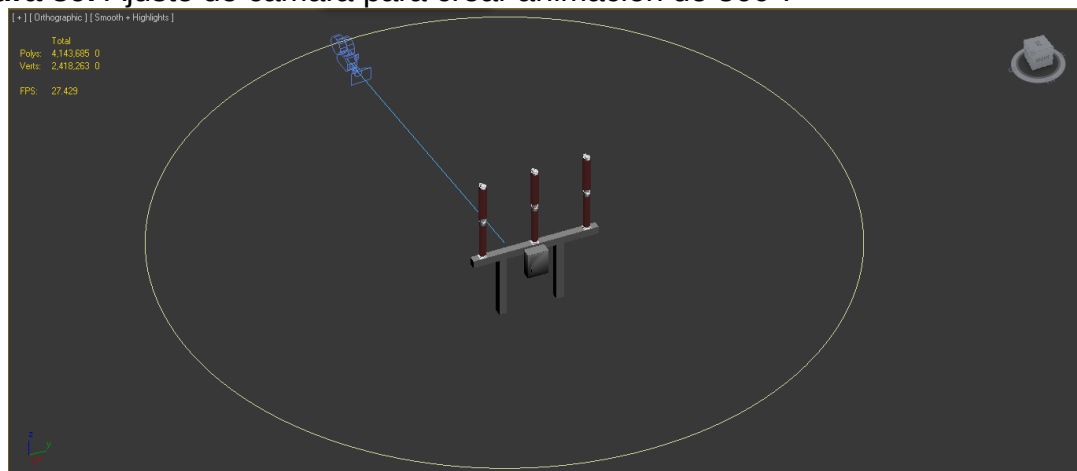


Figura 90. Vistas del interruptor, resultado del *Render*.



3.4.3 Creación de la visita virtual 3D

La visita virtual 3D se realizó en el software Unity 3.5.0 con la versión Libre. A continuación se detalla un poco su proceso de construcción.

A los equipos de patio 3D se les redujo el número de polígonos, es decir, el nivel de detalle de las partes, esto para facilitar la reproducción de la visita virtual en un computador con características mínimas. Con los equipos ya optimizados, se procedió a armar las 11 configuraciones, descritas en el capítulo 2. En la Figura 91, se puede observar la subestación barraje doble en 3ds Max.

Cada archivo de 3ds Max (con extensión *.max*) se exportó a un archivo con extensión *.FBX*, mediante un plugin gratuito proporcionado por Autodesk. Esto con el fin de integrar cada archivo al software Unity para crear la visita virtual de cada subestación.

Figura 91. Subestación Barraje Doble en 3ds Max.



En el software Unity, lo primero que se hizo fue acondicionar el entorno donde iban a estar las 11 subestaciones. Se añadieron luces y se crearon montañas,

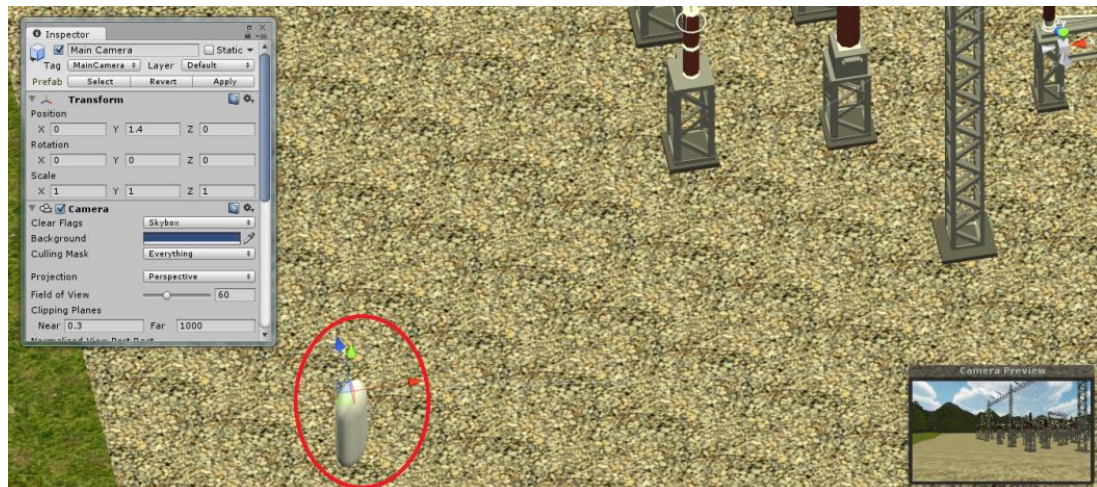
árboles y pasto, como se puede observar en la Figura 92. Posteriormente, se añadió suelo con textura de piedras en el área asignada para cada subestación.

Figura 92. Creación del terreno y del entorno en Unity.



