



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO DEL MANUAL DE LABORATORIO DEL
CURSO DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA 1**

Jonnathan Sttev Ramírez Castellanos

Asesorado por el Ing. Bayron Armando Cuyán Culajay

Guatemala, septiembre de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO DEL MANUAL DE LABORATORIO DEL
CURSO DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA 1**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

JONNATHAN STTEV RAMÍREZ CASTELLANOS

ASESORADO POR EL ING. BAYRON ARMANDO CUYÁN CULAJAY

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRICISTA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Raúl Eduardo Ticún Córdova
VOCAL V	Br. Henry Fernando Duarte García
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno (a.i.)
EXAMINADOR	Ing. Bayron Armando Cuyán Culajay
EXAMINADOR	Ing. Fernando Alfredo Moscoso Lira
EXAMINADOR	Ing. Julio Rolando Barrios Archila
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO DEL MANUAL DE LABORATORIO DEL CURSO DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA 1

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 14 de julio de 2014.

Jonnathan Sttev Ramírez Castellanos

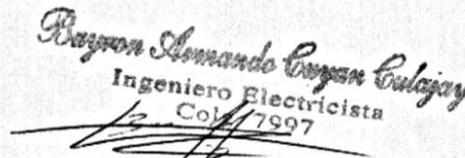
Guatemala, 13 de julio de 2016

Ingeniero Gustavo Benigno Orozco Godínez
Coordinador del Área de Potencia
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señor Coordinador,

Por este medio hago de su conocimiento que he asesorado el trabajo de graduación titulado **“DISEÑO DEL MANUAL DE LABORATORIO DEL CURSO DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA 1”**, desarrollado por el estudiante **JONNATHAN STTEV RAMÍREZ CASTELLANOS**. Con base en la revisión y corrección de dicho trabajo, considero que ha alcanzado los objetivos propuestos, por lo cual el autor y mi persona, en calidad de asesor, somos responsables del contenido del trabajo.

Sin otro particular, me suscribo atentamente,


Ingeniero Electricista
Colegiado 7997
Bayron Armando Cuyan Culajay
Ingeniero Electricista
Colegiado 7997

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Ref. EIME 44. 2016.
Guatemala, 29 de JULIO 2016.

Señor Director
Ing. Francisco Javier González López
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
**DISEÑO DEL MANUAL DE LABORATORIO DEL CURSO DE
ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA 1,** del estudiante
Jonnathan Sttev Ramírez Castellanos, que cumple con los
requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑADA TODOS

Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez
Coordinador Área Potencia



SFO



REF. EIME 44. 2016.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; **JONNATHAN STTEV RAMÍREZ CASTELLANOS**, titulado: **DISEÑO DEL MANUAL DE LABORATORIO DEL CURSO DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA 1**, procede a la autorización del mismo.

Ing. Francisco Javier González López



GUATEMALA, 23 DE AGOSTO 2016.

Universidad de San Carlos
De Guatemala

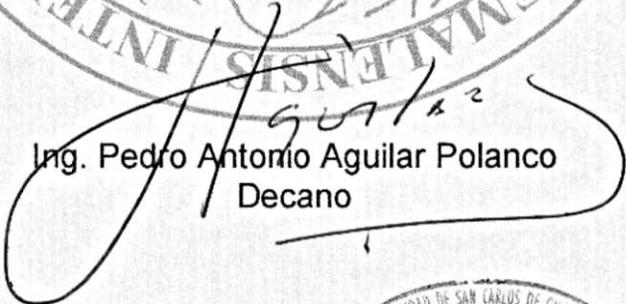


Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.D.433-2016

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO DEL MANUAL DE LABORATORIO DEL CURSO DE ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA 1**, presentado por el estudiante universitario: **Jonnathan Sttev Ramírez Castellanos**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, septiembre de 2016

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	El ser más importante en mi vida.
Mi hija y esposa	Ana Sofía Ramírez Ramírez y Betzayda Ramírez Solares, amores de mi vida, porque que son el regalo más hermoso que Dios me ha dado y me han llenado de felicidad.
Mis padres	Ana Lorena Castellanos y Práxedes Ramírez, las personas más importantes a lo largo de mi vida, porque son los mejores padres del mundo.
Mis abuelos	Marta Alicia Castillo y Agustín Castellanos, por amarme como a un hijo.
Mi sobrina	Alison Ramírez, por ser una estrella en nuestras vidas.
Mi hermano	Brayan Ramírez Castellanos, por su nobleza y ser una fuente de inspiración.

AGRADECIMIENTOS A:

Mis padres	Ana Lorena Castellanos y Práxedes Ramírez, por su amor, entrega y apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida, sin lo cual nunca hubiera podido alcanzar esta meta.
Mis abuelos	Marta Alicia Castillo y Agustín Castellanos, por su amor y haberme armado de valores y principios para enfrentar la vida.
Mis hermanos	Brayan y Axel Ramírez Castellanos, por su cariño y estar a mi lado en todo momento.
Mi asesor	Bayron Armando Cuyán Culajay, por su apoyo y asesoría académica y profesional.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser mi segundo hogar y la casa de estudios que me ha brindado los conocimientos para alcanzar mis metas.
Facultad de Ingeniería	Por ser la mejor unidad académica de Guatemala.
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica	Por ser la escuela superior más exigente del país.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIX
GLOSARIO	XXI
RESUMEN.....	XXXI
OBJETIVOS.....	XXXIII
INTRODUCCIÓN.....	XXXV
1. ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA Y EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO	1
1.1. Sistemas de potencia	1
1.2. Elementos de un sistema de potencia.....	1
1.2.1. Generadores.....	2
1.2.2. Barras	2
1.2.3. Líneas de transmisión.....	3
1.2.4. Transformadores	3
1.2.5. Cargas	4
1.2.6. Bancos de capacitores	5
1.2.7. Reactores	5
1.2.8. Interruptores de potencia.....	6
1.3. Subestaciones eléctricas	7
1.3.1. Área de barras.....	7
1.3.2. Área de campos de conexión equipados.....	7
1.3.3. Área de campos de transformación	8
1.3.4. Área de reactores o bancos de transformadores.....	8
1.3.5. Subestaciones de transformación.....	8

1.3.6.	Subestaciones elevadoras	8
1.3.7.	Subestaciones reductoras	9
1.3.8.	Subestaciones de distribución.....	9
1.3.9.	Subestaciones de maniobra	9
1.4.	Representación gráfica de los sistemas de potencia	9
1.5.	Clasificación de sistemas de potencia.....	10
1.5.1.	Sistemas radiales	10
1.5.2.	Sistemas mallados	11
1.5.3.	Sistemas mixtos	12
1.6.	Confiabilidad de los sistemas de potencia	13
1.7.	Sistema Nacional Interconectado.....	14
1.8.	Análisis de sistemas de potencia	18
1.9.	Análisis de sistemas de potencia dentro del marco regulatorio de Guatemala.....	18
1.9.1.	Normas Técnicas de Estudios de Acceso al Sistema de Transporte (NEAST).....	19
1.9.2.	Normas Técnicas de Acceso y Uso de la Capacidad de Transporte (NTAUCT)	20
1.9.2.1.	Estudios básicos	20
1.9.2.2.	Estudios primarios.....	21
1.9.2.3.	Estudios secundarios	21
2.	INTRODUCCIÓN A LOS SOFTWARE DE SIMULACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA.....	23
2.1.	PowerWorld Simulator Educational- Evaluation	24
2.1.1.	Descarga e instalación	25
2.1.2.	Manual de ayuda.....	25
2.1.3.	Entorno gráfico	25
2.1.3.1.	Modo edición (Edit Mode).....	26

	2.1.3.2.	Modo correr (Run Mode)	26
2.2.		PSS®E Xplore	26
	2.2.1.	Descarga e instalación	26
2.3.		ETAP Demo.....	26
	2.3.1.	Descarga e instalación	27
2.4.		Demo NEPLAN 360.....	27
2.5.		Demo NEPLAN Desktop.....	28
	2.5.1.	Descarga e instalación	28
2.6.		NEPLAN Student version	28
3.		SIMULACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA	29
3.1.		Estudio de flujo de carga	29
3.2.		Consideraciones técnicas en los estudios de flujo de carga....	30
	3.2.1.	Bases de datos	31
	3.2.2.	Escenarios.....	31
	3.2.3.	Despacho de generación.....	31
	3.2.4.	Software de simulación.....	32
	3.2.5.	Método de cálculo.....	32
	3.2.6.	Generador de compensación.....	32
	3.2.7.	Barra de compensación	33
	3.2.8.	Barras de voltaje controlado	33
	3.2.9.	Regulación de tensión	33
3.3.		Estudios de flujo de carga dentro del marco regulatorio de Guatemala.....	34
3.4.		Resultados de la simulación de flujos de carga.....	36
	3.4.1.	Potencia activa y reactiva del generador de compensación.....	36
	3.4.2.	Tensiones en las barras	37

3.4.3.	Flujo de carga en ambos extremos de las líneas de transmisión	37
3.4.4.	Corriente que circula en las líneas de transmisión y transformadores	37
3.4.5.	Porcentaje de utilización de la capacidad de líneas de transmisión y transformadores.....	37
3.4.6.	Pérdidas	37
3.5.	Análisis de los resultados.....	38
3.6.	Diseño del sistema de potencia a emplearse en el desarrollo de la Práctica 1 del laboratorio del curso de Sistemas de Potencia 1.....	38
3.6.1.	Sistema Troncal Norte en el año estacional 1	39
3.6.2.	Parámetros del sistema Troncal Norte	39
3.6.3.	Nomenclatura del sistema Troncal Norte	39
3.6.4.	Elementos sistema Troncal Norte en el año estacional 1	40
3.6.4.1.	Planta Chixoy 275 MW	40
3.6.4.2.	Subestación Chixoy 230/13.8 kV.....	41
3.6.4.3.	Subestación Tactic 230/69 kV	43
3.6.4.4.	Subestación Guatemala Norte 230/69 kV	44
3.6.4.5.	Parámetros eléctricos de los Transformadores	46
3.6.4.6.	Línea de transmisión Chixoy – Tactic 230 kV	47
3.6.4.7.	Línea de transmisión Tactic – Guatemala Norte 230 kV	48
3.6.4.8.	Carga San Julián 69 kV.....	49
3.6.4.9.	Carga Telemán 69 kV	49

	3.6.4.10.	Carga Guatemala 2 69 kV	50
	3.6.4.11.	Carga Guatemala 3 69 kV	50
	3.6.4.12.	Carga Guatemala 5 69 kV	50
	3.6.4.13.	Carga Guatemala 6 69 kV	50
	3.6.4.14.	Comportamiento típico de las cargas ..	50
3.7.		Diseño del Ejemplo 1. Simulación de flujo de carga del escenario de demanda mínima de la época seca del sistema Troncal Norte para año estacional 1	51
	3.7.1.	Definir las consideraciones técnicas de la simulación.....	52
	3.7.2.	Elaborar el diagrama unifilar e ingresar los datos del sistema en el software de simulación	52
	3.7.3.	Correr la simulación del escenario y obtener los resultados	56
	3.7.4.	Análisis de resultados.....	58
3.8.		Diseño de la Práctica 1. Estudio de flujo de carga del sistema Troncal Norte para el año estacional 1.....	59
	3.8.1.	Consideraciones técnicas del estudio.....	59
		3.8.1.1. Bases de datos	59
		3.8.1.2. Escenarios	60
		3.8.1.3. Despacho de generación.....	60
		3.8.1.4. Software de simulación.....	60
		3.8.1.5. Método de cálculo.....	61
		3.8.1.6. Generador de compensación.....	61
		3.8.1.7. Barras de voltaje controlado	61
		3.8.1.8. Regulación de tensión	61
	3.8.2.	Simulación y resultados	61
	3.8.3.	Análisis de los resultados	62
	3.8.4.	Informe técnico	62

3.9.	Diseño del sistema de potencia empleado en la Práctica 2	62
3.9.1.	Parámetros del sistema Troncal Norte en el año estacional 15	62
3.9.2.	Nomenclatura del sistema Troncal Norte en el año estacional 15	63
3.9.3.	Sistema Troncal Norte en el año estacional 15	63
3.9.3.1.	Planta de generación Renace 115 MVA	64
3.9.3.2.	Subestación San Agustín 230/69 kV	64
3.9.3.3.	Subestación Renace 230/13,8 kV	66
3.9.3.4.	Subestación Sanarate 69 kV	67
3.9.3.5.	Subestación Santa Elena 69 kV	68
3.9.3.6.	Parámetros eléctricos de los transformadores	69
3.9.3.7.	Ampliación de la subestación Chixoy 230/13,8 kV 285 MVA	71
3.9.3.8.	Ampliación de la subestación Tactic 230/69 kV	72
3.9.3.9.	Ampliación de la subestación Guatemala Norte 230/69 kV	73
3.9.3.10.	Línea de transmisión Chixoy – San Agustín 230 kV	74
3.9.3.11.	Línea de transmisión San Agustín – Guatemala Norte 230 kV	75
3.9.3.12.	Línea de transmisión Tactic – Renace 230 kV	75
3.9.3.13.	Línea de transmisión San Agustín – Sanarate 69 kV	75

3.9.3.14.	Línea de transmisión Santa Elena – Sanarate 69 kV	75
3.9.3.15.	Línea de transmisión Tactic – Santa Elena 69 kV	76
3.9.3.16.	Línea de transmisión Sanarate – Guatemala Norte 69 kV	76
3.9.3.17.	Ampliación de la capacidad de la línea de transmisión Chixoy – Tactic 230 kV	76
3.9.3.18.	Ampliación de capacidad de la línea de transmisión Tactic – Guatemala Norte 230 kV	76
3.9.3.19.	Parámetros eléctricos de las líneas de transmisión	77
3.9.3.20.	Carga Sanarate 69 kV	78
3.9.3.21.	Carga Jalapa 69 kV	78
3.9.3.22.	Carga San Antonio La Paz 69 kV	78
3.9.3.23.	Carga Salamá 69 kV	79
3.9.3.24.	Comportamiento típico de las cargas del sistema Troncal Norte en el año 15.....	79
3.10.	Diseño de la Práctica 2. Estudio de flujo de carga del sistema Troncal Norte Central en el año 15	80
3.10.1.	Consideraciones técnicas del estudio.....	80
3.10.1.1.	Escenarios	81
3.10.1.2.	Despacho de generación	81
3.10.2.	Simulación y resultados	81
3.10.3.	Análisis de los resultados	82
3.10.4.	Informe técnico	82

4.	SIMULACIÓN DE FALLAS DE CORTOCIRCUITO	83
4.1.	Estudio de fallas de cortocircuito.....	83
4.2.	Consideraciones técnicas de los estudios de fallas de cortocircuito.....	84
4.3.	Estudio de fallas de cortocircuito dentro del marco regulatorio de Guatemala.....	84
4.4.	Resultados de la simulación de fallas de cortocircuito	85
4.4.1.	Tensiones en las barras	85
4.4.2.	Corriente que circula en las líneas de transmisión y transformadores	86
4.4.3.	Corriente que circula en las fases de los generadores y cargas.....	86
4.5.	Diseño del Ejemplo 2. Simulación de una falla simple trifásica sólida que ocurre en la mitad de la línea de transmisión TIC – GNO 230 kV para el escenario de demanda mínima de la época seca del sistema Troncal Norte en el año estacional 1.....	86
4.5.1.	Definir las consideraciones técnicas de la simulación	86
4.5.2.	Ingresar los datos de falla al software de simulación, correr la simulación del escenario y obtener los resultados	87
4.6.	Diseño de la Práctica 3. Estudio de fallas de cortocircuito en el sistema Troncal Norte para el año 1.....	91
4.6.1.	Consideraciones técnicas del estudio	91
4.6.2.	Simulación y resultados.....	91
4.6.3.	Informe técnico.....	92
4.7.	Diseño de la Práctica 4. Estudio de fallas de cortocircuito en el sistema Troncal Norte para el año estacional 15.....	92

4.7.1.	Consideraciones técnicas	92
4.7.2.	Simulación y resultados	92
4.7.3.	Informe técnico	93
5.	SIMULACIÓN DE ESTABILIDAD TRANSITORIA.....	95
5.1.	Estudios de estabilidad transitoria	95
5.1.1.	Consideraciones técnicas de los estudios de estabilidad transitoria	96
5.2.	Estudios de estabilidad transitoria dentro del marco regulatorio de Guatemala	97
5.3.	Resultados de la simulación de estabilidad transitoria	98
5.4.	Diseño del sistema de potencia a emplearse en el desarrollo de la Práctica 5 del laboratorio del curso de Sistemas de Potencia 1	99
5.4.1.	Sistema Gen-Binf en el año estacional 1	99
5.4.2.	Parámetros del sistema Gen-Binf en el año estacional 1.....	99
5.4.3.	Nomenclatura sistema Gen-Binf	99
5.4.4.	Elementos sistema Gen-Binf-230	100
5.4.4.1.	Planta Palo Viejo 42,5 MVA.....	100
5.4.4.2.	Subestación Uspantán 230/13,8 kV...	101
5.4.4.3.	Subestación Chixoy II 230 kV	104
5.4.4.4.	Línea de transmisión Uspantán – Chixoy II 230 kV.....	105
5.5.	Diseño del Ejemplo 3. Análisis de estabilidad transitoria del sistema Gen-Binf	106
5.5.1.	Definir las consideraciones técnicas de la simulación.....	106

5.5.2.	Ingresar los datos del sistema al software de simulación y elaborar el diagrama unifilar	106
5.5.3.	Ingresar los datos de la perturbación al software de simulación, correr la simulación del escenario y obtener los resultados	107
5.6.	Diseño Practica 5. Estudio de estabilidad transitoria del sistema Gen-Binf-230.....	113
5.6.1.	Consideraciones técnicas.....	113
5.6.1.1.	Bases de datos.....	113
5.6.1.2.	Despacho de generación.....	113
5.6.1.3.	Software de simulación	114
5.6.1.4.	Método de cálculo	114
5.6.1.5.	Generador de compensación	114
5.6.1.6.	Escenarios.....	115
5.6.1.7.	Regulación de tensión.....	117
5.6.1.8.	Simulación y resultados.....	118
5.6.1.9.	Análisis de los resultados	118
5.6.2.	Informe técnico.....	118
5.7.	Diseño del sistema de potencia que se deberá emplear en el desarrollo del Proyecto Final de Laboratorio	118
5.7.1.	Proyecto de Ampliación del Sistema de Transporte del Sistema Troncal Norte (PAST 16-20).....	119
5.7.1.1.	Ampliación de la subestación Tactic 230/69 kV	119
5.7.1.2.	Ampliación de la subestación San Agustín 230/69 kV	120
5.7.1.3.	Ampliación de la subestación Guatemala Norte 230/69 kV	121

5.7.1.4.	Ampliación de la subestación Renace 230/13,8 kV	122
5.7.1.5.	Línea de transmisión nueva Tactic – San Agustín 230 kV	123
5.7.1.6.	Línea de transmisión nueva Renace – Guatemala Norte 230 kV	124
5.8.	Diseño del Proyecto Final de Laboratorio: Análisis del Proyecto de Ampliación del Sistema de Transporte del Sistema Troncal Norte (PAST 16-20)	124
5.8.1.	Estudios eléctricos	124
5.8.1.1.	Consideraciones técnicas	125
5.8.1.2.	Simulación y resultados	125
5.8.1.3.	Análisis de los resultados	125
5.8.2.	Informe técnico	126
CONCLUSIONES		127
RECOMENDACIONES		129
BIBLIOGRAFÍA		131
APÉNDICE		135

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Símbolo de generador.....	2
2.	Representación gráfica de una línea de transmisión interconectada con dos barras	3
3.	Símbolo de transformador de dos devanados.....	4
4.	Símbolo de transformador de tres devanados	4
5.	Símbolo de carga conectada a una barra	4
6.	Símbolo de banco de capacitores	5
7.	Símbolo de reactor.....	5
8.	Símbolo de interruptor de potencia comúnmente abierto.....	6
9.	Símbolo de interruptor de potencia comúnmente cerrado.....	6
10.	Diagrama unifilar de un sistema de potencia	10
11.	Diagrama unifilar de un sistema de potencia radial.....	11
12.	Diagrama unifilar de un sistema de potencia mallado	12
13.	Diagrama unifilar de un sistema de potencia mixto	13
14.	Estructura del subsector eléctrico de Guatemala	16
15.	Mapa del Sistema Nacional Interconectado	17
16.	Logo de PowerWorld Corporation	24
17.	Logo del Software ETAP 14.1	27
18.	Diagrama unifilar de referencia de la subestación Chixoy 230/13,8 kV	42
19.	Diagrama unifilar de la subestación Tactic 230/69 kV	44
20.	Diagrama unifilar de la subestación Guatemala Norte 230/69 kV	45
21.	Pestaña “Dibujar”	53

22.	Diagrama unifilar de referencia del sistema Troncal Norte (escenario del ejemplo 1).....	53
23.	Datos de las barras (escenario del ejemplo 1).....	54
24.	Datos de los generadores (escenario del ejemplo 1).....	54
25.	Datos de los transformadores (escenario del ejemplo 1).....	55
26.	Datos de las líneas de transmisión (escenario del ejemplo 1).....	55
27.	Datos de las cargas (escenario del ejemplo 1).....	55
28.	Grupo de opciones “herramientas de flujo de potencia”	57
29.	Resultados de las barras (escenario del ejemplo 1)	57
30.	Resultados de los generadores (escenario del ejemplo 1)	58
31.	Resultados de los transformadores y líneas de transmisión (escenario del ejemplo 1).....	58
32.	Diagrama unifilar de referencia de la subestación San Agustín 230/69 kV.....	65
33.	Diagrama unifilar de referencia de la subestación Renace 230/13,8 kV.....	67
34.	Diagrama unifilar de referencia de la subestación Sanarate 69 kV	68
35.	Diagrama unifilar de referencia de la subestación Santa Elena 69 kV.....	69
36.	Diagrama unifilar de referencia de la subestación Chixoy 230/13,8 kV.....	71
37.	Diagrama unifilar de referencia de la subestación Tactic 230/69 kV.....	73
38.	Diagrama unifilar de referencia de la subestación Guatemala Norte 230/69 kV.....	74
39.	Botón Análisis de Fallas.....	87
40.	Cuadro de diálogo “Análisis de Fallas”	88
41.	Datos de la falla del ejemplo 2 ingresados en el cuadro de dialogo “Análisis de Fallas”.....	89
42.	Resultados de las barras	89

43.	Datos de los transformadores y líneas de transmisión.....	90
44.	Resultados de los generadores.....	90
45.	Resultados de las cargas	90
46.	Comportamiento de la corriente de un generador estable después de ocurrida una perturbación transitoria.....	98
47.	Diagrama unifilar de referencia de la subestación Uspantán 230/13,8 kV	102
48.	Diagrama unifilar de referencia de la subestación Chixoy II 230 kV ..	104
49.	Diagrama unifilar de referencia del sistema Gen-Binf	107
50.	Grupo de opciones “Estabilidad Transitoria (TS)”	108
51.	Cuadro de dialogo “ Análisis de Estabilidad Transitoria (TS)”	108
52.	Datos de la perturbación del ejemplo 3 ingresados en el cuadro de diálogo “Análisis de Estabilidad Transitoria (TS)”.....	109
53.	Gráfica del comportamiento de la potencia activa del generador Palo Viejo H1	110
54.	Ampliación de la gráfica del comportamiento de la potencia activa del generador Palo Viejo H1	111
55.	Diagrama unifilar de referencia de la subestación Tactic 230/69 kV..	120
56.	Diagrama unifilar de referencia de la subestación San Agustín 230/69 kV	121
57.	Diagrama unifilar de referencia de la subestación Guatemala Norte 230/69 kV	122
58.	Diagrama unifilar de referencia de la subestación Renace 230/13,8 kV.....	123

TABLAS

I.	Estudios requeridos por tipo de instalación (NEAST)	20
II.	Nomenclatura sistema Troncal Norte	40

III.	Parámetros de los generadores de la planta Chixoy 275 MVA.....	41
IV.	Parámetros eléctricos de los transformadores del sistema Troncal Norte.....	46
V.	Parámetros eléctricos de los transformadores del sistema Troncal Norte (valores de secuencia cero)	46
VI.	Límites de capacidad de los transformadores del sistema Troncal Norte.....	47
VII.	Parámetros de la línea de transmisión Chixoy – Tactic 230 kV	47
VIII.	Parámetros de la línea de transmisión Chixoy – Tactic 230 kV (valores de secuencia cero).....	48
IX.	Límites de capacidad de la línea de transmisión Chixoy – Tactic 230 kV.....	48
X.	Parámetros de la línea de transmisión Tactic – Guatemala Norte 230 kV.....	48
XI.	Parámetros de la línea de transmisión Tactic – Guatemala Norte 230 kV (valores de secuencia cero).....	49
XII.	Límites de capacidad de la línea de transmisión Tactic – Guatemala Norte 230 kV	49
XIII.	Comportamiento típico de las cargas en la estación húmeda, año estacional 1.....	51
XIV.	Comportamiento típico de las cargas en la estación seca, año estacional 1.....	51
XV.	TDespacho de generación del sistema Troncal Norte para el año estacional 1.....	60
XVI.	Nomenclatura	63
XVII.	Parámetros de los generadores de la planta Renace 115 MVA	64
XVIII.	Parámetros eléctricos de los transformadores del sistema Troncal Norte.....	70

XIX.	Parámetros eléctricos de los transformadores del sistema Troncal Norte (impedancias de secuencia cero).....	70
XX.	Límites de capacidad de los transformadores nuevos del sistema Troncal Norte	70
XXI.	Parámetros eléctricos de las líneas de transmisión del sistema Troncal Norte	77
XXII.	Parámetros eléctricos de las líneas de transmisión del sistema Troncal Norte (valores de secuencia cero).....	77
XXIII.	Límites de capacidad las líneas de transmisión del sistema Troncal Norte	78
XXIV.	Comportamiento típico de las cargas en la estación seca	79
XXV.	Comportamiento típico de las cargas en la Estación húmeda.....	80
XXVI.	Despacho de generación del sistema Troncal Norte para el año estacional 15.....	81
XXVII.	Nomenclatura sistema Gen-Binf	100
XXVIII.	Parámetros del generador de la planta Palo Viejo 42,5 MVA	101
XXIX.	Parámetros eléctricos del transformador de la subestación Uspantán.....	103
XXX.	Parámetros eléctricos del transformador de la subestación Uspantán (valores de secuencia cero).....	103
XXXI.	Límites de capacidad del transformador de la subestación Uspantán.....	103
XXXII.	Parámetros de la línea de transmisión Uspantán – Chixoy II 230 kV	105
XXXIII.	Parámetros de la línea de transmisión Uspantán – Chixoy II 230 kV (valores de secuencia cero)	105
XXXIV.	Límites de capacidad de la línea de transmisión Uspantán – Chixoy II 230 kV	105
XXXV.	Valores de los picos de las oscilaciones	112
XXXVI.	Evaluación de la relación de atenuación	112

XXXVII.	Despacho típico de generación del sistema Gen-Binf para la época seca	114
XXXVIII.	Datos del modelo de la máquina.....	115
XXXIX.	Datos del modelo del excitador.....	116
XL.	Datos del modelo del gobernador	116
XLI.	Datos del modelo del estabilizador	117

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
Y	Admitancia
A	Amperios
H	Constante de inercia
I	Corriente eléctrica
Hz	Hertz
Z	Impedancia
km	Kilómetros
kV	Kilo Volts o Kilo Voltios
MVA	Mega Volt-Amperios
MVAR	Mega Volt-Amperios Reactivos
MW	Mega Watts
ms	Milisegundos
P	Potencia activa
S	Potencia aparente
Q	Potencia reactiva
X	Reactancia
X0	Reactancia de secuencia cero
X2	Reactancia de secuencia negativa
X1	Reactancia de secuencia positiva
Xq	Reactancia del eje de cuadratura
Xd	Reactancia del eje directo
Xdpp	Reactancia subtransitoria del eje directo

Xqpp	Reactancia subtransitoria eje de cuadratura
Xdp	Reactancia transitoria del eje directo
Xqp	Reactancia transitoria eje de cuadratura
R	Resistencia
R0	Resistencia de secuencia cero
R2	Resistencia de secuencia negativa
R1	Resistencia de secuencia positiva
s	Segundos
B	Susceptancia
pu	Valores por unidad
V	Tensión eléctrica o Voltaje

GLOSARIO

Agente comercializador	Agente del Mercado Mayorista, es la persona, individual o jurídica, cuya actividad consiste en comprar y vender bloques de energía eléctrica con carácter de intermediación y sin participar en la generación, transporte, distribución y consumo” ¹ .
Agente distribuidor	Agente del Mercado Mayorista, “es la persona, individual o jurídica, titular o poseedora de instalaciones destinadas a distribuir comercialmente energía eléctrica” ² .
Agente generador	Agente del Mercado Mayorista, “es la persona, individual o jurídica, titular o poseedora de una central de generación de energía eléctrica, que comercializa total o parcialmente su producción de electricidad” ³ .
Agente transportista	Agente del Mercado Mayorista, “es la persona, individual o jurídica, poseedora de instalaciones destinadas a realizar la actividad de transmisión y transformación de electricidad” ⁴ .

