

GUÍA DE TRABAJOS INDEPENDIENTES PARA SISTEMAS ELECTRICOS DE  
POTENCIA

LUIS AGUAS ROMERO  
RICHARD JIMÉNEZ CHINCHILLA

UNIVERSIDAD DE LA COSTA CUC  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERIA ELÉCTRICA  
BARRANQUILLA  
2013

GUÍA DE TRABAJOS INDEPENDIENTES PARA SISTEMAS ELECTRICOS DE  
POTENCIA

LUIS AGUAS ROMERO  
RICHARD JIMENEZ CHINCHILLA

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero Eléctrico

JORGE IVAN SILVA  
Asesor

UNIVERSIDAD DE LA COSTA CUC  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERIA ELÉCTRICA  
BARRANQUILLA  
2013

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Barranquilla 9 de Diciembre de 2013

***“Recibid mi enseñanza, y no plata; y ciencia antes que el oro escogido.  
Porque mejor es la sabiduría que las piedras preciosas; y todo cuanto se  
puede desear, no es de compararse con ella.” (PROVERBIOS 8 (10-11))***

## **DEDICATORIA**

A Dios quien se merece toda la gloria por el apoyo, la fuerza y por llenarnos de bendiciones cada día para salir adelante y prosperar nuestros caminos, por él es que estamos en esta etapa de nuestras vidas afrontando todos los obstáculos presentados para llegar al final y recoger los frutos sembrados.

A nuestros padres por ese inmenso apoyo y constante esfuerzo que hicieron durante todo este proceso, por estar en los buenos y malos momentos de nuestras vidas y por ayudarnos a formar como profesionales excelentes.

A nuestros docentes que con esfuerzo e integridad desarrollaron al máximo nuestras capacidades y nos formaron para afrontar problemas y situaciones en nuestra futura vida profesional, que con sus experiencias lograron abrirnos a un mundo competitivo entregando todo de sí para lograr una amplia visión de la carrera.

A nuestros familiares y amigos que siempre estuvieron ahí dando lo mejor de ellos, confiando y creyendo en nuestras destrezas y habilidades; que junto a nosotros vivieron experiencias de malos y buenos momentos formándose como un gran apoyo a esta nuestra etapa de pregrado.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los agradecimientos de esta obra van dirigidos a todos aquellos que se mostraron en nuestros procesos, en nuestros momentos sin importar si eran malos o buenos, reconocemos que la culminación de esto va a:

A Dios por permitirnos hacer parte de este gran mundo, por hacernos personas de bien con motivación a salir adelante y darnos el don de la vida. Le agradecemos por su infinito amor y tolerancia, por regalarnos esos valores forjados junto a nuestra familias.

A nuestros padres y familiares que formaron personas con ética y valores, hombres dedicados y entregados, correctos en lo que hacemos. A ellos agradecemos por su confianza y su esmero creyendo en el potencial de sus hijos.

A nuestros docentes y verdaderos amigos, que siempre se preocuparon por mostrarnos como hacer las cosas de manera correcta y nos enfocaron a un desarrollo sostenible mejorando día a día nuestras capacidades e intelecto para lograr metas inalcanzables y objetivos propuestos. Les agradecemos por su sinceridad e infinita paciencia en este proceso de formación.

Agradecemos a nuestro director de tesis Jorge Iván Silva por su ayuda integral en todo el proceso de nuestra obra y por el apoyo aportado para la culminación de este proyecto.

## RESUMEN

El proyecto de grado, aglomera y clasifica un método concreto para el desarrollo educativo de los estudiante que cursen la asignatura de sistemas de potencia de la universidad de la costa, desde la parte más compleja de la asignatura hasta los conceptos más avanzados mediante un proceso que permite el aumento de potencial de los estudiante por medio de un ciclo actividades que con el pasar del curso va aumentando su exigencia de acuerdo al conocimiento que va adquiriendo el aprendiz basándose mucho en los aplicativos profesionales y en un software (Neplan) de apoyo que permite una mayor comprensión de los conceptos teóricos que conlleva a un enfoque más amplio de lo esperado al momento del ingreso al campo laboral.

De acuerdo a este orden de ideas el presente documento se estructura bajo el siguiente orden:

Recopilación de Información

Módulos – Guías de trabajo independiente con metodologías prácticas relacionadas con la asignatura sistemas de potencia.

Desarrollo local de Actividades de implementación para el estudiante, con el fin de que puedan abordar con ejemplos y ejercicios los métodos propuestos con ayuda de los docentes encargados de dictar la asignatura.

**PALABRAS CLAVES:** Sistema de potencia, Software, Neplan.

## **ABSTRACT**

The graduation project , agglomerated and classifies a particular method for the educational development of students who study the subject of power systems from the Universidad de la Costa, from the most complex part of the subject to the most advanced concepts through a process that allows for increased student potential through a cycle of activities with the passing of the course will increase their demand according to the knowledge that the learner acquires much based on professional applications and software ( Neplan ) support that allows a greater understanding of the theoretical concepts that leads to a broader approach than expected at entry into the labor force.

According to this thinking the present document is structured in the following order:

Information Gathering

Modules - laboratory Guides with practical methodologies related to the matters which are focused.

Local Development Implementation activities for the student, so that they can deal with examples and exercises proposed methods with the help of the teachers of the subjects.

**KEYWORDS:** Power systems, Software, Neplan.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>16</b>
<b>1 ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO</b> .....	<b>17</b>
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	17
1.2 JUSTIFICACION .....	18
1.3 OBJETIVOS .....	19
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	19
1.4 ESTADO DEL ARTE.....	20
1.5 MARCO CONCEPTUAL .....	21
1.6 MARCO CONTEXTUAL.....	22
1.6.1 Descripción y ubicación .....	22
1.6.2 MISIÓN.....	23
1.6.3 VISIÓN .....	24
1.6.4 BREVE RESEÑA HISTÓRICA .....	25
1.6.5 Delimitación cronológica.....	26
1.6.6 Alcance.....	27
1.6.7 Delimitaciones .....	27
1.6.8 Entregables .....	27
<b>2 MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>28</b>
2.1 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE POTENCIA .....	29
2.1.1 Generadores.....	29
2.1.2 Transformador eléctrico.....	33
2.1.3 Líneas de transporte.....	40
2.1.4 Tipos de carga.....	47
2.1.5 Compensadores y reactores.....	47
2.1.6 Barrajes y nodos de una subestación.....	48
2.1.7 Redes .....	48
2.2 NÚMEROS COMPLEJOS .....	50
2.3 FLUJO DE CARGA.....	52
2.3.1 Procedimiento para desarrollar flujo de carga .....	52
2.3.2 Newton-Raphson.....	53

2.3.3 Simulación con NEPLAN .....	55
<b>2.4 CORTOCIRCUITO .....</b>	<b>56</b>
2.4.1 Diagramas de secuencia .....	56
2.4.2 Cortocircuito $3\alpha$ .....	58
2.4.3 Cortocircuito $2\alpha - T$ .....	58
2.4.4 Cortocircuito $2\alpha$ .....	58
2.4.5 Cortocircuito $1\alpha$ .....	59
<b>2.5 SISTEMAS POR UNIDAD .....</b>	<b>59</b>
<b>2.6 REGULACIÓN DE TENSIÓN .....</b>	<b>60</b>
<b>3 DISEÑO METODOLÓGICO .....</b>	<b>62</b>
<b>3.1 TIPO DE INVESTIGACION .....</b>	<b>62</b>
<b>3.2 POBLACIÓN UNIVERSO .....</b>	<b>62</b>
<b>3.3 MUESTRA .....</b>	<b>62</b>
<b>3.4 ETAPAS DEL PROYECTO .....</b>	<b>62</b>
3.4.1 Etapa I: Recopilación de definiciones y conceptos que se tienen en cuenta en un sistema de potencia .....	63
3.4.2 Etapa II: Diseñar un sistema de potencia en la costa .....	63
3.4.3 Etapa III: Desarrollar guía de trabajo independiente para uso de NEPLAN en un Sistema de Potencia .....	63
<b>4 CONCLUSIONES .....</b>	<b>66</b>
<b>5 RECOMENDACIONES .....</b>	<b>67</b>
<b>6 GLOSARIO .....</b>	<b>68</b>
<b>7 BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>76</b>

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Porcentaje de conductividad, resistividad y constante de temperatura de conductores .....	44
--	----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Entrada principal de la Universidad de la Costa .....	22
Figura 2. Símbolos de un generador eléctrico .....	30
Figura 3. Central hidroeléctrica .....	30
Figura 4. Central termoeléctrica.....	31
Figura 5. Símbolos de un transformador.....	34
Figura 6. Circuito equivalente del autotransformador .....	35
Figura 7. Conexiones de transformadores.....	37
Figura 8. Curva de histéresis .....	38
Figura 9. Circuito equivalente del transformador trifásico .....	39
Figura 10. Símbolo de línea de transmisión.....	40
Figura 11. Modelo línea corta .....	40
Figura 12. Modelo línea media.....	41
Figura 13. Modelo línea larga .....	42
Figura 14. Equivalente de Thévenin .....	48
Figura 15. Plano complejo .....	51
Figura 16. Carpeta de acceso a ejemplos en NEPLAN .....	55
Figura 17. Diagrama de secuencia positiva .....	57
Figura 18. Diagrama de secuencia negativa.....	57
Figura 19. Diagrama de secuencia cero .....	57
Figura 20. Falla eléctrica.....	58
Figura 21. Ejemplo de valores en p.u. ....	60
Figura 22. Parámetros eléctricos de una línea de distribución .....	61

## LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1 .....	32
Ecuación 2 .....	32
Ecuación 3 .....	32
Ecuación 4 .....	33
Ecuación 5 .....	38
Ecuación 6 .....	40
Ecuación 7 .....	41
Ecuación 8 .....	42
Ecuación 9 .....	42
Ecuación 10 .....	42
Ecuación 11 .....	43
Ecuación 12 .....	43
Ecuación 13 .....	45
Ecuación 14 .....	45
Ecuación 15 .....	45
Ecuación 16 .....	46
Ecuación 17 .....	50
Ecuación 18 .....	51
Ecuación 19 .....	51
Ecuación 20 .....	51
Ecuación 21 .....	51
Ecuación 22 .....	52
Ecuación 23 .....	53
Ecuación 24 .....	53
Ecuación 25 .....	53
Ecuación 26 .....	54
Ecuación 27 .....	54
Ecuación 28 .....	54
Ecuación 29 .....	54

Ecuación 30 .....54  
Ecuación 31 .....54  
Ecuación 32 .....54  
Ecuación 33 .....56  
Ecuación 34 .....60  
Ecuación 35 .....60  
Ecuación 36 .....61  
Ecuación 37 .....61

## LISTA DE ANEXOS

Anexo 1. Programa: sistemas de potencia .....	77
Anexo 2. Introducción .....	79
Anexo 3. Competencias .....	80
Anexo 4. REVISIÓN DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS Y OPERACIONES FASORIALES. ....	81
Anexo 5. INSTRUCTIVO DE USO DE NEPLAN PARA DISEÑO DE SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA. ....	87
Anexo 6. CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE TENSIÓN ( $\Delta V$ ) Y PÉRDIDAS DE POTENCIA ( $\Delta S$ ) DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA. ....	102
Anexo 7. CÁLCULOS DE PORCENTAJE REGULACIÓN DE TENSIÓN Y POTENCIA APOYADO EN EL INSTRUCTIVO ANTERIOR.....	107
Anexo 8. PARÁMETROS DE LÍNEAS DE TRASMISIÓN.OBJETIVOS.....	114
Anexo 9. INSTRUCTIVO DE CALCULOS PARA SISTEMAS POR UNIDADOBJETIVO .....	121
Anexo 10. FLUJO DE CARGA EN NEPLAN.....	127
Anexo 11. DISEÑO DE UN SISTEMA INTERCONECTADO REGIONAL. ....	132
Anexo 12. ANÁLISIS DE FALLAS EN PUNTOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA. ....	138
Anexo 13. CÁLCULO DE CORRIENTE DE FALLA EN UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA. ....	142
Anexo 14. SIMULACION DE CORTOS CIRCUITOS NEPLAN. ....	148
Anexo 15 Carta de entrega y autorización del autor para la consulta, reproducción parcial o total, y publicación electrónica del texto completo de tesis y trabajos de grado .....	154
Anexo 16. Formulario de la descripción de la tesis de grado.....	158
Anexo 17. Material anexo .....	159

## INTRODUCCIÓN

El estudio de los sistemas de potencia es una de las disciplinas más interesantes y complejas de la ingeniería. Involucra desde el diseño de las redes, hasta sus protecciones y sistemas de control [1].