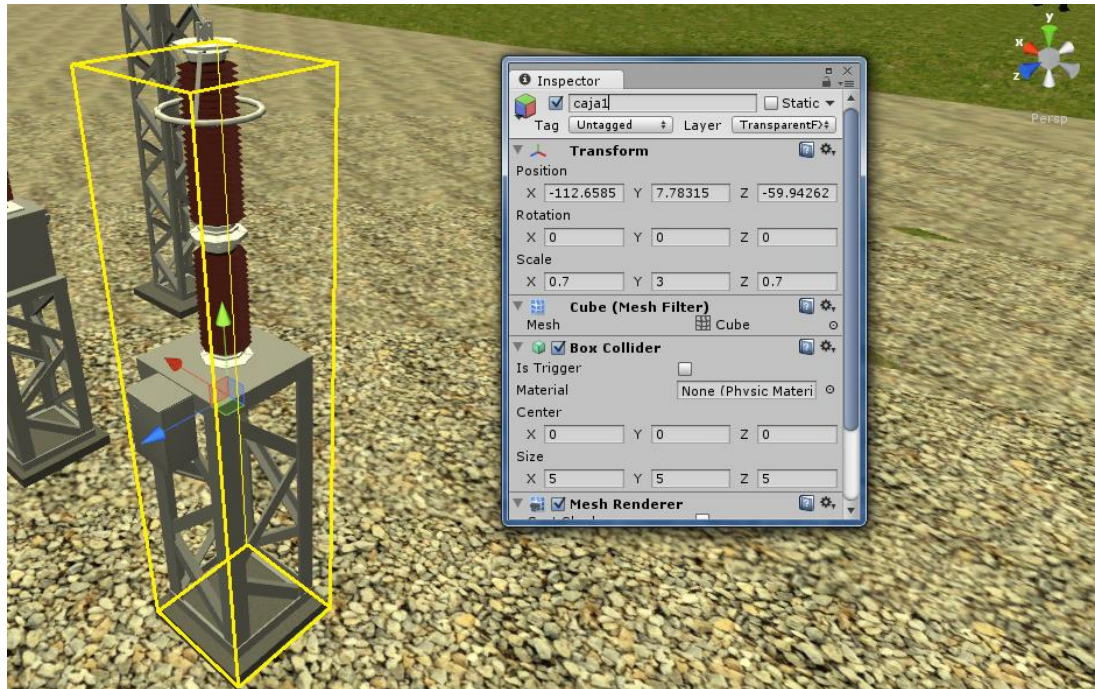
Luego, se añadió la subestación y se creó un personaje en primera persona (*First Person Controller*) para realizar el recorrido virtual. Se ajustó la cámara (la visión del personaje) a una altura de 2 metros sobre el nivel del suelo. También entre los parámetros del personaje se ajustó que éste observara el cielo. La creación del personaje se puede observar en la Figura 93.

Figura 93. Creación de un personaje en primera persona.



Después, se crearon cajas transparentes (*Box Collider*) y se ubicaron en la parte inferior de los objetos de la subestación para generar colisión entre el personaje y éstos. Lo anterior se puede observar en la Figura 94.

Figura 94. Creación de colisiones.



Finalmente, se generó un archivo ejecutable (.exe) de la visita virtual 3D para cada subestación. En las Figuras 95, 96, 97, 98, 99 y 100 se pueden observar imágenes de la visita virtual 3D en la subestación de Barraje Doble. En la sección 3.5.2 de este capítulo, se describirá cómo realizar la visita interactiva.

Figura 95. Subestación Barraje Doble en Unity, ubicación inicial del personaje.



Figura 96. Subestación Barraje Doble en Unity, detalle de las conexiones.

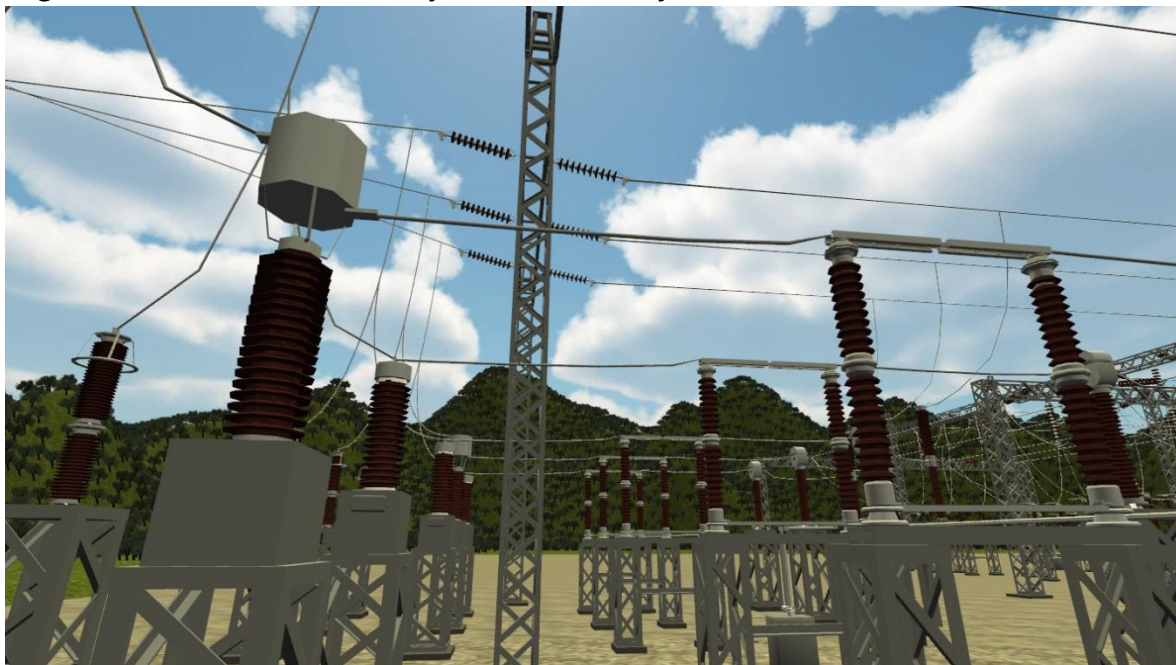


Figura 97. Subestación Barraje Doble en Unity, TP's de barra.