¹ Guatemala. *Ley General de Electricidad. Decreto No. 93-96. 1996.*

² *Ibíd.*

³ *Ibíd.*

⁴ *Ibíd.*

Agentes del Mercado Mayorista	Son los generadores, comercializadores, distribuidores, importadores, exportadores y transportista cuyo tamaño supere el límite establecido en el Reglamento de la Ley general de electricidad.
AMM	Acrónimo de Administrador del Mercado Mayorista, ente privado, sin fines de lucro, responsable de la administración del mercado mayorista.
Barra fin	Es la barra que se define arbitrariamente como la barra donde finaliza una línea de transmisión.
Barra inicio	Es la barra que se define arbitrariamente como la barra donde finaliza una línea de transmisión.
Barra infinita	Es una barra que representa, en el análisis de un sistema de potencia "A", a otro sistema "B" grande en comparación con A, cuando ambos sistemas se encuentran interconectados, en dado caso las perturbaciones dentro del sistema A no afectan a la tensión en el punto de conexión, la barra de potencia infinita está representada por una tensión contantes sin impedancia interna.
Barra del lado de alta	Es la barra a la cual se conecta los terminales, con mayor valor de tensión nominal, de un transformador de dos devanados.

Barra del lado de baja	Es la barra a la cual se conecta los terminales, con menor valor de tensión nominal, de un transformador de dos devanados.
CNEE	Acrónimo de Comisión Nacional de Energía Eléctrica, órgano técnico del Ministerio de Energía y Minas, responsable de la regulación del subsector eléctrico.
Falla simple	Es la falla que no ocurre simultáneamente con otra falla.
Falla solida	Es la falla donde la impedancia de falla es igual a 0.
Frecuencia nominal	“Es la frecuencia nominal del Sistema Eléctrico Nacional, con un valor de 60 Hertz” ⁵ .
Gran usuario	Es aquel cuya demanda de potencia excede al límite estipulado en el Reglamento de la Ley general de electricidad.
Impedancia de falla	Es la impedancia que se presenta entre el punto de falla y la tierra.
LGE	Acrónimo de Ley General de Electricidad, es la ley que norma el desarrollo del conjunto de

⁵ Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Normas Técnicas del Servicio de distribución, Resolución CNEE-09-99*. 1999.

actividades de generación, transporte, distribución y comercialización de electricidad, de acuerdo con los principios que se describen en el artículo 1 de la misma ley.

MEM

Acrónimo de Ministerio de Energía y Minas, órgano del Estado responsable de formular y coordinar las políticas, planes de Estado, programas indicativos relativos al subsector eléctrico.

Mercado Mayorista

“Es el conjunto de operaciones de compra y venta de bloques de potencia y energía que se efectúan a corto y a largo plazo entre agentes del mercado”⁶.

NEAST

Acrónimo de Normas de Estudio de Acceso al Sistema de Transporte, “el objetivo de estas normas es establecer el tipo y contenido de los estudios eléctricos para Sistemas de Potencia, que todo interesado debe presentar ante la CNEE, para toda nueva instalación, o ampliación de su infraestructura existente, de generación, transmisión o distribución de energía eléctrica”⁷.

⁶ Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Normas Técnicas del Servicio de distribución, Resolución CNEE-09-99*. 1999.

⁷ Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Normas de estudios de acceso al sistema de transporte, Resolución CNEE-28-98*. 1998.

NTAUCT

Acrónimo de normas Técnicas de Acceso y Uso de la Capacidad de Transporte, los objetivos de esta norma son, establecer el tipo y contenido de los estudios eléctricos para sistemas de potencia, que todo interesado en tener acceso al Sistema de Transporte de Energía Eléctrica, debe presentar ante la CNEE y definir el procedimiento a seguir en la evaluación de solicitudes de acceso a la capacidad de transporte existente y solicitudes de ampliación de la capacidad de transporte del sistema.

NTCSTS

Acrónimo de normas Técnicas de Calidad del Servicio de Transporte y Sanciones, el objetivo de estas normas es establecer los índices de referencia para calificar la calidad con que se proveen los servicios de energía eléctrica en el sistema de transporte en el punto de entrega, las tolerancias permisibles, los métodos de control, las indemnizaciones y las sanciones respecto de los parámetros establecidos en el artículo 2 de estas mismas normas.

NTDOID

Acrónimo de Normas Técnicas de Diseño y Operación de las Instalaciones de Distribución, “estas normas tienen como objetivo establecer las disposiciones, criterios y requerimientos mínimos para asegurar que las mejoras y expansiones de las instalaciones de distribución de energía

eléctrica, se diseñen y operen, garantizando la seguridad de las personas y bienes y la calidad del servicio”⁸.

NTDOST

Acrónimo de Normas Técnicas de Diseño y Operación del Sistema de Transporte, “Estas normas tienen como objetivo establecer las disposiciones, criterios y requerimientos mínimos para asegurar que las mejoras y expansiones de la instalaciones del servicio de transporte de energía eléctrica, se diseñen y operen, garantizando la seguridad de las personas y bienes y la calidad de servicio”⁹.

NTSD

Acrónimo de Normas Técnicas del Servicio de Distribución, el objetivo de estas normas es establecer derechos y obligaciones de los prestatarios y Usuarios del Servicio Eléctrico de Distribución, índices o indicadores de referencia para calificar la calidad con que se proveen los servicios de energía eléctrica, tanto en el punto de entrega como en el punco de utilización de tales servicios, tolerancias permisibles, métodos de control, Indemnizaciones, sanciones y/o multas, respecto de los parámetros que se detallan en al artículo 2 de estas mismas normas.

⁸ Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Normas técnicas de diseño y operación de las instalaciones de distribución, Resolución CNEE-47-99*. 1999

⁹ Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Normas técnicas de diseño y operación del servicio de transporte de energía eléctrica, Resolución CNEE-49-99*. 1999.

NTT

Acrónimo de Norma Técnica para la Expansión del Sistema de Transmisión, “el objetivo de esta norma es establecer los criterios, procedimientos y la metodología para la elaboración del Plan de Expansión del Sistema de Transporte; los procedimientos que se deberán seguir para desarrollar las Obras del Plan de Expansión del Sistema de Transporte; y definir los requisitos y procedimientos que deberán cumplirse para obtener la o las autorizaciones necesarias para el desarrollo de las obras”¹⁰.

RAMM

Acrónimo del Reglamento del Administrador de Mercado Mayorista, define los principios generales del Mercado Mayorista, así como la organización, funciones, obligaciones y mecanismos de financiamiento del Administrador del Mercado Mayorista.

RLGE

Acrónimo de Reglamento de la Ley General de Electricidad, establece disposiciones que se aplican, “dentro del marco de la Ley General de Electricidad, generación, transporte, distribución y comercialización, que incluye la importación y exportación, de electricidad que desarrollan tanto las personas individuales o jurídicas con participación privada, mixta o estatal,

¹⁰ Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Normas técnicas para la expansión del sistema de transmisión, resolución CNEE-28-2009*. 2009.

independientemente de su grado de autonomía y régimen de constitución”¹¹.

Sistema de transmisión “Es el conjunto de subestaciones de transformación y líneas de transmisión, entre el punto de entrega del generador y el punto de recepción del distribuidor o de los grandes usuarios y comprende un sistema principal y sistema secundarios”¹².

Sistema principal “Es el sistema de transmisión compartido por los generadores. La CNEE definirá este sistema de conformidad con el informe que al efecto le presente el administrador del mercado mayorista”¹³.

Sistema secundario “Es aquel que no forma parte del sistema principal. El sistema de distribución privada y final no forma parte del sistema secundario”¹⁴.

Tensión nominal “Es el valor eficaz de la tensión eléctrica, en sus diferentes niveles de tensión, que sirve como base para calcular las desviaciones de los parámetros eléctricos que se controlarán para medir la calidad

¹¹ Guatemala. *Reglamento de la Ley General de Electricidad. Acuerdo Gubernativo Número 256-97*. 1997.

¹² Guatemala. *Ley General de Electricidad. Decreto No. 93-96*. 1996.

¹³ *Ibíd.*

¹⁴ *Ibíd.*

del Servicio Eléctrico de Distribución, que prestan los Distribuidores”¹⁵.

Transmisión

“Es la actividad que tiene por objetivo el transporte de energía eléctrica a través del sistema de transmisión”¹⁶.

¹⁵ Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Normas técnicas del servicio de distribución, Resolución CNEE-09-99*. 1999.

¹⁶ Guatemala. *Ley General de Electricidad. Decreto No. 93-96*. 1996.

RESUMEN

El análisis de sistemas eléctricos de potencia es una disciplina trascendental en el que hacer de la ingeniería eléctrica, a través de los estudios eléctricos que integran esta disciplina, es posible determinar el comportamiento de los sistemas de potencia en escenarios específicos, lo cual permite tomar decisiones oportunas y acertadas para una correcta operación y planificación de los sistema.

El presente trabajo de graduación constituye un esfuerzo académico con el propósito de contribuir de forma significativa en la educación de las futuras generaciones de ingenieros electricistas. El diseño del manual de laboratorio del curso de Análisis de Sistemas de Potencia 1 se enmarca dentro de los objetivos del curso y del propio laboratorio, vinculando los temas de clase con el contexto dentro del cual se desarrolla el análisis de potencia en Guatemala.

El primer capítulo trata sobre los conceptos básicos del análisis de sistemas eléctricos de potencia y el Sistema Nacional Interconectado de Guatemala.

El segundo capítulo aborda una introducción a los diferentes programas gratuitos para la simulación de sistemas de potencia, disponibles para usos educativos y de evaluación.

En el tercer capítulo se desarrolla el diseño de las prácticas de simulación de flujos de carga.

En el cuarto capítulo se desarrolla el diseño de las prácticas de simulación de cortocircuito.

En el quinto capítulo se desarrolla el diseño de la práctica de simulación de estabilidad transitoria y el diseño del proyecto final.

OBJETIVOS

General

Diseñar el manual de laboratorio del curso de Análisis de Sistemas de Potencia.

Específicos

1. Redactar una guía técnica para introducir a los estudiantes en el uso de software de simulación de Análisis de Sistemas de Potencia.
2. Diseñar nuevas prácticas de simulación de flujo de potencia, fallas de corto circuitos y estabilidad transitoria que permitan al estudiante tener una experiencia idéntica a los estudios que se realizan en el subsector eléctrico.
3. Estructurar nuevos lineamientos para el proyecto final de laboratorio que integre los conocimientos que el estudiante adquirió durante el curso y el laboratorio.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas eléctricos de potencia permiten el aprovechamiento de fuentes de energía a gran escala para la producción de electricidad. Estos sistemas permiten la transmisión efectiva de grandes cantidades de energía eléctrica desde las plantas de generación hasta los centros de consumo, separados por cientos de kilómetros.

El análisis de sistemas de potencia es una materia que aglutina los estudios eléctricos que hacen posible examinar el comportamiento de los sistemas de potencia ante determinados escenarios.

Los software de simulación para el análisis de sistemas de potencia, permiten realizar estudios eléctricos en tiempos muy cortos y reducen considerablemente el error en los resultados, no obstante la efectividad de los simuladores dependerá de la calidad de los datos y los criterios técnicos empleados por el ingeniero responsable de los estudios.

El presente trabajo de graduación aborda la simulación de los estudios eléctricos de flujo de carga, fallas de cortocircuito y estabilidad transitoria.

La simulación de flujos de carga permite determinar el comportamiento de los parámetros eléctricos de los sistemas de potencia en determinados escenarios.

La simulación de fallas de cortocircuito permite determinar el comportamiento de los parámetros eléctricos de los sistemas de potencia al presentarse una falla de cortocircuito.

La simulación de estabilidad transitoria permite determinar el comportamiento de los sistemas de potencia después de ocurrida una perturbación transitoria.

1. ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA Y EL SISTEMA NACIONAL INTERCONECTADO

1.1. Sistemas de potencia

Son sistemas eléctricos que tienen como fin interconectar los centros de generación de energía eléctrica con los centros de consumo, permitiendo la transmisión de grandes cantidades de energía a grandes distancias de forma efectiva. Operan a niveles de tensión que van desde miles hasta cientos de miles de voltios. Los sistemas de potencia permiten suministrar energía eléctrica a países enteros.

Por sus características y su importancia estos sistemas eléctricos requieren de estudios eléctricos especializados, que permiten entender su comportamiento, a este conjunto de estudios se les llama análisis de sistemas de potencia.

1.2. Elementos de un sistema de potencia

Los sistemas de potencia están compuestos por elementos que permiten suministrar energía eléctrica a miles de usuarios de forma continua y segura, es decir, dentro de parámetros de calidad, que garantizan el suministro sin interrupciones y la seguridad de personas y equipos. Para el análisis del sistema de potencia, sus elementos se pueden clasificar de la siguiente manera:

1.2.1. Generadores

Son máquinas eléctricas que transforman las diferentes fuentes de energías renovables y no renovables en energía eléctrica. En los diagramas unifilares es común que se representen con un círculo que encierra una onda sinusoidal u otra imagen que representa el tipo de tecnología que utiliza el generador como fuente de energía primaria.

Figura 1. **Símbolo de generador**



Fuente: elaboración propia.

1.2.2. Barras

Son los nodos del sistema de potencia, las barras son los únicos elementos a los cuales se puede conectar los otros elementos del sistema. Son fundamentales para la operación segura y confiable del sistema de potencia, estructuralmente son conductores que pueden ser rígidos, razón por la cual reciben el nombre de barras.

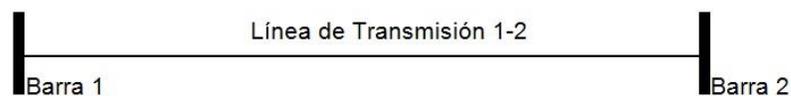
Es común que las barras se representen en los diagramas unifilares por líneas continuas cortas y más gruesas que las líneas utilizadas para representar las líneas de transmisión. Las barras pueden aislarse a través del aire o de un gas encapsulado, comúnmente se denomina tecnología de aislamiento convencional cuando las barras se aíslan a través del aire y tecnología de

aislamiento no convencional, cuando las barras se aíslan a través de un gas encapsulado.

1.2.3. Líneas de transmisión

Sirven de medio físico para transmitir la energía eléctrica. Desde el punto de vista constructivo las forman los cables conductores que transportan la energía eléctrica, los medios de aislamiento y en el caso de las líneas aéreas también por estructuras que sostienen tanto los conductores como los medios de aislamiento. En los diagramas unifilares se representan con líneas continuas que interconectan las barras del sistema de potencia al que pertenecen.

Figura 2. **Representación gráfica de una línea de transmisión interconectada con dos barras**

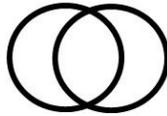


Fuente: elaboración propia.

1.2.4. Transformadores

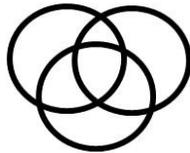
Son máquinas eléctricas cuya principal función es elevar o reducir el nivel de tensión eléctrica, con el fin de hacer eficiente la transmisión de energía. Los transformadores interconectan barras de distinto nivel de tensión. Regularmente en un diagrama unifilar los transformadores, dependiendo de los devanados que posean, se representan con dos o tres círculos entrelazados.

Figura 3. **Símbolo de transformador de dos devanados**



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. **Símbolo de transformador de tres devanados**

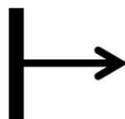


Fuente: elaboración propia.

1.2.5. **Cargas**

Son los elementos que consumen la energía que se transmite por medio del sistema de potencia. También suele llamárseles demandas, se conectan a una barra y se representan comúnmente en un diagrama unifilar con una flecha que apunta en dirección opuesta a la barra a la cual están conectadas.

Figura 5. **Símbolo de carga conectada a una barra**



Fuente: elaboración propia.

1.2.6. Bancos de capacitores

Como su nombre lo indica son bancos de capacitores que se utilizan para contrarrestar los fenómenos inductivos que presentan en los sistemas de potencia. Es común que se les represente en un diagrama unifilar con el signo de los capacitores electrolíticos.

Figura 6. **Símbolo de banco de capacitores**



Fuente: elaboración propia.

1.2.7. Reactores

Son máquinas eléctricas que pueden ser consideradas básicamente como inductancias de alta potencia, se utilizan para contrarrestar los fenómenos capacitivos que se presentan en los sistemas de potencia. Es común que se les represente en un diagrama unifilar con el signo de una inductancia.

Figura 7. **Símbolo de reactor**



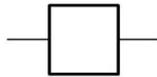
Fuente: elaboración propia.

1.2.8. Interruptores de potencia

Los sistemas de potencia para operar de forma segura y efectiva necesitan de sistemas adicionales de control y protección, entre los elementos que forman estos sistemas se encuentran los interruptores de potencia que dentro del análisis de sistemas de potencia, resulta necesario conocer.

Los interruptores de potencia son elementos de protección y control altamente sofisticados, que tiene como principal función interrumpir la corriente eléctrica entre dos puntos del sistema de potencia cuando es necesario. Poseen sistemas inteligentes que les permiten operar según los requerimientos. En un diagrama unifilar suelen ser representados con un cuadro vacío si operan comúnmente abiertos o un cuadro relleno si operan comúnmente cerrados.

Figura 8. **Símbolo de interruptor de potencia comúnmente abierto**



Fuente: elaboración propia.

Figura 9. **Símbolo de interruptor de potencia comúnmente cerrado**



Fuente: elaboración propia.

1.3. Subestaciones eléctricas

Las barras, transformadores, reactores y bancos de capacitores se encuentran ubicados generalmente dentro de instalaciones llamadas estaciones o subestaciones eléctricas, que tienen como objetivo garantizar la seguridad de los seres humanos y los equipos, sin interrumpir la operación normal de los sistemas de potencia.

Dentro de las estaciones eléctricas siempre se encuentra instalada al menos una barra que interconecta como mínimo una línea de transmisión con otro elemento del sistema de potencia, la instalación de elementos eléctricos de potencia dentro de la estación dependerá de los requerimientos para los cuales fue construida. Dentro de las subestaciones también se encuentran instalados equipos que forman parte de los sistemas de protección y control de los sistemas de potencia.

Por los elementos instalados en una subestación eléctrica la subestaciones eléctricas se pueden dividir en las siguientes áreas:

1.3.1. Área de barras

Es el área donde se encuentran instaladas las barras y la infraestructura que las soportan y aíslan.

1.3.2. Área de campos de conexión equipados

Es el área donde se encuentran instalados los equipos de protección y control necesarios para conectar los otros elementos del sistema de potencia a las barras.

1.3.3. Área de campos de transformación

Es el área donde se encuentran instalados los transformadores, en algunos casos, también donde se encuentran los equipos de protección y control necesario para conectar los transformadores a las barras.

1.3.4. Área de reactores o bancos de transformadores

Es el área donde se encuentran instalados los reactores o bancos de transformadores.

Las subestaciones eléctricas, como se les llama usualmente en Guatemala, son instalaciones fundamentales para el correcto funcionamiento de los sistemas de potencia, dependiendo de los elementos eléctricos de potencia instalados en ellas pueden clasificarse de la siguiente manera:

1.3.5. Subestaciones de transformación

Son estaciones eléctricas dentro de las cuales se encuentran instalados transformadores.

1.3.6. Subestaciones elevadoras

Son estaciones de transformación, donde los transformadores tienen la función de elevar el nivel de tensión.

1.3.7. Subestaciones reductoras

Son estaciones de transformación, donde los transformadores tienen la función de reducir el nivel de tensión.

1.3.8. Subestaciones de distribución

Son estaciones reductoras, cuya principal función es alimentar los circuitos de distribución de los centros de consumo.

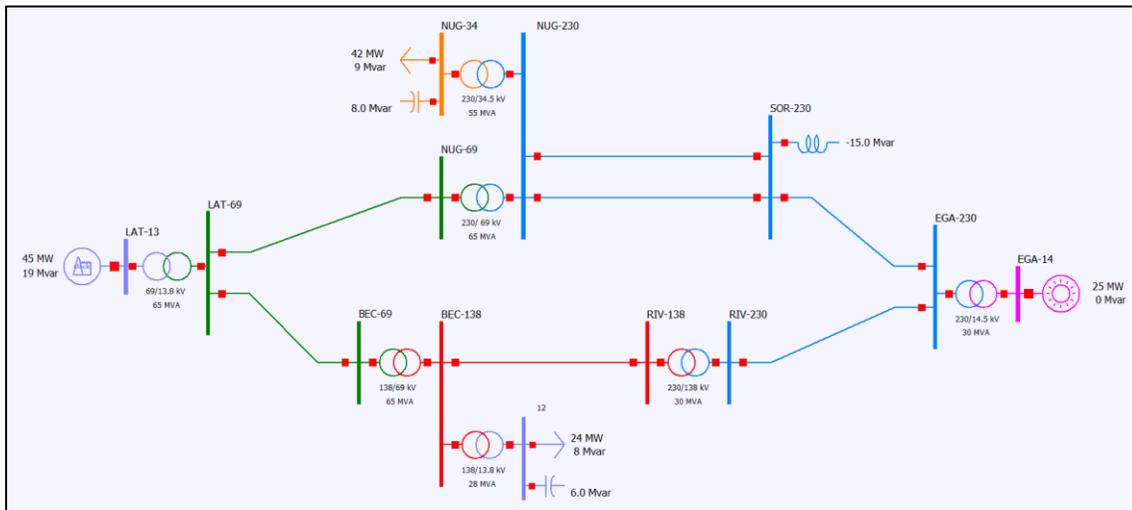
1.3.9. Subestaciones de maniobra

Son estaciones eléctricas que no poseen transformadores, la configuración de las barras dentro de estas subestaciones tiene como principal objetivo permitir la maniobrabilidad de los sistemas de potencia.

1.4. Representación gráfica de los sistemas de potencia

Gráficamente un sistema potencia suele representarse por medio de un diagrama unifilar, a continuación, se presenta un ejemplo:

Figura 10. **Diagrama unifilar de un sistema de potencia**



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator Educational-Evaluation 19.

1.5. Clasificación de sistemas de potencia

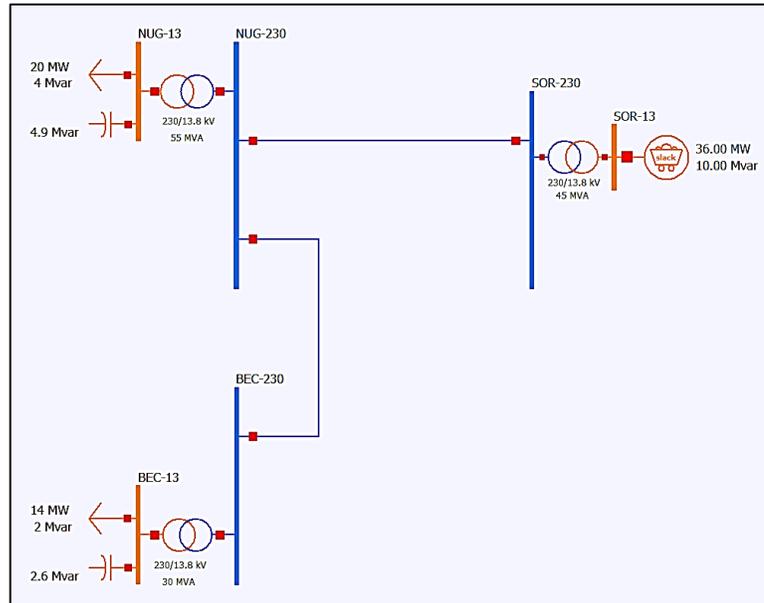
Por la forma en que se interconectan las subestaciones de un sistema de potencia, los sistemas se pueden clasificar en radiales, mallados o mixtos.

1.5.1. Sistemas radiales

Son sistemas de potencia en donde las subestaciones se interconectan en serie, en estos sistemas entre una y otra subestación solo existe una única línea transmisión, esto significa que entre un nodo del sistema y otro solamente existe un camino para que la corriente eléctrica fluya.

A continuación se presenta un ejemplo del diagrama unifilar de un sistema radial:

Figura 11. **Diagrama unifilar de un sistema de potencia radial**



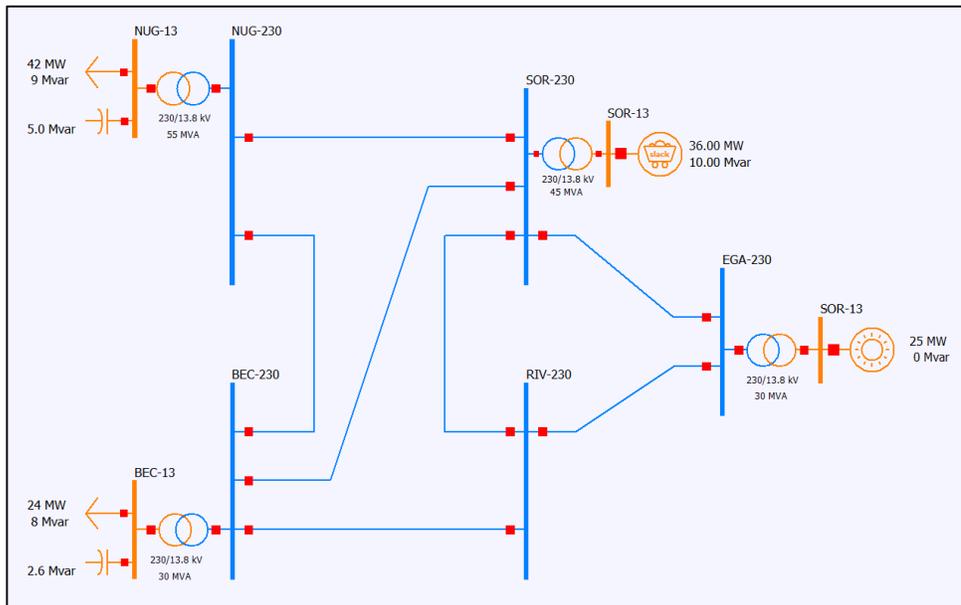
Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator Educational-Evaluation 19.

1.5.2. **Sistemas mallados**

Son sistemas de potencia en donde las subestaciones se interconectan de manera tal que se forman mallas o anillos, esto significa que existen en el sistema dos o más líneas de transmisión a través de las cuales la corriente eléctrica puede fluir de un nodo a otro.

A continuación, se presenta un ejemplo del diagrama unifilar de un sistema mallado:

Figura 12. Diagrama unifilar de un sistema de potencia mallado



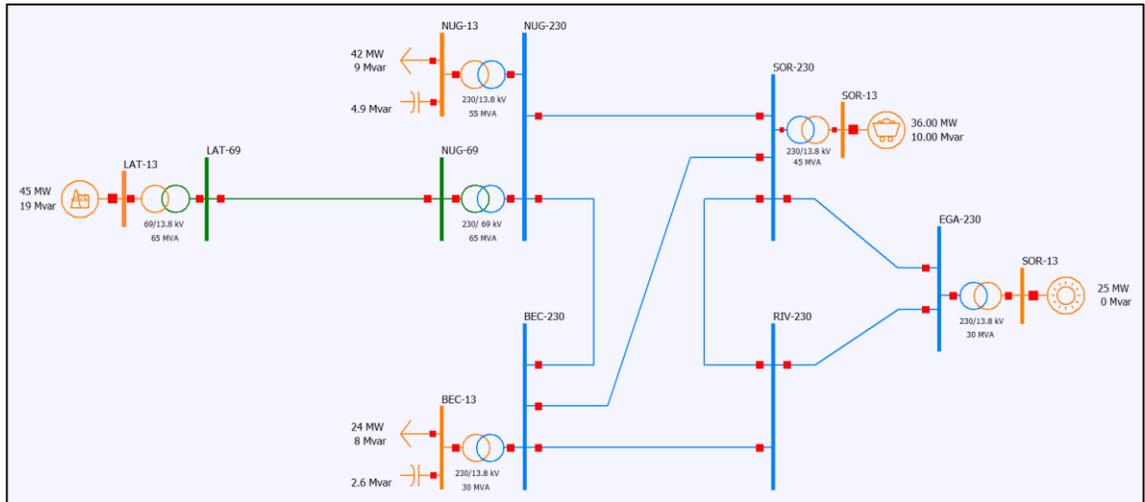
Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator Educational-Evaluation 19.