La Universidad de la Costa CUC tiene como misión en el programa de Ingeniería Eléctrica, la formación de profesionales que en esta rama de la ingeniería cuenten con la capacidad analítica, habilidad y adaptabilidad al desarrollo tecnológico, entre otros, con el fin de que estos logren un manejo productivo en las oportunidades de mejoramiento profesional que se le presenten [2].

Dentro del plan de estudios académicos definido por la Universidad de la Costa se encuentra la asignatura de sistemas de potencia y en vista de que la institución busca, a través de cada uno de sus programas académicos, un modelo flexible que permita responder a las necesidades existentes en la región y el país [3], se han desarrollado herramientas informáticas que permiten realizar estudios detallados de los sistemas eléctricos de potencia, con base en varias suposiciones: condiciones normales y anormales de operación, cargas punta y fuera de punta [4], entre otros casos.

Es así que con la aplicación de las doce guías de trabajos complementarios a la asignatura sistemas de potencia, enlazadas con la aplicación del software NEPLAN, se le permitirá a el estudiante que al finalizar el curso de la asignatura obtenga la capacidad analítica y adaptabilidad al desarrollo tecnológico que el mercado requiere en cuanto a el campo de los sistemas de potencia y que a la vez sean partícipes activos en los desarrollos tecnológicos de su contexto nacional y regional.

# 1 ASPECTOS GENERALES DEL PROYECTO

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los sistemas de potencia son una base fundamental de aprendizaje y formación de la ingeniería eléctrica, basándose en el camino hacia la obtención de prácticas de calidad y excelencia. Se encuentra profundamente sujeto a la consolidación de una cultura para el manejo adecuado y eficiente de los recursos formativos tanto en clases como de manera independiente. Es así, que por tal motivo, la Universidad de la Costa (CUC) está mejorando sus recursos estructurales y de talento humano para lograr consecución de acreditación y mejorar como Institución de educación superior.

Actualmente el estudiante de ingeniería eléctrica es deficiente en el manejo de software que proporciona comprensión de cálculos de las magnitudes de corriente que circulan por los diferentes elementos que componen un sistema de potencia y de las tensiones que se registran en cada uno de los nodos del sistema al ocurrir una falla o cortocircuito.

Es por eso que la mayoría de los estudiantes que salen a presentar prácticas industriales en empresas dedicadas a este campo presentan deficiencias teóricas y prácticas en sistemas de potencia. El problema se puede dimensionar en el poco tiempo de preparación y el no contar con las herramientas adecuadas para el estudio práctico de la teoría que ve en el día a día durante el semestre vigente de la asignatura. Debido a esto se ha desarrollado dicha investigación sobre la incidencia de los medios de aprendizaje en el dominio práctico de sistemas de potencia, con el objeto de facilitar una guía de trabajo independiente [5].

¿Existe una guía de trabajo independiente que propicie el dominio práctico de la asignatura de sistemas de potencia en los estudiantes de ingeniería eléctrica de la universidad de la costa (CUC)?, ¿Es necesario implementar un diseño de metodológico para una guía de trabajo independiente donde se desarrolle una serie ejercicios evaluando la comprensión y el desarrollo de la asignatura sistemas de potencia? ¿Por qué es necesario implementar esta guía en la asignatura de sistemas de potencia?

## 1.2 JUSTIFICACION

Debido a la búsqueda de la certificación y acreditación de la universidad de la costa CUC, y al poco tiempo que tiene la asignatura de haber sido incluida en el pensum como requisito, esta propuesta es generada gracias a la necesidad de no contar con una guía de trabajo independiente enfocada a sistemas de potencias permitiendo visualizar cada trabajo realizado en la parte teórica de la asignatura en curso, corroborando cada funcionamiento de los equipos que conforman un sistema de potencia al igual que el análisis detallado de todas las características eléctricas presente en cada ejercicio planteado.

Por tal motivo, con este proyecto se busca desarrollar el diseño metodológico de unas guías de trabajo independiente para la asignatura, de tal manera que les permita a los estudiantes de ingeniería eléctrica de la universidad de la costa (C.U.C) poner en práctica cada diseño o cálculo realizado para un sistema de potencia, visualizando las fallas situadas e indagando la mejor solución posible. De esta manera entrara el estudiante o profesional, con mayor confianza y conocimientos teórico - prácticos, al mundo laboral donde se generan demandas de profesionales con estas capacidades.

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

- Diseñar una metodología para los cálculos de flujo de carga y cortocircuito a través de unas guías de trabajo independiente de la asignatura sistemas de potencia.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Diseñar una guía de procedimiento de uso del software Neplan para el análisis del comportamiento del suministro del sistema eléctrico.
- Diseñar una guía de procedimiento para cálculos de flujos de carga con la ayuda de neplan.
- Diseñar una guía de procedimiento para cálculos de cortocircuito con la ayuda de neplan.

## 1.4 ESTADO DEL ARTE

Actualmente los sistemas de potencias cubren gran parte de los objetivos planteados por cada entidad o empresa dedicada al suministro de energía en cualquiera de sus etapas, generación, transmisión, distribución o comercialización.

El buen funcionamiento de un sistema de potencia depende de qué tan excelente fue planteado y de su análisis físico matemático durante el desarrollo mientras está en ejecución, para esto es necesario contar con el personal calificado y entrenado en el estudio de estos sistemas con bases fundamentales para la parte argumentativa de la puesta en marcha del suministro de energía [4].

Por lo mencionado con anterioridad, estas entidades establecen unos criterios o estándares conocidos como instructivos básicos para el diseño de sistemas de potencia usando la normativa eléctrica nacional colombiana incluyéndola en cada uno de los campos, por más pequeño que sea, definición de procedimientos que hay que tener en cuenta y analizar, para definir parámetros básicos que ayuden a obtener información suficiente para cálculos como pérdidas de potencia aparente, caídas de tensión a grandes distancias, fallas posibles en el sistema y diámetro de conductores que soporten las corrientes de corto circuito, cálculo de tensiones de paso y de contacto tolerables, esto con el objetivo de obtener unos cálculos pertinentes al desarrollo del sistema para un óptimo flujo de carga.

Adentrando en la formación académica actual de la universidad de la costa (CUC), se ha indagado un poco en las investigaciones realizadas, y se observa que hay una tendencia al suministro y aplicación de bases conceptuales a manera teórica en la asignatura de sistemas de potencia verificando cada temática vista [6].

## 1.5 MARCO CONCEPTUAL

Los conceptos básicos y avanzados a utilizar en este trabajo de grado son adquiridos a partir de la asignatura:

Sistemas de potencia

Además de ello, fue necesaria una amplia documentación en normativas nacionales e internacionales que auditan las instalaciones que comprenden un sistema de potencia. Entre estas leyes fueron citadas dos normativas colombianas NTC como las referencias [7] y [8], el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) [9], y una norma técnica de la empresa de distribución de energía de Quindío [10].

En las referencias se aprecia la investigación realizada con distintos textos, artículos [11] [12] y páginas web visitadas para recaudar la información necesaria para elaborar las guías de trabajo independientes.

## 1.6 MARCO CONTEXTUAL

### 1.6.1 Descripción y ubicación

La Universidad de la Costa es un establecimiento privado de educación superior, cuya personería jurídica fue otorgada el 23 de abril de 1971, mediante la Resolución No. 352 de la Gobernación del Atlántico, está ubicada en la Calle 58 No. 55-66.



*Figura 1. Entrada principal de la Universidad de la Costa*

Fuente [13]

## **1.6.2 MISIÓN**

La Universidad de la Costa, CUC, tiene como misión formar un ciudadano integral bajo el principio de la libertad de pensamiento y pluralismo ideológico, con un alto sentido de responsabilidad en la búsqueda permanente de la excelencia académica e investigativa, utilizando para lograrlo el desarrollo de la ciencia, la técnica, la tecnología y la cultura.

### **1.6.3 VISIÓN**

La Universidad de la Costa, tiene como visión ser reconocida por la sociedad como una institución de educación superior de alta calidad y accesible a todos aquellos que cumplan los requerimientos académicos.

#### **1.6.4 BREVE RESEÑA HISTÓRICA**

La UNIVERSIDAD DE LA COSTA –CUC, se creó el 16 de Noviembre de 1970, como una entidad sin ánimo de lucro, dedicada a la formación de profesionales en el área de la ciencia, la tecnología, las humanidades, el arte y la filosofía.

El 3 de enero de 1971, el nuevo centro inició labores en la carrera 42F No. 75B-169 de esta ciudad, ofreciendo los programas de Arquitectura, Administración, Derecho e Ingeniería Civil, con una matrícula de 154 estudiantes. El traslado a su sede actual, Calle 58 No. 55-66, se verificó en enero de 1974. Su personería jurídica fue otorgada el 23 de abril de 1971, mediante la Resolución No. 352 de la Gobernación del Atlántico.

Posteriormente, se iniciaron estudios en la Facultad de Ciencias de la Educación, en las especialidades de Psicopedagogía, Matemáticas, Lenguas Modernas y Educación Física, así como en Economía en Comercio Internacional.

En 1975 se crea el Departamento de Investigaciones Socioeconómicas (DIS) adscrito a la facultad de Economía, hecho que marcó el inicio del proceso investigativo en la CUC.

En la Década de los 90´ el ICFES autoriza el funcionamiento de los programas de ingeniería eléctrica, ingeniería electrónica, industrial, sanitaria y ambiental, análisis y programación de computadores, tecnología en informática y telecomunicaciones, luego el programa de psicología.

A mediados de 1994 se realizó un diagnóstico con el fin de determinar la eficacia y la eficiencia que tenía la gestión investigativa en la institución, a raíz de las inquietudes generadas por la aprobación de la Ley 30/92. El Consejo Directivo determina la implementación y puesta en marcha del Centro de Investigaciones y Desarrollo -CID- que se pone en marcha en 1996, ente interdisciplinario, al cual se adscriben los investigadores pertenecientes a los anteriores centros de las facultades.

Los programas de Postgrado se les dan inició el 16 de marzo de 1987 con la Especialización en Finanzas y Sistemas, autorizado mediante el Acuerdo 203 del 30 de octubre de 1986, emanado de la Junta Directiva del ICFES.

Luego, se decide a mediados del año 2000 crear la División de Consultoría y de prestación de servicios adscrito al -CID-, teniendo en cuenta su entorno y las

fortalezas que la institución posee o genere durante los próximos años, con el propósito de que la institución mantenga su función de cambio social, económico y ambiental de la Región Caribe.

#### **1.6.5 Delimitación cronológica**

El proyecto de grado tiene como plan de ejecución realizarse dentro del periodo que va desde el mes de junio hasta inicios del mes de diciembre de 2013, tiempo que se distribuye trabajando de forma grupal todos los domingos de 9:00 AM a 3:30 PM y de forma independiente según lo requieran las actividades en las horas de la noche entre semana.