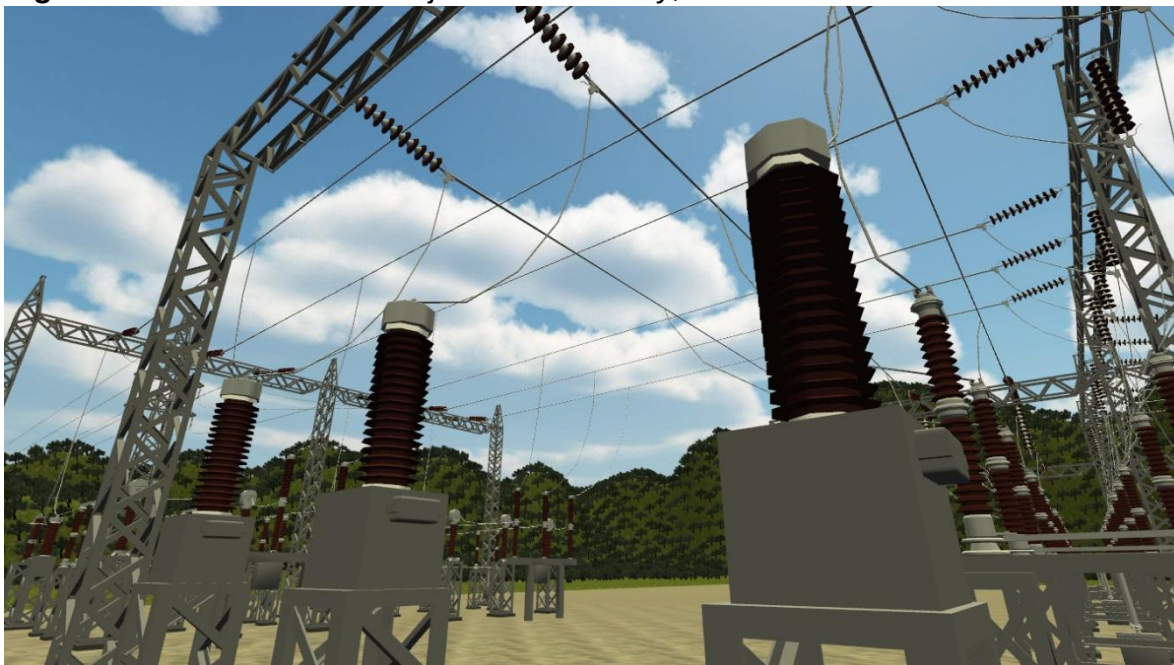


Figura 98. Subestación Barraje Doble en Unity, transformador de potencia.

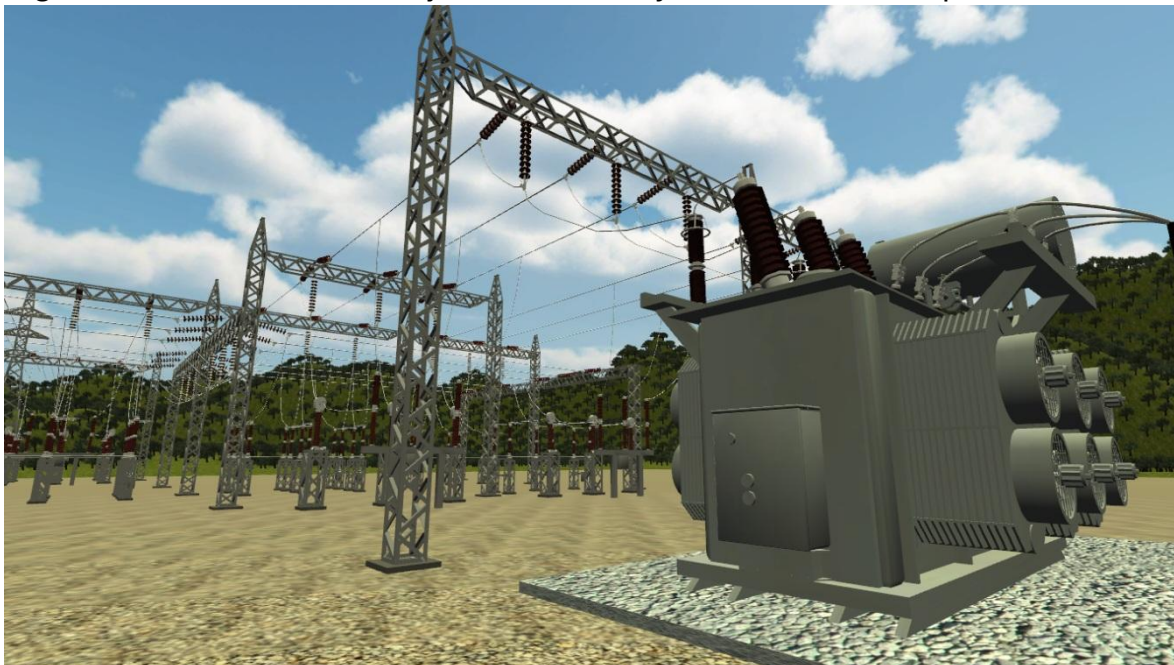
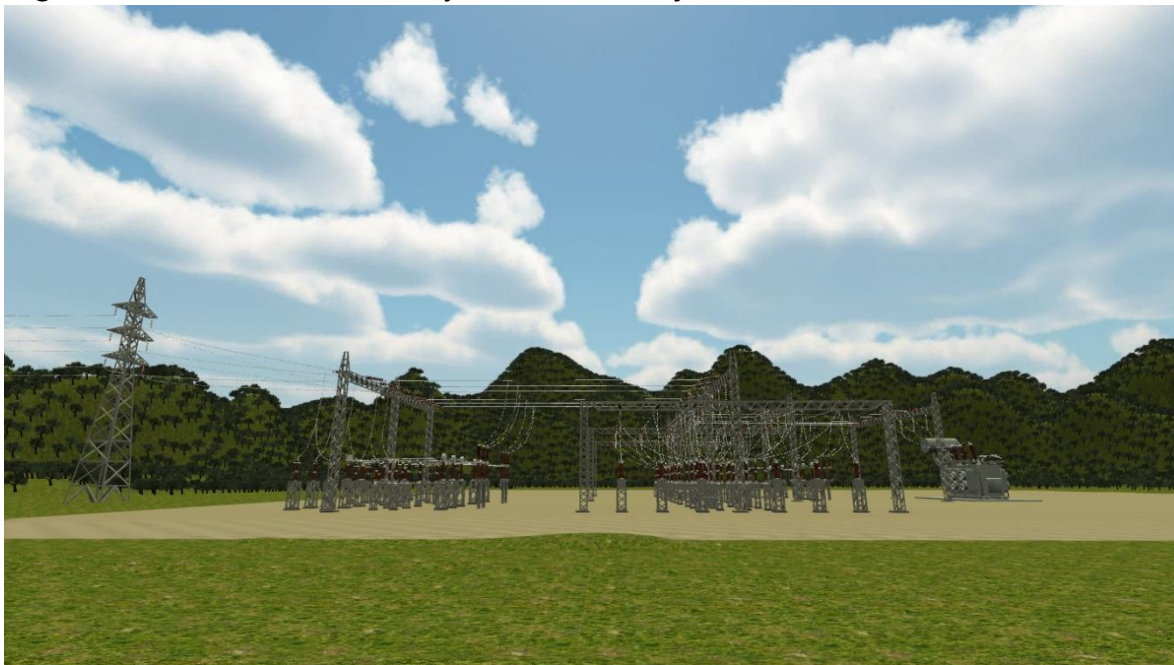