1.5.3. Sistemas mixtos

Por lo general los sistemas de potencia se integran por subsistemas tanto radiales y como anillados, en Guatemala por ejemplo el SNI es un sistema mixto, la parte mallada se define como sistema principal, mientras que los sistemas radiales se definen como sistema secundarios.

A continuación, se presenta un ejemplo del diagrama unifilar de un sistema mixto:

Figura 13. Diagrama unifilar de un sistema de potencia mixto



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator Educational-Evaluation 19.

1.6. Confiabilidad de los sistemas de potencia

La confiabilidad de un sistema de potencia es la capacidad que el sistema tiene para garantizar la continuidad del suministro de energía eléctrica. En este sentido resulta evidente que los sistemas anillados son más confiables que los sistemas radiales, dado que en los sistemas radiales la pérdida de una línea de transmisión implica que entre dos determinadas barras no existirá flujo de carga, mientras que para los sistemas mallados la pérdida de una sola línea de transmisión no limita que entre dos nodos exista flujo de potencia, porque existen varios caminos para que fluya corriente eléctrica entre dos barras.

1.7. Sistema Nacional Interconectado

La Ley General de Electricidad establece el marco legal que rige el subsector eléctrico de Guatemala, dentro de esta ley se define el Sistema Nacional Interconectado (SNI) como la porción interconectada del Sistema Eléctrico Nacional.

El Sistema Eléctrico Nacional (SEN) es el conjunto de instalaciones, interconectadas o no, dentro del cual se efectúan las diferentes transferencias de energía eléctrica entre las diversas regiones del país.

El SEN está integrado por centrales generadoras, líneas de transmisión, subestaciones eléctricas, redes de distribución, equipos eléctricos, centros de carga y en general toda la infraestructura eléctrica destinada a la prestación del suministro de energía eléctrica.

En la actualidad el Sistema Nacional Interconectado (SNI) está formado por todo el Sistema Eléctrico Nacional, pero eso no siempre fue así, existieron sistemas eléctricos aislados por ejemplo el sistema eléctrico del departamento de Petén.

Es necesario resaltar la diferencia entre un sistema de potencia y un sistema de transmisión, este último se define en la Ley General de Electricidad como “el conjunto de subestaciones de transformación y líneas de transmisión, entre el punto de entrega del generador y el punto de recepción de la distribuidora o de los grades usuarios y que comprende un sistema principal y secundario”¹⁷.

¹⁷ Guatemala. *Ley General de Electricidad, Decreto No. 93-96. 1996.*

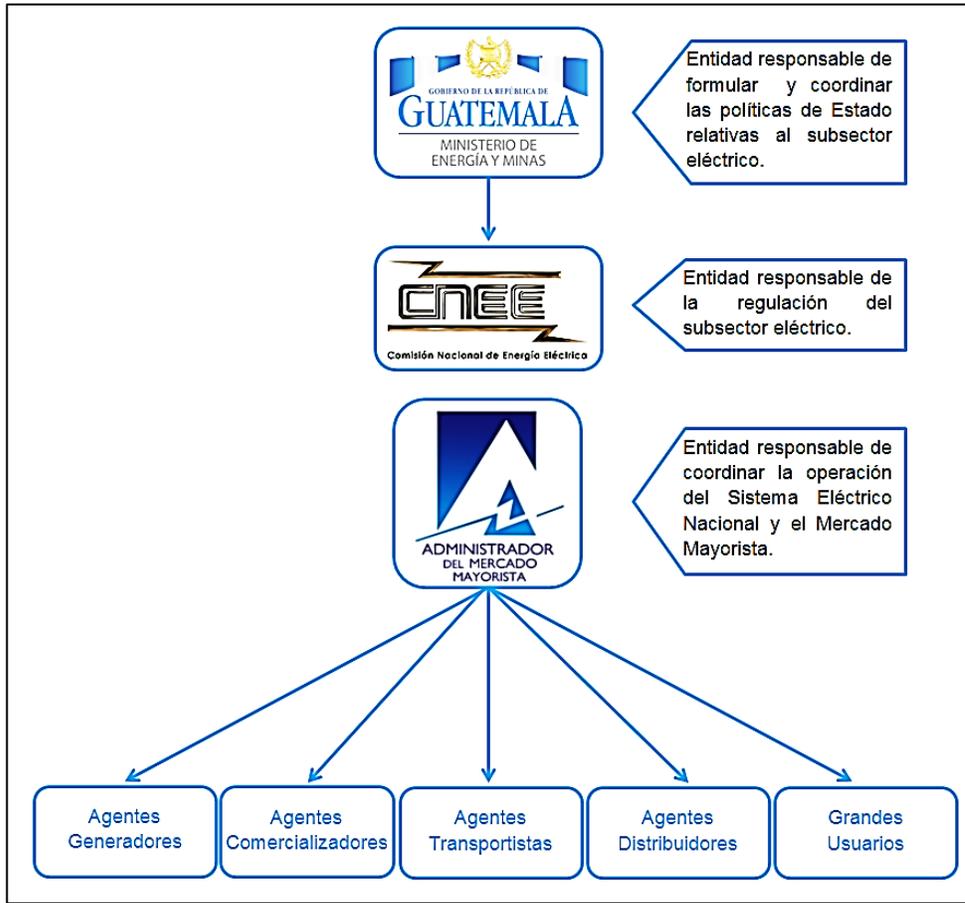
Dentro del marco regulatorio guatemalteco un sistema de transmisión es la parte de un sistema de potencia que incluye únicamente transformadores, barras, líneas de transmisión, reactores y bancos de capacitores.

En 1996, el estado de Guatemala reformó el subsector eléctrico guatemalteco a través de la Ley General de Electricidad, estableciendo el marco regulatorio dentro del cual se desarrolla el mercado eléctrico actual.

La Ley General de Electricidad establece los principios generales dentro de los cuales se deberán desarrollar las actividades del subsector eléctrico, crea la Comisión Nacional de Energía Eléctrica (CNEE), entidad reguladora del subsector eléctrico; separa las funciones de la actividad eléctrica; crea el Administrador de Mercado Mayorista (AMM), entidad responsable de administrar la operación del Sistema Eléctrico Nacional y el Mercado Mayorista.

El reglamento de la Ley General de Electricidad y El reglamento del Administrador del Mercado Mayorista, amplían y desarrollan lo establecido en la Ley General de Electricidad.

Figura 14. Estructura del subsector eléctrico de Guatemala



Fuente: elaboración propia, empleando Microsoft Word.

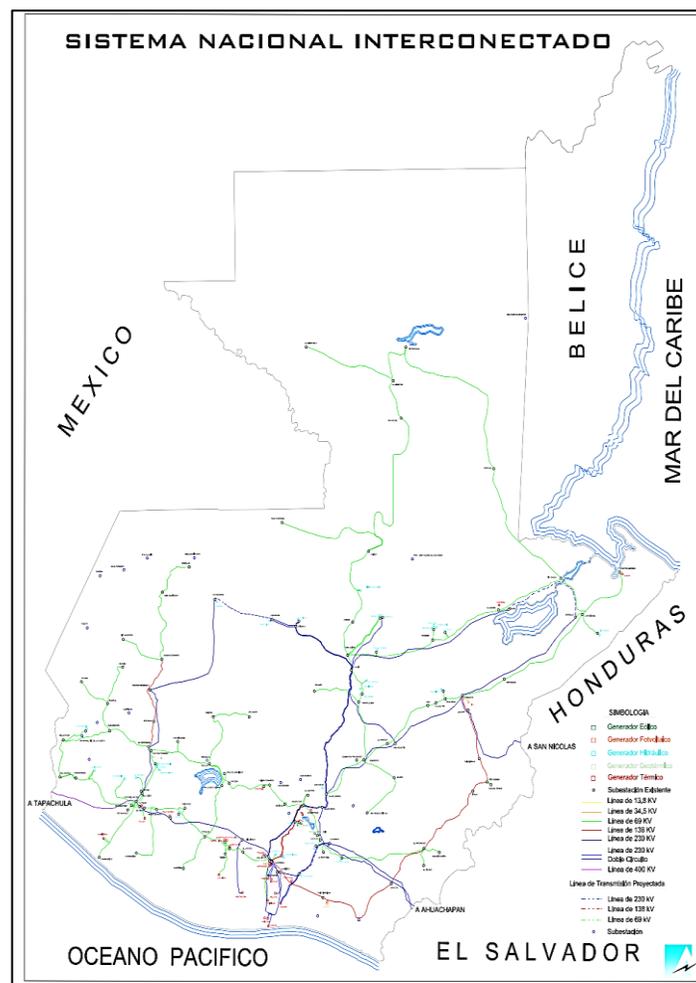
Cumpliendo con lo establecido en la Ley General de Electricidad y sus reglamentos, la CNEE y el AMM han emitido respectivamente Normas Técnicas y Normas de Coordinación Comercial y Operativa, que forman el canon normativo de las actividades del subsector eléctrico.

Dentro de este contexto, el SNI es el medio físico por medio del cual se realizan las actividades que hacen posible la venta y compra de energía eléctrica en el Mercado Mayorista.

El sistema de transmisión del SNI está formado por un sistema principal y uno secundario, el sistema principal es definido por la CNEE y el sistema secundario son todos los elementos que no forman parte del sistema.

A continuación se presenta un mapa del SNI publicado por el Administrador del Mercado Mayorista en su Informe Estadístico Anual de 2014.

Figura 15. **Mapa del Sistema Nacional Interconectado**



Fuente: Administrador del Mercado Mayorista. Informe estadístico anual 2015.

1.8. Análisis de sistemas de potencia

El análisis de los sistemas de potencia consiste en estudios eléctricos que permiten determinar el comportamiento de los sistemas de potencia en determinadas condiciones.

En el análisis de sistemas de potencia los estudios eléctricos se hacen a través de software de simulación que permiten analizar el comportamiento de los sistemas, formados por un enorme número de elementos, de forma eficaz y rápida.

Los estudios eléctricos que se abordan en el curso de Análisis de Sistemas de Potencia 1 son los estudios de flujo de carga, los estudios de fallas de corto circuito y los estudios de estabilidad transitoria.

1.9. Análisis de sistemas de potencia dentro del marco regulatorio de Guatemala

Los estudios eléctricos que se realizan en Guatemala se realizan de acuerdo a los criterios y procedimientos establecidos en el marco regulatorio vigente en el país. La Ley General de Electricidad, sus reglamentos y el conjunto de normas técnicas y de coordinación operativa y comercial establecen el marco de referencia donde se realizan las diferentes actividades del subsector eléctrico, incluyendo el análisis de sistemas de potencia.

1.9.1. Normas Técnicas de Estudios de Acceso al Sistema de Transporte (NEAST)

Para el análisis de sistemas de potencia en Guatemala tiene relevante importancia las Normas Técnicas de Estudios de Acceso al Sistema de Transporte (NEAST) emitidas por la CNEE mediante la resolución CNEE 28-98, el 25 de noviembre de 1998.

Las NEAST tienen como objetivo “establecer el tipo y contenido de los estudios eléctricos para Sistemas de Potencia, que todo interesado debe presentar ante la CNEE, para toda nueva instalación o ampliación de su infraestructura existe de generación, transmisión o distribución de energía eléctrica”¹⁸.

Las NEAST son de aplicación obligatoria para todo interesado en desarrollar obras de generación, transmisión o distribución que impacten sobre el sistema de transmisión existente de energía eléctrica.

Las NEAST establecen que “en general, los estudios eléctricos deberán mostrar el impacto resultante de las instalaciones propuestas y de los equipos adicionales requeridos de transformación, maniobra, control, protección y medición, sobre el Sistema de Transmisión existente y sus parámetros eléctricos”¹⁹.

Los estudios eléctricos requeridos, respecto el tipo de instalación, según lo establecido en las NEAST se detallan en el siguiente cuadro:

¹⁸ Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Normas de estudios de acceso al sistema de transporte, Resolución CNEE-28-98*. 1998.

¹⁹ *Ibíd.*

Tabla I. **Estudios requeridos por tipo de instalación (NEAST)**

Tipo de estudio	Tipo de instalación		
	Generación	Transporte	Distribución
Flujo de cargas	Si	Si	Si
Cortocircuitos	Si	Si (1)	Si (1)
Estabilidad transitoria	Si	Si (1)	Si (1)
(1) En el caso de ser evidente o se demostrare un impacto en el comportamiento dinámico del sistema de transmisión existe ante determinadas perturbaciones, el interesado de la nueva instalación o ampliación del sistema de Transporte o de Distribución, podrá solicitar a la CNEE la no realización de estos estudios.			

Fuente: Normas Técnicas de Estudios de Acceso al Sistema de Transporte (NEAST).

1.9.2. Normas Técnicas de Acceso y Uso de la Capacidad de Transporte (NTAUCT)

Las NTAUCT establecen que estudios deberán efectuarse previo a la conexión de nuevas instalaciones de generación, transporte o demanda al Sistema de Transporte de Energía Eléctrica.

Las NTAUCT dividen los estudios a realizar en tres niveles:

1.9.2.1. Estudios básicos

Las NTAUCT definen que “de haberse realizado los estudios solicitados en las NEAST, estos se repetirán utilizando los datos y parámetros definitivos del equipo a instalar e introduciendo las adecuaciones necesarias en los escenarios e hipótesis adoptadas, en caso contrario los estudios deberán efectuarse completamente”²⁰.

²⁰ Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Normas técnicas de acceso y uso de la capacidad de transporte, Resolución CNEE-33-98*. 1998.

Adicionalmente las NTAUCT contemplan que en caso que se demostrara que los estudios presentados oportunamente, según lo establecen las NEAST, “se adecúan a datos y parámetros definitivos del equipo a instalar y que los escenarios e hipótesis bajo las cuales esos estudios fueron realizados continúan siendo válidos”,²¹ la CNEE podrá aceptar dichos estudios en cuanto satisfagan las exigencias establecidas en las NTAUCT.

1.9.2.2. Estudios primarios

Las NTAUCT establecen que estos estudios están dirigidos a establecer las necesidades de instalación de equipos de control, recursos estabilizantes, instalaciones de arranque en negro, formación de islas y de limitaciones de perturbaciones en el sistema, que puedan ser producidos por la instalación de nuevo equipo o ampliación del sistema de transporte. En este sentido se contempla la realización de estudios de pequeñas perturbaciones, estudios de transitorios electromagnéticos y estudios detallados de estabilidad transitoria.

1.9.2.3. Estudios secundarios

Las NTAUCT definen que estos estudios profundizarán los realizados como parte del nivel de estudios primarios. Las NTAUCT dependiendo del proyecto establecen que “se deben realizar los estudio necesario para el ajuste del equipo de control y de los eventuales recursos estabilizantes que resulten necesarios.”²²

²¹ Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Normas técnicas de acceso y uso de la capacidad de transporte, Resolución CNEE-33-98*. 1998.

²² *Ibíd.*

2. INTRODUCCIÓN A LOS SOFTWARE DE SIMULACIÓN PARA EL ANÁLISIS DE SISTEMAS DE POTENCIA

En el mercado existe una amplia oferta de software de simulación para el análisis de sistemas de potencia, entre ellos se pueden mencionar a PowerWorld Simulator, PSS®E, ETAP y NEPLAN. Es necesario resaltar que estos no son los únicos.

Los software de simulación para el análisis de sistemas de potencia, tienen costos que rondan los cientos de miles de dólares estadounidenses, no obstante la mayoría ofrece versiones de prueba gratuitas, para fines educativos o de evaluación, regularmente estas versiones tienen disponibles las mismas herramientas y paquetes que las versiones comerciales, pero con algunas restricciones en cuanto al número de barras disponibles para simular, el tiempo límite de la licencia, entre otras.

Todas las versiones de prueba de los programas de simulación para el análisis de sistemas de potencia, tienen disponibles manuales de ayuda gratuitos, con la información requerida para aprender a usarlos; es necesario estudiar detenidamente estos manuales si se desea aprender a usar de forma efectiva los programas de simulación.

En la mayoría de los casos los manuales de ayuda están escritos en idioma inglés. Esto no debe constituir un obstáculo, dado que el dominio del idioma inglés es una competencia necesaria para el éxito en el ámbito profesional. No obstante, si se carece del conocimiento necesario se puede

hacer uso de las herramientas de traducción que poseen los diferentes navegadores web.

A continuación, se presenta una descripción de algunas versiones de prueba de simuladores de sistemas de potencia recomendables:

2.1. PowerWorld Simulator Educational-Evaluation

PowerWorld Simulator Educational- Evaluation es un software de prueba gratuito, desarrollado por PowerWorld Corporation, su entorno gráfico es amigable e intuitivo, lo que permite un ahorro significativo de horas hombre para aprender a usarlo; se encuentra disponible para fines educativos y de evaluación, puede simular sistemas de potencia con un número máximo de 13 barras, guardar y editar diagramas unifilares y bases de datos. Puede usarse por tiempo ilimitado e incluye la mayor parte de las herramientas y complementos disponibles para software comercial PowerWorld Simulator - Versión 19.

Figura 16. **Logo de PowerWorld Corporation**



Fuente: Software PowerWord Simulator Educational-Evaluation 19

2.1.1. Descarga e instalación

La última versión del software PowerWorld Simulator Educational-Evaluation puede descargarse del sitio web de PowerWorld Corporation, al cual se puede acceder copiando y pegando en la barra de direcciones de cualquier navegador la siguiente dirección <http://www.powerworld.com/>. Los pasos para descargar e instalar este software se detallan en el Manual de Laboratorio del Curso de Análisis de Sistemas de Potencia 1, Primera edición, que se encuentra en el apéndice A.

2.1.2. Manual de ayuda

Una vez instalado el software PowerWorld Simulator Educational-Evaluation, para aprender a usarlo se debe emplear el manual de ayuda del software, que se encuentra disponible en dos versiones una local y otra web. La versión local está integrada por archivos con extensión .htm guardados en la PC automáticamente por el instalador, esta versión puede visualizarse por medio de un navegador web sin necesidad de conexión a internet y la versión web se encuentra publicada en el sitio web de PowerWorld Corporation.

2.1.3. Entorno gráfico

El entorno gráfico del software PowerWord Simulator está dividido en dos modos de trabajo interactivo, el Modo edición (Edit Mode) y el Modo Correr (Run Mode).

2.1.3.1. Modo edición (Edit Mode)

Este modo permite crear escenarios de simulación, introducir y editar datos, construir y editar diagramas unifilares.

2.1.3.2. Modo correr (Run Mode)

Este modo permite correr las simulaciones de los escenarios creados.

2.2. PSS®E Xplore

Es una versión gratuita del software PSS®E, desarrollado por Siemens, este software se encuentra disponible para fines educativos, permite simular sistemas de potencia con un número máximo de 50 barras, ofrece todas las herramientas de análisis de la versión comercial del software PSS®E, puede usarse por un tiempo ilimitado y tiene un entorno gráfico técnico.

2.2.1. Descarga e instalación

El software PSS®E Xplore puede descargarse del sitio web de Siemens, al cual se puede acceder ingresando en la barra de direcciones de cualquier navegador web la siguiente dirección: <http://w3.siemens.com/>.

2.3. ETAP Demo

Es una versión gratuita de evaluación del software ETAP, desarrollada por la empresa ETAP, ofrece todas las características y funciones de análisis de la última versión comercial del software ETAP, puede usarse por un período de treinta días.

2.3.1. Descarga e instalación

El software ETAP Demo puede descargarse del sitio web de la empresa ETAP, al cual se puede acceder copiando y pegando en la barra de direcciones de cualquier navegador web la siguiente dirección: <http://etap.com/>.

Figura 17. **Logo del Software ETAP 14.1**



Fuente: Software ETAP 14.1.0 Demo.

2.4. Demo NEPLAN 360

Es una versión gratuita de la aplicación NEPLAN 360, una solución de simulación web desarrollada por la empresa NEPLAN AG, disponible para fines de evaluación, se requiere de conexión a internet para poder usarla.

Se puede acceder a la aplicación Demo NEPLAN 360 copiando y pegando en la barra de direcciones de cualquier navegador web el siguiente enlace: <http://www.neplan.ch/en-demo-request/>.

2.5. Demo NEPLAN Desktop

Es una versión gratuita del software NEPLAN, desarrollado por la empresa NEPLAN AG, disponible para fines de demostración.

2.5.1. Descarga e instalación

El software PSS®E Xplore puede descargarse del sitio de la empresa NEPLAN AG, al cual se puede acceder copiando y pegando en la barra de direcciones de cualquier navegador web el siguiente enlace: <http://www.neplan.ch/en-demo-request/>. Hay que tomar en cuenta que para descargar este software el interesado debe contar con una dirección de correo electrónico empresarial o de una universidad, la empresa NEPLAN AG no acepta correos gmail, hotmail, yahoo, entre otros.

2.6. NEPLAN Student version

Es una versión gratuita de la aplicación NEPLAN 360, desarrollada por la empresa NEPLAN AG, disponible para fines educativos, se requiere de conexión a internet para poder usarla. Se puede acceder a la aplicación NEPLAN Student version copiando y pegando en la barra de direcciones de cualquier navegador web el siguiente enlace: <http://www.neplan.ch/en-demo-request/>.

3. SIMULACIÓN DE FLUJOS DE POTENCIA

3.1. Estudio de flujo de carga

El estudio de flujo de carga permite analizar el comportamiento de los parámetros eléctricos de los sistemas de potencia, este estudio permite determinar las corrientes en la línea de transmisión y los voltajes en las barras de un sistema de potencia, con los valores de estos parámetros se puede calcular la potencia aparente, es decir la potencia activa y reactiva, transmitida de un extremo a otro de una línea de transmisión, es por ello que a estos estudios también suelen llamarse estudios de flujo de potencia.

La solución de un problema de flujo de carga para un sistema de potencia dado, es la fotografía instantánea del comportamiento del sistema en un instante con determinadas condiciones. Al conjunto de datos de un sistema de potencia y las condiciones en las que opera en un determinado instante se le llama escenario o caso.

Para analizar el comportamiento de un sistema de potencia en un período t , se deben conocer cómo cambian las condiciones del sistema durante el período que se desea analizar. Para n cambios de condiciones del sistema se define n casos o escenarios. El comportamiento de los parámetros de un sistema de potencia no cambia si las condiciones del sistema se mantienen constantes, resulta evidente que resolver más de un problema por caso es innecesario, dado que los resultados serán los mismos.

Determinado el número de casos o escenarios, se obtiene el número de problemas de flujos de carga que deberán ser resueltos. La solución de los n problemas de flujo de carga y el análisis de sus resultados, constituye el estudio de flujo de carga para un sistema de potencia en un período t , que puede abarcar horas, días, semanas, meses o años.

Los problema de flujo de carga pueden resolverse empleado diversos métodos de análisis numérico, entre ellos se puede mencionar el método de Gauss – Seidel y Newton – Raphson. Para un número n de barras muy grande, resolver estos problemas se vuelve una tarea titánica, sin embargo, los ordenadores modernos han permitido el desarrollo de software que resuelven estos problemas en tiempos muy cortos, casi instantáneos, las últimas versiones de estos software resultan herramientas muy potentes y amigables, con una amplia gama de opciones que facilitan la simulación de estudios de flujo de carga.

3.2. Consideraciones técnicas en los estudios de flujo de carga

La simulación de un flujo de potencia requiere definir consideraciones técnicas que permitan hacer un análisis objetivo de los resultados.

Los resultados de una simulación de flujo de potencia dependerán de las consideraciones técnicas que el analista tome al momento de iniciar el estudio.

A continuación, se describen las consideraciones técnicas más importantes que deber ser definidas para realizar estudios de flujo de potencia.

3.2.1. Bases de datos

Para realizar cualquier estudio eléctrico es necesario contar con los datos correctos del sistema de potencia que se desea analizar, el éxito de los estudios dependerá de esto, es responsabilidad del ingeniero analista verificar que los datos disponibles son los correctos, de lo contrario no se puede garantizar que el modelo eléctrico a utilizar permita obtener resultados confiables.

Al elaborar las bases de datos es recomendable utilizar una nomenclatura que facilite el análisis tanto de la base como de los resultados obtenidos.

3.2.2. Escenarios

Es de vital importancia definir las condiciones de operación del sistema de potencia en los instantes que se desea analizar.

El estudio de flujo de carga deber incluir el análisis de los escenarios necesarios para determinar el comportamiento del sistema dentro del período de estudio o como mínimo los escenarios que el marco regulador establezca.

3.2.3. Despacho de generación

El despacho de generación es la designación de las unidades de generación que se deben operar en un determinado escenario. El despacho de generación por lo regular es definido por la institución responsable de la operación del sistema, en función de criterios de optimización tanto técnicos como económicos. En Guatemala el responsable del establecer los despachos de generación es el Administrador del Mercado Mayorista.

3.2.4. Software de simulación

La elección del programa de simulación que se utilizará en el estudio de flujo de carga debe satisfacer los estándares fijados por el marco regulatorio, la efectividad del software en la práctica dependerá de ello. Otros aspectos importantes a tomar en cuenta son el soporte técnico que la compañía proveedora ofrece y el costo de inversión que requiere la compra del programa.

3.2.5. Método de cálculo

Es el método numérico iterativo utilizado para resolver el problema de flujo de carga. El ingeniero encargado del estudio determinará que método utilizará, en función de los requerimientos del análisis que desea realizar, por ejemplo el margen de error admisible en los resultados o el objeto del estudio, es decir si es con fines de planificación u operación.

3.2.6. Generador de compensación

Es un tipo especial de generador que no tiene definido un valor constante de potencia a generar, su principal función es compensar los faltantes o excedentes de potencia aparente del sistema para un escenario dado, es decir generar la potencia aparente que el sistema demanda y que los otros generadores no pueden satisfacer o en el caso de ser necesario absorber la potencia aparente, cuando la potencia generada por los otros generadores excede la demanda del sistema.

Para realizar un estudio de flujo de carga es necesario definir que generador del sistema actuará como generador de compensación, todos los

programas de simulación necesitan que se defina al menos un generador de compensación dentro del sistema analizado.

En el software PowerWord Simulator el generador de compensación se denomina generador Slack, que en inglés se entiende como generador flotante, nombre que hace referencia a su capacidad de generar o absorber un valor no definido de potencia aparente, según lo requiera el comportamiento del sistema de potencia para un determinado escenario.

3.2.7. Barra de compensación

Es la barra a la cual se conecta el generador de compensación. En el programa PowerWord Simulator es necesario designar la barra de compensación, los generadores que se conecten a la barra designada como barra de compensación serán definidos automáticamente por el programa como generadores de compensación.

3.2.8. Barras de voltaje controlado

Son barras del sistema que tienen como restricción, mantener constante la magnitud de la tensión. En cada barra de voltaje controlado se tiene un generador conectado.

3.2.9. Regulación de tensión

En Guatemala las Normas Técnicas de Calidad de Servicio de Transporte y Sanciones (NTCSTS) establecen que para alta tensión, la tolerancia admisible de la magnitud del voltaje respecto del valor nominal es del 5 %. Lo anterior significa que la magnitud del voltaje en los diferentes puntos del SNI, que

operan a alta tensión, deberá mantenerse dentro del 95 y 105 % respecto al valor nominal, es decir dentro del 0,95 y 1,05 pu.

3.3. Estudios de flujo de carga dentro del marco regulatorio de Guatemala

Los estudios de flujo de carga en Guatemala se realizan dentro del marco establecido en la normativa legal vigente.

Para la incorporación de nuevos elementos al Sistema Nacional Interconectado las NEAST establecen que “los estudios de flujo de carga se deberán realizar para las condiciones críticas con relación a la incorporación de las nuevas instalaciones o ampliaciones de generación, transporte y distribución, tanto para máxima como para mínima demanda. A partir de estos flujos de carga se deberá verificar la existencia o no de sobrecargas en equipos y el cumplimiento de los parámetros eléctricos.”²³

Las NEAST estipulan que los estudios de flujo de carga deben “incluir el funcionamiento post-falla del Sistema, luego de fallas simples (sistema en condiciones N-1) en cada uno de los casos indicados en el Artículo 14 de estas Normas”²⁴. Las NEAST también definen que cuando se prevean fallas múltiples de media o alta probabilidad de ocurrencia, el estudio de flujo de carga deberá incluir el análisis del comportamiento del sistema para tales escenarios. Adicionalmente se indica que deben ser analizados los casos de máxima exigencia para los elementos del sistema.