### **1.6.6 Alcance**

- Se tendrá guías de trabajo independiente que servirán a los docentes para la formación de la temática de Sistemas de Potencia.
- Cada módulo va acorde a las temáticas planteadas y sujetas por el plan de estudio preparado por el docente de la asignatura sistemas de potencia.
- Se entregará una instalación de un sistema de potencia de manera didáctica para la comprobación de parámetros y funcionamiento.
- Se tendrá muy en cuenta la utilización de las normas y estándares que existen para estos sistemas.

### **1.6.7 Delimitaciones**

- El modelo que se dejará en la institución, será un SP a nivel regional, este módulo se aplicaría en la materia de Sistemas de potencia.
- Se entregarán tres paquetes de cuatro módulos, correspondientes a las temáticas preparadas por el docente.

### **1.6.8 Entregables**

- Metodología para uso del software Neplan en Sistemas de Potencia, de manera didáctica, para su análisis, estudio y comprobación de la parte teórica.
- Guías de trabajo acorde a la asignatura.
- Documento o evidencia de las investigaciones realizadas.

## 2 MARCO TEÓRICO

El constante desarrollo tecnológico de las aplicaciones virtuales para maniobrar simulaciones de sistemas reales permite el avance científico y anticipado de las ramas de la educación. En la Ingeniería Eléctrica se aprecia un número considerable de software dedicados de manera especializada a la investigación e implementación de diversos escenarios. Sin embargo es pertinente que los conceptos fundamentales sean conocidos ampliamente para abordar problemáticas adecuadamente.

En materia de los mercados energéticos se evalúan aspectos teóricos que serán descritos en este capítulo. La empresa de energía a nivel nacional e internacional ha dividido el comercio de energía en las fases de generación, transmisión y distribución, con el propósito de permitir mayores activos en el proceso de comercialización. Cada sector necesita variables específicas para operar correctamente determinando un tipo de red en particular (el tipo de red se describe a partir de su nivel de tensión).

A continuación se presenta la clasificación estandarizada por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas:

- Extra alta tensión (EAT): Corresponde a tensiones superiores a 230 kV.
- Alta tensión (AT): Tensiones mayores o iguales a 57,5 kV y menores o iguales a 230 kV.
- Media tensión (MT): Los de tensión nominal superior a 1000 V e inferior a 57,5 kV.
- Baja tensión (BT): Los de tensión nominal mayor o igual a 25 V y menor o igual a 1000 V.
- Muy baja tensión (MBT): Tensiones menores de 25 V [9].

Los sistemas de potencia permiten tener la posibilidad de transportar la energía eléctrica generada en una central de generación hasta el usuario final. Tal proceso requiere de ciertos elementos que hacen posible el suministro de energía eléctrica.

Los elementos fundamentales de un sistema de potencia serán descritos a continuación.

## 2.1 ELEMENTOS DEL SISTEMA DE POTENCIA

### 2.1.1 Generadores

Los generadores eléctricos son elementos necesarios para la obtención de recursos energéticos. Un generador es una máquina implementada para transformar energía mecánica en energía eléctrica de corriente alterna [14].

El generador cuenta con dos partes estructurales que permiten la inducción y generación de energía:

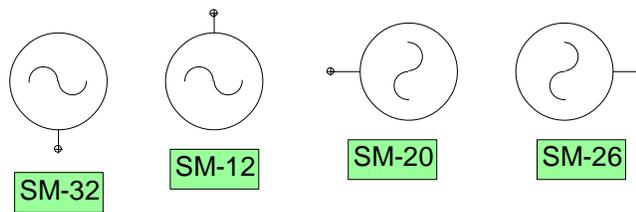
Por un lado se encuentra el rotor, que se compone básicamente de un núcleo ferromagnético y un devanado ubicado de tal manera que pueda inducir campos electromagnéticos capaces de generar una corriente eléctrica. Dicho devanado se le conoce comúnmente como “Devanado del rotor” o “Devanado de campo”.

Por otro lado se cuenta con un estator o armadura que se compone por un material ferromagnético y un devanado ubicado por capas en las ranuras existentes en la armadura. Esto se convierte en otro electroimán. A dicho devanado se le conoce como “Devanado estatórico” o “Devanado de armadura”.

Para lograr generar corriente eléctrica alterna, se aplica una corriente directa en el devanado del rotor para producir un campo magnético (esto suele llevarse a cabo para excitar a la máquina). Luego de esto el rotor gira con la ayuda de un motor externo, generalmente es una turbina impulsada a su vez por algún método de generación de energía eléctrica. Este campo rotacional electromagnético induce un grupo trifásico de corrientes en el devanado del estator.

La corriente inducida en el estator se encuentra con una diferencia de potencial en media tensión (para el caso de generadores en centrales de generación) que es utilizada para iniciar el proceso de transmisión de la energía [14].

Como todo elemento de una red eléctrica, posee un símbolo para representar su función. En un software de simulación tal como NEPLAN se pueden obtener diferentes símbolos para un generador. En la figura 2 se ilustran los distintos símbolos para representar un generador.



*Figura 2. Símbolos de un generador eléctrico*

Los generadores pueden clasificarse en:

### **2.1.1.1 Generadores hidráulicos**

Los generadores hidráulicos son máquinas eléctricas especialmente diseñadas para generar energía eléctrica a partir de la energía cinética o potencial de un caudal o estanque de agua. Comúnmente se aprecian centrales de generación hidráulica aprovechando un gran volumen de agua estancado por la acción de un muro de concreto. Esto permite una altura considerable que otorgará una energía potencial suficiente para crear un flujo de agua por un ducto que se encuentra especialmente ubicado en el muro de concreto.

Tras descender, el agua obtendrá energía cinética debido a la velocidad de su movimiento. Dicha energía es aprovechada por las aspas de una turbina hidráulica, que a su vez transportará energía cinética de manera circular al generador hidráulico.



*Figura 3. Central hidroeléctrica*

Este proceso permite por lo general a las grandes empresas obtener potencias en el orden de los MW (megavatios). En la figura 3 se observa una central de generación hidráulica [15] [16].

### 2.1.1.2 Generadores térmicos

Los generadores térmicos utilizan la energía liberada en forma de calor por la combustión de materiales fósiles, tales como el petróleo, carbón o gas natural. Este calor es utilizado al circular con alta presión desde la caldera de combustión hacia un ducto conectado a la turbina termoeléctrica.

Las centrales termoeléctricas poseen dos posibles formas de generar energía. La primera es con un ciclo sencillo, es decir, únicamente se aprovecha la energía en forma de calor mientras el medio seleccionado para transportar esta energía (generalmente gas) hacia las aspas de la turbina. La segunda, de ciclo combinado también utiliza el gas de alta presión, sin embargo, se diferencia de la anterior porque aprovecha los gases de escape, transportándolos a un intercambiador de calor para calentar un fluido que a su vez llegará a las aspas de una turbina menor. Finalmente, el movimiento de las turbinas con sus respectivos engranajes permitirá al generador un movimiento circular para obtener energía eléctrica [17] [18].

Este tipo de centrales ocasiona un alto impacto al medio ambiente, debido a la emisión de gases de efecto invernadero, como lo es el dióxido de carbono En la figura 4 se presenta una imagen de una central termoeléctrica.



*Figura 4. Central termoeléctrica*

### 2.1.1.3 Parámetros característicos de generadores

Las máquinas eléctricas poseen especificaciones que permiten determinar si es propicia para un proyecto o no. Estas características o parámetros generalmente son propios de una máquina, debido a que las centrales de generación no mantienen parámetros iguales en todas sus aplicaciones [14] [19].

Las características propias de los generadores son:

- Potencia nominal: es la capacidad instalada en VA (Voltamperios) que podrá generar la máquina. Esta se obtiene a partir de la demanda
- Voltaje interno inducido: generalmente este valor se encuentra en el orden de los kV (kilovoltios) ubicados en la clasificación de media tensión. Sin embargo se debe mencionar que la tensión dependerá de un voltaje interno inducido en la máquina. Este voltaje puede representarse a través de la siguiente expresión:

$$E_a = \sqrt{2}\pi N\phi f \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

N: número de espiras de las bobinas.

$\phi$ : Flujo magnético interno

- Número de polos: este parámetro es determinado de acuerdo a la capacidad requerida del generador, al igual que la tensión.
- Velocidad de rotación: la frecuencia eléctrica en el estator dependerá de la velocidad mecánica del campo magnético en revoluciones por minuto del rotor. Dicha frecuencia se expresa con la siguiente expresión:

$$f = \frac{nP}{120} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

n: Velocidad mecánica del campo magnético

P: número de polos del generador

- Tipo de conexión: los tipos de conexión disponibles son  $\Delta$  e Y. En el diseño es necesario determinar si se requiere aterrizar o no el devanado del generador.
- Voltaje de saturación: es el voltaje utilizado para superar la reactancia inductiva de los devanados estáticos y se puede hallar con la siguiente expresión:

$$E_{sat} = -jX I_a \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

–jX: Reactancia inductiva de los devanados del estator

$I_a$ : Corriente que circula por los devanados del estator

- Tensión por fase: la tensión por fase será determinada mediante la siguiente expresión:

$$V\phi = E_a - jXI_a \text{ Ecuación 4}$$

### 2.1.2 Transformador eléctrico

El transformador eléctrico es una máquina eléctrica estática que modifica o regula el nivel de tensión asociada al punto de la red en que se encuentre instalado el transformador.

Su funcionamiento sólo es posible si se trabaja con corriente alterna, pues para generar una corriente inducida es necesario someter un conductor a variación de flujo. Para lograr esto, se pueden plantear dos soluciones: el conductor debe moverse dentro del campo electromagnético como en un generador o que el campo sea variable, es decir, alterno.

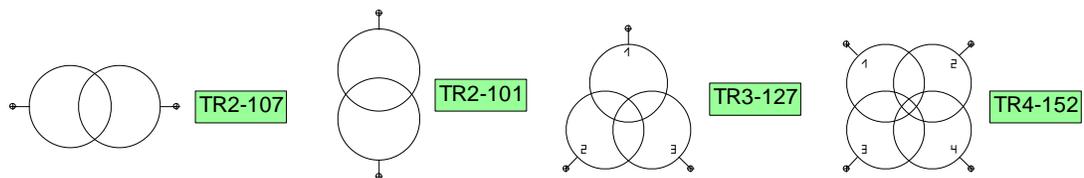
El transformador contiene un núcleo ferromagnético y un grupo de devanados. Puede ser un único devanado, dos o incluso tres. Para los casos anteriores se aplican en autotransformadores, transformadores monofásicos, y transformadores trifásicos, respectivamente.

Los devanados del transformador suelen enumerarse como devanado primario y devanado secundario. El devanado primario recibe la corriente alterna suministrada por la red, ésta a su vez es conducida por las espiras del devanado induciendo un campo electromagnético en el núcleo del transformador, y finalmente, dicho campo induce el devanado secundario que suministra la corriente alterna resultante de la inducción provocada.

En un sistema de potencia se implementan los transformadores de potencia (Elevadores, reductores y reguladores). Estos se encuentran ubicados en subestaciones intermedias de la red. Una vez la energía es transformada de mecánica a eléctrica, se transporta hacia una primera subestación elevadora para transmitirla a tensiones altas con el objetivo de disminuir pérdidas en la red. En el espacio de la red se ubican otras subestaciones con sus respectivos transformadores que reducen el nivel de tensión para distribuir la energía a

localidades urbanas y rurales. Finalmente se ubican transformadores en las estructuras de soporte para suministrar energía en baja tensión al usuario final.