Figura 99. Subestación Barraje Doble en Unity, llegada de las líneas.



Figura 100. Subestación Barraje Doble en Unity, vista lateral.



3.5 DESCRIPCIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE SUBVIRT

3.5.1 Instalación

Para instalar SUBVIRT 1.0 se debe ejecutar el icono del asistente de instalación “Setup.exe” proporcionado en el DVD-ROM de la herramienta y seguir las instrucciones. Primero, se muestra la ventana principal del asistente de instalación que especifica los términos de la licencia, como se observa en la Figura 101. Si se está de acuerdo con éstos, se debe hacer clic en Aceptar. Luego, escoger el directorio en Examinar donde se instalará la herramienta y hacer clic en Instalar (ver Figura 102). Cuando finalice la instalación, se creará un acceso directo en el Escritorio, como se muestra en la Figura 103.

Figura 101. Ventana principal del asistente de instalación.

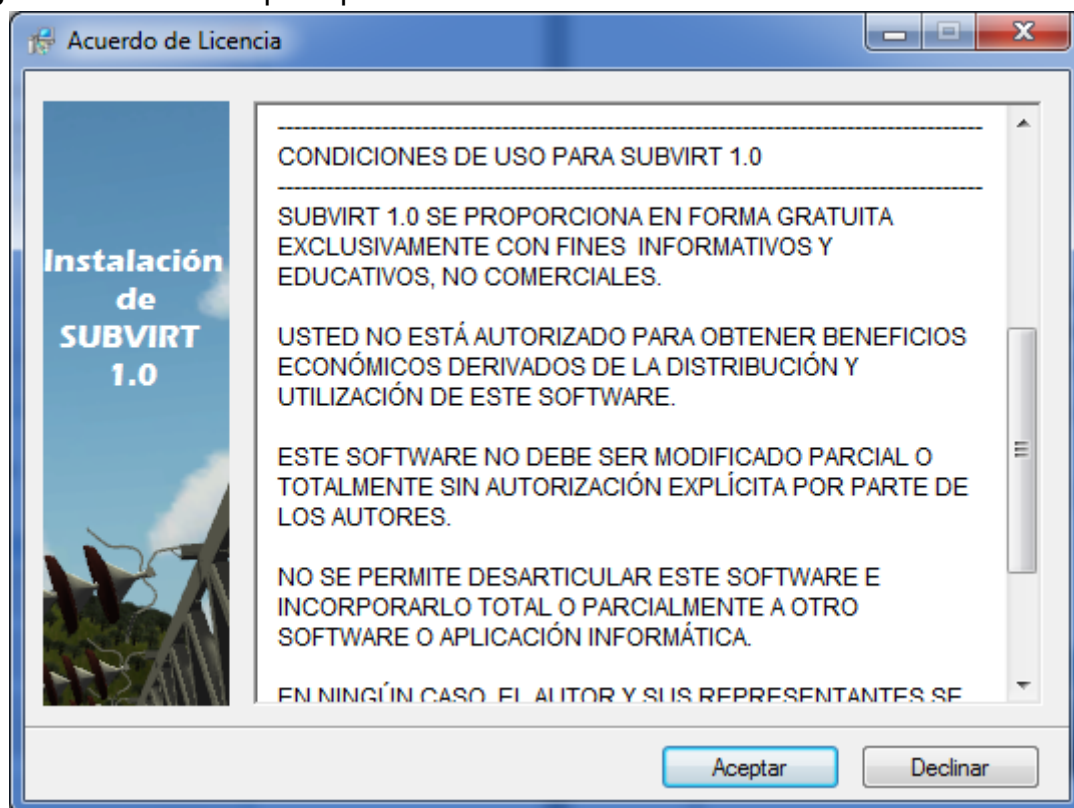


Figura 102. Ubicación del directorio donde se instalará la herramienta.