²³ Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Normas de estudios de acceso al sistema de transporte, resolución CNEE-28-98*. 1998.

²⁴ *Ibíd.*

Por su parte las NTAUCT establecen que los flujos de carga deberán realizarse “Cuando se trate de ingreso de nueva generación o demanda, o se realice una ampliación de Transporte”²⁵.

Las NTAUCT definen que se deben tomar como base las condiciones de demanda máxima y mínima establecidas por el AMM, asimismo, deben hacerse las adecuaciones que sean necesarias para incluir los nuevos ingresos de generación, demanda o ampliaciones de transporte, autorizados o en etapa de evaluación por la CNEE.

En Guatemala los casos de estudio se analizan dentro de períodos denominados años estacionales, que dura doce meses, inician el uno de mayo y finaliza el treinta de abril del siguiente año. El año estacional se divide en dos estaciones, húmeda y seca, ambas duran seis meses. La estación húmeda inicia el uno de mayo y finaliza el treinta y uno de octubre, y la época seca inicia el uno de noviembre y termina el treinta de abril del siguiente año.

Las NEAST establecen que se deben considerar escenarios, con condiciones excepcionales que sean previsibles en el SNI, dentro de un horizonte de cuatro años a partir de la puesta en servicio comercial de las nuevas instalaciones, para condiciones estacionales de demanda máxima y mínima, sin embargo, la práctica ha demostrado que es necesario considerar adicionalmente escenarios de demanda media.

En Guatemala para un año estacional se deben considerar por lo menos seis casos de análisis. Es decir un caso de demanda mínima, uno de demanda

²⁵ Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Normas técnicas de acceso y uso de la capacidad de transporte, Resolución CNEE-33-98, 1998.*

media y uno de demanda máxima, tanto para la estación seca como para la húmeda. Estos casos corresponden a un día típico de ambas estaciones.

Los días se dividen en tres bandas horarias, banda de demanda mínima, media y máxima. Comúnmente el escenario de demanda mínima corresponde a las condiciones promedio del SNI a las 3:00 horas, el de demanda media corresponde a las condiciones promedio del SNI a las 12:00 horas y el de demanda máxima corresponde a las condiciones promedio del SNI a las 19:00 horas.

Las NEAST establecen que los estudios deben elaborarse utilizando las bases de datos disponibles en la CNEE u otra que dicha entidad apruebe y que los datos que se adicionen a estas bases, se deberán detallar indicando su fuente.

3.4. Resultados de la simulación de flujos de carga

De las simulaciones de flujo de carga realizadas se deberán obtener como mínimo los siguientes resultados:

3.4.1. Potencia activa y reactiva del generador de compensación

Los valores de MW y MVAR de la potencia activa y reactiva respectivamente.

3.4.2. Tensiones en las barras

Los valores, en kV y pu, de las magnitudes de las tensiones en cada uno de los nodos del sistema, además de los valores, en grados, de los ángulos de dichas tensiones.

3.4.3. Flujo de carga en ambos extremos de las líneas de transmisión

Los valores en MW y MVAR de los flujos de potencia en ambos extremos de las líneas de transmisión del sistema.

3.4.4. Corriente que circula en las líneas de transmisión y transformadores

Los valores en amperios y pu de la corriente que circula en las líneas y transformadores del sistema.

3.4.5. Porcentaje de utilización de la capacidad de líneas de transmisión y transformadores

Los valores porcentuales de la utilización de la capacidad de las líneas de transmisión y transformadores.

3.4.6. Pérdidas

Los valores, en MW y MVAR, de las pérdidas en las líneas de transmisión del sistema.

3.5. Análisis de los resultados

Una vez se obtengan los resultados que se detallan en el numeral anterior, debe procederse a realizar el análisis de los resultados, que permita explicar el comportamiento del sistema para el período de estudio, este análisis debe determinar cómo mínimo lo siguiente:

- Si la potencia activa y reactiva producida por el generador de compensación se mantiene dentro de los límites de operación de la máquina.
- El valor de potencia activa adicional a la potencia instalada que requiere el sistema.
- Si existen magnitudes de tensiones en las barras que estén fuera de la tolerancia admisible de la regulación de tensión, según lo establecido en las NTSD.
- Si existe la necesidad de compensación de potencia reactiva y los valores en MVAR requeridos.
- El porcentaje de pérdidas respecto a la potencia generada.
- Si existen elementos sobrecargados.
- Las acciones correctivas para los problemas detectados. Por ejemplo, conexión de reactores o banco de capacitores en las barras que presenten violaciones a los límites de regulación de tensión.

3.6. Diseño del sistema de potencia a emplearse en el desarrollo de la Práctica 1 del laboratorio del curso de Sistemas de Potencia 1

Para el desarrollo de la Práctica 1 del laboratorio se diseñó un sistema de potencia con base en la configuración y datos reales del Sistema Eléctrico

Nacional de Guatemala. El sistema diseñado para el desarrollo de la Práctica 1 se describe a continuación:

3.6.1. Sistema Troncal Norte en el año estacional 1

El sistema de potencia denominado Troncal Norte en el año 1, se diseñó como un sistema radial integrado por una planta de generación de 275 MVA, tres subestaciones eléctricas de transformación, dos líneas de transmisión de 230 kV y seis cargas que suman una demanda máxima de 264,08 MVA.

3.6.2. Parámetros del sistema Troncal Norte

La frecuencia nominal es de 60 Hertz, las tensiones nominales fase a fase son, 230 kV, 69 kV, 13,8 kV. La tolerancia de la regulación de la tensión respecto al valor nominal es +/- 5 %.

3.6.3. Nomenclatura del sistema Troncal Norte

Para facilitar el análisis del sistema Troncal Norte se define la siguiente nomenclatura:

Tabla II. **Nomenclatura sistema Troncal Norte**

Nomenclatura	Descripción
CHX	Chixoy
TIC	Tactic
GNO	Guatemala Norte
SJN-D	San Julián
TEL-D	Telemán
GT2-D	Guatemala 2
GT3-D	Guatemala 3
GT5-D	Guatemala 5
GT6-D	Guatemala 6

Fuente: elaboración propia, con base en información proporcionada por la CNEE.

3.6.4. Elementos sistema Troncal Norte en el año estacional 1

Los elementos que forman el sistema Troncal Norte se describen a continuación:

3.6.4.1. Planta Chixoy 275 MW

La planta de generación Chixoy es una planta hidroeléctrica, con embalse de regulación anual, con una potencia instalada de 275 MW, cuenta con 5 unidades de generación con potencia nominal de 55 MW y operan a una tensión nominal de 13,8 kV. Las unidades son nombradas Chixoy H1, Chixoy H2, Chixoy H3, Chixoy H4 y Chixoy H5.

Todos los generadores de la planta Chixoy tienen los siguientes parámetros:

Tabla III. **Parámetros de los generadores de la planta Chixoy 275 MVA**

Voltaje Nominal [kV]	13,800
Potencia Nominal [MW]	55,000
Potencia activa máxima [MW]	56,846
Potencia activa mínima [MW]	30,000
Potencia reactiva máxima [MVAR]	29,000
Potencia reactiva mínima [MVAR]	-20,000
Potencia base [MVA]	55,300
X [pu]	0,1790
X0 [pu]	0,1520

Fuente: datos proporcionados por la CNEE.

3.6.4.2. Subestación Chixoy 230/13.8 kV

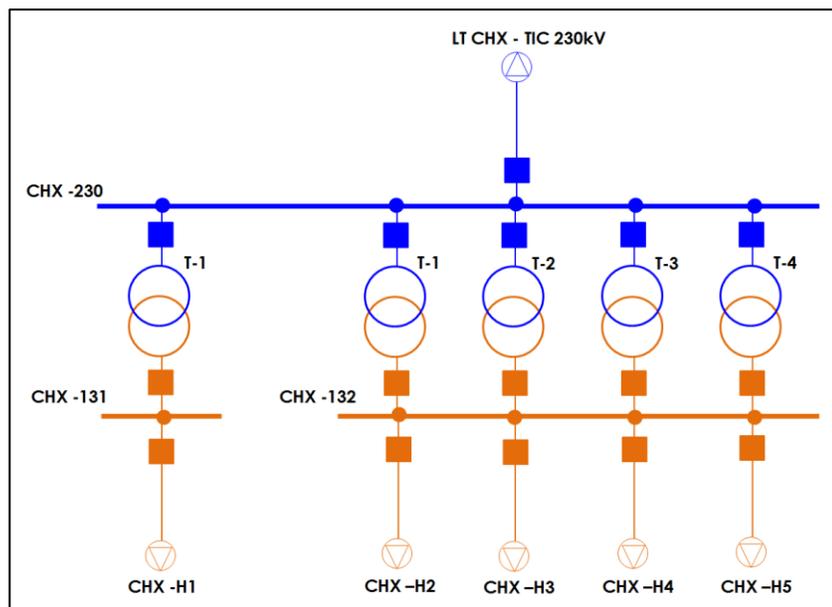
La subestación Chixoy es una subestación de transformación elevadora de tensión, que permite conectar las unidades de la planta de generación Chixoy 275 MVA al sistema, se encuentra equipada con lo siguiente:

- Una barra de 230 kV con configuración barra simple, denominada Chixoy 230.
- Dos barras de 13,8 kV con configuración barra simple, denominadas Chixoy 131 y Chixoy 132.
- Un campo de transformación de 230/13,8 kV, con capacidad de 67,5 MVA, que interconecta las barras Chixoy 230 y Chixoy 131.
- Cuatro campos de transformación de 230/13,8 kV, con capacidad de 67,5 MVA, que interconecta las barras Chixoy 230 y Chixoy 132.
- Un campo de conexión equipado de 13,8 kV para conectar las unidad Chixoy H1 de la planta de generación Chixoy 275 MVA a la barra Chixoy 131.

- Cuatro campos de conexión equipados de 13,8 kV para conectar las unidades Chixoy H1, Chixoy H2, Chixoy H3 y Chixoy H4 de la planta de generación Chixoy 275 MVA a la barra Chixoy 132.
- Un campo de conexión equipado de 230 kV para conectar la línea de transmisión Chixoy -Tactic 230 kV.

A continuación se muestra el diagrama unifilar de referencia de la subestación Chixoy 230/13,8 kV:

Figura 18. **Diagrama unifilar de referencia de la subestación Chixoy 230/13,8 kV**



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator Educational-Evaluation 19.

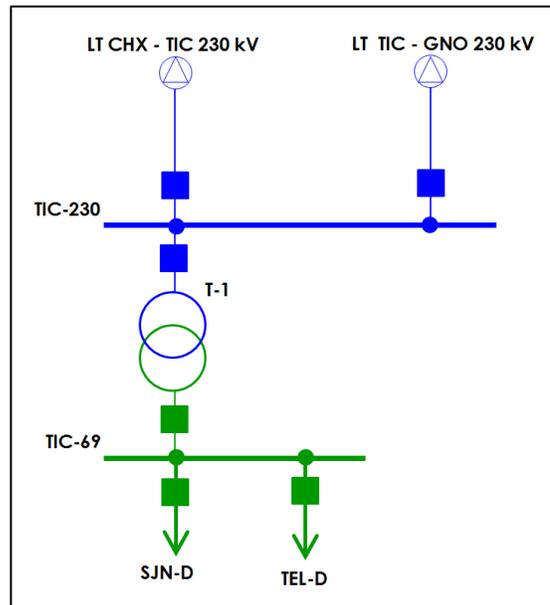
3.6.4.3. Subestación Tactic 230/69 kV

La subestación Tactic es una subestación de transformación reductora de tensión, que permite conectar al sistema las cargas denominadas San Julián y Telemán. Se encuentra equipada con lo siguiente:

- Una barra de 230 kV con configuración barra simple, denominada Tactic 230.
- Una barra de 69 kV con configuración barra simple, denominada Tactic 69.
- Un campo de transformación de 230/69 kV, con capacidad de 150 MVA, que interconecta las barras Tactic 230 y Tactic 69.
- Un campo de conexión equipado de 230 kV para conectar la línea de transmisión Chixoy – Tactic 230 kV.
- Un campo de conexión equipado de 230 kV para conectar la línea de transmisión Tactic – Guatemala Norte 230 kV.
- Un campo de conexión equipado de 69 kV para conectar la carga San Julián.
- Un campo de conexión equipado de 69 kV para conectar la carga Telemán.

A continuación se muestra el diagrama unifilar de referencia de la subestación Tactic 230/69 kV:

Figura 19. **Diagrama unifilar de la subestación Tactic 230/69 kV**



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator Educational-Evaluation 19.

3.6.4.4. **Subestación Guatemala Norte 230/69 kV**

La subestación Guatemala Norte es una subestación de transformación reductora de tensión, que permite conectar al sistema las cargas denominadas Guatemala 2, Guatemala 3, Guatemala 5 y Guatemala 6. Se encuentra equipada con lo siguiente:

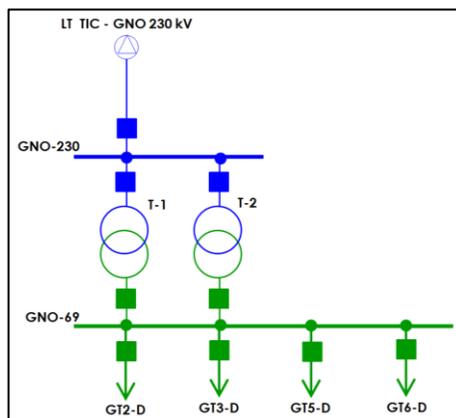
- Una barra de 230 kV con configuración barra simple, denominada Guatemala Norte 230.
- Una barra de 69 kV con configuración barra simple, denominada Guatemala Norte 69.

Dos campos de transformación de 230/69 kV, con capacidad de 150 MVA, que interconecta las barras Guatemala Norte 230 y Guatemala Norte 69.

- Un campo de conexión equipado de 230 kV para conectar la línea de transmisión Tactic – Guatemala Norte 230 kV.
- Un campo de conexión equipado de 69 kV para conectar la carga Guatemala 2.
- Un campo de conexión equipado de 69 kV para conectar la carga Guatemala 3.
- Un campo de conexión equipado de 69 kV para conectar la carga Guatemala 5.
- Un campo de conexión equipado de 69 kV para conectar la carga Guatemala 6.

A continuación, se muestra el diagrama unifilar de referencia de la subestación Guatemala Norte 230/69 kV:

Figura 20. **Diagrama unifilar de la subestación Guatemala Norte 230/69 kV**



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator Educational-Evaluation 19.

3.6.4.5. Parámetros eléctricos de los Transformadores

Los parámetros eléctricos de los transformadores del sistema Troncal Norte se presenta a continuación:

Tabla IV. Parámetros eléctricos de los transformadores del sistema Troncal Norte

Barra del lado de alta	Barra del lado de baja	Núm.	Tensión del lado de alta [kV]	Tensión del lado de baja [kV]	R [pu]	X [pu]	B [pu]
CHX-230	CHX-131	1	230,00	13,80	0,000	0,18140	0,000
CHX-230	CHX-132	1	230,00	13,80	0,000	0,18140	0,000
CHX-230	CHX-132	2	230,00	13,80	0,000	0,18140	0,000
CHX-230	CHX-132	3	230,00	13,80	0,000	0,18140	0,000
CHX-230	CHX-132	4	230,00	13,80	0,000	0,18140	0,000
TIC-230	TIC-69	1	230,00	69,00	0,000	0,08333	0,000
GNO-230	GNO-69	1	230,00	69,00	0,000	0,08333	0,000
GNO-230	GNO-69	2	230,00	69,00	0,000	0,08333	0,000

Fuente: elaboración propia con base en datos proporcionados por la CNEE.

Tabla V. Parámetros eléctricos de los transformadores del sistema Troncal Norte (valores de secuencia cero)

Barra del lado de alta	Barra del lado de baja	Núm.	Tensión del lado de alta [kV]	Tensión del lado de baja [kV]	R0 [pu]	X0 [pu]
CHX-230	CHX-131	1	230,00	13,80	0,000	0,18610
CHX-230	CHX-132	1	230,00	13,80	0,000	0,18610
CHX-230	CHX-132	2	230,00	13,80	0,000	0,18610
CHX-230	CHX-132	3	230,00	13,80	0,000	0,18610
CHX-230	CHX-132	4	230,00	13,80	0,000	0,18610
TIC-230	TIC-69	1	230,00	69,00	0,000	0,08333
GNO-230	GNO-69	1	230,00	69,00	0,000	0,08333
GNO-230	GNO-69	2	230,00	69,00	0,000	0,08333

Fuente: elaboración propia con base en datos proporcionados por la CNEE.

Tabla VI. **Límites de capacidad de los transformadores del sistema Troncal Norte**

Barra del lado de alta	Barra del lado de baja	Núm .	Límite A [MVA]	Límite B [MVA]
CHX-230	CHX-131	1	67,600	0,000
CHX-230	CHX-132	1	67,600	0,000
CHX-230	CHX-132	2	67,600	0,000
CHX-230	CHX-132	3	67,600	0,000
CHX-230	CHX-132	4	67,600	0,000
TIC-230	TIC-69	1	150,00	180,000
GNO-230	GNO -69	1	150,00	180,000
GNO-230	GNO -69	2	150,00	180,000

Fuente: elaboración propia con base en datos proporcionados por la CNEE.

3.6.4.6. Línea de transmisión Chixoy – Tactic 230 kV

Esta línea de transmisión interconecta la subestación Chixoy 230/13,8 kV con la subestación Tactic 230/69 kV, se extiende a lo largo de 44,88 km. Sus parámetros eléctricos se presentan a continuación:

Tabla VII. **Parámetros de la línea de transmisión Chixoy – Tactic 230 kV**

Barra Inicio	Barra Final	V [kV]	R [pu]	X [pu]	B [pu]
CHX-230	TIC-230	230,00	0,005820	0,029950	0,109410

Fuente: elaboración propia con base en datos proporcionados por la CNEE.

Tabla VIII. **Parámetros de la línea de transmisión Chixoy – Tactic 230 kV (valores de secuencia cero)**

Barra Inicio	Barra Final	V [kV]	R0 [pu]	X0 [pu]
CHX-230	TIC-230	230,00	0,023910	0,088060

Fuente: elaboración propia con base en datos proporcionados por la CNEE.

Tabla IX. **Límites de capacidad de la línea de transmisión Chixoy – Tactic 230 kV**

Barra Inicio	Barra Final	Límite A [MVA]	Límite B [MVA]
CHX-230	TIC-230	444,600	558,600

Fuente: elaboración propia con base en datos proporcionados por la CNEE.

3.6.4.7. Línea de transmisión Tactic – Guatemala Norte 230 kV

Esta línea de transmisión interconecta la subestación Tactic 230/69 kV con la subestaciones Guatemala Norte 230/69 kV y se extiende a lo largo de 76,70 km.

Tabla X. **Parámetros de la línea de transmisión Tactic – Guatemala Norte 230 kV**

Barra Inicio	Barra Final	V [kV]	R [pu]	X [pu]	B [pu]
TIC-230	GNO-230	230,00	0,009920	0,051140	0,187070

Fuente: elaboración propia con base en datos proporcionados por la CNEE.

Tabla XI. **Parámetros de la línea de transmisión Tactic – Guatemala Norte 230 kV (valores de secuencia cero)**

Barra Inicio	Barra Final	V [kV]	R0 [pu]	X0 [pu]
TIC-230	GNO-230	230,00	0,040740	0,150320

Fuente: elaboración propia con base en datos proporcionados por la CNEE.

Tabla XII. **Límites de capacidad de la línea de transmisión Tactic – Guatemala Norte 230 kV**

Barra Inicio	Barra Final	Límite A [MVA]	Límite B [MVA]
TIC-230	GNO-230	444,600	558,600

Fuente: elaboración propia con base en datos proporcionados por la CNEE.

3.6.4.8. Carga San Julián 69 kV

Se encuentra conectada a la barra de 69 de la subestación Tactic 230/69 kV, es una carga en su mayoría de consumo residencial, con demanda máxima de 33,00 MVA y mínima 8,50 MVA.

3.6.4.9. Carga Telemán 69 kV

Se encuentra conectada a la barra de 69 de la subestación Tactic 230/69 kV, es una carga en su mayoría de consumo residencial, con demanda máxima de 56,00 MVA y mínima 15,00 MVA.

3.6.4.10. Carga Guatemala 2 69 kV

Se encuentra conectada a la barra de 69 de la subestación Guatemala Norte 230/69 kV, es una carga en su mayoría de consumo residencial, con demanda máxima de 35,00 MVA y mínima 10,00 MVA.

3.6.4.11. Carga Guatemala 3 69 kV

Se encuentra conectada a la barra de 69 de la subestación Guatemala Norte 230/69 kV, es una carga en su mayoría de consumo residencial, con demanda máxima de 61,00 MVA y mínima 21,00 MVA.

3.6.4.12. Carga Guatemala 5 69 kV

Se encuentra conectada a la barra de 69 kV de la subestación Guatemala Norte 230/69 kV, es una carga en su mayoría de consumo residencial, con demanda máxima de 56,00 MVA y mínima 18,00 MVA.

3.6.4.13. Carga Guatemala 6 69 kV

Se encuentra conectada a la barra de 69 kV de la subestación Guatemala Norte 230/69 kV, es una carga en su mayoría de consumo industrial, con demanda máxima de 25,00 MVA y mínima 23,00 MVA.

3.6.4.14. Comportamiento típico de las cargas

El comportamiento típico de las cargas en el año estacional 1 se presenta en las siguientes tablas:

Tabla XIII. **Comportamiento típico de las cargas en la estación húmeda, año estacional 1**

Carga	Voltaje Nominal KV	Demanda Mínima		Demanda Media		Demanda Máxima	
		MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR
San Julián	69	8,422	1,268	19,651	4,459	31,816	8,457
Telemán	69	14,972	2,921	28,073	6,227	53,338	13,531
Guatemala 2	69	10,293	1,383	22,458	5,382	33,687	9,072
Guatemala 3	69	20,587	4,766	42,109	9,840	58,952	15,377
Guatemala 5	69	17,779	3,844	29,944	6,842	54,274	13,240
Guatemala 6	69	23,750	5,806	22,800	5,094	23,750	5,806

Fuente: elaboración propia con base en datos publicados por la AMM.

Tabla XIV. **Comportamiento típico de las cargas en la estación seca, año estacional 1**

Carga	Voltaje Nominal KV	Demanda Mínima		Demanda Media		Demanda Máxima	
		MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR
San Julián	69	8,550	1,310	19,950	4,557	32,300	8,616
Telemán	69	15,200	2,996	28,500	6,367	54,150	13,798
Guatemala 2	69	10,450	1,435	22,800	5,494	34,200	9,241
Guatemala 3	69	20,900	4,869	42,750	9,051	59,850	15,672
Guatemala 5	69	18,050	3,933	30,400	6,992	55,100	14,110
Guatemala 6	69	23,750	5,806	22,750	5,306	23,750	5,806

Fuente: elaboración propia con base en datos publicados por la AMM.

3.7. **Diseño del Ejemplo 1. Simulación de flujo de carga del escenario de demanda mínima de la época seca del sistema Troncal Norte para año estacional 1**

Para realizar la simulación de flujo de carga del escenario de demanda mínima de la época seca del sistema Troncal Norte para el año estacional 1 se siguió el procedimiento que se describe a continuación:

3.7.1. Definir las consideraciones técnicas de la simulación

En este caso se utilizan las consideraciones técnicas que se definen en el numeral 3.8.1 del presente trabajo de graduación. Para realizar la simulación se eligió el software PowerWorld Simulator Educational- Evaluation 19.

3.7.2. Elaborar el diagrama unifilar e ingresar los datos del sistema en el software de simulación

Para la elaboración de la base de datos y la construcción del diagrama unifilar del presente ejemplo se respeta los parámetros definidos en el numeral 3.6.2 del presente trabajo de graduación y la nomenclatura establecida en el numeral 3.6.3.

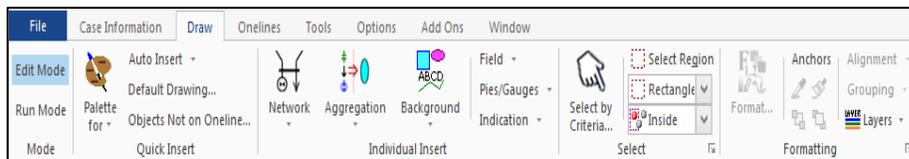
En el presente ejemplo se utilizan los datos de los elementos que conforman el sistema Troncal Norte en el año estacional 1 que se detallan en el numeral 3.6.4 del presente trabajo de graduación.

La unidad del manual de ayuda de PowerWorld Simulator Educational-Evaluation titulada “Crear, Cargar y Guardar Casos de Simulación” (Creating, Loading, and Saving Simulator Cases), contiene la información sobre cómo crear, guardar y abrir escenarios de simulación.

La unidad titulada Construcción y Edición de Diagramas Unifilares (Building and Editing Online Diagrams), contiene la información sobre las herramientas para dibujar y editar los diagramas unifilares de los sistemas de potencia e ingresar y modificar los datos de los elementos que los componen.

Para acceder a las herramientas de dibujo y edición de diagramas unifilares, se selecciona el modo editar se hace clic sobre la pestaña Dibujar (Draw), del programa PowerWorld Simulator Educational-Evaluation, se desplegara una cinta de herramientas, que contiene las diferentes herramientas de dibujo, edición e introducción de datos.

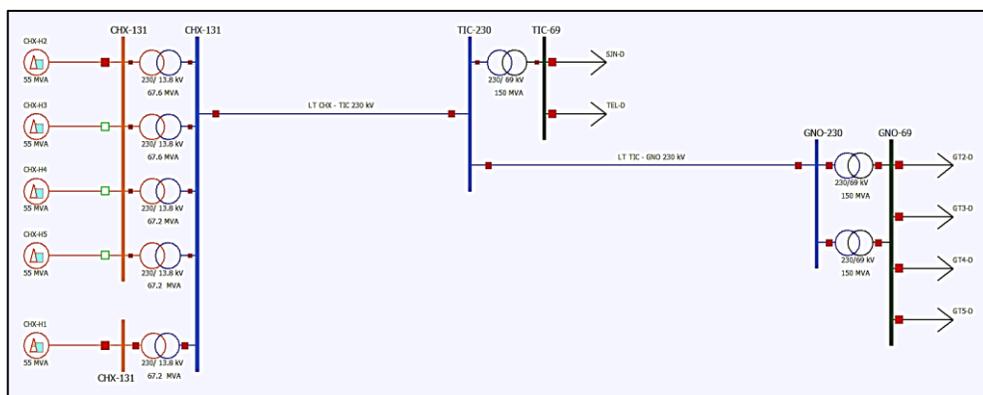
Figura 21. Pestaña “Dibujar”



Fuente: Software PowerWord Simulator Educational-Evaluation 19.

A continuación, se muestra el diagrama unifilar construido para el presente ejemplo:

Figura 22. Diagrama unifilar de referencia del sistema Troncal Norte (escenario del ejemplo 1)



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator Educational-Evaluation 19.

La base de datos ingresada en el software de simulación se muestra en las siguientes figuras:

Figura 23. Datos de las barras (escenario del ejemplo 1)

	Num ▲	Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
1	1	CHX-131	1	13.80	1.00000	13.800	0.000			0.000	0.000
2	2	CHX-230	1	230.00	1.00000	230.000	0.000				
3	3	TIC-230	1	230.00	1.00000	230.000	0.000				
4	4	TIC-69	1	69.00	1.00000	69.000	0.000	23.750	4.306		
5	5	GNO-230	1	230.00	1.00000	230.000	0.000				
6	6	GNO-69	1	69.00	1.00000	69.000	0.000	54.979	10.888		
7	7	CHX-132	1	69.00	1.01000	69.690	0.000			53.800	-1.864

Fuente: elaboración propia, empleando PowerWord Simulator Educational-Evaluation 19.

Figura 24. Datos de los generadores (escenario del ejemplo 1)

	Number of Bus	Name of Bus	ID	Status	Gen MW	Gen Mvar	Set Volt	AGC	AVR	Min MW	Max MW	Min Mvar	Max Mvar
1	1	CHX-131	1	Closed	0.000	0.000	1.00000	YES	YES	30.00	56.85	-20.00	29.00
2	7	CHX-132	1	Closed	53.800	-1.864	1.01000	YES	YES	30.00	56.85	-20.00	29.00
3	7	CHX-132	2	Open	0.000	0.000	1.01000	YES	YES	30.00	56.85	-20.00	29.00
4	7	CHX-132	3	Open	0.000	0.000	1.01000	YES	YES	30.00	56.85	-20.00	29.00
5	7	CHX-132	4	Open	0.000	0.000	1.01000	YES	YES	30.00	56.85	-20.00	29.00

Fuente: elaboración propia, empleando PowerWord Simulator Educational-Evaluation 19.