Al igual que el generador, el transformador también posee una simbología para representarlo en software de simulación. En la figura 3 se presentan los distintos símbolos utilizados para representar un transformador con dos, tres y cuatro devanados.



*Figura 5. Símbolos de un transformador*

### 2.1.2.1 Autotransformadores

Los autotransformadores pueden llamarse también reguladores de tensión, pues dan la posibilidad de elevar o reducir niveles de tensión teniendo en cuenta las restricciones del usuario en algún punto de la red.

Se encuentran en la rama de transformadores especiales y poseen un único devanado dispuesto en dos partes. La primera parte se denomina devanado común, y es a su vez el de tensión inferior, mientras que la parte superior es el devanado serie, y permite la elevación del voltaje.

La ecuación 5 de relación de transformación también aplica para autotransformadores. La figura 6 presenta el circuito equivalente de un autotransformador. [20]

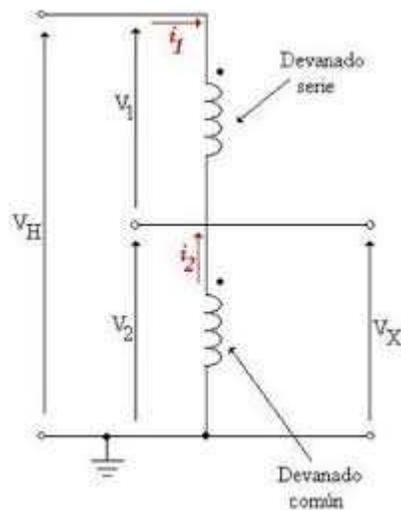


Figura 6. Circuito equivalente del autotransformador

### 2.1.2.2 Tipos de transformadores

Los transformadores pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Según su función: elevadores, reductores y reguladores. Un elevador incrementa el nivel de tensión de la red, un reductor disminuye el nivel de tensión de la red, y un regulador hace posible que se mantenga estable el nivel de tensión requerido en la red.
- Según el número de fases: monofásicos, polifásicos.
- Según ambiente de trabajo: intemperie, interior.
- Según refrigeración: natural, forzada.
- Según refrigerante: con refrigerante, sin refrigerante.
- Según medidas: de intensidad, de tensión. Estos son utilizados para la lectura de mediciones imposibles con medidores de manera directa [21].

Existen también transformadores especiales para subestaciones que requieran distintos niveles de tensión en los circuitos secundarios, a estos se los conoce como:

### **2.1.2.2.1 Transformadores tridevanados**

Son utilizados generalmente cuando se requiere un nivel de alimentación especial para los servicios auxiliares de la subestación. Internamente poseen tres devanados en cada columna del núcleo, generando así un primario, secundario y terciario. Para el tipo de conexión de estos transformadores se utilizan dos índices horarios, el primero es para resaltar la conexión entre el devanado primario y el secundario, mientras que el segundo índice resalta la conexión entre el devanado primario y el terciario, como ejemplo se puede presentar la conexión Dy5d1, donde existe un índice horario 5 (150°) entre primario y secundario, y un índice 1 (30°) entre primario y terciario [22] [23].

### **2.1.2.2.2 Transformadores tetra devanados**

Al igual que los tridevanados, los transformadores tetra devanados permiten tener distintos niveles de tensión. Esta vez se trata de cuatro niveles distintos, generalmente se utilizan para alimentar servicios auxiliares y corregir los problemas de la presencia de armónicos de tercer orden. Sin embargo, suelen implementarse en subestaciones que deben suministrar energía a distintos niveles de tensión a usuarios que lo requieren [24].

### **2.1.2.3 Conexiones de transformadores**

Las conexiones de los transformadores pueden ser estrella, delta o zigzag. La tercera es utilizada para casos muy especiales para demarcar un desfase deseado por el usuario.

Las conexiones delta y estrella se representan con los símbolos Y (estrella) y  $\Delta$  (delta), mientras que el zigzag se representa con la letra z. Adicional a saber el tipo de conexión, se debe ilustrar un número que representa un ángulo de desfase entre el devanado primario y el secundario. Dicho número va desde el 0 hasta el 12, representando así ángulos de desfase, es decir, para 0 se obtiene 0°, para 1 se obtiene 30°, para 2 se obtiene 60°, etc. Como se observa la unidad es un múltiplo de 30 [25] [26]. En la figura 7 se presenta el grupo de conexiones más utilizado.

PCV A	GRUPO DE CONEXIÓN (CC)	ESQUEMA VECTORIAL		ESQUEMA DE CONEXIONES		RELACION DE TRANSFORMACION	GRUPO DE CONEXIÓN VOE
		ALTA TENSION	BAJA TENSION	ALTA TENSION	BAJA TENSION		
0 $\delta = 0^\circ$	Dd0					$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$	A1
	Yy0					$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$	A2
	Dz0					$\frac{U_1}{U_2} = \frac{2N_1}{3N_2}$	A3
5 $\delta = 30^\circ$	Dy5					$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{\sqrt{3}N_2}$	C1
	Yd5					$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3}N_1}{N_2}$	C2
	Yz5					$\frac{U_1}{U_2} = \frac{2N_1}{\sqrt{3}N_2}$	C3
6 $\delta = 30^\circ$	Dd6					$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$	B1
	Yy6					$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{N_2}$	B2
	Dz6					$\frac{U_1}{U_2} = \frac{2N_1}{3N_2}$	B3
11 $\delta = 330^\circ$ $\delta = -30^\circ$	Dy11					$\frac{U_1}{U_2} = \frac{N_1}{\sqrt{3}N_2}$	D1
	Yd11					$\frac{U_1}{U_2} = \frac{\sqrt{3}N_1}{N_2}$	D2
	Yz11					$\frac{U_1}{U_2} = \frac{2N_1}{\sqrt{3}N_2}$	D3

Figura 7. Conexiones de transformadores

FUENTE [27]

### 2.1.2.4 Parámetros

Todo transformador posee una relación de transformación que permite obtener la variación de transformación que se obtiene a partir de la ecuación 1.

$$m = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} \text{ Ecuación 5}$$

Donde:

m: relación de transformación

$V_1$ : Nivel de tensión en el devanado primario

$V_2$ : Nivel de tensión en el devanado secundario

$N_1$ : Número de espiras en el devanado primario

$N_2$ : Número de espiras en el devanado secundario

$I_1$ : Intensidad de corriente en el devanado primario

$I_2$ : Intensidad de corriente en el devanado secundario

De igual manera los transformadores presentan problemas de magnetización en su núcleo. Esto se hace notar con el fenómeno de histéresis. Cada vez que el transformador es magnetizado se ilustra una curva que enfrenta las variables de fuerza magnetomotriz vs flujo. Con el tiempo el punto inicial estará en un nivel superior de flujo debido a que el núcleo requerirá mayor flujo magnético para generar voltaje [28]. La figura 8 presenta la curva de histéresis.

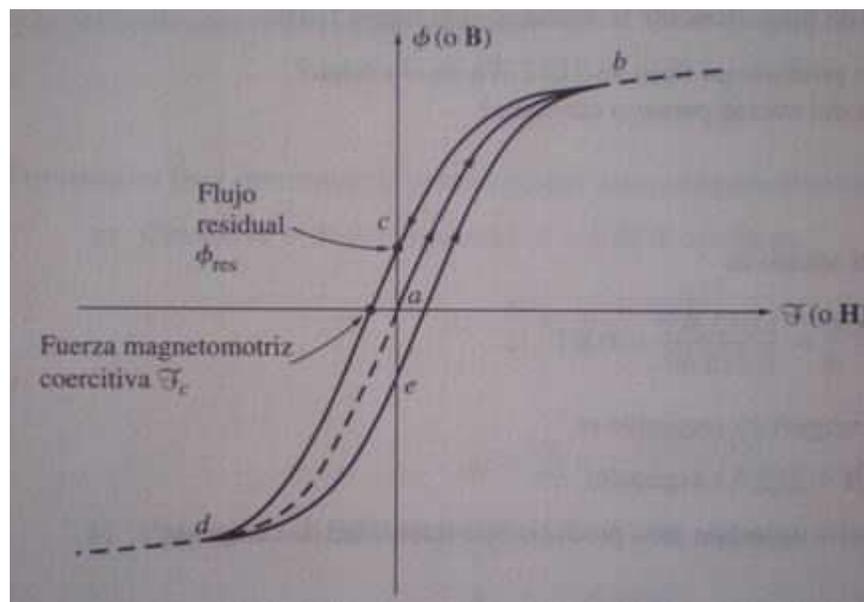


Figura 8. Curva de histéresis

Otro parámetro del transformador es la potencia nominal. Este punto es diseñado en el momento de la construcción del transformador y dependerá del tamaño del núcleo, calibre de los conductores de los devanados, y el número de espiras del mismo.

Al igual que el generador, el transformador también presenta un circuito equivalente que permite representar los valores de voltaje, resistencia e inductancia. La figura 9 presenta el circuito equivalente.

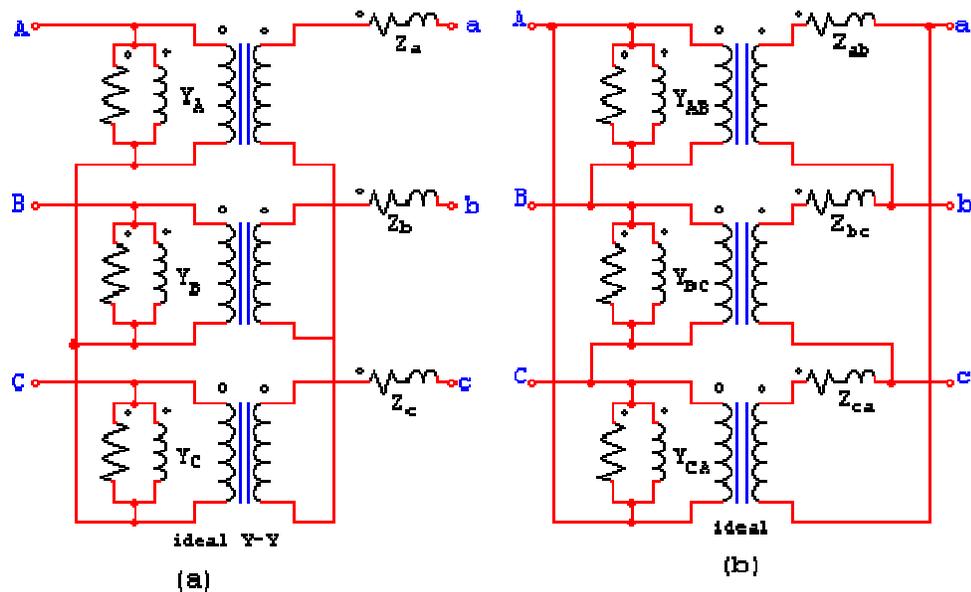


Figura 9. Circuito equivalente del transformador trifásico

FUENTE [29]

### 2.1.3 Líneas de transporte

La red eléctrica de transmisión es un conjunto de elementos interconectados que permiten que la corriente eléctrica circule desde una central de generación [22] [30]. Suele representarse como una línea en cualquier software de simulación. En la figura 10 se presenta el modelo de línea generado por NEPLAN.