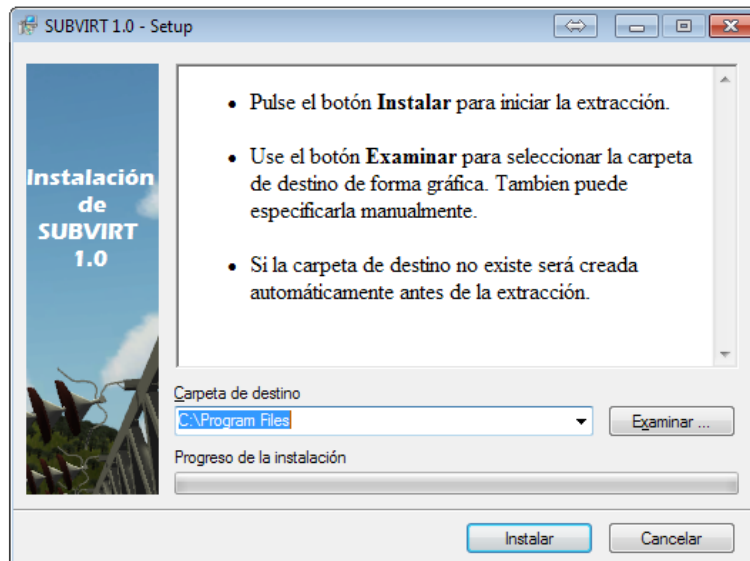


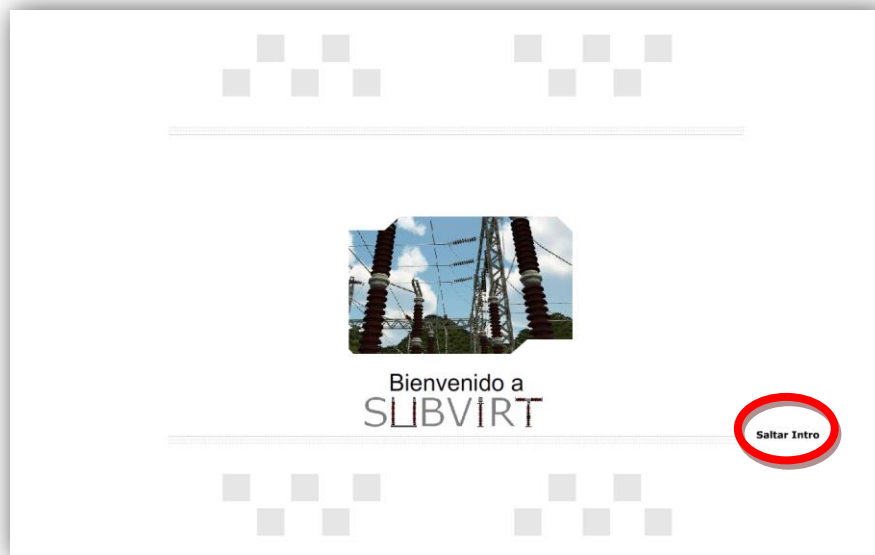
Figura 103. Acceso directo de la herramienta.



3.5.2 Interfaz de usuario

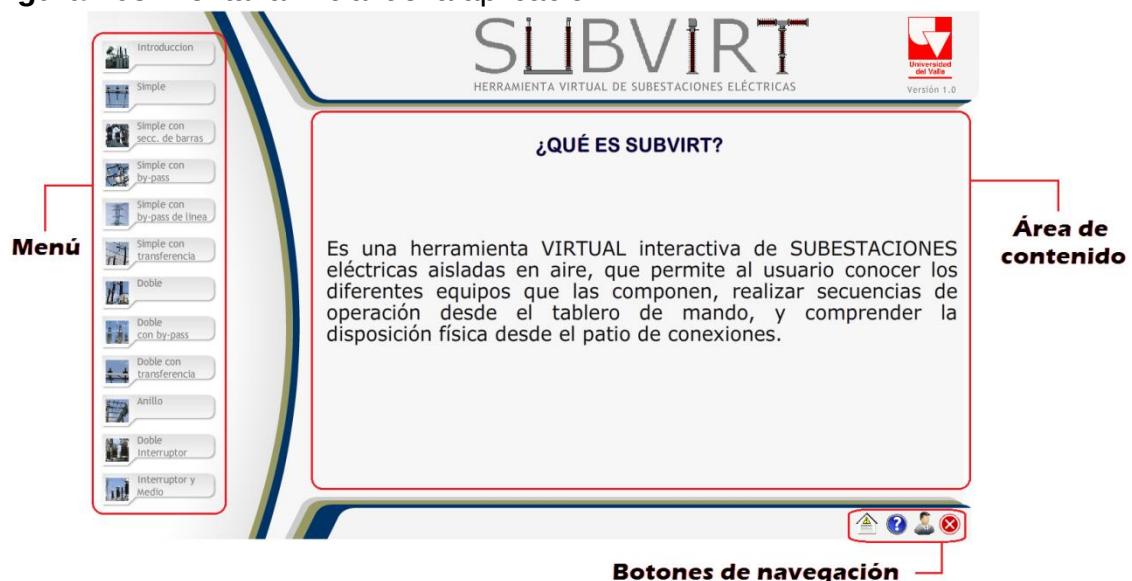
- **Intro.** Al abrir la herramienta, esta inicia con un videoclip de presentación, y al terminar se despliega la **interfaz de usuario**. Si no se desea ver el videoclip, hacer clic en “**Saltar Intro**”. Esto se muestra en la Figura 104.

Figura 104. Videoclip de introducción a la herramienta.



La interfaz de usuario está compuesta por un **Menú**, el cual contiene 12 botones: 1 de introducción y 11 de configuraciones. También tiene un **área de contenido**, en la cual se despliegan las ventanas. En la parte inferior derecha se encuentran los **Botones de navegación**. En la Figura 105, se observa la Ventana inicial de la aplicación.

Figura 105. Ventana inicial de la aplicación.



- **Menú**



Accede a la **Ventana Introducción**

Los **Botones contenido de configuraciones**, ubicados en la parte inferior del botón **Introducción**, dirigen a la **Ventana Configuraciones**.

- **Botones de Navegación**

Inicio



: Retorna la herramienta a la **Ventana Inicial**

Ayuda



: Abre el **Manual del usuario**

Acerca de



: Despliega información sobre la herramienta

Salir



: Cierra la herramienta.