Figura 25. Datos de los transformadores (escenario del ejemplo 1)

	From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Branch Device Type	R	X	B	Lim MVA A	Lim MVA B	Lim MVA C	Seq. R 0	Seq. X 0
1	1	CHX-131	2	CHX-230	1	Transformer	0.00000	0.18614	0.00000	67.6	0.0	0.0	0.00000	0.18610
2	7	CHX-132	2	CHX-230	1	Transformer	0.00000	0.18614	0.00000	67.6	0.0	0.0	0.00000	0.18610
3	7	CHX-132	2	CHX-230	2	Transformer	0.00000	0.18614	0.00000	67.6	0.0	0.0	0.00000	0.18610
4	7	CHX-132	2	CHX-230	3	Transformer	0.00000	0.18614	0.00000	67.6	0.0	0.0	0.00000	0.18610
5	7	CHX-132	2	CHX-230	4	Transformer	0.00000	0.18614	0.00000	67.6	0.0	0.0	0.00000	0.18610
6	3	TIC-230	4	TIC-69	1	Transformer	0.00000	0.08333	0.00000	150.0	180.0	0.0	0.00000	0.20832
7	5	GNO-230	6	GNO-69	1	Transformer	0.00000	0.08333	0.00000	150.0	180.0	0.0	0.00000	0.20832
8	5	GNO-230	6	GNO-69	2	Transformer	0.00000	0.08333	0.00000	150.0	180.0	0.0	0.00000	0.20832

Fuente: elaboración propia, empleando PowerWord Simulator Educational-Evaluation 19.

Figura 26. Datos de las líneas de transmisión (escenario del ejemplo 1)

	From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Branch Device Type	R	X	B	Lim MVA A	Lim MVA B	Lim MVA C	Seq. R 0	Seq. X 0
1	2	CHX-230	3	TIC-230	1	Line	0.00582	0.02995	0.10941	444.6	558.6	0.0	0.02391	0.08806
2	3	TIC-230	5	GNO-230	1	Line	0.00992	0.05114	0.18707	444.6	558.6	0.0	0.04074	0.15032

Fuente: elaboración propia, empleando PowerWord Simulator Educational-Evaluation 19.

Figura 27. Datos de las cargas (escenario del ejemplo 1)

	Number of Bus	Name of Bus	Area Name of Load	Zone Name of Load	ID	Status	MW	Mvar	MVA
1	4	TIC-69	1	1	1	Closed	8.550	1.3100	8.6498
2	4	TIC-69	1	1	2	Closed	15.200	2.9960	15.4924
3	6	GNO-69	1	1	1	Closed	10.450	1.4350	10.5481
4	6	GNO-69	1	1	2	Closed	20.900	4.8690	21.4597
5	6	GNO-69	1	1	3	Closed	18.050	3.9330	18.4735
6	6	GNO-69	1	1	4	Closed	5.579	0.6510	5.6169

Fuente: elaboración propia, empleando PowerWord Simulator Educational-Evaluation 19.

3.7.3. Correr la simulación del escenario y obtener los resultados

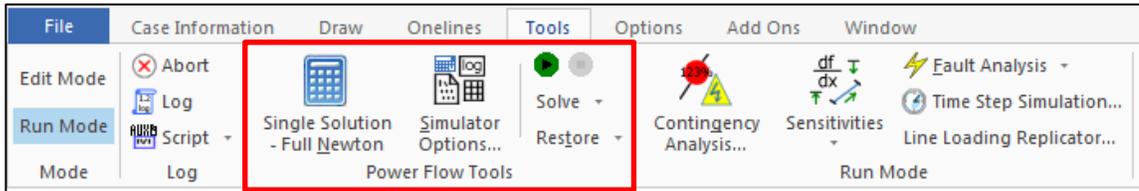
En la unidad titulada “Simulando y Resolviendo un Caso” (Solving and Simulating a Case) se encuentra la información relativa a la simulación de problemas de flujos de carga.

La unidad Simulando y Resolviendo un Caso se divide en dos subunidades, la primera titulada Opciones (Options), describe las diferentes opciones disponibles en el Software para la simulación de flujos de carga, esta subunidad puede ser consultada en el siguiente enlace <http://goo.gl/xIHAcS>.

La segunda subunidad titulada Solución y Control (Solution and Control), contiene la información sobre las herramientas para la simulación de los problemas de flujos carga, la metodología empleada para resolver los problemas y las opciones para el control de área disponibles en el simulador.

Para acceder a las herramientas de simulación de flujo de potencia, se selecciona el modo correr, se hace clic sobre la pestaña Herramientas (Tools), del programa PowerWorld Simulator Educational- Evaluation, se desplegará una cinta de herramientas, dentro de esta se encuentra el grupo de opciones denominado Herramientas de Flujo de Potencia (Power Flow Tools) el cual contiene las herramientas de simulación de problemas de flujos de carga. La siguiente imagen muestra la ubicación del grupo de opciones “Herramientas de Flujo de Potencia”:

Figura 28. Grupo de opciones “herramientas de flujo de potencia”



Fuente: software PowerWord Simulator Educational-Evaluation 19.

La información de ayuda para las herramientas de simulación de problemas de flujos carga se puede consultar en el siguiente enlace: <http://goo.gl/PWzWKX>.

Al correr la simulación del escenario de demanda mínima de la época seca del sistema Troncal Norte para el año estacional 1 se obtienen los resultados que se muestran en las siguientes imágenes:

Figura 29. Resultados de las barras (escenario del ejemplo 1)

	Num ▲	Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
1	1	CHX-131	1	13.80	1.00000	13.800	0.000			25.591	-5.350
2	2	CHX-230	1	230.00	1.01108	232.549	-2.700				
3	3	TIC-230	1	230.00	1.00799	231.837	-4.051				
4	4	TIC-69	1	69.00	1.00422	69.291	-5.171	23.750	4.306		
5	5	GNO-230	1	230.00	1.00071	230.163	-5.632				
6	6	GNO-69	1	69.00	0.99589	68.717	-6.949	54.979	10.888		
7	7	CHX-132	1	69.00	1.01000	69.690	-1.295			53.800	-1.691

Fuente: resultados obtenidos empleando PowerWord Simulator Educational-Evaluation 19.

Figura 30. **Resultados de los generadores (escenario del ejemplo 1)**

	Number of Bus	Name of Bus	ID	Status	Gen MW	Gen Mvar	Set Volt
1	1	CHX-131	1	Closed	25.591	-5.350	1.00000
2	7	CHX-132	1	Closed	53.800	-1.691	1.01000
3	7	CHX-132	2	Open	0.000	0.000	1.01000
4	7	CHX-132	3	Open	0.000	0.000	1.01000
5	7	CHX-132	4	Open	0.000	0.000	1.01000

Fuente: resultados obtenidos empleando PowerWord Simulator Educational-Evaluation 19.

Figura 31. **Resultados de los transformadores y líneas de transmisión (escenario del ejemplo 1)**

	From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Status	Branch Device Type	Xfrmr	Lim MVA	% of MVA Limit (Max)	MW Loss	Mvar Loss	MW From	Mvar From	MVA From	MW To	Mvar To	MVA To
1	1	CHX-131	2	CHX-230	1	Closed	Transformer	YES	67.600	39.103	0.000	1.272	25.591	-5.350	26.144	-25.591	6.622	26.434
2	2	CHX-230	3	TIC-230	1	Closed	Line	NO	444.600	17.991	0.360	-9.299	79.404	-9.633	79.986	-79.044	0.334	79.045
3	7	CHX-132	2	CHX-230	1	Closed	Transformer	YES	67.600	19.936	0.000	0.331	13.456	-0.423	13.462	-13.456	0.753	13.477
4	7	CHX-132	2	CHX-230	2	Closed	Transformer	YES	67.600	19.936	0.000	0.331	13.456	-0.423	13.462	-13.456	0.753	13.477
5	7	CHX-132	2	CHX-230	3	Closed	Transformer	YES	67.600	19.936	0.000	0.331	13.456	-0.423	13.462	-13.456	0.753	13.477
6	7	CHX-132	2	CHX-230	4	Closed	Transformer	YES	67.600	19.936	0.000	0.331	13.456	-0.423	13.462	-13.456	0.753	13.477
7	3	TIC-230	4	TIC-69	1	Closed	Transformer	YES	150.000	16.154	0.000	0.482	23.752	4.794	24.231	-23.752	-4.313	24.140
8	3	TIC-230	5	GNO-230	1	Closed	Line	NO	444.600	12.668	0.300	-17.322	55.287	-5.126	55.524	-54.987	-12.196	56.323
9	5	GNO-230	6	GNO-69	1	Closed	Transformer	YES	150.000	18.774	0.000	0.660	27.493	6.099	28.161	-27.493	-5.439	28.026
10	5	GNO-230	6	GNO-69	2	Closed	Transformer	YES	150.000	18.774	0.000	0.660	27.493	6.099	28.161	-27.493	-5.439	28.026

Fuente: resultados obtenidos empleando PowerWord Simulator Educational-Evaluation 19.

3.7.4. Análisis de resultados

De los resultados de la simulación se puede determinar que:

- La potencia activa y reactiva producida por el generador de compensación se mantiene dentro de los límites de operación de la máquina.

- En las barras del sistema no se presentan magnitudes de tensiones, que estén fuera de la tolerancia admisible de la regulación de tensión, según lo establecido en las NTSD.
- No existe necesidad de compensación de potencia reactiva.
- El porcentaje de pérdidas es de 1,0846 % respecto a la potencia generada.
- No existen elementos sobrecargados.
- No existe necesidad de implementar acciones correctivas.

3.8. Diseño de la Práctica 1. Estudio de flujo de carga del sistema Troncal Norte para el año estacional 1

Se requiere analizar el comportamiento del sistema Troncal Norte para el año estacional 1, por lo cual se solicita al estudiante que realice el estudio de flujo de potencia correspondiente.

3.8.1. Consideraciones técnicas del estudio

El estudio de flujo de carga del sistema Troncal Norte para el año estacional 1 debe realizarse respetando las siguientes consideraciones técnicas:

3.8.1.1. Bases de datos

Las bases de datos que se emplearan en el estudio, deberán elaborarse respetando los parámetros definidos en el numeral 3.6.1 del presente trabajo de graduación y la nomenclatura establecida en el numeral 3.6.2. Se deberán utilizar exclusivamente los datos de que se detallan en el numeral 3.6.3 del presente Manual.

3.8.1.2. Escenarios

Deberán modelarse los escenarios de demanda mínima, media y máxima para las temporadas húmeda y seca del año estacional 1.

3.8.1.3. Despacho de generación

El despacho de generación del sistema Troncal Norte para el año estacional 1 se presenta en el siguiente cuadro:

Tabla XV. **Despacho de generación del sistema Troncal Norte para el año estacional 1**

Escenario	Potencia despachada en ambas estaciones.					
	Demanda Mínima		Demanda Media		Demanda Máxima	
	P [MW]	Q [MVAR]	P [MW]	Q [MVAR]	P [MW]	Q [MVAR]
Chixoy H1	--.--	--.--	--.--	--.--	--.--	--.--
Chixoy H2	53,800	0,905	53,80	11,00	53,800	11,000
Chixoy H3	0,00	0,000	53,80	11,00	53,800	11,000
Chixoy H4	0,00	0,000	0,00	0,00	53,800	11,000
Chixoy H5	0,00	0,000	0,00	0,00	53,800	11,000

Fuente: elaboración propia empleando base en datos proporcionados por la CNEE.

3.8.1.4. Software de simulación

Para el estudio deberá utilizarse un software que permita realizar simulaciones de flujos de carga de sistemas de potencia, que posean 7 o más barras, el simulador también deberá permitir guardar, abrir y editar las bases de datos de los diferentes escenarios que forman parte del estudio.

3.8.1.5. Método de cálculo

Deberá aplicarse el método Single Solution – Full Newton.

3.8.1.6. Generador de compensación

El generador de compensación asignado será la unidad generadora denominada Chixoy H1.

3.8.1.7. Barras de voltaje controlado

Se definen las barras Chixoy 231 y Chixoy 232 como barras de voltaje controlado, que operan a una tensión de 1,026 pu.

3.8.1.8. Regulación de tensión

Se aplicarán los límites de regulación de tensión establecidos en las NTDOST.

3.8.2. Simulación y resultados

Deberán simularse cada uno de los escenarios y obtener en todos los casos los resultados que se detallan en el numeral 3.5 del presente trabajo de graduación.

3.8.3. Análisis de los resultados

Deberá realizarse el análisis de los resultados y explicar el comportamiento conforme a lo que se detalla en el numeral 3.6 del presente trabajo de graduación.

3.8.4. Informe técnico

Deberá presentarse, en medio físico y digital, un informe técnico del estudio de flujo de carga realizado, conforme a lo que se estipulo en el apéndice A del presente trabajo de graduación.

3.9. Diseño del sistema de potencia empleado en la Práctica 2

Para el desarrollo de la Práctica 2 del laboratorio se diseñó un sistema de potencia con base en la configuración y datos reales del Sistema Eléctrico Nacional de Guatemala. El sistema empleado en la práctica de laboratorio se describe a continuación:

3.9.1. Parámetros del sistema Troncal Norte en el año estacional 15

La frecuencia nominal es de 60 Hertz, las tensiones nominales fase a fase son, 230 kV, 69 kV, 13,8 kV. La tolerancia de la regulación de la tensión respecto al valor nominal es +/- 5 %.

3.9.2. Nomenclatura del sistema Troncal Norte en el año estacional 15

Para facilitar el análisis de los datos del sistema Troncal Norte, se utiliza la siguiente nomenclatura:

Tabla XVI. Nomenclatura

Nomenclatura	Descripción	Nomenclatura	Descripción
CHX	Chixoy	TEL-D	Telemán
TIC	Tactic	GT2-D	Guatemala 2
GNO	Guatemala Norte	GT3-D	Guatemala 3
SAS	San Agustín	GT5-D	Guatemala 5
REN	Renace	GT6-D	Guatemala 6
SAN	Sanarate	JAL-D	Jalapa
SEL	Santa Elena	SAP-D	San Antonio La Paz
SJN-D	San Julián	SLM-D	Salmá

Fuente: elaboración propia con base en datos proporcionados por la CNEE.

3.9.3. Sistema Troncal Norte en el año estacional 15

El sistema Troncal Norte para el año estacional 15 se constituye como un sistema mallado, a lo largo de quince años se realizaron ampliaciones en los sistemas de transmisión y generación, para satisfacer los incrementos de las demandas existentes y la necesidad de conectar nuevas cargas en áreas rurales.

En el año estacional 15 el sistema Troncal Norte está formado por dos plantas de generación que suman 390 MVA, seis subestación eléctricas, cuatro líneas de trasmisión de 230 kV, cuatro líneas de transmisión de 69 kV y doce cagas que suman una demanda máxima de 380 MVA.

Las ampliaciones realizadas al sistema Troncal Norte, a lo largo de estos quince años, se describen a continuación:

3.9.3.1. Planta de generación Renace 115 MVA

La planta de generación Renace es una planta hidroeléctrica, con una potencia instalada de 115 MVA, cuenta con 4 unidades de generación con tensión y potencia aparente nominales de 13,8 kV y 28,696 MVA respectivamente. Las unidades son nombradas Renace H4, Renace H5, Renace H6 y Renace H7.

Todos los generadores de la planta Renace tienen los siguientes parámetros:

Tabla XVII. **Parámetros de los generadores de la planta Renace 115 MVA**

Voltaje nominal [kV]	13,800
Potencia aparente Nominal [MVA]	28,696
Potencia activa máxima [MW]	28,696
Potencia activa mínima [MW]	0,000
Potencia reactiva máxima [MVAR]	18,000
Potencia reactiva mínima [MVAR]	-17,800
Potencia base [MVA]	33,760
X [pu]	0,2880
X0 [pu]	0,1350

Fuente: datos proporcionados por la CNEE.

3.9.3.2. Subestación San Agustín 230/69 kV

La subestación San Agustín es una subestación de transformación reductora de tensión, que permite interconectar el subsistema de 230 kV con el subsistema 69 kV. Se encuentra equipada con lo siguiente:

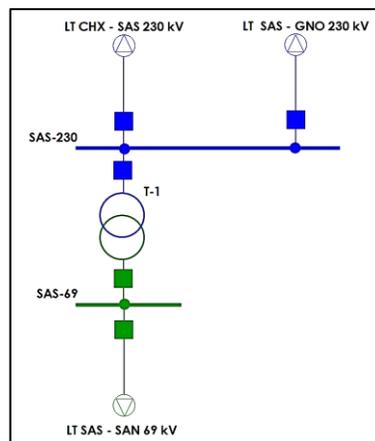
- Una barra de 230 kV con configuración barra simple, denominada San Agustín 230.
- Una barra de 69 kV con configuración barra simple, denominada San Agustín 69.

Un campo de transformación de 230/69 kV, con capacidad de 150 MVA, que interconecta las barras San Agustín 230 y San Agustín 69.

- Un campo de conexión equipado de 230 kV para conectar la línea de transmisión Chixoy – San Agustín 230 KV.
- Un campo de conexión equipado de 230 kV para conectar la línea de transmisión San Agustín – Guatemala Norte 230 kV.
- Un campo de conexión equipado de 69 kV para conectar la línea de transmisión San Agustín – Sanarate 69 kV.

A continuación, se muestra el diagrama unifilar de referencia de la subestación San Agustín 230/69 kV.

Figura 32. **Diagrama unifilar de referencia de la subestación San Agustín 230/69 kV**



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator Educational-Evaluation 19.

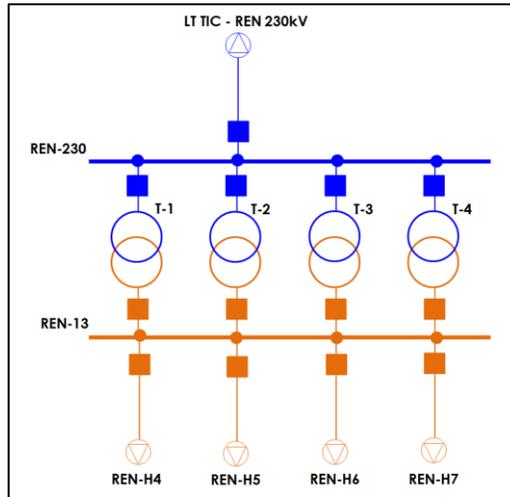
3.9.3.3. Subestación Renace 230/13,8 kV

La subestación Renace 230/13,8 KV es una subestación de transformación elevadora de tensión, que permite conectar al sistema las unidades de generación de la planta Renace. Se encuentra equipada con lo siguiente:

- Una barra de 230 kV con configuración barra simple, denominada Renace 230.
- Una barra de 13,8 kV con configuración barra simple, denominada Renace 13.
- Cuatro campos de transformación de 230/13,8 kV, con capacidad de 36 MVA, que interconectan las barras Renace 230 y Renace 13,8.
- Un campo de conexión equipado de 230 kV para conectar la línea de transmisión Tactic – Renace 230 kV.
- Cuatro campos de conexión equipados de 13,8 kV para conectar las unidades de generación de la Planta Renace.

A continuación se muestra el diagrama unifilar de referencia de la subestación Renace 230/13,8 kV.

Figura 33. **Diagrama unifilar de referencia de la subestación Renace 230/13,8 kV**



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator Educational-Evaluation 19.

3.9.3.4. **Subestación Sanarate 69 kV**

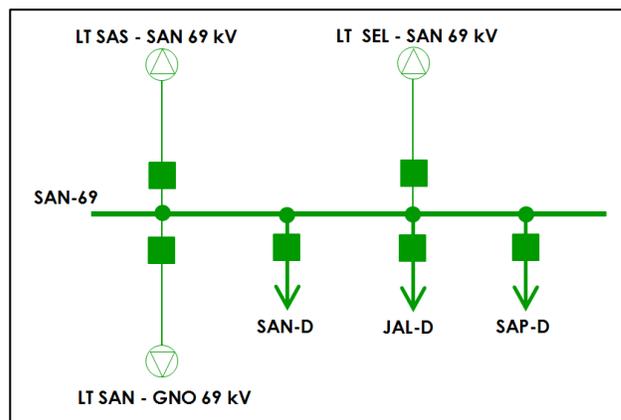
La subestación Sanarate 69 kV es una subestación que permite conectar al sistema las cargas denominadas Sanarate, Jalapa y San Antonio La Paz. Se encuentra equipada con lo siguiente:

- Una barra de 69 kV con configuración barra simple, denominada Sanarate 69.
- Un campo de conexión equipado de 69 kV para conectar la línea de transmisión San Agustín – Sanarate 69 kV.
- Un campo de conexión equipado de 69 kV para conectar la línea de transmisión Santa Elena – Sanarate 69 kV.
- Un campo de conexión equipado de 69 kV para conectar la línea de transmisión Sanarate – Guatemala Norte 69 kV.

- Un campo de conexión equipado de 69 kV para conectar la carga Sanarate.
- Un campo de conexión equipado de 69 kV para conectar la carga Jalapa.
- Un campo de conexión equipado de 69 kV para conectar la carga San Antonio La Paz.

A continuación, se muestra el diagrama unifilar de referencia de la subestación Sanarate 230/69 kV.

Figura 34. **Diagrama unifilar de referencia de la subestación Sanarate 69 kV**



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator Educational-Evaluation 19.

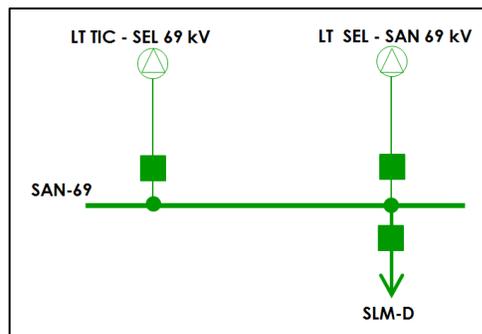
3.9.3.5. Subestación Santa Elena 69 kV

La subestación Santa Elena 69 kV es una subestación que permite conectar al sistema la carga denominada Salamá. Se encuentra equipada con lo siguiente:

- Una barra de 69 kV con configuración barra simple, denominada Santa Elena 69.
- Un campo de conexión equipado de 69 kV para conectar las Línea de transmisión Tactic – Sanarate Norte 69 kV.
- Un campo de conexión equipado de 69 kV para conectar las Línea de transmisión Santa Elena – Sanarate Norte 69 kV.
- Un campo de conexión equipado de 69 kV para conectar la carga Salamá.

A continuación, se muestra el diagrama unifilar de referencia de la subestación Santa Elena 230/69 kV.

Figura 35. **Diagrama unifilar de referencia de la subestación Santa Elena 69 kV**



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator Educational-Evaluation 19.

3.9.3.6. Parámetros eléctricos de los transformadores

Los parámetros eléctricos de los transformadores nuevos del sistema Troncal Norte se presenta a continuación:

Tabla XVIII. **Parámetros eléctricos de los transformadores del sistema Troncal Norte**

Barra del lado de alta	Barra del lado de baja	Núm.	Tensión del lado de alta [kV]	Tensión del lado de baja [kV]	R [pu]	X [pu]	B [pu]
REN-230	REN-13	1	230,00	13,80	0,000	0,361667	0,000
REN-230	REN-13	1	230,00	13,80	0,000	0,361667	0,000
REN-230	REN-13	2	230,00	13,80	0,000	0,361667	0,000
REN-230	REN-13	3	230,00	13,80	0,000	0,361667	0,000
SAS-230	SAS-69	1	230,00	69,00	0,000	0,124400	0,000

Fuente: elaboración propia con base en datos proporcionados por la CNEE.

Tabla XIX. **Parámetros eléctricos de los transformadores del sistema Troncal Norte (impedancias de secuencia cero)**

Barra del lado de alta	Barra del lado de baja	Núm.	Tensión del lado de alta [kV]	Tensión del lado de baja [kV]	R0 [pu]	X0 [pu]
REN-230	REN-13	1	230,00	13,80	0,000	0,361667
REN-230	REN-13	1	230,00	13,80	0,000	0,361667
REN-230	REN-13	2	230,00	13,80	0,000	0,361667
REN-230	REN-13	3	230,00	13,80	0,000	0,361667
SAS-230	SAS-69	1	230,00	69,00	0,000	0,124400

Fuente: elaboración propia con base en datos proporcionados por la CNEE.

Tabla XX. **Límites de capacidad de los transformadores nuevos del sistema Troncal Norte**

Barra del lado de alta	Barra del lado de baja	Núm.	Limite A [MVA]	Limite B [MVA]
REN-230	REN-13	1	30,000	36,000
REN-230	REN-13	1	30,000	36,000
REN-230	REN-13	2	30,000	36,000
REN-230	REN-13	3	30,000	36,000
SAS-230	SAS-69	1	150,000	150,000

Fuente: elaboración propia con base en datos proporcionados por la CNEE.

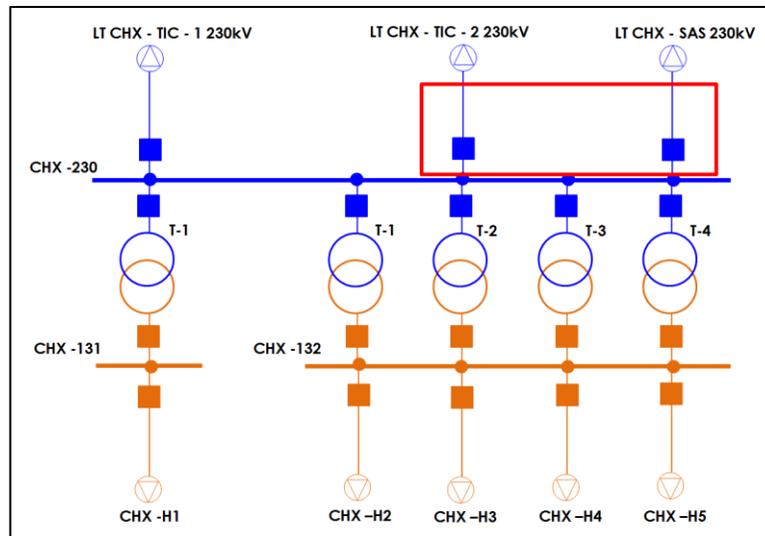
3.9.3.7. Ampliación de la subestación Chixoy 230/13,8 kV 285 MVA

La ampliación de la subestación Chixoy consiste en la adición de las siguientes instalaciones:

- Un campo de conexión equipado de 230 kV para conectar el segundo circuito de la línea de transmisión Chixoy – Tactic 230 KV.
- Un campo de conexión equipado de 230 kV para conectar la línea de transmisión Chixoy – San Agustín 230 KV.

A continuación, se muestra el diagrama unifilar de referencia de la subestación Chixoy 230/13,8 kV:

Figura 36. Diagrama unifilar de referencia de la subestación Chixoy 230/13,8 kV



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator Educational-Evaluation 19.

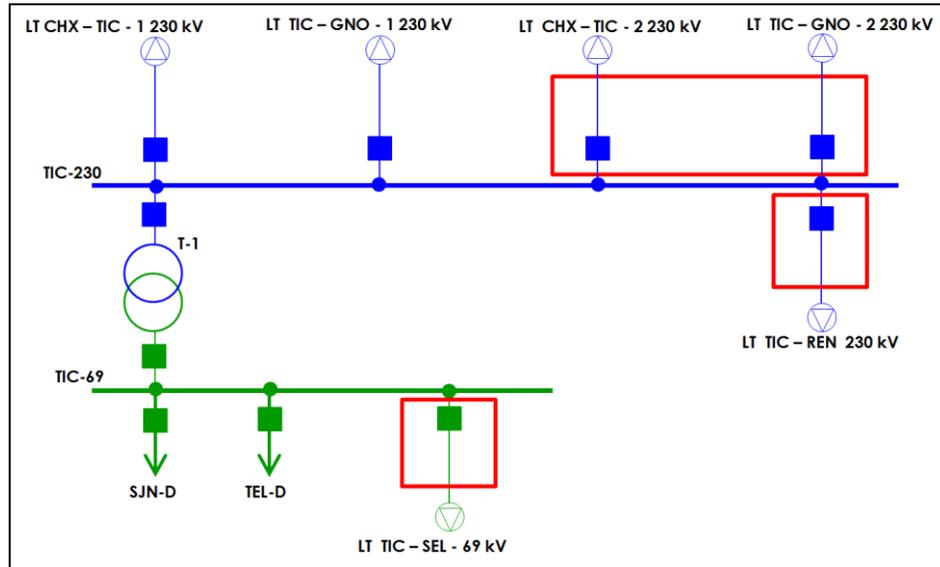
3.9.3.8. Ampliación de la subestación Tactic 230/69 kV

La ampliación de la subestación Tactic consistió en la adición de las siguientes instalaciones:

- Un campo de conexión equipado de 230 kV para conectar el segundo circuito de la línea de transmisión Chixoy – Tactic 230 KV.
- Un campo de conexión equipado de 230 kV para conectar el segundo circuito de la línea de transmisión Tactic – Guatemala Norte 230 KV.
- Un campo de conexión equipado de 230 kV para conectar la línea de transmisión Tactic – Renace 230 KV.
- Un campo de conexión equipado de 69 kV para conectar la línea de transmisión Tactic – Santa Elena 69 kV.