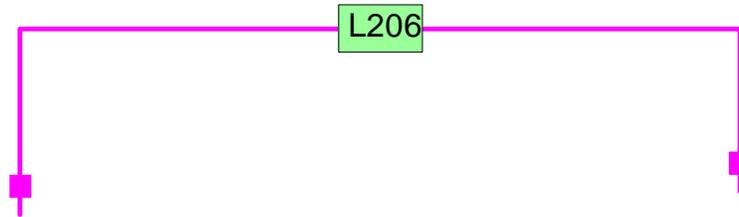


Figura 10. Símbolo de línea de transmisión

#### 2.1.3.1 Modelos de líneas

##### 2.1.3.1.1 Línea corta

Aquellas líneas de transmisión con longitud menor de 80 km y con tensión de alimentación inferior a 70 kV la capacitancia paralela al circuito puede ser ignorada, lo cual conlleva a evaluar las variables de resistencia e inductancia únicamente, es decir, solo es necesario multiplicar la resistencia e inductancia por unidad y la longitud de la línea como en la siguiente expresión [16].

$$Z = (r + j\omega L)l = R + jX \quad \text{Ecuación 6}$$

En la figura 11 se presenta el modelo de línea corta.

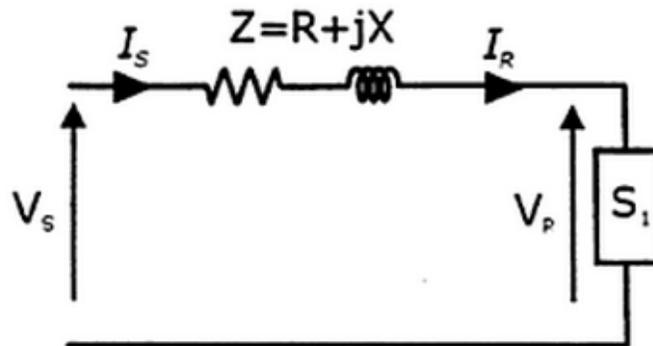


Figura 11. Modelo línea corta

### 2.1.3.1.2 Línea media

Los modelos de líneas de transmisión de longitud media son considerados desde 80 km hasta 250km. En este caso la capacitancia si debe ser tenida en cuenta presentando un modelo  $\pi$ , sin embargo, el valor de admitancia (Y) sólo toma la mitad de su valor. La siguiente expresión ilustra el caso:

$$Y = (g + jwC)l \text{ Ecuación 7}$$

Donde:

Y: Admitancia

g: Conductancia, en condiciones normales este valor se considera como cero

C: Capacitancia línea-neutro por unidad de longitud

l: Longitud

La figura 12 ilustra el caso.

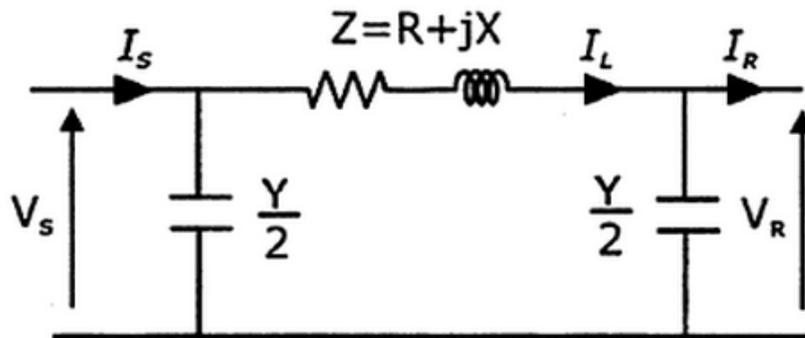


Figura 12. Modelo línea media

### 2.1.3.1.3 Línea larga

Para las líneas de transmisión que superan los 250 km debe considerarse la distribución de los parámetros a lo largo de su longitud como se presenta en la figura 13.

Las expresiones matemáticas se complican para este caso, debido a que se han obtenido divisiones que sólo pueden resolverse mediante la integración. Así, si se desea conocer el valor de la tensión en cualquier punto de la red se hace uso de la siguiente expresión.

$$V(x + \Delta x) = V(x) + z\Delta x l(x) \text{ Ecuación 8}$$

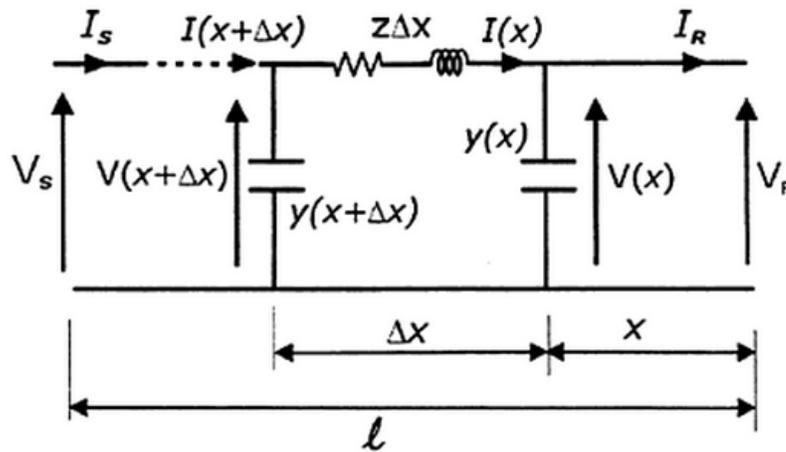


Figura 13. Modelo línea larga

Despejando la  $z l(x)$  en la ecuación 8 y tomando al límite  $\Delta x \rightarrow 0$  se tiene:

$$\frac{dV(x)}{dx} = z l(x) \text{ Ecuación 9}$$

### 2.1.3.2 Resistencia

La red de transmisión posee un elemento propio del sistema, cuya función es muy importante para el suministro de energía. Este elemento es el conductor. A través del conductor es posible la transmisión de la electricidad, sin embargo, como todo elemento eléctrico posee una resistencia, reactancia, capacitancia y conductancia.

La resistencia eléctrica es la propiedad que tiene el conductor eléctrico de oponerse al paso de la corriente eléctrica [31]. Esta propiedad es la principal causante de las caídas de tensión en las líneas de transmisión.

Para corriente continua en una temperatura determinada la resistencia puede calcularse mediante la ecuación 10:

$$R_{dc, T} = \frac{\rho_T l}{A} \text{ Ecuación 10}$$

Donde:

$\rho_T$ : resistividad del conductor a la temperatura T

$l$ : longitud del conductor

A: área de la sección transversal del conductor

Y en el caso de la corriente alterna se utiliza la ecuación 11.

$$R_{ac} = \frac{P_{p\acute{e}rdida}}{|I|^2} \text{ Ecuaci3n 11}$$

Donde:

$P_{p\acute{e}rdida}$ : p\acute{e}rdida real de potencia del conductor

$|I|$ : Magnitud de la corriente el\acute{e}ctrica que pasa por el conductor

La raz3n por la cual existen dos ecuaciones distintas para obtener la resistencia del conductor en DC y AC es porque en DC la corriente circula de manera uniforme por el conductor mientras que en AC la corriente circula de manera no uniforme por la superficie del conductor generando un fen3meno denominado efecto piel [6].

Dado que los fabricantes ofrecen el valor de resistencia del conductor a una temperatura espec\acute{f}ica, se debe calcular la resistencia para cualquier otra temperatura a partir de la ecuaci3n 12.

$$\rho_{T2} = \rho_{T1} \left( \frac{T2+T}{T1+T} \right) \text{ Ecuaci3n 12.}$$

Donde:

$\rho_{T1}$ : Resistividad del conductor a temperatura nominal (75°C)

$\rho_{T2}$ : Resistividad del conductor a la temperatura final

$T$ : constante de temperatura que depende del material del conductor

La constante de resistividad mencionada se presenta en la tabla 1 para algunos materiales.

Tabla 1. Porcentaje de conductividad, resistividad y constante de temperatura de conductores

		Resistividad a 20°C	Constante de temperatura
Materiales	% de conductividad	$\Omega\text{m} \times 10^{-8}$	°C
<b>Cobre:</b>			
Recocido	100%	1,72	234,5
Estirado en frío	97,3%	1,77	241,5
<b>Aluminio:</b>			
Estirado en frío	61%	2,83	228,1
Latón	20-27%	6,4-8,4	480
Hierro	17,2%	10	180
Plata	108%	1,59	243
Sodio	40%	4,3	207
Acero	2-14%	12-88,	180-980

Fuente [4]

### 2.1.3.3 Inductancia

Además de la resistencia, los conductores presentan otra característica llamada reactancia eléctrica. La reactancia se define como la oposición de un elemento para generar un campo magnético [32]. Dicha oposición sólo se genera por elementos inductores y capacitores. Los tipos de reactancia en estos elementos son denominados como Inductancia y Capacitancia.

Para el caso de las redes de transmisión se desprecia el valor de la reactancia capacitiva por la inexistencia de capacitores en la red y los valores de capacitancia entre los conductores y la tierra, sin embargo, hay ubicación de capacitores en el recorrido de la red con el propósito de regular el nivel de tensión reduciendo la caída de la misma.

Contrario a la conductancia, la inductancia si se tiene en cuenta, debido a sus valores significativos que generan pérdidas en el sistema de potencia. Para

obtener los valores de reactancia de una línea de transmisión se requiere conocer el RMG (Radio Medio Geométrico) del conductor proporcionado por el fabricante y la distancia comprendida entre los conductores de cada fase.

Con lo anterior se presenta la ecuación 13 para calcular el valor de la distancia equivalente entre los conductores:

$$D_{eq} = (D1 * D2 * D3)^{1/3} \text{ Ecuación 13}$$

Donde:

$D_{eq}$ : distancia equivalente entre conductores

$D_1$ : distancia entre conductor fase a y fase b

$D_2$ : distancia entre conductor fase b y fase c

$D_3$ : distancia entre conductor fase a y fase c

Obteniendo la distancia equivalente entre las fases se procede a encontrar el valor de inductancia de la red:

$$L = 2 * 10^{-7} * \ln \frac{D_{eq}}{r} \text{ H/m Ecuación 14}$$

Donde:

$L$ : inductancia

$r$ : radio del conductor, para el caso de red trifásica se usa el RMG

Y finalmente se presenta el valor de la reactancia inductiva con la ecuación 15.

$$XL = 2\pi fL \ \Omega \text{ Ecuación 15}$$

Donde:

$f$ : frecuencia de la red

Cuando se implementa el software de simulación NEPLAN es necesario ingresar los valores de resistencia y reactancia por kilómetro para que los cálculos que se le exijan al programa correspondan con los resultados esperados.

#### 2.1.3.4 Capacitancia

La capacitancia es un tipo de reactancia, y se define como la oposición al paso de la corriente propuesta por elementos capacitivos, como lo son los condensadores. En las líneas de transmisión, sólo se aprecia este valor cuando su longitud es larga, ya que se genera un campo entre las líneas y la tierra, pues se presenta como un gran condensador cuyo medio es el aire existente entre las dos placas [33] [34].

Para obtener el valor de capacitancia de la red se utiliza la siguiente ecuación:

$$C = \frac{0.0243}{\log \frac{d}{r}} * 10^{-6} \text{ Ecuación 16}$$

Donde:

d: separación media geométrica entre fases

r: radio equivalente del conductor

#### 2.1.3.5 Conductancia

Existen pérdidas en los sistemas de potencia adicionales a los encontrados en el conductor propiamente dicho. Estas suelen presentarse en los aisladores, es un efecto conocido como efecto corona y depende de la suciedad, imperfecciones o condiciones meteorológicas de la zona para permitir que en el aislador se presenten corrientes de fuga hacia la estructura de apoyo o algún elemento que se encuentre cercano a la red.

En los estudios y diseños de los sistemas de potencia, este fenómeno suele despreciarse, debido a que son muy inferiores a los encontrados por la ecuación  $IR^2$  [35] [36].

#### **2.1.4 Tipos de carga**

Los tipos de carga encontrados en la red pueden dividirse en cuatro grupos:

- Carga resistiva: son cargas que contienen componentes netamente resistivos, como las resistencias.
- Carga inductiva: son cargas que contienen elementos netamente inductivos, como lo son los devanados.
- Carga capacitiva: son cargas que contienen elementos netamente capacitivos, como los condensadores.
- Cargas combinadas: este tipo de carga es el más común, pues mezcla componentes de los tres grupos anteriores.