- **Ventana Introducción.** Aquí se muestra una breve definición de una subestación eléctrica. Al lado derecho se encuentra disponible el botón **EQUIPOS DE PATIO** que dirige a la **Ventana Equipos de Patio** (Figura 107). En la Figura 106, se observa la **Ventana Introducción**.

- **Ventana Equipos de Patio.** Contiene una breve definición y muestra las características de los equipos 3D empleados en la disposición física. Cada botón de la parte derecha dirige a la información del respectivo equipo. El botón Vista 360° despliega una ventana en la cual se puede observar el equipo en una rotación de 360 grados, como se muestra en la Figura 108.

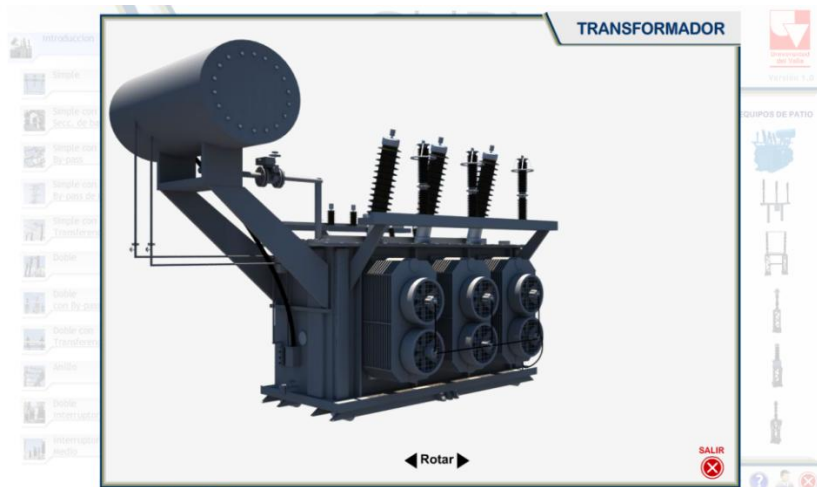
Figura 106. Ventana Introducción.



Figura 107. Ventana Equipos de Patio.



Figura 108. Ventana Vista 360º Equipo.



- **Ventana Configuraciones.** Contiene la información de cada configuración, donde cada ventana conserva la misma estructura. En la Figura 109, se muestra la configuración de barraje simple. Esta ventana contiene los siguientes botones:

ESQUEMAS 2D: Dirige a la **Ventana Esquemas**

SUBESTACIÓN 3D: Abre la **Ventana Visita Virtual Interactiva 3D**

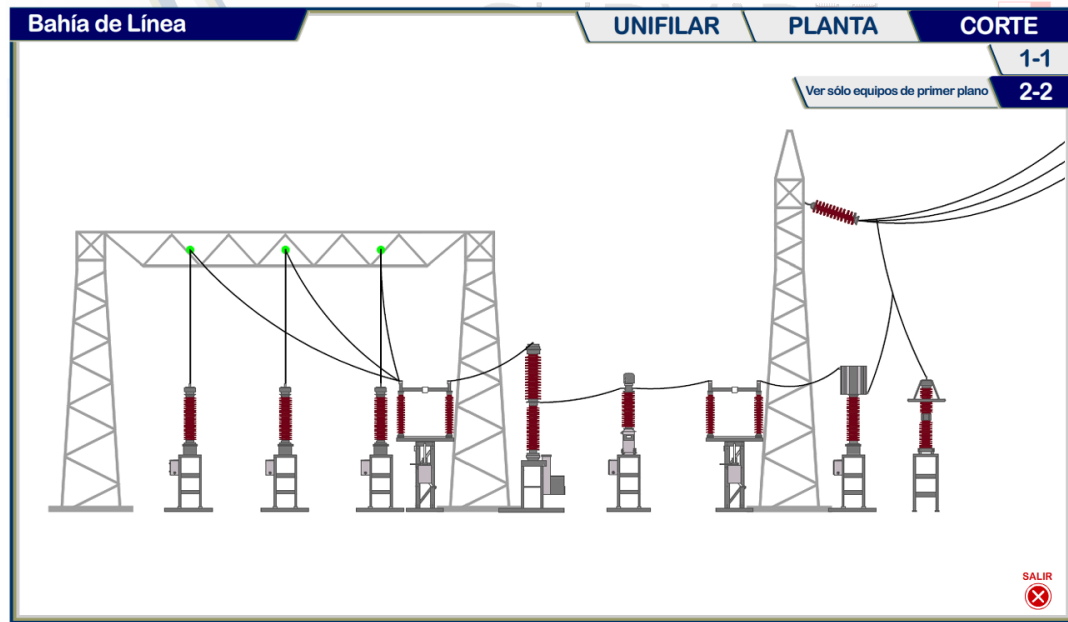
SECUENCIAS: Abre la **Ventana Secuencias de Operación**

Figura 109. Ventana Configuraciones, subestación barraje simple.



- **Ventana Esquemas.** Aquí se muestran los siguientes diagramas: unifilar, planta y las vistas en corte. En este caso, en la configuración Barraje Simple, se puede acceder con los botones **UNIFILAR**, **PLANTA**, **CORTE 1-1** y **2-2**. En la opción de **CORTE**, se tendrá la posibilidad de observar sólo los equipos de primer plano o la vista normal, con hacer clic en el botón que aparece debajo del nombre de la bahía. Habrán dos botones dependiendo de la vista actual: **Ver sólo equipos de primer plano** e **Ir a Vista completa**. En la Figura 110, se observa la Ventana Esquemas.

Figura 110. Ventana Esquemas.