A continuación, se muestra el diagrama unifilar de referencia de la subestación Tactic 230/69 kV:

Figura 37. **Diagrama unifilar de referencia de la subestación Tactic 230/69 kV**



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator Educational-Evaluation 19.

3.9.3.9. Ampliación de la subestación Guatemala Norte 230/69 kV

La ampliación de la subestación Guatemala Norte consiste en la adición de las siguientes instalaciones:

- Un campo de conexión equipado de 230 kV para conectar el segundo circuito de la línea de transmisión Tactic – Guatemala Norte 230 KV.
- Un campo de conexión equipado de 230 kV para conectar la línea de transmisión San Agustín – Guatemala Norte 230 KV.
- Un campo de conexión equipado de 69 kV para conectar línea de transmisión Sanarate – Guatemala Norte 69 kV.

3.9.3.11. Línea de transmisión San Agustín – Guatemala Norte 230 kV

Esta línea de transmisión interconecta la subestación San Agustín 230/69 kV con la subestación Guatemala Norte 230/69 kV, se extiende a lo largo de 57,08 km.

3.9.3.12. Línea de transmisión Tactic – Renace 230 kV

Esta línea de transmisión interconecta la subestación Tactic 230/69 kV con la subestación Renace 230/13,8 kV, se extiende a lo largo de 36,683 km.

3.9.3.13. Línea de transmisión San Agustín – Sanarate 69 kV

Esta línea de transmisión interconecta la subestación San Agustín 230/69 kV con la subestación Sanarate 69 kV, se extiende a lo largo de 44,88 km.

3.9.3.14. Línea de transmisión Santa Elena – Sanarate 69 kV

Esta línea de transmisión interconecta la subestación Santa Elena 69 kV con la subestación Sanarate 69 kV, se extiende a lo largo de 26,8 km.

**3.9.3.15. Línea de transmisión Tactic – Santa Elena
69 kV**

Esta línea de transmisión interconecta la subestación Tactic 230/69 kV con la subestación Santa Elena 69 kV, se extiende a lo largo de 37,02 km.

**3.9.3.16. Línea de transmisión Sanarate – Guatemala
Norte 69 kV**

Esta línea de transmisión interconecta la subestación Sanarate 69 kV con la subestación Guatemala Norte 230/69 kV, se extiende a lo largo de 37,02 km.

**3.9.3.17. Ampliación de la capacidad de la línea de
transmisión Chixoy – Tactic 230 kV**

La ampliación de capacidad de la línea de transmisión Tactic – Guatemala Norte 230 kV, consiste en la construcción de un segundo circuito con iguales parámetros eléctricos y límites de capacidad que el circuito original.

**3.9.3.18. Ampliación de capacidad de la línea de
transmisión Tactic – Guatemala Norte
230 kV**

La ampliación de capacidad de la línea de transmisión Tactic – Guatemala Norte 230 kV, consiste en la construcción de un segundo circuito con iguales parámetros eléctricos y límites de capacidad que el circuito original.

3.9.3.19. Parámetros eléctricos de las líneas de transmisión

Los parámetros eléctricos de las líneas de transmisión del sistema Troncal Norte se presentan a continuación:

Tabla XXI. **Parámetros eléctricos de las líneas de transmisión del sistema Troncal Norte**

Barra Inicio	Barra Final	Circuito	V [kV]	R [pu]	R [pu]	B [pu]
CHX-230	TIC-230	1	230,00	0,005820	0,029950	0,109410
CHX-230	TIC-230	2	230,00	0,005820	0,029950	0,109410
TIC-230	GNO-230	1	230,00	0,009920	0,051140	0,187070
TIC-230	GNO-230	2	230,00	0,009920	0,051140	0,187070
CHX-230	SAS-230	1	230,00	0,012046	0,069557	0,237394
SAS-230	GNO-230	1	230,00	0,008070	0,052170	0,104200
TIC-230	REN-230	1	230,00	0,005668	0,037075	0,069863
SAS-69	SAN-69	1	69,00	0,057845	0,214963	0,004000
TIC-69	SEL-69	1	69,00	0,085370	0,295880	0,004950
SEL-69	SAN-69	1	69,00	0,076760	0,266060	0,004450
SAN-69	GNO-69	1	69,00	0,108550	0,376260	0,006300

Fuente: elaboración propia con base en datos proporcionados por la CNEE.

Tabla XXII. **Parámetros eléctricos de las líneas de transmisión del sistema Troncal Norte (valores de secuencia cero)**

Barra Inicio	Barra Final	Circuito	V [kV]	R0 [pu]	X0 [pu]
CHX-230	TIC-230	1	230,00	0,023910	0,088060
CHX-230	TIC-230	2	230,00	0,023910	0,088060
TIC-230	GNO-230	1	230,00	0,040740	0,150320
TIC-230	GNO-230	2	230,00	0,040740	0,150320
CHX-230	SAS-230	1	230,00	0,072748	0,236502
SAS-230	GNO-230	1	230,00	0,037380	0,127740
TIC-230	REN-230	1	230,00	0,023679	0,093428
SAS-69	SAN-69	1	69,00	0,212198	0,997487
TIC-69	SEL-69	1	69,00	0,288500	0,954610
SEL-69	SAN-69	1	69,00	0,259330	0,858320
SAN-69	GNO-69	1	69,00	0,366780	1,213900

Fuente: elaboración propia con base en datos proporcionados por la CNEE.

Tabla XXIII. **Límites de capacidad las líneas de transmisión del sistema Troncal Norte**

Barra Inicio	Barra Final	Circuito	Límite A [MVA]	Límite B [MVA]
CHX-230	TIC-230	1	444,600	558,000
CHX-230	TIC-230	2	444,600	558,000
TIC-230	GNO-230	1	444,600	558,000
TIC-230	GNO-230	2	444,600	558,000
CHX-230	SAS-230	1	438,200	438,200
SAS-230	GNO-230	1	374,000	374,000
TAC-230	REN-230	1	434,600	434,600
SAS-69	SAN-69	1	66,700	80,100
TIC-69	SEL-69	1	66,700	83,800
SEL-230	SAN-230	1	66,700	83,800
SAN-69	GNO-69	1	66,700	83,800

Fuente: elaboración propia con base en datos proporcionados por la CNEE.

3.9.3.20. Carga Sanarate 69 kV

Se encuentra conectada a la subestación Sanarate 69 kV; esta carga en su mayoría es de consumo residencial, con demanda máxima de 28 MVA y mínima 9 MVA.

3.9.3.21. Carga Jalapa 69 kV

Se encuentra conectada a la subestación Sanarate 69 kV; esta carga en su mayoría es de consumo residencial, con demanda máxima de 45 MVA y mínima 14 MVA.

3.9.3.22. Carga San Antonio La Paz 69 kV

Se encuentra conectada a la subestación Sanarate 69 kV; esta carga en su mayoría es de consumo residencial, con demanda máxima de 14 MVA y mínima 3,50 MVA.

3.9.3.23. Carga Salamá 69 kV

Se encuentra conectada a la subestación Santa Elena 69 kV; esta carga en su mayoría es de consumo residencial, con demanda máxima de 26 MVA y mínima 8 MVA.

3.9.3.24. Comportamiento típico de las cargas del sistema Troncal Norte en el año 15

El comportamiento típico de las cargas se presenta en las siguientes tablas:

Tabla XXIV. Comportamiento típico de las cargas en la estación seca

Carga	Voltaje Nominal KV	Demanda Mínima		Demanda Media		Demanda Máxima	
		MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR
San Julián	69	11,330	1,710	26,450	6,000	42,820	11,380
Telemán	69	20,150	3,930	37,780	8,380	71,790	18,210
Guatemala 2	69	13,850	1,860	30,230	7,240	45,340	12,210
Guatemala 3	69	27,710	6,410	56,670	13,240	79,340	20,700
Guatemala 5	69	23,930	5,170	40,300	9,210	73,050	17,820
Guatemala 6	69	3,420	0,860	31,960	7,810	3,420	0,860
Sanarate	69	8,422	1,268	15,908	3,229	25,201	5,612
Jalapa	69	10,101	2,306	28,880	7,150	35,109	9,840
San Antonio	69	3,275	0,976	7,486	1,461	13,101	2,306
Salamá	69	2,486	1,061	11,229	1,691	22,330	5,751

Fuente: elaboración propia, con base en datos publicados por la AMM.

Tabla XXV. **Comportamiento típico de las cargas en la Estación húmeda**

Carga	Voltaje Nominal KV	Demanda Mínima		Demanda Media		Demanda Máxima	
		MW	MVAR	MW	MVAR	MW	MVAR
San Julián	69	11,510	1,760	26,850	6,130	43,470	11,600
Telemán	69	20,460	4,030	38,360	8,570	72,880	18,570
Guatemala 2	69	14,060	1,930	30,690	7,390	46,030	12,440
Guatemala 3	69	28,130	6,550	57,540	12,180	80,550	21,090
Guatemala 5	69	24,290	5,290	40,910	9,410	74,160	18,990
Guatemala 6	69	3,470	0,880	32,450	7,990	3,470	0,910
Sanarate	69	8,550	1,810	15,600	6,743	26,600	8,743
Jalapa	69	10,300	3,371	28,750	7,051	35,75	10,051
San Antonio	69	3,325	1,093	13,300	1,371	13,300	4,371
Salamá	69	2,600	1,498	17,700	2,118	22,700	8,118

Fuente: elaboración propia, con base en datos publicados por la AMM.

3.10. Diseño de la Práctica 2. Estudio de flujo de carga del sistema Troncal Norte Central en el año 15

Se requiere analizar el comportamiento del sistema Troncal Norte para el año estacional 15, por lo cual se debe realizar el estudio de flujo de potencia correspondiente.

3.10.1. Consideraciones técnicas del estudio

El estudio de flujo de carga del sistema Troncal Norte para el año estacional 15 debe realizarse respetando las consideraciones definidas en el numeral 3.8.1 del presente trabajo de graduación, con excepción de los escenarios y el despacho de generación.

3.10.1.1. Escenarios

Para el presente estudio deberá modelarse los escenarios de demanda mínima, media y máxima de ambas estaciones, considerando el comportamiento de las demandas para el año estacional quince.

3.10.1.2. Despacho de generación

El despacho de generación del sistema Troncal Norte para el año estacional 1 se presenta en el siguiente cuadro:

Tabla XXVI. **Despacho de generación del sistema Troncal Norte para el año estacional 15**

Escenario	Potencia despachada en ambas estaciones					
	Demanda Mínima		Demanda Media		Demanda Máxima	
Unidad Generadora	P [MW]	Q [MVAR]	P [MW]	Q [MVAR]	P [MW]	Q [MVAR]
Chixoy H1	--,--	--,--	--,--	--,--	--,--	--,--
Chixoy H2	53,80	11,00	53,80	11,00	53,80	11,00
Chixoy H3	53,80	11,00	53,80	11,00	53,80	11,00
Chixoy H4	0,00	0,00	0,00	0,00	53,80	11,00
Chixoy H5	0,00	0,00	0,00	0,00	53,80	11,00
Renace H4	0,00	0,00	28,50	6,30	28,50	6,30
Renace H5	0,00	0,00	28,50	6,30	28,50	6,30
Renace H6	0,00	0,00	28,50	6,30	28,50	6,30
Renace H7	0,00	0,00	0,00	0,00	28,50	6,30

Fuente: elaboración propia con base en datos proporcionados por la CNEE.

3.10.2. Simulación y resultados

Deberán simularse cada uno de los escenarios y obtener en todos los casos los resultados que se detallan en el numeral 3.4 del presente trabajo de graduación.

Adicionalmente deberá simularse los casos de N-1 elementos del Sistema de Transporte del sistema Troncal Norte, para los escenarios de demanda máxima de ambas estaciones, de conformidad a lo establecido en las NEAST y NTAUCT.

3.10.3. Análisis de los resultados

Deberá realizarse el análisis de los resultados y explicar el comportamiento conforme a lo que se detalla en el numeral 3.5 del presente trabajo de graduación.

3.10.4. Informe técnico

Deberá presentarse, en medio físico y digital, un informe técnico del estudio de flujo de carga realizado, conforme a lo que se estipula en el apéndice A del presente trabajo de graduación.

4. SIMULACIÓN DE FALLAS DE CORTOCIRCUITO

4.1. Estudio de fallas de cortocircuito

El estudio de fallas de cortocircuito permite determinar el comportamiento de los parámetros eléctricos de los elementos de un sistema de potencia al presentarse una falla de cortocircuito.

Se pueden presentar cuatro tipos de cortocircuitos: trifásicos, monofásicos a tierra, bifásicos y bifásicos a tierra.

La importancia de los estudios de fallas de cortocircuito radica en la seguridad de los sistemas de potencia. Los estudios de fallas de cortocircuito son necesarios para la correcta coordinación de los sistemas de protección, que deberán garantizar la seguridad de las personas y los equipos durante y después de ocurrida una falla en el sistema de potencia.

Los sistemas de protección tienen como propósito proteger la integridad de los seres humanos y de los elementos que conforman el sistema de potencia, de igual forma mantener su seguridad operativa. Los resultados obtenidos de los estudios de fallas de cortocircuito permiten que los sistemas de protección cumplan con su propósito.

4.2. Consideraciones técnicas de los estudios de fallas de cortocircuito

Las consideraciones técnicas de los estudios de fallas de cortocircuito incluyen aquellas que se toman en cuenta para los estudios de flujos de carga, los tipos de fallas de cortocircuito que se requiere simular y los valores de impedancia de falla que interesan.

Respetando el concepto de escenario que se definió en el capítulo 3 del presente trabajo de graduación, en los estudios de fallas de cortocircuito se tiene un escenario por cada falla o combinación de fallas que se definan en una simulación.

4.3. Estudio de fallas de cortocircuito dentro del marco regulatorio de Guatemala

Las Norma Técnicas de Estudios de Acceso al Sistema de Transporte (NEAST) establecen que los estudios de fallas de corto circuito deberán incluir, “simulaciones de cortocircuito, trifásicos y monofásicos a tierra, para los casos de demanda de máxima y mínima. Los puntos del Sistema a estudiar, serán en principio aquellos que el interesado considere críticos en función de la nueva instalación”²⁶ y adicionalmente se deberá verificar “que en ninguna subestación del Sistema se superen los niveles de potencia de cortocircuito nominal de los equipos instalados”²⁷ e indicar “cuál es el incremento de la potencia de cortocircuito que resulta por efecto de la inserción de la nueva instalación; así

²⁶ Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Normas de estudios de acceso al sistema de transporte, Resolución CNEE-28-98*. 1998.

²⁷ *Ibíd.*

como analizar especialmente la condición más desfavorable dentro de los escenarios elegidos”²⁸.

Por su parte las Normas Técnicas de Acceso y Uso de la Capacidad de Transporte (NTAUCT) establecen que, “cuando se trate de ingreso de nueva generación tanto al SNI como a sistemas de prestadores de la Función de Transportista, o de instalación que modifiquen la configuración de dichos sistemas”²⁹ se deberán realizar simulaciones de fallas de cortocircuito como lo establecen las NEAST.

Las NEAST en su Artículo 14 y la NTAUCT en su Artículo 20 establecen los criterios para la simulación de fallas y perturbaciones que deben tomarse en cuenta para los estudios correspondientes.

4.4. Resultados de la simulación de fallas de cortocircuito

De las simulaciones de fallas de cortocircuito realizadas se deberán obtener como mínimo los siguientes resultados:

4.4.1. Tensiones en las barras

Los valores, en kV y pu, de las magnitudes de las tensiones en cada uno de los nodos del sistema, además de los valores, en grados, de los ángulos de dichas tensiones.

²⁸ Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Normas de estudios de acceso al sistema de transporte, Resolución CNEE-28-98*. 1998.

²⁹ *Ibíd.*

4.4.2. Corriente que circula en las líneas de transmisión y transformadores

Los valores en amperios y pu de la corriente que circula en las líneas de transmisión y transformadores del sistema.

4.4.3. Corriente que circula en las fases de los generadores y cargas

Los valores en amperios y pu de la corriente que circula en los generadores y cargas del sistema.

4.5. Diseño del Ejemplo 2. Simulación de una falla simple trifásica sólida que ocurre en la mitad de la línea de transmisión TIC – GNO 230 kV para el escenario de demanda mínima de la época seca del sistema Troncal Norte en el año estacional 1

Para realizar la simulación de falla del escenario de demanda mínima de la época seca del sistema Troncal Norte para año estacional 1, se siguió el procedimiento que se describe a continuación:

4.5.1. Definir las consideraciones técnicas de la simulación

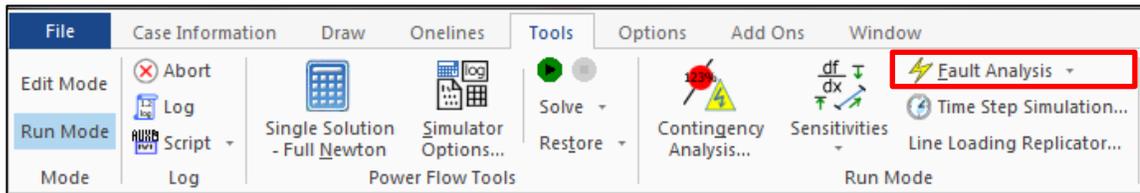
En este caso se utilizan las consideraciones técnicas que se definen en el numeral 3.8.1 del presente trabajo de graduación. Para realizar la simulación se eligió el software PowerWorld Simulator Educational- Evaluation 19.

4.5.2. Ingresar los datos de falla al software de simulación, correr la simulación del escenario y obtener los resultados

En la unidad Análisis de Fallas (Fault Analysis en inglés), del contenido de ayuda PowerWorld Simulator Educational- Evaluation, se encuentra la información respecto a la simulación de fallas de cortocircuito.

Dentro de la cinta de herramientas de la pestaña Herramientas (“Tools”), del programa PowerWorld Simulator Educational- Evaluation, se encuentra el grupo de opciones denominado Modo Ejecución (“Run Mode”) dentro de este grupo se encuentra el botón Análisis de Fallas (Fault Analysis), la ubicación de esta botón se presenta en la siguiente imagen:

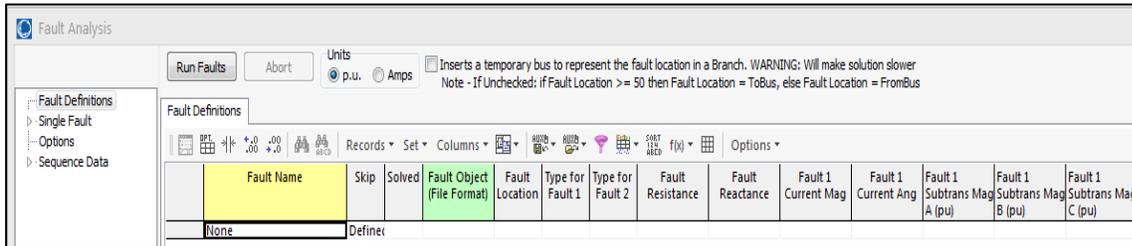
Figura 39. Botón Análisis de Fallas



Fuente: software PowerWord Simulator Educational-Evaluation 19.

El hacer clic sobre el botón Análisis de Fallas se abre el cuadro de diálogo Análisis de Fallas que se muestra a continuación:

Figura 40. Cuadro de diálogo “Análisis de Fallas”

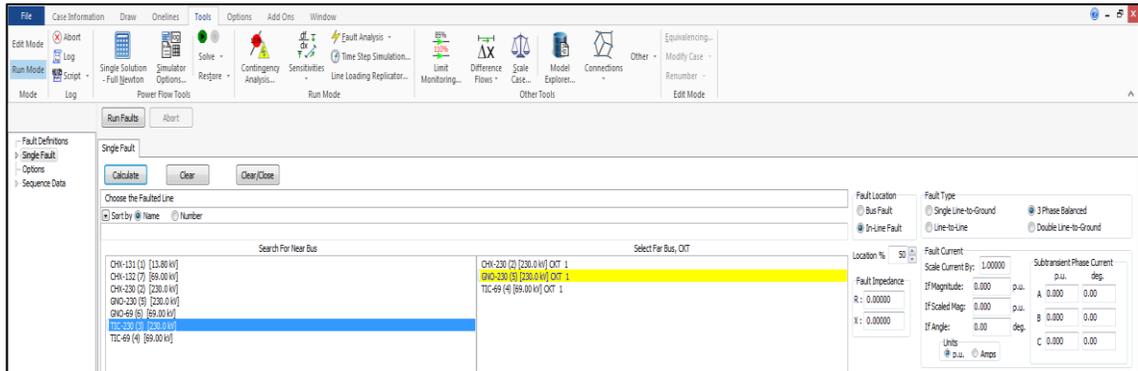


Fuente: software PowerWorld Simulator Educational-Evaluation 19.

El contenido de ayuda del cuadro de diálogo Análisis de Fallas se puede consultar en el siguiente enlace: <http://goo.gl/AaSuW3>.

La simulación se hace empleando la base de datos del ejemplo 1. Al correr la simulación del escenario de demanda mínima de la época seca del sistema Troncal Norte para el año estacional 1. Se ingresan los datos de la falla al simulador, en esta caso es una falla simple trifásica sólida que ocurre en la mitad de la línea de transmisión TIC – GNO 230 kV, la siguiente figura muestra los datos ingresados en cuadro de diálogo “Análisis de Fallas”.

Figura 41. Datos de la falla del ejemplo 2 ingresados en el cuadro de dialogo “Análisis de Fallas”



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWord Simulator Educational-Evaluation 19.

Al correr la simulación se obtienen los resultados que se muestran en las siguientes imágenes:

Figura 42. Resultados de las barras

	Number	Name	Phase Volt A	Phase Volt B	Phase Volt C	Phase Ang A	Phase Ang B	Phase Ang C
1	1	CHX-131	0.64753	0.64753	0.64753	1.10	-118.90	121.10
2	2	CHX-230	0.29158	0.29158	0.29158	-4.40	-124.40	115.60
3	3	TIC-230	0.13439	0.13439	0.13439	-4.59	-124.59	115.41
4	4	TIC-69	0.13388	0.13388	0.13388	-5.71	-125.71	114.29
5	5	GNO-230	0.00000	0.00000	0.00000	-50.41	-170.41	69.59
6	6	GNO-69	0.00001	0.00001	0.00001	-45.38	-165.38	74.62
7	7	CHX-132	0.43892	0.43892	0.43892	-0.36	-120.36	119.64
8	8	FaultPt	0.00000	0.00000	0.00000	166.31	46.31	-73.69

Fuente: resultados obtenidos empleando PowerWord Simulator Educational-Evaluation 19.

Figura 43. Datos de los transformadores y líneas de transmisión

	From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Xfrmr	Phase Cur A From	Phase Cur B From	Phase Cur C From	Phase Cur A To	Phase Cur B To	Phase Cur C To
1	1	CHX-131	2	CHX-230	1	YES	1.92532	1.92532	1.92532	1.92532	1.92532	1.92532
2	2	CHX-230	3	TIC-230	1	NO	5.13666	5.13666	5.13666	5.15952	5.15952	5.15952
3	7	CHX-132	2	CHX-230	1	YES	0.80301	0.80301	0.80301	0.80301	0.80301	0.80301
4	7	CHX-132	2	CHX-230	2	YES	0.80301	0.80301	0.80301	0.80301	0.80301	0.80301
5	7	CHX-132	2	CHX-230	3	YES	0.80301	0.80301	0.80301	0.80301	0.80301	0.80301
6	7	CHX-132	2	CHX-230	4	YES	0.80301	0.80301	0.80301	0.80301	0.80301	0.80301
7	3	TIC-230	4	TIC-69	1	YES	0.03208	0.03208	0.03208	0.03208	0.03208	0.03208
8	3	TIC-230	5	GNO-230	1	NO	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
9	3	TIC-230	8	FaultPt	1	NO	5.14717	5.14717	5.14717	5.15333	5.15333	5.15333
10	5	GNO-230	6	GNO-69	1	YES	0.00006	0.00006	0.00006	0.00006	0.00006	0.00006
11	5	GNO-230	6	GNO-69	2	YES	0.00006	0.00006	0.00006	0.00006	0.00006	0.00006
12	8	FaultPt	5	GNO-230	1	NO	0.00014	0.00014	0.00014	0.00014	0.00014	0.00014

Fuente: resultados obtenidos empleando PowerWord Simulator Educational-Evaluation 19.

Figura 44. Resultados de los generadores

	Number of Bus	Name of Bus	Phase Cur A	Phase Cur B	Phase Cur C	Phase Ang A	Phase Ang B	Phase Ang C
1	1	CHX-131	1.92532	1.92532	1.92532	-84.43	155.57	35.57
2	7	CHX-132	3.21201	3.21201	3.21201	-82.47	157.53	37.53
3	7	CHX-132	0.00000	0.00000	0.00000	0.00	0.00	0.00
4	7	CHX-132	0.00000	0.00000	0.00000	0.00	0.00	0.00
5	7	CHX-132	0.00000	0.00000	0.00000	0.00	0.00	0.00

Fuente: resultados obtenidos empleando PowerWord Simulator Educational-Evaluation 19.

Figura 45. Resultados de las cargas

	Number of Bus	Name of Bus	ID	Phase Cur A	Phase Cur B	Phase Cur C
1	4	TIC-69	1	0.01148	0.01148	0.01148
2	4	TIC-69	2	0.02057	0.02057	0.02057
3	6	GNO-69	1	0.00000	0.00000	0.00000
4	6	GNO-69	2	0.00000	0.00000	0.00000
5	6	GNO-69	3	0.00000	0.00000	0.00000
6	6	GNO-69	4	0.00000	0.00000	0.00000

Fuente: resultados obtenidos empleando PowerWord Simulator Educational-Evaluation 19.

4.6. Diseño de la Práctica 3. Estudio de fallas de cortocircuito en el sistema Troncal Norte para el año 1

Se requiere analizar el comportamiento del sistema Norte Central ante fallas de cortocircuito simples ubicadas en la mitad de las líneas de transmisión del sistema, para los escenarios de demanda mínima, media y máxima de ambas estaciones, por lo cual se debe realizar el estudio de fallas de cortocircuito correspondiente.

4.6.1. Consideraciones técnicas del estudio

El estudio debe realizarse respetando las consideraciones técnicas definidas en el numeral 3.8.1 del presente trabajo de graduación.

Los tipos de fallas que se requiere simular son trifásicas, bifásicas, bifásica a tierra y monofásicas a tierra, todas simples y sólidas, es decir no simultáneas y con impedancia de falla igual a cero.

Todas las fallas se localizan en la mitad de las líneas de transmisión.

4.6.2. Simulación y resultados

De acuerdo a lo indicado en las consideraciones técnicas deberá simularse una por una cada tipo de falla en una línea a la vez.

En cada la simulación se deben obtener los resultados que se definen en el numeral 4.4 del presente trabajo de graduación.

4.6.3. Informe técnico

El estudiante deberá presentar, en medio físico y digital, un informe técnico del estudio de fallas de cortocircuito realizado, que contenga según corresponda lo establecido en el apéndice A del presente trabajo de graduación.

4.7. Diseño de la Práctica 4. Estudio de fallas de cortocircuito en el sistema Troncal Norte para el año estacional 15

Se requiere analizar el comportamiento del sistema Norte Central ante fallas trifásicas simples ubicadas en la mitad de las líneas de transmisión del sistema, para los escenarios de demanda mínima, media y máxima de ambas estaciones, por lo cual se debe realizar el estudio de fallas de cortocircuito correspondiente.

4.7.1. Consideraciones técnicas

El estudio debe realizarse respetando las consideraciones técnicas definidas en el numeral 3.8.1 del presente trabajo de graduación.