Adicional a esto, las cargas que demandan el suministro de electricidad dependen del tipo de usuario, es decir, industrial, comercial o residencial [37] [38].

#### **2.1.5 Compensadores y reactores**

Es común que existan caídas de tensión, y grandes desfases de ángulos entre las corrientes que circulan por la red. En la red existen componentes que consumen potencia reactiva en exceso, por lo que se genera una mayor demanda de corriente eléctrica para suplir la misma cantidad de potencia activa.

Los compensadores son elementos capacitivos que suministran potencia reactiva a la red para equilibrar el consumo de la misma, es decir, si existe un consumo de 100 MVAR en la red se hace necesaria la instalación de un compensador de 100 MVAR para mantener un factor de potencia apropiado.

Los reactores son utilizados para filtrar armónicos de la red, también para aumentar el nivel de cortocircuito en las subestaciones. Adicionalmente, pueden utilizarse para cumplir funciones de interruptor en sitios donde no es económico instalar un interruptor [39].

### 2.1.6 Barrajes y nodos de una subestación

Los nodos son los puntos de conexión entre distintos elementos de la red. Las subestaciones eléctricas por lo general son simbolizadas como nodos de interconexión entre las líneas de transmisión o distribución.

La función principal de una subestación es distribuir la energía eléctrica con una capacidad nominal determinada a las zonas que la requieran. Las subestaciones pueden ser reductoras, elevadoras o reguladoras, dependiendo del tipo de transformador que contenga.

Las fallas en las barras de una subestación son muy raras, sin embargo, cuando ocurren ocasionan grandes daños en la red, pues desconectan gran parte del sistema [40].

### 2.1.7 Redes

Las redes eléctricas pueden trabajarse matemáticamente mediante los modelos presentados en la sección 2.1.3.1. Pero debe agregarse algunas características adicionales no menos importantes.

#### 2.1.7.1 *Equivalente de Thévenin*

Todo circuito eléctrico por muy complicado que parezca puede ser simplificado a una única fuente de tensión y una resistencia en serie como lo ilustra la figura 14.

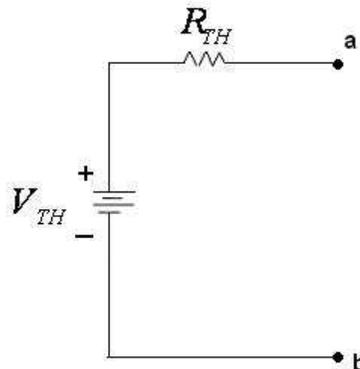


Figura 14. *Equivalente de Thévenin*

FUENTE [41]

La reducción del circuito inicial a un circuito equivalente con un único resistor, o según sea el caso una impedancia permite encontrar valores de corriente total del circuito, y por supuesto la impedancia total del mismo. Para lograr una reducción tal, es necesario remitirse a la suma de impedancias en serie y en paralelo, o los métodos de superposición con el objetivo de realizar cambios en las conexiones de los elementos. Esta herramienta permite un fácil desarrollo de sistemas muy grandes [42].

#### **2.1.7.2 Nodo Slack**

Los nodos Slack o Swing permiten la instalación de elementos que proporcionen la potencia no suministrada por los generadores. En el software de aplicación NEPLAN se utiliza para correr los flujos de potencia, es decir es una herramienta para que en caso de no existir suficiente energía generada, el nodo Slack suministre la potencia adicional [43].

Con este estudio se puede determinar la inserción de alguna fuente de energía en zonas desconectadas del sistema nacional, o simplemente diseñar una central de mayor capacidad. Es normal que no se conozcan las pérdidas del sistema antes de correr el flujo de carga, por lo que el nodo Slack es perfecto para simulaciones.

#### **2.1.7.3 Nodo SP**

Los nodos SP o PV son designados para las zonas de la red en donde se instalarán los generadores. Es normal que estos nodos suplan toda la demanda del sistema, claro está, con la integración de varios nodos del mismo tipo.

Los nodos de generación deben ser seleccionados como se explica en los anexos de las guías independientes y maniobrarlos de acuerdo a las referencias del problema o sistema propuesto.

#### **2.1.7.4 Nodo PQ**

El nodo más común en un sistema de potencia, pues contiene a las cargas de la red. Estos nodos suelen estar distribuidos por toda la red y representan la demanda energética total de la red.

En NEPLAN se puede especificar el valor de potencia activa, reactiva, o aparente según se requiera.

## 2.2 NÚMEROS COMPLEJOS

En la naturaleza de las matemáticas existen grupos de conjuntos, entre los que se destacan los naturales, enteros, racionales, reales, entre otros. Los conjuntos mencionados suelen suplir las necesidades básicas y fundamentales del análisis matemático de casi cualquier sistema. Estos sistemas pueden integrar variables que relacionan valores numéricos comunes para establecer patrones.

Cuando nace la necesidad de utilizar números resultantes de raíces pares negativas es obvio que los conjuntos antes mencionados no pueden implementarse, porque no existe valor real para la siguiente raíz  $\sqrt{-1}$ . Ante tal problemática surgió el desarrollo de los números complejos.

Un número complejo es aquel que se encuentra representado por una parte real y otra imaginaria [44]. De manera numérica se puede expresar como en la ecuación 20.

$$C = a + jb \text{ Ecuación 17}$$

Donde:

C: Conjunto de números complejos

a: Parte real del número complejo

b: Parte imaginaria del número complejo

La forma presentada en la ecuación 20 es conocida como rectangular porque representa el valor real como el eje horizontal del plano cartesiano complejo y el valor imaginario como el eje vertical del plano cartesiano complejo. En la figura 15 se observa el plano complejo.

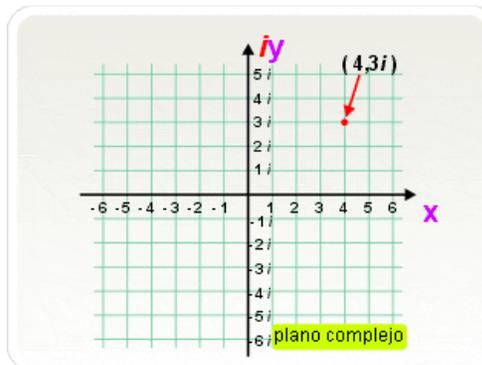


Figura 15. Plano complejo

Fuente [45]

Como se observa en la figura 15, se representa el número  $4 + j3$ ; donde el número 4 representa la parte real de la expresión y el número  $j3$  representa la parte imaginaria.

La expresión para un número complejo puede referirse como una magnitud con un ángulo. Para hallar el valor de la magnitud, o la distancia entre el origen y el punto referenciado  $(4 + j3)$  se implementa la ecuación 21.

$$|C| = \sqrt{a^2 + b^2} \text{ Ecuación 18}$$

Donde:

$|C|$ : Magnitud del número complejo

Y para obtener el ángulo comprendido entre la horizontal y el vector que une el origen con el punto referenciado en el plano complejo se utiliza la ecuación 22.

$$\phi = \arctg\left(\frac{b}{a}\right) \text{ Ecuación 19}$$

Si sucede el caso contrario, es decir, se conocen la magnitud y el ángulo del número complejo, y se desea obtener el valor en coordenadas rectangulares, es necesario evaluar las ecuaciones 23 y 24.

$$a = |C| \cos\phi \text{ Ecuación 20}$$

$$b = |C| \sen\phi \text{ Ecuación 21}$$

$$a + jb = |C| (\cos\phi + j\sin\phi) \text{ Ecuación 22}$$

La expresión de la ecuación 25 presenta una forma reducida de obtener el número complejo completo en sus coordenadas rectangulares.

Para el estudio de los sistemas de potencia es muy común la implementación de los números complejos, pues existen conceptos de análisis tales como potencia aparente (magnitud del número complejo), potencia activa (parte real del número complejo), potencia reactiva (parte imaginaria del número complejo) y el ángulo que permite obtener el factor de potencia entre las potencias activa y reactiva (ángulo  $\phi$ ).

Es posible realizar operaciones aritméticas con los números complejos, sin embargo se recomienda que las operaciones de adición y sustracción se realicen bajo coordenadas rectangulares, mientras que la multiplicación y división se realicen con coordenadas polares.

## **2.3 FLUJO DE CARGA**

El concepto de flujo de carga se asocia con la predicción de la dirección de los flujos en la red, las tensiones cuando se le da el estado de generadores y cargas [4]. Los flujos de carga o potencia permiten evaluar el estado de la red de manera anticipada y prever una situación inadecuada en el sistema.

Es usual que las empresas dedicadas al suministro de energía eléctrica utilicen software avanzado para simular los flujos de carga y averiguar el funcionamiento de la red. Con este tipo de investigaciones se pretende inspeccionar los posibles puntos de la red en los que el nivel de tensión no cumpla con la normativa de regulación de tensión y el suministro 100% de la demanda energética.

### **2.3.1 Procedimiento para desarrollar flujo de carga**

Para que un sistema de potencia funcione correctamente se requiere lo siguiente:

- Que la generación abastezca la demanda o carga adicionando las pérdidas del sistema.
- Que las magnitudes de los voltajes en los nodos permanezcan cercanos a los nominales.

- Que los generadores operen dentro de límites especificados de potencia real y reactiva.
- Que las líneas de transmisión y los transformadores no estén sobrecargados [4].

En la actualidad los sistemas computacionales han proporcionado herramientas útiles para realizar flujos de carga, presentando de manera simulada un sistema de prueba o real.

Cualquier software aplicado a sistemas de potencia requiere un sistema de evaluación, puede ser un caso de estudio IEEE, IEC, entre otros, o un sistema de prueba diseñado por el usuario del software

Después de contar con el sistema sólo es necesario presionar el botón en la interfaz gráfica que permita correr el flujo de potencia. Y finalmente se obtienen los resultados que pasarán al análisis por parte del usuario.

Para mayor detalle, remítase a las guías de trabajo independiente en los anexos del presente documento.

### 2.3.2 Newton-Raphson

El método Newton-Raphson resuelve ecuaciones algebraicas no lineales representadas en una matriz. Se tiene:

$$f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix} = y \quad \text{Ecuación 23}$$

Siendo  $x$  e  $y$   $N$  vectores mientras que  $f(x)$  es un vector de  $N$  funciones. Se tiene  $f(x)$  e  $y$ , deseando resolver para  $x$ . Se puede reescribir como sigue:

$$0 = y - f(x) \quad \text{Ecuación 24}$$

Sumando  $Dx$  a ambos lados, siendo  $D$  una matriz cuadrada invertible de magnitud  $N \times N$ .

$$Dx = Dx + y - f(x) \quad \text{Ecuación 25}$$

Se multiplica por  $D^{-1}$ :

$$x = x + D^{-1}[y - f(x)] \quad \text{Ecuación 26}$$

Los valores viejos de  $x(i)$  se utilizan en el lado derecho de la ecuación, mientras que los valores futuros  $x(i + 1)$  en el lado izquierdo.

$$x(i + 1) = x(i) + D^{-1}\{y - f[x(i)]\} \quad \text{Ecuación 27}$$

Para ecuaciones lineales  $f(x) = Ax$  reduciendo la ecuación así:

$$x(i + 1) = D^{-1}(D - A)x(i) + D^{-1}y \quad \text{Ecuación 28}$$

Para especificar a  $D$  se utiliza la serie de Taylor:

$$y = f(x_0) + \left\langle \frac{df}{dx} \middle| x = x_0 \right\rangle (x - x_0) \dots \quad \text{Ecuación 29}$$

Sin prestar atención a los términos de orden superior se tiene:

$$x = x_0 + \left\langle \frac{df}{dx} \middle| x = x_0 \right\rangle^{-1} [y - f(x_0)] \quad \text{Ecuación 30}$$

El método de Newton-Raphson sustituye  $x_0$  por el valor viejo  $x(i)$  y a  $x$  por el valor nuevo  $x(i+1)$  obteniendo:

$$x(i + 1) = x(i) + J^{-1}(i)\{y - f[x(i)]\} \quad \text{Ecuación 31}$$

Donde:

$$J(i) = \left\langle \frac{df}{dx} \middle| x = x(i) \right\rangle = \left\langle \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_N} \\ \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial x_N} \end{bmatrix} \middle| x = x(i) \right\rangle \quad \text{Ecuación 32}$$

Aplicando la matriz  $J(i)$  también llamada como matriz Jacobiana se encuentra el valor futuro para  $x$  [4].