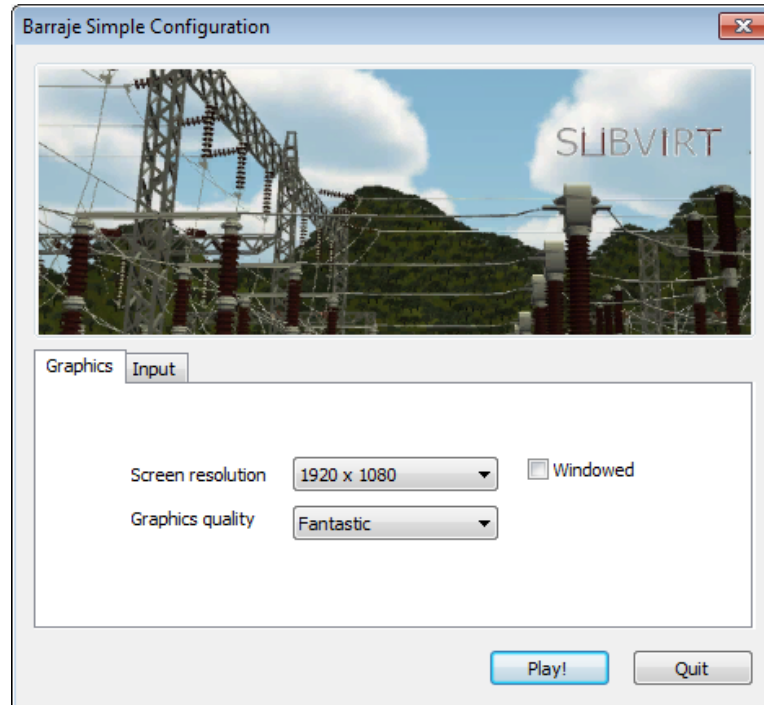
- **Ventana Visita Virtual Interactiva 3D.** Aquí se puede observar la disposición física 3D de la configuración seleccionada con un nivel de tensión de **115 kV**. Los objetos tienen medidas reales y el recorrido se hace con las flechas del teclado y el mouse, con una cámara a 2 metros del suelo. Al hacer clic sobre el botón **SUBESTACIÓN 3D**, se despliega la ventana mostrada en la Figura 111, en la cual se podrán ajustar los parámetros de la visita virtual:

Graphics: se configura el tamaño de la ventana (*Screen resolution*) y la calidad de los gráficos (*Graphics quality*) para la **Visita Virtual Interactiva 3D**. Si se deselecciona el parámetro *Windowed*, ésta se realizará en pantalla completa. Para salir de la pantalla completa, se presionan las teclas **ALT + F4**.

Input: se configuran las teclas de movimiento durante la **Visita Virtual Interactiva 3D**. Por defecto, éstas serán las flechas del teclado.

Para realizar la visita hacer clic en **Play!**, de lo contrario hacer clic en **Quit**.

Figura 111. Parámetros de la visita virtual.

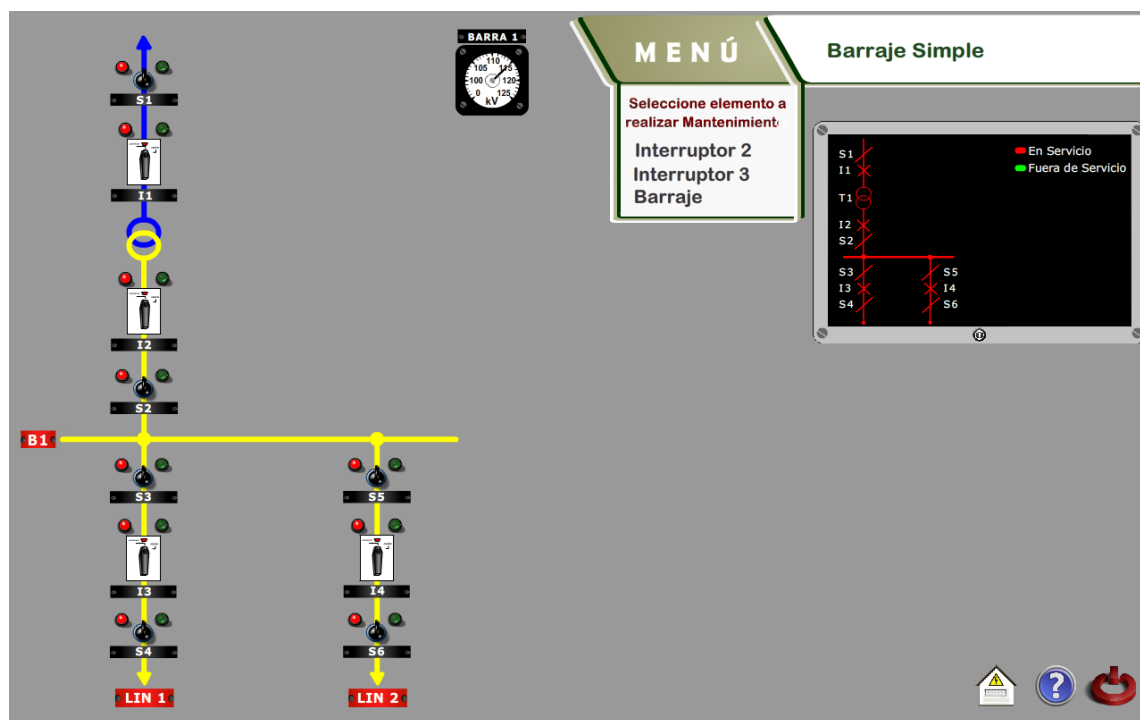


- **Ventana Secuencias de Operación.** Es un módulo virtual que simula un tablero de mando de una subestación real, en el cual se pueden realizar secuencias de operación. En la parte de “**MENÚ**” se escoge el elemento al cual se le desea realizar mantenimiento, además en el lado derecho se puede encontrar un monitor con el estado de los seccionadores, interruptores y barrajes. Para

mayor información, ver la opción **1** de la **Ayuda** de esta ventana. La **Ventana Secuencias de Operación**, se observa en la Figura 112. Ésta contiene los siguientes botones:

- Menú**  : retorna al menú de secuencias.
- Ayuda**  : dirige al **Menú de Ayuda**. Ver Figura 113.
- Salir**  : cierra la **Ventana Secuencias de Operación**.