El tipo de falla que se requiere simular son: simples trifásicas sólidas, localizadas en la mitad de las líneas de transmisión.

4.7.2. Simulación y resultados

De acuerdo a lo indicado en las consideraciones técnicas deberá simularse el tipo de falla indicado en una línea a la vez.

En cada la simulación se deben obtener los resultados que se definen en el numeral 4.4 del presente trabajo de graduación.

4.7.3. Informe técnico

El estudiante deberá presentar, en medio físico y digital, un informe técnico del estudio de fallas de cortocircuito realizado, que contenga según corresponda lo establecido en el apéndice A del presente trabajo de graduación.

5. SIMULACIÓN DE ESTABILIDAD TRANSITORIA

5.1. Estudios de estabilidad transitoria

La estabilidad transitoria en un sistema de potencia es la capacidad del sistema de mantener la operación sincronizada después de ocurrida una falla transitoria.

El estudio de estabilidad transitoria permite determinar el comportamiento de los sistemas de potencia, que operan en condiciones normales con sincronismo, ante perturbaciones transitorias.

El estudio de estabilidad tiene como objetivo determinar si un sistema se mantiene estable después de ocurrida una falla no periódica, es decir transitoria.

La estabilidad transitoria, por su naturaleza, resulta un tema un tanto complejo, Por razones didácticas suele utilizarse el criterio de áreas iguales para su explicación, no obstante este método en la práctica no es aplicable.

Se puede determinar si un generador posee estabilidad transitoria observado el comportamiento de este ante una perturbación transitoria, por ejemplo se puede analizar cómo se comporta en el tiempo el ángulo del rotor después de ocurrida una perturbación transitoria, las NTAUCT definen que se considera como amortiguamiento aceptable, es decir que posee estabilidad transitoria, si las oscilaciones presentan a partir del tercer pico una atenuación mínima del 25 %.

5.1.1. Consideraciones técnicas de los estudios de estabilidad transitoria

En los estudios de estabilidad transitoria se toman en cuenta las consideraciones técnicas de un estudio de flujo más consideraciones propias de los estudios de estabilidad, estas son los modelos dinámicos de los elementos del sistema y los equivalentes de red empleados en las simulaciones.

En la simulación de estabilidad transitoria resulta de suma importancia los modelos dinámicos y datos empleados, la efectividad de los resultados dependerá en buena medida de los modelos que se empleen en las simulaciones.

Ejemplos de modelos dinámicos son, el modelo de máquina Genruo, que se emplea para simular unidades generadoras térmicas, y el modelo de máquina Gensal, que se emplea para simular unidades generadoras hidráulicas, que poseen más de un par de polos. Es necesario resaltar que existe otros modelos de máquinas que se utilizan según se requiera para simular las características particulares de los diferentes tipos de unidades generadores con sus.

Los modelos del excitador, gobernador y estabilizador de los generadores son especificados por el fabricante.

Los modelos dinámicos de otros elementos así como los equivalentes de red a emplear dependerán de los requerimientos del estudio y los criterios establecidos en la normativa legal.

5.2. Estudios de estabilidad transitoria dentro del marco regulatorio de Guatemala

Las NEAST establecen para conexión de nuevas instalaciones al Sistema Eléctrico Nacional, “que se deberán realizar estudios de estabilidad transitoria y analizar la respuesta, tanto de los equipos existentes como de la nueva instalación propuesta ante perturbaciones que ocasionen inestabilidad en el SNI o en los Sistemas aislados”³⁰.

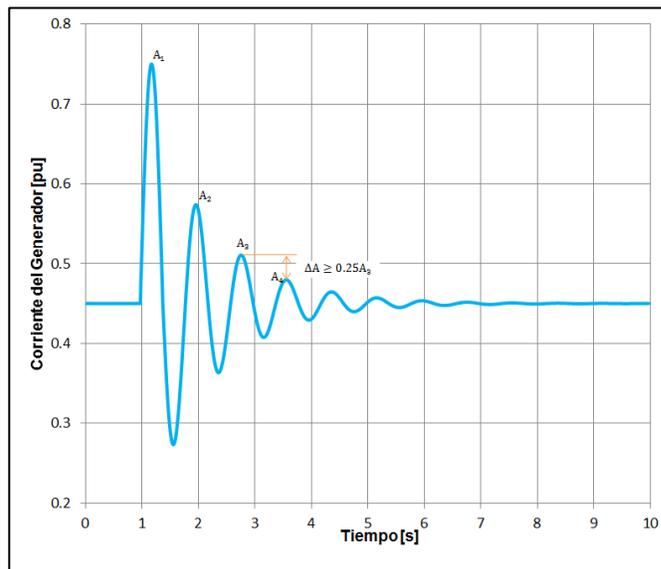
Las NTAUCT establecen en su artículo 16, numeral 1, los requisitos mínimos que deben cumplir los programas de simulación para la elaboración de estudios de estabilidad transitoria; en los numerales 2 y 3 del mismo artículo se establece las consideraciones técnicas para equivalentes de red y esquemas de control; en el numeral 4 se define los tiempo mínimos de simulación, para estabilidad transitoria 3 segundos y para evaluación del amortiguamiento post-falla 20 segundos.

Para la evaluación de los resultados de las simulaciones de análisis de estabilidad transitoria las NTAUCT definen que se considera como amortiguamiento post-falla aceptable, cuando la relación de atenuación entre 2 picos sucesivos a partir de la 3ª oscilación es de 0,75, es decir entre los picos, A_3 y A_4 , de la 3ª y 4ª oscilación respectivamente, deberá existir una atenuación igual o mayor al 25 %, lo anterior significa que un sistema de potencia se considera estable ante una perturbación transitoria siempre que $A_{i+1}/A_i \leq 0,75$, donde i es el número de oscilación igual o mayor que 3, es de esta forma que las NTAUCT expresan matemáticamente el criterio de amortiguamiento aceptable.

³⁰ Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Normas de estudios de acceso al sistema de transporte, Resolución CNEE-28-98*. 1998.

A continuación, se presenta una gráfica que ilustra el criterio de amortiguamiento aceptable establecido en las NTAUC:

Figura 46. **Comportamiento de la corriente de un generador estable después de ocurrida una perturbación transitoria**



Fuente: elaboración propia, empleando Adobe Illustrator.

5.3. Resultados de la simulación de estabilidad transitoria

De las simulaciones de estabilidad transitoria realizadas se deberán obtener los resultados y las gráficas del comportamiento posfalla de los parámetros de los generadores que forman parte del sistema estudiado.

5.4. Diseño del sistema de potencia a emplearse en el desarrollo de la Práctica 5 del laboratorio del curso de Sistemas de Potencia 1

Para el desarrollo de la Práctica 5 del laboratorio se diseñó un sistema de potencia con base en la configuración y datos reales del Sistema Eléctrico Nacional de Guatemala. El sistema diseñado para el desarrollo de la Práctica 5 se describe a continuación:

5.4.1. Sistema Gen-Binf en el año estacional 1

El sistema de potencia denominado Gen-Binf es un subsistema de 42,5 MVA que forma parte de un sistema de potencia interconectado (SPI), este último es un sistema mucho mayor que el Gen-Binf.

El sistema Gen-Binf en el año 1, está integrado por una planta de generación de 42,5 MVA, dos subestación eléctricas y dos líneas de trasmisión de 230 kV.

5.4.2. Parámetros del sistema Gen-Binf en el año estacional 1

La frecuencia nominal es de 60 Hertz, las tensiones nominales fase a fase son, 230 kV, 13,8 kV. La tolerancia de la regulación de la tensión respecto al valor nominal es +/- 5 %.

5.4.3. Nomenclatura sistema Gen-Binf

La nomenclatura del sistema Gen-Binf-230 se detalla en la siguiente tabla:

Tabla XXVII. **Nomenclatura sistema Gen-Binf**

Nomenclatura	Descripción
CXH	Chixoy
USP	Uspantán
PVI	Palo Viejo

Fuente: elaboración propia.

5.4.4. Elementos sistema Gen-Binf-230

Los elementos que forman el sistema Gen-Binf-230 se describen a continuación:

5.4.4.1. Planta Palo Viejo 42,5 MVA

La planta de generación Palo Viejo, es una central hidroeléctrica con embalse de regulación diaria, integrada por dos generadores con tensión y potencia aparente nominales de 13,8 kV y 42,5 MVA respectivamente, denominado Palo Viejo H1 y Palo Viejo H2.

Las unidades de generación Palo Viejo H1 tiene los siguientes parámetros:

Tabla XXVIII. **Parámetros del generador de la planta Palo Viejo 42,5 MVA**

Voltaje Nominal [kV]	13,800
Potencia Aparente Nominal [MVA]	42,500
Potencia activa máxima [MW]	44,152
Potencia activa mínima [MW]	20,000
Potencia reactiva máxima [MVAR]	23,465
Potencia reactiva mínima [MVAR]	-23,465
Potencia Base [MVA]	50,000
X [pu]	0,2400
X0 [pu]	0,2400

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por la CNEE.

5.4.4.2. Subestación Uspantán 230/13,8 kV

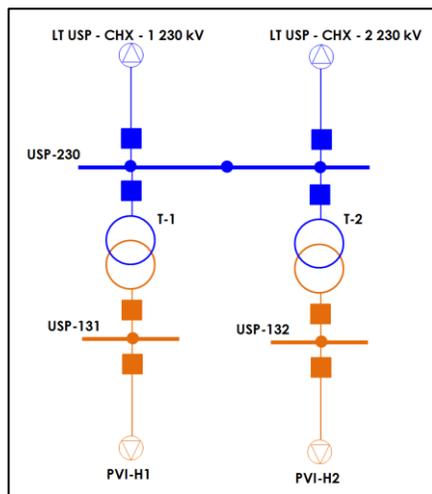
La subestación Uspantán es una subestación de transformación elevadora de tensión, que permite conectar la unidad de generación de la planta Palo Viejo al sistema, se encuentra equipada con lo siguiente:

- Una barra de 230 kV con configuración barra simple, denominada Uspantán 230.
- Dos barras de 13,8 kV con configuración barra simple, denominadas Chixoy 131 y Chixoy 132.
- Un campo de transformación de 230/13,8 kV, con capacidad de 50 MVA, que interconecta las barras Uspantán 230 y Uspantán 131.
- Un campo de transformación de 230/13,8 kV, con capacidad de 50 MVA, que interconecta las barras Uspantán 230 y Uspantán 132.
- Un campo de conexión equipado de 13,8 kV para conectar la unidad de generación denominada Palo Viejo H1 a la barra Uspantán 131.
- Un campo de conexión equipado de 13,8 kV para conectar la unidad de generación denominada Palo Viejo H2 a la barra Uspantán 132.

- Dos campos de conexión de 230 kV para conectar la línea de transmisión de doble circuito Uspantán – Chixoy II 230.

A continuación, se muestra el diagrama unifilar de referencia de la subestación Uspantán 230/13,8 kV:

Figura 47. **Diagrama unifilar de referencia de la subestación Uspantán 230/13,8 kV**



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator Educational-Evaluation 19.

Los parámetros eléctricos del transformador de la subestación Uspantán se presentan a continuación:

Tabla XXIX. **Parámetros eléctricos del transformador de la subestación Uspantán**

Barra del lado de alta	Barra del lado de baja	Núm.	Tensión del lado de alta [kV]	Tensión del lado de baja [kV]	R [pu]	X [pu]	B [pu]
USP-230	USP-13	1	230,00	13,80	0,0000	0,2040	0,0000

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por la CNEE.

Tabla XXX. **Parámetros eléctricos del transformador de la subestación Uspantán (valores de secuencia cero)**

Barra del lado de alta	Barra del lado de baja	Núm.	Tensión del lado de alta [kV]	Tensión del lado de baja [kV]	R0 [pu]	X0 [pu]
USP-230	USP-13	1	230,00	13,80	0,0000	0,2040

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por la CNEE.

Tabla XXXI. **Límites de capacidad del transformador de la subestación Uspantán**

Barra del lado de alta	Barra del lado de baja	Núm.	Límite A [MVA]	Límite B [MVA]
USP-230	USP-13	1	50,000	50,000

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por la CNEE.

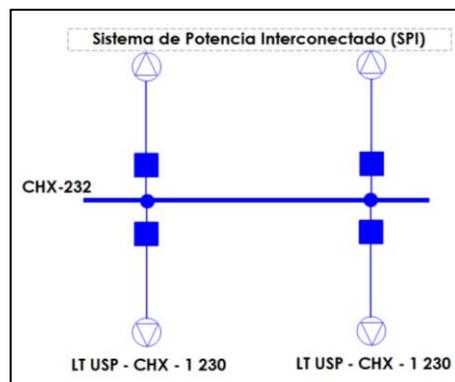
5.4.4.3. Subestación Chixoy II 230 kV

Es una subestación de maniobra que interconecta la línea de transmisión de doble circuito Uspantán – Chixoy II 230 al sistema de potencia SPI, se encuentra equipada con lo siguiente:

- Una barra de 230 kV con configuración barra simple, denominada Chixoy 232.
- Dos campos de conexión de 230 kV para conectar la línea de transmisión de doble circuito Uspantán – Chixoy II 230 kV.
- Dos campos de conexión de 230 kV para conectar la línea de transmisión de doble circuito que interconecta la subestación Chixoy II con el sistema SPI.

A continuación, se muestra el diagrama unifilar de referencia de la subestación Chixoy II 230 kV:

Figura 48. **Diagrama unifilar de referencia de la subestación Chixoy II 230 kV**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

5.4.4.4. Línea de transmisión Uspantán – Chixoy II 230 kV

Esta línea de transmisión interconecta la subestación Uspantán 230/13,8 kV con la subestación Chixoy II 230 kV, en un sistema de doble circuito, se extiende a lo largo de 31,910 km. Sus parámetros eléctricos se presentan a continuación:

Tabla XXXII. **Parámetros de la línea de transmisión Uspantán – Chixoy II 230 kV**

Barra Inicio	Barra Final	Núm.	V [kV]	R [pu]	X [pu]	B [pu]
USP-230	CHX-232	1	230,00	0,003920	0,023440	0,077170
USP-230	CHX-232	2	230,00	0,003920	0,023440	0,077170

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por la CNEE.

Tabla XXXIII. **Parámetros de la línea de transmisión Uspantán – Chixoy II 230 kV (valores de secuencia cero)**

Barra Inicio	Barra Final	Núm.	V [kV]	R0 [pu]	X0 [pu]
USP-230	CHX-232	1	230,00	0,024970	0,071750
USP-230	CHX-232	2	230,00	0,024970	0,071750

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por la CNEE.

Tabla XXXIV. **Límites de capacidad de la línea de transmisión Uspantán – Chixoy II 230 kV**

Barra Inicio	Barra Final	Núm.	Límite A [MVA]	Límite B [MVA]
USP-230	CHX-232	1	439,800	514,700
USP-230	CHX-232	2	439,800	514,700

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por la CNEE.

5.5. Diseño del Ejemplo 3. Análisis de estabilidad transitoria del sistema Gen-Binf

Para realizar la simulación de estabilidad transitoria del sistema Gen-Binf se siguió el procedimiento que se describe a continuación:

5.5.1. Definir las consideraciones técnicas de la simulación

En este ejemplo se utilizan las consideraciones técnicas que se definen en el numeral 5.7.1 del presente trabajo de graduación, con excepción de la perturbación, que para el presente ejemplo se define como una falla simple bifásica sólida ubicada a la mitad de la línea de transmisión Uspantán – Chixoy II 230 kV, la falla se libra después de 100 ms.

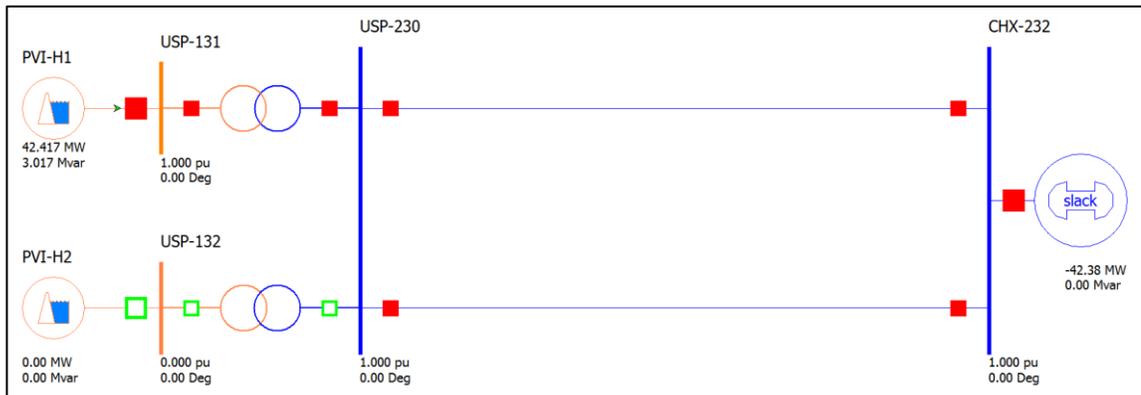
5.5.2. Ingresar los datos del sistema al software de simulación y elaborar el diagrama unifilar

Para la elaboración de la base de datos y la construcción del diagrama unifilar del presente ejemplo se respetan los parámetros definidos en el numeral 5.5.2 del presente trabajo de graduación y la nomenclatura establecida en el numeral 5.5.3.

En el presente ejemplo se utilizan los datos de los elementos que conforman el sistema Gen-Binf que se detallan en el numeral 5.6.4 del presente trabajo de graduación.

A continuación, se presenta el diagrama unifilar de referencia del escenario simulado construido para el presente ejemplo:

Figura 49. Diagrama unifilar de referencia del sistema Gen-Binf



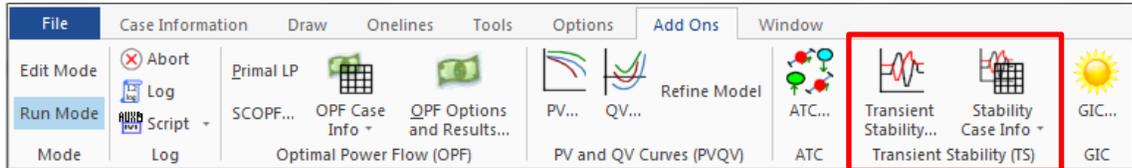
Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator Educational-Evaluation 19.

5.5.3. Ingresar los datos de la perturbación al software de simulación, correr la simulación del escenario y obtener los resultados

En la unidad titulada Estabilidad Transitoria Complementos (TS) (Transient Stability Add-On (TS)) del contenido de ayuda de PowerWorld Simulator Educational- Evaluation, se encuentra la información relativa a la simulación de problemas de estabilidad Transitoria.

Para acceder a las herramientas de simulación de estabilidad transitoria se debe hacer clic sobre la pestaña Complementos (And Ons), del programa PowerWorld Simulator Educational - Evaluation, se desplegará una cinta de herramientas, dentro de esta se encuentra el grupo de opciones denominado "Estabilidad Transitoria (TS)" (Transient Stability (TS)) el cual contiene las herramientas de simulación de problemas de flujos carga. La siguiente imagen muestra la ubicación del grupo de opciones "Estabilidad Transitoria (TS)":

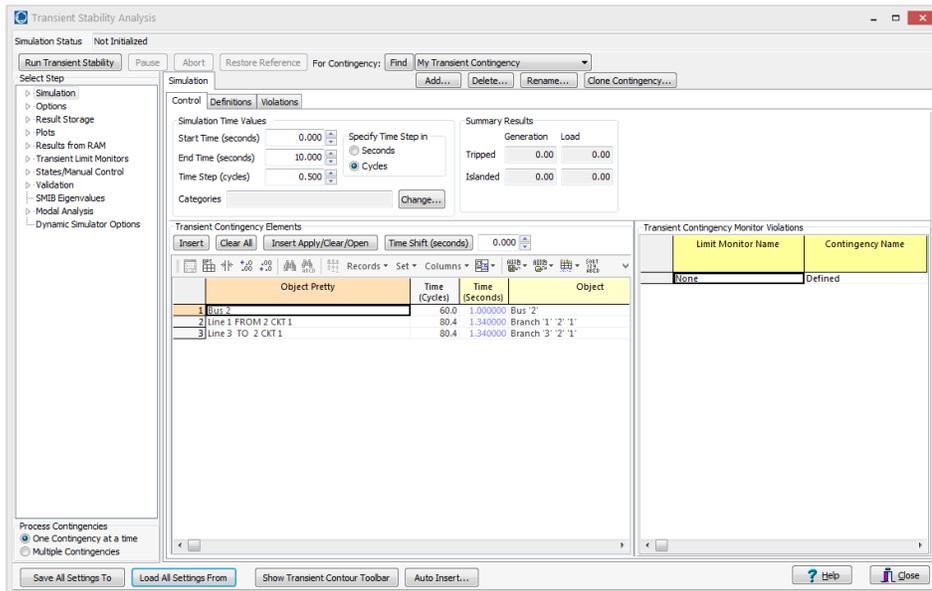
Figura 50. Grupo de opciones “Estabilidad Transitoria (TS)”



Fuente: software PowerWord Simulator Educational-Evaluation 19.

Al hacer clic en el botón Estabilidad Transitoria (Transient Stability) se abrirá el cuadro de diálogo Análisis de Estabilidad Transitoria (Transient Stability Analysis Dialog), el cual se muestra a continuación:

Figura 51. Cuadro de dialogo “ Análisis de Estabilidad Transitoria (TS)”

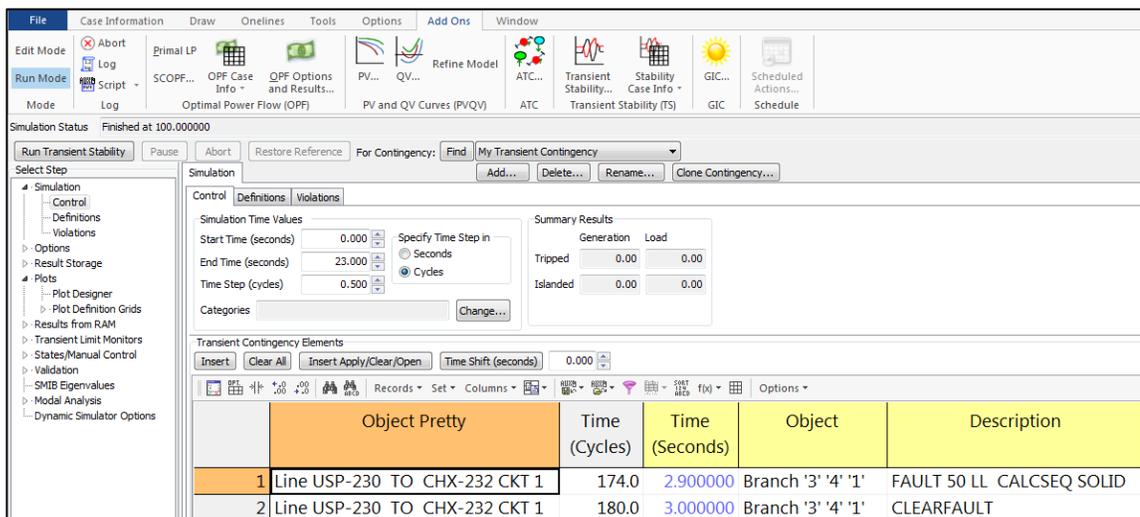


Fuente: software PowerWord Simulator Educational-Evaluation 19.

La información de ayuda del cuadro diálogo Análisis de Estabilidad Transitoria se puede consultar en el siguiente enlace: <http://goo.gl/AF7InT>.

Se ingresan los datos de la perturbación, en este caso es una falla fase a fase localizada en la mitad de la línea de transmisión Uspantán – Chixoy II 230 kV, la falla se libra después de 100,00 ms. La siguiente figura muestra los datos ingresados en cuadro de dialogo “Análisis de Estabilidad Transitoria (TS)”:

Figura 52. Datos de la perturbación del ejemplo 3 ingresados en el cuadro de diálogo “Análisis de Estabilidad Transitoria (TS)”

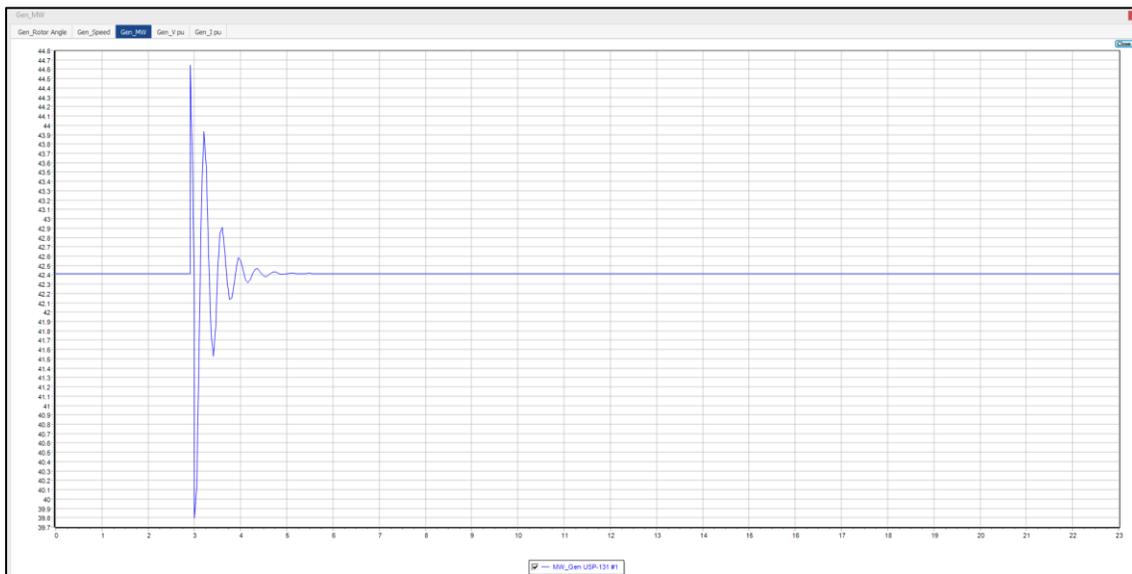


Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator Educational- Evaluation 19.

Como se puede observar en la figura anterior, la falla ocurre a partir de 2,9 segundos y es librada 0,1 segundos después. Se simulan 23 segundos para cumplir con las NTAUCT, que establecen que deberá evaluarse el amortiguamiento post-falla como mínimo 20 segundos.

Al correr la simulación del escenario se obtiene la gráfica que se muestra a continuación:

Figura 53. **Gráfica del comportamiento de la potencia activa del generador Palo Viejo H1**

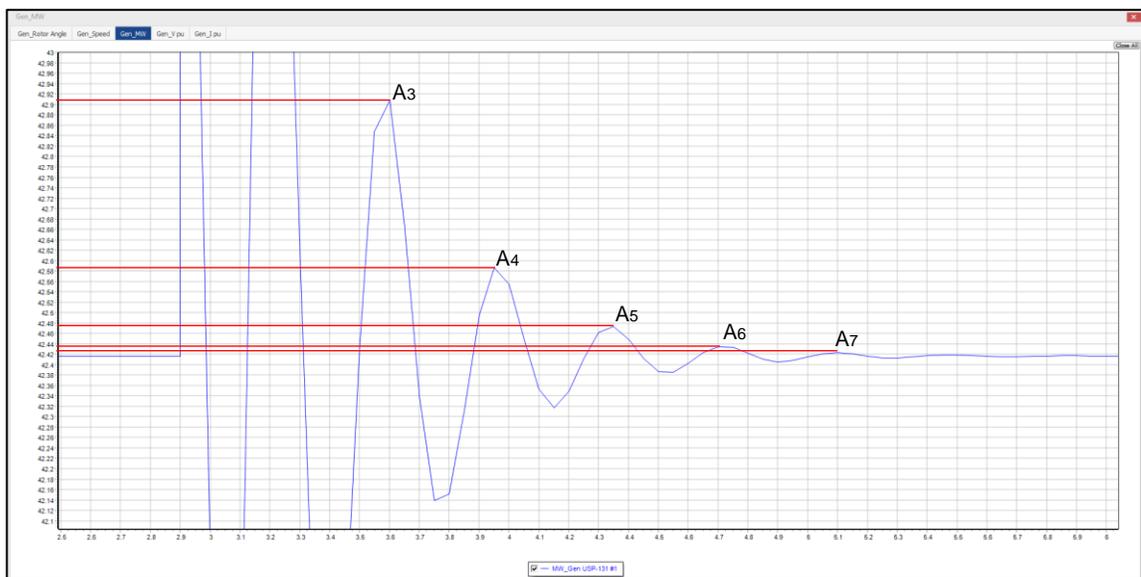


Fuente: resultado obtenido, empleando PowerWorld Simulator Educational- Evaluation 19.