### 2.3.3 Simulación con NEPLAN

En las guías propuestas en este trabajo de grado se ofrece la oportunidad a los estudiantes de realizar flujos de potencia en el software aplicativo para sistemas de potencia NEPLAN.

El software presenta varios ejemplos que se pueden encontrar en la carpeta de instalación del software, siguiendo su subcarpeta examples, luego Elec, y sólo basta seleccionar un caso ejemplo y evaluar un flujo de carga (En la guía de flujo de carga se explica detalladamente la manera de realizar un flujo de carga en NEPLAN). En la figura 16 se aprecia la carpeta en la cual se pueden encontrar los ejemplos.

En el anexo 10 del presente documento se ilustra paso a paso la manera simular un flujo de carga en NEPLAN

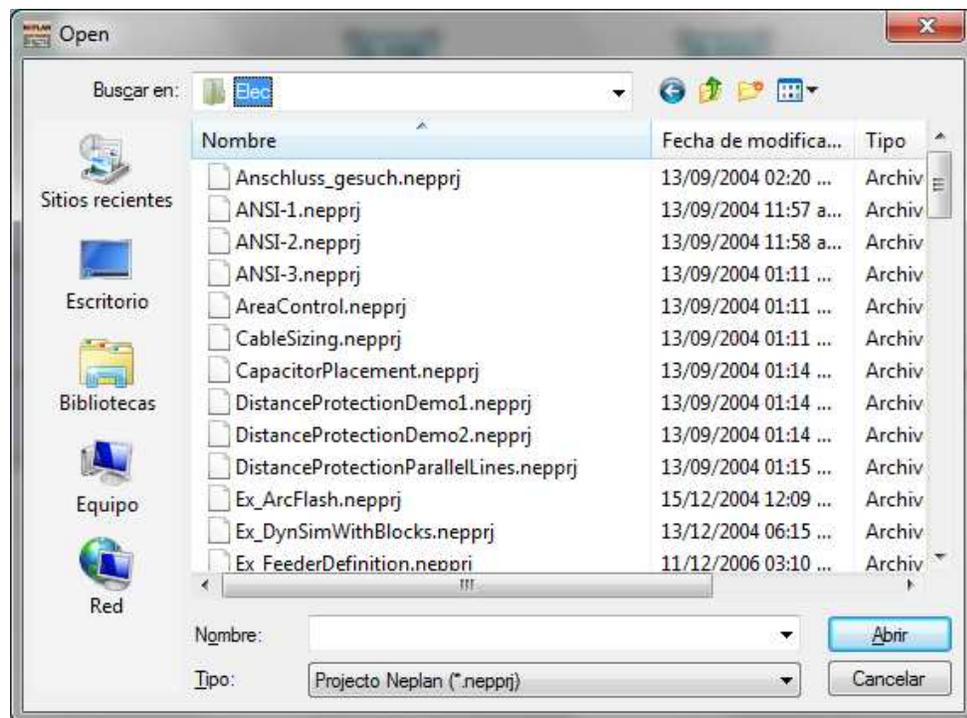


Figura 16. Carpeta de acceso a ejemplos en NEPLAN

## 2.4 CORTOCIRCUITO

A pesar de un diseño detallado y bien calculado, la red siempre es vulnerable a fallas. Una falla se define como el paso de la corriente eléctrica desde un conductor energizado “fase” hacia la tierra o el conductor neutro. Cuando esto sucede se requiere un estudio de las impedancias de los elementos que ocasionaron la falla [46] [47].

Para el cálculo de corriente de cortocircuito (falla) se puede utilizar la ecuación 33.

$$I = \frac{E}{Z} \text{ Ecuación 33}$$

Donde:

I: Corriente de cortocircuito

E: Tensión en el sistema

Z: Impedancia equivalente del sistema incluyendo la red y las fuentes de cortocircuito

Al momento de ocurrir una falla, la impedancia del sistema es muy baja, mientras que la tensión se mantiene en un valor significativo, pues los niveles de tensión para transmisión son de alta tensión. Con lo anteriormente mencionado y la ecuación 33, se aprecia que la corriente de cortocircuito es inversamente proporcional a la impedancia del sistema. Como tal impedancia es baja, la corriente de cortocircuito tiende a ser alta.

Los valores analizados para corrientes de cortocircuito reflejan importancia en el diseño de protecciones eléctricas de la red, pues éstas deben soportar la corriente de cortocircuito para no cortar el suministro de energía a los usuarios por largos intervalos de tiempo.

### 2.4.1 Diagramas de secuencia

Las fallas ocurren por perturbaciones en la red, y estas suelen representarse mediante diagramas que permiten el análisis de la providencia de la falla.

### 2.4.1.1 Secuencia positiva

El diagrama respectivo se ilustra en la figura 17. Representa la corriente que pasa de la línea energizada a tierra.

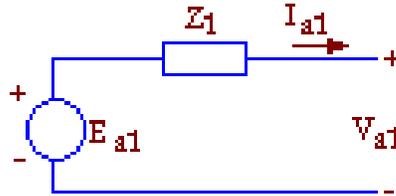


Figura 17. Diagrama de secuencia positiva

### 2.4.1.2 Secuencia negativa

El diagrama de secuencia negativa representa las corrientes remanentes de los elementos hacia la falla. La figura 18 ilustra el caso.

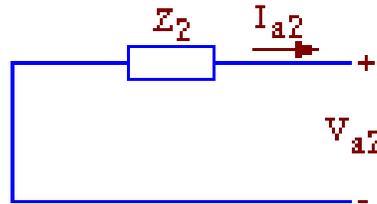


Figura 18. Diagrama de secuencia negativa

### 2.4.1.3 Secuencia cero

En este caso se refleja la corriente que aporta la tierra a la falla. Se ilustra el evento en la figura 19.

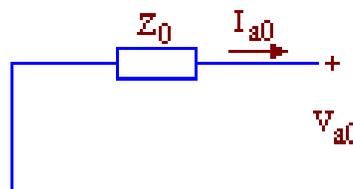


Figura 19. Diagrama de secuencia cero

Cuando se evalúan las fallas con sus componentes de secuencias positivas, negativas y cero se presenta la siguiente situación. [34]

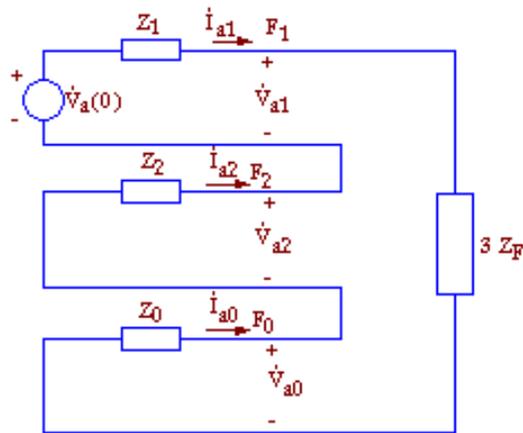


Figura 20. Falla eléctrica

Entre los tipos de cortocircuitos que se pueden generar se destacan los siguientes:

#### 2.4.2 Cortocircuito $3\alpha$

Una falla trifásica ocurre cuando los tres conductores fases de la red se unen físicamente. Este tipo de falla no es común, usualmente se presentan de manera accidental, bien sea por un árbol caído o algún animal que se posa sobre los tres conductores. A pesar de no ser muy reiterativas, significan el mayor valor para la corriente de cortocircuito, pues la impedancia se hace cero. Por tal motivo es necesario calcular las protecciones de la red con este valor.

#### 2.4.3 Cortocircuito $2\alpha - T$

Una falla bifásica – tierra ocurre cuando dos fases son aterrizadas simultáneamente. Pueden presentarse el conjunto de fallas ABT, ACT y BCT dependiendo de las fases que fallen [48].

#### 2.4.4 Cortocircuito $2\alpha$

Una falla bifásica ocurre cuando se pierde el aislamiento entre dos fases del sistema, o cuando sencillamente existe contacto entre dos conductores desnudos. Las corrientes falladas se desfasan en  $180^\circ$ . Este tipo de falla no es tan común como las monofásicas. Pueden encontrarse fallas A-B, A-C, y B-C dependiendo de las fases que fallen.

### **2.4.5 Cortocircuito 1 $\alpha$**

Una falla monofásica ocurre cuando uno de los conductores es aterrizado. Este tipo de falla es la más común en los sistemas de transmisión y distribución, pues es más fácil que un conductor caiga a que los tres caigan simultáneamente.

Este tipo de cálculos también es especificado en la guía correspondiente de fallas simuladas con el software NEPLAN (remítase a la guía).

## **2.5 SISTEMAS POR UNIDAD**

Los sistemas de potencia presentan una gama de variables que poseen sus propias unidades, tales como la tensión (voltios), intensidad de corriente (amperios), potencia (voltamperios), e impedancia (ohmios). Cuando se realiza un análisis avanzado es mejor tener la posibilidad de representar los valores en un sistema porcentual o en por unidad sobre todo cuando se presentan distintos niveles de tensión, potencia, corriente e impedancias [40] [46].

Para gestionar un grupo de variables en valores en por unidad, se hace necesario seleccionar inicialmente un valor de potencia base, que generalmente es la potencia del generador o la red. Una tensión base que dependerá de la zona en la que se encuentre, cabe resaltar que para distinguir las zonas se deben observar el número de transformadores en el sistema. La figura 21 presenta un sistema de potencia simulado en NEPLAN que posee cuatro transformadores, un generador, dos líneas de transmisión y dos cargas. Dicha figura contempla cuatro zonas de trabajo. La primera zona maneja la tensión del generador (22 kV), es decir, aguas arriba de los transformadores TR2-114 y TR2-115. La segunda zona se ubica entre los transformadores TR2-114 y TR2-116 con una tensión base de 220 kV. La tercera zona se ubica entre los transformadores TR2-115 y TR2-117 con una tensión base de 110 kV.

Cuando ya se tiene el valor base para potencia y tensiones, se procede a utilizar la ley de Ohm para obtener los valores de corriente e impedancia del sistema en p.u. (por unidad). Los valores base reciben un valor en p.u. de la unidad (1), y para obtener los valores en p.u. de los demás elementos de la red se debe implementar la ecuación 34.