Figura 112. Ventana Secuencias de Operación



En la **Ayuda** de la **Ventana Secuencias de Operación**, aparece un menú numerado en el cual se encuentra las siguientes opciones:

1 ¿Cómo realizar una secuencia?: contiene un video explicativo de cómo realizar una secuencia de operación.

2 Convenciones: muestra todas las convenciones utilizadas.

3 Secuencia Correcta: contiene unas pautas generales sobre la manera de desconexión y conexión de los elementos.

4 Operaciones Correctas: muestra los criterios para la realización adecuada de las secuencias de operación, es muy importante revisar esta opción antes de proceder a realizar alguna secuencia de operación.

Figura 113. Menú de ayuda de la Ventana Secuencias de Operación.



3.5.3 Desinstalación

Si se desea desinstalar la herramienta SUBVIRT 1.0, se debe eliminar la carpeta SUBVIRT del directorio donde se creó al instalar. Por último se elimina el acceso directo del Escritorio.

4. CONCLUSIONES

- ✓ Se diseñó un módulo virtual que permite a los usuarios realizar secuencias de operación para 11 configuraciones de subestaciones eléctricas, en el campo de 115 kV.
- ✓ Se diseñó un entorno virtual 3D que permite hacer recorridos por el patio de conexiones de 11 subestaciones exteriores de 115 kV.
- ✓ SUBVIRT se proporciona como una herramienta de aprendizaje y capacitación, enmarcándose como un desarrollo acorde a las nuevas tecnologías de la información y la comunicación (NTIC), motivando el aprendizaje sobre conceptos complejos como las secuencias de operación y la disposición física en un ambiente muy similar a la realidad.
- ✓ SUBVIRT permite al usuario conocer los elementos básicos de las subestaciones eléctricas en términos de apariencia y funcionalidad.

5. TRABAJOS FUTUROS

- ✓ La metodología y arquitectura implementada en el software, permite que sea complementada adicionando tópicos como el Principio AC y Principio DC.
- ✓ Ampliación de la biblioteca de Equipos de patio.
- ✓ Realizar recorrido virtual para subestaciones con diferentes niveles de Tensión.
- ✓ Adición de un editor de subestaciones que por medio de parámetros como la configuración y cantidad de bahías, genere los esquemas y la disposición física para un recorrido virtual interactivo.
- ✓ Modificar el módulo de secuencias de operación, para el ingreso de restricciones por parte del usuario.

BIBLIOGRAFÍA

ABB. Guía de Productos. Disponible en: <http://www.abb.com>

APONTE MAYOR, Guillermo. Subestaciones. Colombia: Universidad del Valle, 1990.

ARROYO, E y ARCOS, J.L.L. SRV: a virtual reality application to electrical substations operation training. En Multimedia Computing and Systems, 1999. IEEE International Conference. vol.1. Jul 1999. p 835-839.

DEREK, Franklin y VÁZQUEZ Llorente. Flash Mx (2003) Ruth-ISBN: 8420536482

HARPER, Gilberto. Elementos de diseño de subestaciones eléctricas. Segunda edición: México, LIMUSA S.A, 2005.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION (ICONTEC). NTC 2545, ELECTROTECNIA: Generación, Transmisión y Distribución de Energía Eléctrica. SUBESTACIONES VOCABULARIO Bogotá D.C., 2003. 9 p.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION (ICONTEC). NTC 317, ELECTROTECNIA: Transformadores de Potencia y Distribución. TERMINOLOGIA Bogotá D.C., Tercera actualización. 52 p.

LOS ARCOS, J.L. *et al.* PDA: a training application to electrical substation operation. En Multimedia Computing and Systems, 1999. IEEE International Conference. vol.2. Jul 1999. p 1058-1060.

MCDONALD, John D. Electric Power Substations Engineering. Second Edition: USA, CRC Press, 2007. 379 p.

MOLÉ, Julio. SOFTWARE SIMULADOR PARA CONSTRUIR Y OPERAR SUBESTACIONES ELECTRICAS. En: Congreso Latinoamericano en Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico ALTAE (X:26-30, Septiembre, 2011, La Habana, Cuba). Empresa de Construcciones de la Industria Eléctrica, Habana, Cuba.

MEDIAactive. El gran libro de 3ds Max 2010. México, Alfaomega Grupo Editor S.A, 2010. 888 p.

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Anexo General Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas – RETIE. 2008. 164 p.

Plantillas gratis de Flash. Disponible en: <http://www.flashmo.com>

RAMÍREZ, Carlos. Subestaciones de alta y extra alta tensión Colombia: Segunda edición: HMV Ingenieros y Mejía Villegas S.A, 2003. 778 p.

SIEMENS. High-Voltage Products. Disponible en: <http://www.energy.siemens.com>

SIEMENS, Power Engineering Guide. Erlangen, Germany., Quinta Edición, 2008. 418 p.

TEJEDA, Luis. Tutoriales de 3D y Postproducción. Disponible en: <http://www.youtube.com/3dluistutorials>

TRENCH. Product Portafolio. Disponible en: <http://www.trenchgroup.com>

Tutoriales de Flash Action Script 3. Disponible en: <http://flashfacilito.com/>

Tutoriales de programación de Flash y 3Ds Max Studio. Disponible en: <http://www.illasaron.com>

VALENCIA, María Eugenia. Un método de desarrollo de aplicaciones educativas hipermedia. En: Congreso Colombia de Informática Educativa (4:1-4, Abril, 1998, Manizales, Colombia) Grupo de Investigación y Desarrollo de Software Educativo. Universidad del Valle, Cali, Colombia.