En la gráfica anterior se puede observar el comportamiento de la corriente del generador Palo Viejo H-1 ante una falla simple bifásica sólida que se ubica a la mitad de la línea de transmisión Uspantán – Chixoy II 230 kV, y que es librada 100 ms después. Resulta evidente que el amortiguamiento pos-falla tiende al valor inicial y se estabiliza antes de los 20 segundos, no obstante es necesario evaluar el criterio de amortiguamiento aceptable establecido en las NTAUCT.

A continuación, se muestra una ampliación de la gráfica del comportamiento de la corriente del generador Palo Viejo H1, que permite apreciar mejor los picos de las oscilaciones:

Figura 54. Ampliación de la gráfica del comportamiento de la potencia activa del generador Palo Viejo H1



Fuente: resultado obtenido empleando PowerWorld Simulator Educational- Evaluation 19.

Con base en los resultados de la simulación, se obtienen los valores de los picos, que se presentan en la siguiente tabla:

Tabla XXXV. **Valores de los picos de las oscilaciones**

Pico	Valor [MW]	Valor medido a partir del valor inicial [MW]
A3	42,9085	0,4915
A4	42,5865	0,1695
A5	42,4737	0,0567
A6	42,4357	0,0187
A7	42,4235	0,0065

Fuente: elaboración propia, con base en los resultados obtenidos, empleando PowerWorld Simulator Educational- Evaluation 19.

A continuación, se presenta una tabla que contiene la evaluación del criterio de amortiguamiento aceptable establecido en las NTAUCT en su artículo 16.

Tabla XXXVI. **Evaluación de la relación de atenuación**

Relación	Valor	Relación menor o igual a 0,75
A4/A3	0,3449	Si
A5/A4	0,3345	Si
A6/A5	0,3298	Si
A7/A6	0,3476	Si

Fuente: elaboración propia, con base en los resultados obtenidos, empleando PowerWorld Simulator Educational- Evaluation 19.

De los resultados de la tabla anterior se observa que el comportamiento del generador Palo Viejo H-1 ante una falla simple bifásica sólida que se ubica a la mitad de la línea de transmisión Uspantán – Chixoy II 230 kV, y que es librada en 100 ms, cumple con el criterio de amortiguamiento aceptable establecido en las NTAUC, dentro de este marco se determina que el referido

generador posee estabilidad transitoria ante la falla del escenario del presente ejemplo.

5.6. Diseño Practica 5. Estudio de estabilidad transitoria del sistema Gen-Binf-230

Se requiere analizar el comportamiento del sistema Gen-Binf-230 ante la ocurrencia de perturbaciones transitorias, por lo cual es necesario realizar el estudio de estabilidad transitoria correspondiente.

5.6.1. Consideraciones técnicas

El estudio de estabilidad transitoria del sistema Gen-Binf-230 debe realizarse respetando las siguientes consideraciones técnicas:

5.6.1.1. Bases de datos

Las bases de datos que se emplearan en el estudio, deberán elaborarse con la información detallada en el numeral 5.6.2 del presente trabajo de graduación, y respetando la nomenclatura establecida en el numeral 5.6.3.

5.6.1.2. Despacho de generación

El despacho típico de generación del sistema Gen-Binf-230 para la época seca, se presenta en el siguiente cuadro:

Tabla XXXVII. **Despacho típico de generación del sistema Gen-Binf para la época seca**

Escenario	Potencia despachada típica época seca					
	Demanda Mínima		Demanda Media		Demanda Máxima	
Unidad Generadora	P [MW]	Q [MVAR]	P [MW]	Q [MVAR]	P [MW]	Q [MVAR]
Palo Viejo H1	0,000	0,000	0,000	0,000	42,417	3,017
Palo Viejo H2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

Fuente: elaboración propia.

5.6.1.3. Software de simulación

Para el estudio deberá utilizarse un software que permita realizar simulaciones de estabilidad transitoria de sistemas de potencia, que posean 4 o más barras, el simulador también deberá permitir guardar, abrir y editar las bases de datos del escenario.

5.6.1.4. Método de cálculo

Para el flujo de carga deberá aplicarse el método Single Solution – Full Newton.

5.6.1.5. Generador de compensación

Para simplificar el problema se definirá la barra denomina Chixoy 332 como la barra de compensación y se conectará un generador que sustituirá al resto del sistema SPI.

5.6.1.6. Escenarios

Se modelará el escenario típico de demanda máxima para la época seca, la perturbación a simular se define como falla trifásica sólida, que se ubica a la mitad de la línea de transmisión Uspantán – Chixoy II 230 kV y que es librada 100 ms después. Se simplifica el problema definiendo a la barra de compensación como una barra de potencia infinita.

Se deberá emplear los modelos dinámicos con los datos que presentan a continuación:

Tabla XXXVIII. Datos del modelo de la máquina

Tipo de modelo de la máquina	GENSAL
H	2,5970
D	1,0000
Ra	20,000
Xd	1,0700
Xq	0,5000
Xdp	0,2800
Xdpp	0,2400
Xl	0,1500
Tdop	7,0000
Tdopp	0,0350
Tqopp	0,0500
S1	0,0000
S12	0,0000
RComp	0,0000
XComp	0,0000

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por la CNEE.

Tabla XXXIX. **Datos del modelo del excitador**

Tipo de modelo del excitador	ESST1A
UEL	2
Vos	1
Tr	0,0000
ViMax	0,5000
ViMin	-0,5000
Tc	1,7400
Tb	174,000
Tc1	0,0000
Tb1	0,1000
Ka	9 170,0000
Ta	0,0100
VaMax	6,4500
VaMin	-5,6720
Vrmax	6,4500
Vrmin	-5,6720
Kc	0,0000
Kf	0,0000
Tf	1,5000
Klr	100,0000
lIr	3,0410

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por la CNEE.

Tabla XL. **Datos del modelo del gobernador**

Tipo de modelo del gobernador	WEHGOV		
Feedback	0	FlowG1	0,0000
RpermGate	0,0000	FlowG2	0,2000
RpermPE	0,0340	FlowG3	0,5720
Tpe	0,0500	FlowG4	0,7920
Kp	1,0000	FlowG5	1,0000
Ki	0,1250	FlowP11	0,1000
Kd	0,0000	FlowP12	0,2000
Td	0,1000	FlowP13	0,3000
Tp	0,0200	FlowP14	0,4000
Tdv	0,0500	FlowP15	0,5000
Tg	0,2220	FlowP16	0,6000
GTMXOP	0,1270	FlowP17	0,7000
GTMXCL	-0,0794	FlowP18	0,8000
Gmax	1,0000	FlowP19	0,9000
Gmin	0,0000	FlowP20	1,0000

Continuación de la tabla XL.

Dturb	0,5000	PMECH1	0,0000
Tw	1,1730	PMECH2	0,1080
SpeedDeadband	0,0000	PMECH3	0,2120
DPV	0,0000	PMECH4	0,3140
DICN	0,0000	PMECH5	0,4140
Gate1	0,1000	PMECH6	0,5120
Gate2	0,2700	PMECH7	0,6080
Gate3	0,6000	PMECH8	0,7020
Gate4	0,8000	PMECH9	0,7930
Gate5	1,0000	PMECH10	0,8830

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por la CNEE.

Tabla XLI. **Datos del modelo del estabilizador**

Tipo de modelo del estabilizador	IEE2ST
ics1	2
ics2	3
K1	7,6920
K2	-7,4920
T1	0,0000
T2	5,0000
T3	3,5000
T4	3,5000
T5	1,3000
T6	5,0000
T7	0,1200
T8	0,0250
T9	0,1200
T10	0,0250
Lsmax	0,0500
Lsmin	-0.0500
Vcu	0.0000
Vd	0.0000

Fuente: elaboración propia, con base en datos proporcionados por la CNEE.

5.6.1.7. Regulación de tensión

Se aplicarán los límites de regulación de tensión establecidos en las NTDOST.

5.6.1.8. Simulación y resultados

Deberá simularse el escenario descrito en el numeral 5.6.1.6 del presente trabajo de graduación y obtener las gráficas del comportamiento de la corriente, del voltaje en terminales, del ángulo del rotor, de la potencia y la velocidad del generador Palo Viejo H.

Las bases de datos de la simulación deben respetar la nomenclatura descrita en el numeral 5.4.1.4 del presente trabajo de graduación.

5.6.1.9. Análisis de los resultados

Se deberá realizar el análisis de los resultados y explicar el comportamiento del generador ante el escenario planteado, este análisis deberá determinar si el sistema es estable ante la perturbación transitoria planteada.

5.6.2. Informe técnico

Se deberá presentar, en medio físico y digital, un informe técnico del estudio de estabilidad transitoria realizado, que contenga como mínimo lo establecido en el apéndice A del presente trabajo de graduación.

5.7. Diseño del sistema de potencia que se deberá emplear en el desarrollo del Proyecto Final de Laboratorio

A continuación, se presenta el diseño del sistema de potencia que se deberá emplear en el desarrollo del proyecto final de laboratorio.

5.7.1. Proyecto de Ampliación del Sistema de Transporte del Sistema Troncal Norte (PAST 16-20)

Se ha planteado una alternativa de Ampliación del Sistema de Transporte del sistema Troncal Norte, denominado Proyecto de Ampliación del Sistema de Transporte del Sistema Troncal Norte (PAST 16-20), a desarrollarse entre los años 16 y 20. Este proyecto consiste en las siguientes ampliaciones del sistema de transporte:

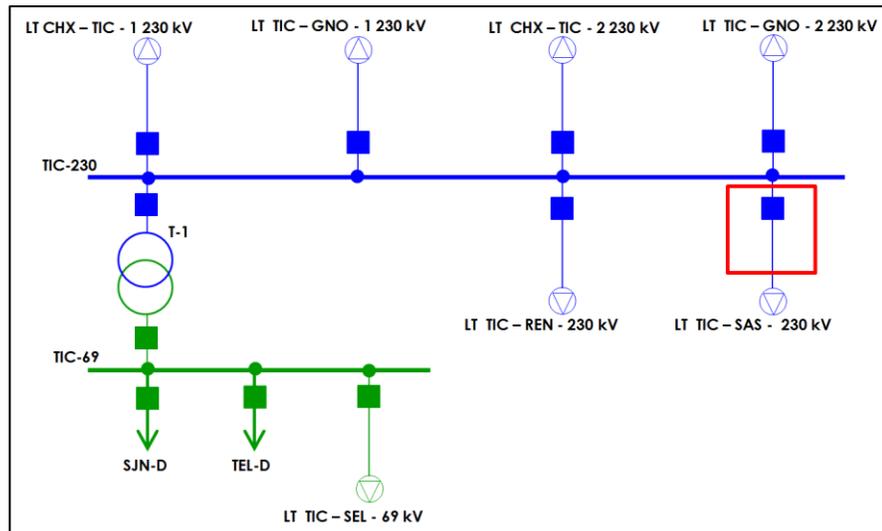
5.7.1.1. Ampliación de la subestación Tactic 230/69 kV

La ampliación de la subestación Tactic, constituye la adición del siguiente equipo:

- Un campo de conexión equipado de 230 kV para conectar la línea de transmisión nueva Tactic – San Agustín 230 KV.

A continuación, se muestra el diagrama unifilar de referencia de la subestación Tactic 230/69 kV:

Figura 55. **Diagrama unifilar de referencia de la subestación Tactic 230/69 kV**



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator Educational-Evaluation 19.

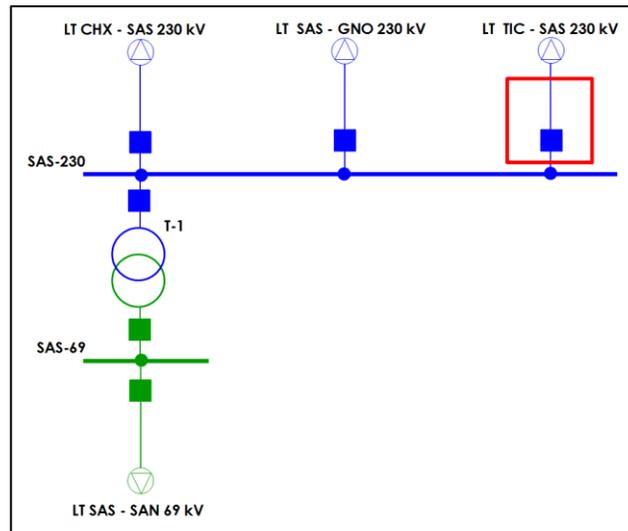
5.7.1.2. **Ampliación de la subestación San Agustín 230/69 kV**

La ampliación de la subestación San Agustín, constituye la adición del siguiente equipo:

- Un campo de conexión equipado de 230 kV para conectar la línea de transmisión nueva Tactic – San Agustín 230 KV.

A continuación, se muestra el diagrama unifilar de referencia de la subestación San Agustín 230/69 kV.

Figura 56. **Diagrama unifilar de referencia de la subestación San Agustín 230/69 kV**



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator Educational-Evaluation 19.

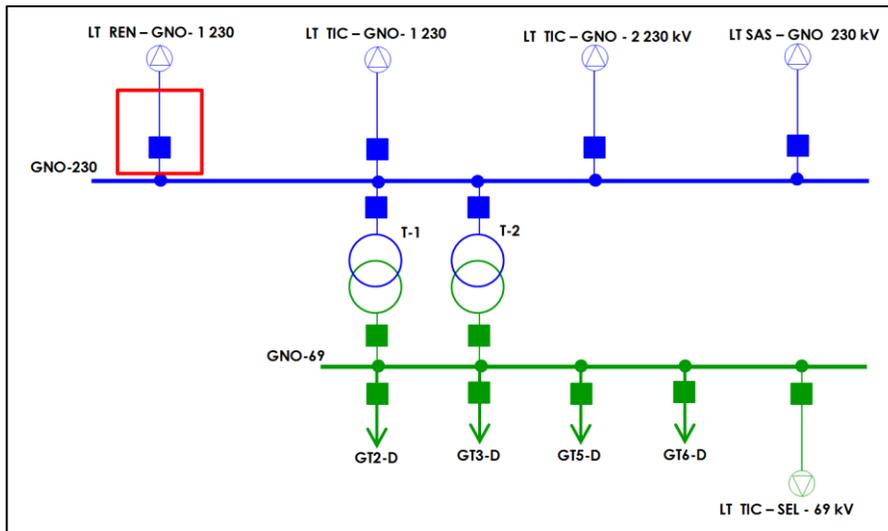
5.7.1.3. **Ampliación de la subestación Guatemala Norte 230/69 kV**

La ampliación de la subestación Guatemala Norte, constituye la adición del siguiente equipo:

- Un campo de conexión equipado de 230 kV para conectar la línea de transmisión Guatemala nueva Norte – Renace 230 KV.

A continuación, se muestra el diagrama unifilar de referencia de la subestación Guatemala Norte 230/69 kV:

Figura 57. **Diagrama unifilar de referencia de la subestación Guatemala Norte 230/69 kV**



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator Educational-Evaluation 19.

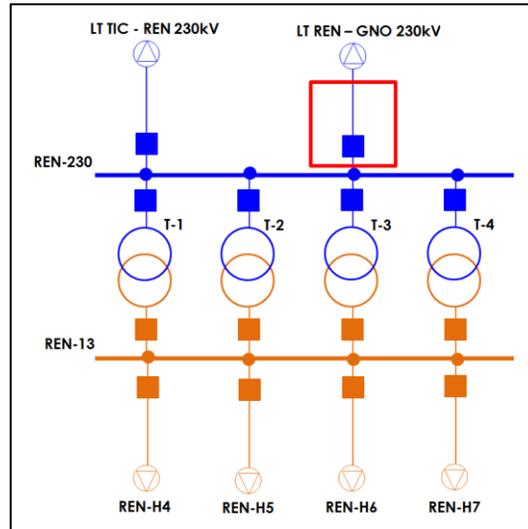
5.7.1.4. **Ampliación de la subestación Renace 230/13,8 kV**

La ampliación de la subestación Renace, constituye la adición del siguiente equipo:

- Un campo de conexión equipado de 230 kV para conectar la línea de transmisión nueva Renace - Guatemala Norte 230 kV.

A continuación, se muestra el diagrama unifilar de referencia de la subestación Renace 230/13,8 kV.

Figura 58. **Diagrama unifilar de referencia de la subestación Renace 230/13,8 kV**



Fuente: elaboración propia, empleando PowerWorld Simulator Educational-Evaluation 19.

5.7.1.5. **Línea de transmisión nueva Tactic – San Agustín 230 kV**

Esta línea interconecta la subestación San Agustín 230/69 kV con la subestación Tactic 230/69 kV, deberá estimarse la distancia y los parámetros eléctricos de la línea, tomando en cuenta que la capacidad de la misma no deberá ser inferior a la mínima de las capacidades de las líneas de transmisión de 230 kV existentes en el sistema Troncal Norte. Los cálculos deberán justificarse mediante una memoria de cálculo que deberá presentarse, con las justificaciones y comentarios correspondientes, en el apéndice del informe técnico del proyecto final de laboratorio.

5.7.1.6. Línea de transmisión nueva Renace – Guatemala Norte 230 kV

Esta línea interconecta la subestación Renace 230/69 kV con la subestación Guatemala Norte 230/69 kV, deberá estimarse la distancia y los parámetros eléctricos de la línea, tomando en cuenta que la capacidad de la misma no deberá ser inferior a la mínima de las capacidades de las líneas de transmisión de 230 kV existentes en el sistema Troncal Norte. Los cálculos deberán justificarse mediante una memoria de cálculo que deberá presentarse, con las justificaciones y comentarios correspondientes, en el apéndice del informe técnico del proyecto final de laboratorio.

5.8. Diseño del Proyecto Final de Laboratorio: Análisis del Proyecto de Ampliación del Sistema de Transporte del Sistema Troncal Norte (PAST 16-20)

A continuación, se presenta el diseño del Proyecto Final de Laboratorio: Análisis del Proyecto de Ampliación del Sistema de Transporte del Sistema Troncal Norte (PAST 16-20).

5.8.1. Estudios eléctricos

Se desea analizar el comportamiento del sistema Troncal Norte, incluyendo el PAST 16-20, para el año estacional 20, año en el cual se prevé que las obras de transmisión del referido plan entren en operación, por lo cual se solicita al estudiante que realice el estudio de flujo de potencia y de fallas de cortocircuito correspondiente.

5.8.1.1. Consideraciones técnicas

Los estudios deberán realizarse conforme a lo establecido en los apartados de consideraciones técnicas de los capítulos 3 y 4 del presente trabajo de graduación, con excepción de los escenarios que corresponderán a los escenarios del año estacional 20.

El despacho de generación, a emplearse en los estudios, será indicado por el profesor de laboratorio.

Para los estudios deberán utilizarse los valores de demanda que indique el profesor del laboratorio, en caso contrario, para el período de los años del 16 al 20, se asumirá una tasa anual de crecimiento de la demanda de 2 %.

5.8.1.2. Simulación y resultados

Deberán simularse cada uno de los escenarios y obtener en todos los casos los resultados que se indican en los apartados de resultados de los capítulos 3 y 4 del presente trabajo de graduación.

5.8.1.3. Análisis de los resultados

El estudiante deberá realizar el análisis de los resultados y explicar el comportamiento del sistema para el período de estudio, este análisis deberá determinar lo establecido en los apartados de análisis de resultados de los capítulos 3 y 4 del presente trabajo de graduación.

5.8.2. Informe técnico

El estudiante deberá presentar, en medio físico y digital, un informe técnico de los estudios eléctricos realizados, que contenga como mínimo lo establecido en el numeral 3.8.3 del presente trabajo de graduación.

CONCLUSIONES

1. En el desarrollo del presente trabajo de graduación se logró diseñar el Manual de Laboratorio del Curso de Análisis de Sistemas de Potencia 1, con apego a la normativa legal vigente de Guatemala.
2. El Manual desarrolla en sus diferentes capítulos una guía técnica que introduce al estudiante en el uso de programas de simulación, dentro del marco establecido en la normativa legal vigente de Guatemala. Se enfatiza que la efectividad de los resultados de una simulación dependen de la calidad de datos empleados y las consideraciones técnicas adoptadas para los escenarios. Los software de simulación resultan herramientas efectivas para ejemplificar y reforzar los temas teóricos del Curso de Análisis de Sistemas de Potencia 1.
3. Se diseñaron nuevas prácticas de simulación de flujo de carga, fallas de cortocircuito y estabilidad transitoria, que permiten al estudiante experimentar el desarrollo de los estudios reales que se realizan en el subsector eléctrico de Guatemala.
4. Se estructuró un nuevo proyecto final de laboratorio, que permite al estudiante integrar los conocimientos adquiridos durante el Curso de Análisis de Alistemos de Potencia 1 y su laboratorio, haciendo énfasis en que el análisis de sistemas de potencia resulta una disciplina de vital importancia en la planificación energética de un país.

RECOMENDACIONES

1. Adoptar el manual de laboratorio diseñado en el presente trabajo de graduación como el manual oficial del Laboratorio del Curso Análisis de Sistemas de Potencia 1.
2. Procurar que la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala adquiriera una licencia universitaria de algún programa de simulación de sistema de potencia, que pueda ser usado gratuitamente por los estudiantes para el desarrollo del Laboratorio del Curso Análisis de Sistemas de Potencia 1.
3. Mientras no se obtenga una licencia universitaria, emplear para el desarrollo de las prácticas de laboratorio el software PowerWorld Simulator Educational- Evaluation, en su versión más reciente, por sus ventajas didácticas, dentro de las cuales destaca, un entorno gráfico amigable e intuitivo, una licencia gratuita por tiempo ilimitado, que permite guardar y editar escenarios de simulación, entre otras, que lo hacen ideal para introducir a estudiantes en el campo de la simulación de sistemas de potencia.
4. Aprovechar el software PowerWorld Simulator Educational- Evaluation por sus ventajas didácticas, para la implementación de laboratorios de los cursos de Sistemas de Generación y Protección de Sistemas de Potencia.

BIBLIOGRAFÍA

1. Administrador del Mercado Mayorista. *Informe estadístico 2015*. [en línea]. <http://www.amm.org.gt/portal/?page_id=145>. [Consulta: 31 de marzo de 2016].
2. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Mercado de energía eléctrica: Guía del inversionista*. [en línea]. <<http://www.cnee.gob.gt/pdf/informacion/GuiaDelInversionista2015.pdf>>. [Consulta: 31 de marzo de 2016].
3. _____. *Normas de Estudios de Acceso al Sistema de Transporte, Resolución CNEE-28-98*. Guatemala: CNEE, 1998. 142 p.
4. _____. *Normas técnicas*. [en línea]. <http://www.cnee.gob.gt/wp/?page_id=555>. [Consulta: 31 de marzo de 2016].
5. _____. *Normas Técnicas de Acceso y Uso de la Capacidad de Transporte, Resolución CNEE-33-98*. Guatemala: CNEE, 1998. 147 p.
6. _____. *Normas Técnicas de Calidad del Servicio de Transporte y Sanciones, Resolución CNEE-50-99*. Guatemala: CNEE, 1999. 175 p.

7. _____. *Normas Técnicas de Diseño y Operación de las Instalaciones de Distribución, Resolución CNEE-47-99.* Guatemala: CNEE, 1999. 157 p.
8. _____. *Normas Técnicas de Diseño y Operación del Servicio de Transporte de Energía Eléctrica, Resolución CNEE-49-99.* Guatemala: CNEE, 1999. 162p.
9. _____. *Normas Técnicas del Servicio de Distribución, Resolución CNEE-09-99.* Guatemala: CNEE, 1999. 139 p.
10. _____. *Normas Técnicas para la Expansión del Sistema de Transmisión, Resolución CNEE-28-2009.* Guatemala: CNEE, 2009. 124 p.
11. ETAP. *ETAP Electrical Power System Software Demo.* [en línea], <<http://etap.com/demo-section/demo-download.htm?lang=en-US>>. [Consulta: 31 de marzo de 2016].
12. FRAILE MORA, Jesús. *Máquinas eléctricas.* 5a ed. Madrid, España: McGraw-Hill/Interamericana de España, 2003. 758 p. ISBN.84-481-3913-5.
13. GRAINGER, John J.; STEVENSON, William D. *Análisis de sistemas de potencia.* México: McGraw-Hill, 1996. 189 p.
14. Guatemala. *Ley General de Electricidad. Decreto No. 93-96,* 1996.

15. _____. *Reglamento de la Ley General de Electricidad*. Acuerdo Gubernativo Número 256-97, 1997.
16. _____. *Reglamento del Administrador del Mercado Mayorista*. Acuerdo Gubernativo Número 299-98, 1998.
17. LEDESMA, Pablo. *Estabilidad transitoria*. [en línea]. <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-electrica/operacion-y-control-de-sistemaselectricos/II_OCSE_ES_T.pdf>. [Consulta: 31 de marzo de 2016].
18. NEPLAN. *Cortocircuito*. [en línea]. <<http://www.utp.edu.co/~hsi/analisis/Ch-09CortoCircuito.pdf>>. [Consulta: 31 de marzo de 2016].
19. _____. *Demo request*. [en línea]. <<http://www.neplan.ch/en-demo-request/>>. [Consulta: 31 de marzo de 2016].
20. _____. *Flujo de carga*. [en línea]. <<http://www.utp.edu.co/~hsi/análisis/Ch-05FlujoDeCarga.pdf>>. [Consulta: 31 de marzo de 2016].
21. _____. *Paquetes*. [en línea]. <http://support.neplan.ch/html/es/es_electricity_packages_default.htm>. [Consulta: 31 de marzo de 2016].
22. OVERBYE, Tom. *ECE 576 Power System Dynamics and Stability - Synchronous Machines Models*. [en línea]. <<http://slideplayer.com/slide/8760822/>>. [Consulta: 31 de marzo de 2016].

23. _____. *Transient Stability*. [en línea]. <<http://slideplayer.com/slide/5975469/>>. [Consulta: 31 de marzo de 2016].
24. Powerword Corporation, *Demo software*. [en línea]. <<http://www.powerworld.com/download-purchase/demo-software>>. [Consulta: 31 de marzo de 2016].
25. _____. *Manual*. [en línea]. <<http://www.powerworld.com/WebHelp>>. [Consulta: 31 de marzo de 2016].
26. RAMÍREZ, Carlos Felipe. *Subestaciones de alta y extra alta tensión*. 2a ed. Colombia: Impresiones Gráficas, 1991. 800 p.
27. Siemens. *PSS®E for Education*. [en línea]. <<http://goo.gl/PauJ0l>>. [Consulta: 31 de marzo de 2016].
28. STEVENSON, William. *Análisis de sistemas eléctricos de potencia*. 2a ed. México: McGraw-Hill de México, 1985. 382 p. ISBN 0-968-6046-98-4.
29. Unidad de información Pública de la Comisión Nacional de Energía Eléctrica. *Resolución UIP-RFUIP2015-33*. Guatemala, CNEE, 2015.

APÉNDICE

Apéndice 1. **Especificaciones del informe técnico**

Se deberán presentar, en medio físico y digital, informes técnicos, que contenga como mínimo y sin ser limitativo los siguientes elementos:

Caratula, deberá incluir lo siguiente:

- La información de la universidad, facultad, escuela y carrera a la que pertenece el estudiante.
- Nombre del laboratorio.
- Nombre del profesor.
- Nombre del estudio.
- Nombre y cané del estudiante.
- Lugar y fecha.

Resumen, deberá contener un resumen ejecutivo del informe.

Índice, esquematizado de forma apropiada.

Continuación del apéndice 1.

Consideraciones técnicas del estudio, deberá contener Las consideraciones técnicas tomadas para realizar el estudio de flujo de carga, incluyendo las bases datos utilizada.

Análisis de los resultados, debe presentarse para cada escenario de forma clara y ordena e incluir los resultados y su respectivo análisis.

El análisis deberá incluir una comparación de los resultados obtenidos en cada escenario, que permita comprender con facilidad el comportamiento del sistema para el período estudio analizado.

Es muy importante que el análisis incluya tablas, gráficas e imágenes que faciliten la comprensión de la información presentada.

Conclusiones, del análisis de los resultados del estudio.

Opinión técnica, con base en el análisis y las conclusiones el estudiante deberá emitir su opinión y recomendaciones técnicas que considere pertinentes.

Anexos, el informe técnico deberá adjuntarse las bases de datos de todos los escenarios, en medio digital (archivos .pwb y .pwd).

Fuente: elaboración propia.