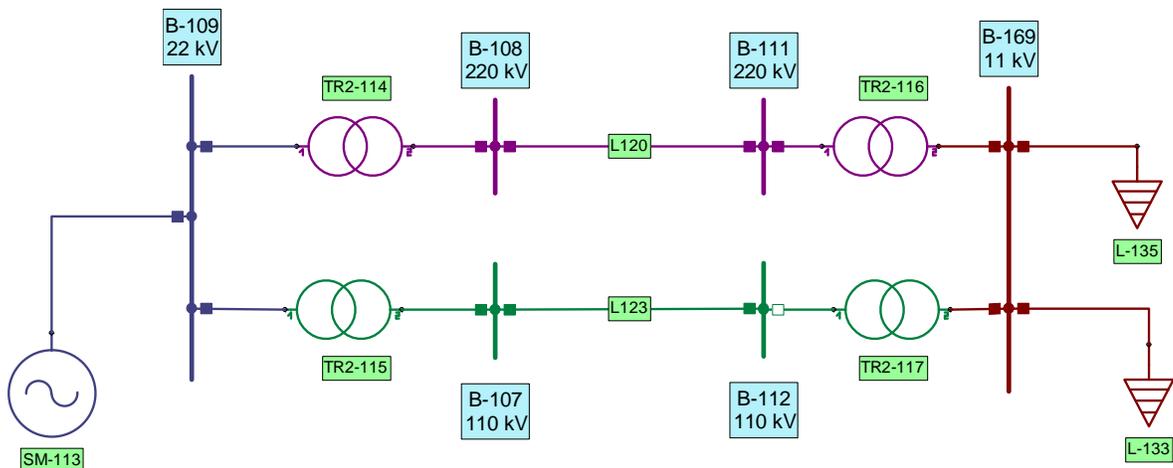


Figura 21. Ejemplo de valores en p.u.

$$\text{Valor en p.u.} = \frac{\text{Valor real}}{\text{Valor base}} \quad \text{Ecuación 34}$$

Si se desea luego definir los valores reales de cada zona del sistema de potencia, sólo basta con despejar la ecuación anterior y hallar el valor real.

## 2.6 REGULACIÓN DE TENSIÓN

Se define como la caída de tensión porcentual existente entre dos puntos, generalmente se expresan los conceptos de alimentador (Punto 1 en la red) y carga (Punto 2 en la red) [16]. El porcentaje máximo de regulación permitido es del 5%, de esta manera el 95% de la tensión original en el barraje primario debe garantizarse en el barraje secundario [6] [7] [10].

La calidad del servicio energético se encuentra influenciada por mantener valores adecuados que pueden garantizar el buen funcionamiento de las cargas conectadas al barraje final.

El porcentaje de regulación puede obtenerse utilizando la ecuación 35.

$$\%reg = \frac{\Delta v}{v} \quad \text{Ecuación 35}$$

Donde:

$\Delta v$ : caída de tensión a través del trayecto de la línea

V: tensión entregada en el punto de inicio de la línea

La variación de tensión ( $\Delta v$ ) se obtiene de la ecuación 36.

$$\Delta v = \frac{P''R + Q''X_L}{V_{out}} + j \left[ \frac{P''X_L - Q''R}{V_{out}} \right] \text{ Ecuación 36}$$

Donde:

P'': potencia activa entregada a la carga

Q'': potencia reactiva entregada a la carga

R: resistencia del conductor

X<sub>L</sub>: reactancia del conductor

V<sub>out</sub>: tensión entregada a la carga

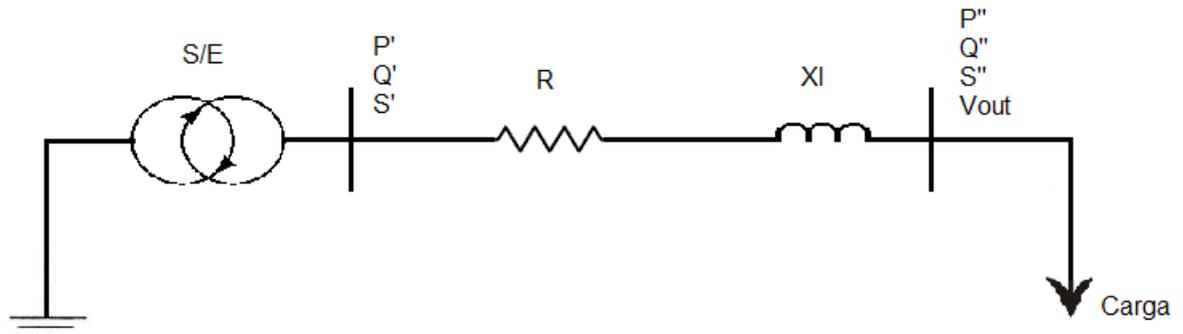


Figura 22. Parámetros eléctricos de una línea de distribución

Puede notarse en la figura 22 se presenta gráficamente la situación de caída de tensión. Se tienen valores iniciales de potencia aparente, activa y reactiva, P', Q' y S', respectivamente. Una caída de tensión causada por los componentes del conductor: resistencia y reactancia, R y X<sub>L</sub>, respectivamente. Finalmente se obtiene una variación en la tensión y por ende en las potencias como se ilustra P'', Q'', S'' y V<sub>out</sub>.

La expresión para identificar la caída de potencia se ilustra en la ecuación 37.

$$\Delta S = \frac{P^2 + Q^2}{V_{out}^2} * [R + jX_L] \text{ Ecuación 37}$$

Donde:

ΔS: Variación de potencia aparente

### **3 DISEÑO METODOLÓGICO**

#### **3.1 TIPO DE INVESTIGACION**

El estudio se llevó a cabo bajo los criterios y particularidades de la investigación “Descriptiva” debido a que se pretende caracterizar una situación concreta indicando sus rasgos más peculiares o diferenciadores. Por medio de este estudio se pueden conocer las condiciones y características de la metodología de aprendizaje, para una asignatura específica, de los estudiantes de ingeniería eléctrica de la Universidad de la Costa, a través de una descripción exacta del modelo de trabajo y entregando mejoras al proceso. Este tipo de investigación abarca estudios de interrelaciones y a su vez estudios casuales comparativos, lo que ayuda en la comparación de esta problemática junto con otras ya resueltas.

La investigación descriptiva identifica las características, propiedades, dimensiones y regularidades del fenómeno en estudio.

#### **3.2 POBLACIÓN UNIVERSO**

Para este estudio la población universo corresponde a los estudiantes de ingeniería eléctrica de la Universidad de la Costa que prestan servicios continuos en los análisis dados de algunas temáticas.

#### **3.3 MUESTRA**

Para este estudio se tomaron a los estudiantes de sistemas de potencia de los semestres avanzados o que ya culminaron la materia, debido al gran concepto que se puede apreciar al momento de terminar la asignatura sin conocimientos prácticos-operativos.

#### **3.4 ETAPAS DEL PROYECTO**

A continuación se relaciona la metodología utilizada para la elaboración de este proyecto de investigación, teniendo en cuenta los diferentes métodos y técnicas propias de cada una de las etapas que intervinieron en el estudio, incluyendo los procedimientos, recolección, procesamiento y análisis de la información. La investigación se llevó a cabo en seis etapas descritas a continuación:

### **3.4.1 Etapa I: Recopilación de definiciones y conceptos que se tienen en cuenta en un sistema de potencia.**

Actividad 1: Búsqueda de información sobre diseño de un Sistema de Potencia.

Actividad 2: Revisión de normativa nacional.

Actividad 3: Revisión del software Neplan como ayuda didáctica.

Actividad 4: Revisión de componentes que conforman un Sistema de Potencia.

### **3.4.2 Etapa II: Diseñar un sistema de potencia en la costa**

Actividad 1: Selección de lugares donde será diseñado el sistema de potencia.

Actividad 2: Distancias aproximadas en tiempo real de los diferentes lugares para proceder con la viabilidad del sistema de potencia.

Actividad 3: Diseño de un sistema de potencia.

Actividad 4: Pruebas y resultados pérdidas reales del sistema.

Actividad 5: Capítulo para guía independiente.

### **3.4.3 Etapa III: Desarrollar guía de trabajo independiente para uso de NEPLAN en un Sistema de Potencia.**

Actividad 1: Guía para cálculos de potencia, flujos de carga, cortocircuitos y tensión a tener en cuenta en un sistema de potencia.

Actividad 2: Guía para diseñar un sistema de potencia nivel costa en NEPLAN.

## **2.5 METODOLOGIA DESARROLLO PARA GUIAS DE TRABAJO INDEPENDIENTE**

Para el desarrollo de las guías de trabajo independiente de sistemas de potencia, el docente de la asignatura entregara el plan de trabajo preparado para el semestre a cada uno de los estudiantes junto con estas. Luego de lo anterior, cada vez que se termine la temática planteada por unidad, el docente exigirá la solución de la guía pertinente a dicha unidad con un tiempo estipulado de entrega (determinado por cada docente) donde el estudiante deberá comenzar a trabajar realizando investigaciones de acuerdo a los requisitos exigidos en cada modulo de trabajo independiente.

Una vez solucionada la guía, el estudiante entregara su respectivo informe al docente para previa calificación.

Para concluir con la descripción, la metodología de trabajo será:

- Finalización de la unidad. (Docente)
- Referencias bibliográficas básicas. (Docente)
- Cronograma (semanal/mensual) para la entrega del trabajo. (Docente)
- Asignación de la guía a desarrollar. (Docente)
- Solución de la guía independiente. (Estudiante)
  - Desarrolló adecuado del procedimiento para cumplir los objetivos pactados en la guía (cálculos, resultados).
  - Desarrollo del cuestionario final de cada guía.
- Informe. (Estudiante)
  - El informe deberá contener la normativa de un trabajo escrito.
- Evaluación de la guía. (Docente)

### **EVALUACIÓN POR EXPERIENCIA**

Para la evaluación por experiencia, el docente deberá tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Presentación del informe: en este punto el docente corroborara que el estudiante entregue su documento con todas las normativas pertinentes para un trabajo escrito. Para esto se tendrá en cuenta un (10%)

- Claridad de conceptos: aquí el docente deberá verificar cada uno de los conceptos descritos por el estudiante para la realización del informe y los aplicados a la temática. Para esto se tendrá en cuenta un (15%)
- Cálculos y análisis de resultados: El docente verificara paso a paso el desarrollo de todo tipo de cálculos y al mismo tiempo realizara un análisis de los resultados descritos por el estudiante. Para esto de tendrá en cuenta un (40%).
  - Los cálculos deberán tener las formulas a utilizar antes de cualquier desarrollo y deberá tener el orden adecuado con la debida respuesta ante todo resultado.
- Respuestas a preguntas de la guía: El docente deberá revisar y analizar cada respuesta logrando una relación pertinente con la pregunta. Las respuestas deberán ser precisas y directas. Para esto se tendrá en cuenta un (30%).
- Conclusiones y recomendaciones: el estudiante entregara las conclusiones obtenidas durante el desarrollo de la guía y las recomendaciones u observaciones al respecto. El docente validara cada una de las recomendaciones y para esto se tendrá en cuenta un (5%)

## 4 CONCLUSIONES

Este manual de aprendizaje se estructuró en módulos que brindan los conocimientos básicos y las orientaciones prácticas vivenciales consideradas relevantes para el desarrollo profesional de los estudiantes que cursan la asignatura de sistemas de potencia de la universidad de la costa.

Los temas desarrollados responden a los aspectos esenciales en el proceso de formación en servicio de los estudiantes permitiendo tener un mayor enfoque hacia la asignatura y profundizando en ciertos temas que se ven muy reflejados en el campo laboral.

Este proyecto tiene como propósito cualificar su rol de mediadores del proceso de aprendizaje, ayudar a organizar la universidad de la costa y vincular con éxito a todos los actores comprometidos con la certificación de calidad de la educación superior.

Los módulos están diseñados siguiendo una metodología coherente con la desarrollada en las guías de aprendizaje para los estudiantes, a fin de facilitar la comprensión de los conceptos y propiciar desde las clases experiencias similares las cuales esperan a los estudiantes en su práctica cotidiana.

La organización de este manual está dada por capítulos y módulos temáticos que ofrecen la oportunidad de sistematizar los talleres de acuerdo a los contenidos que se requiera desarrollar y a los que sea necesario reforzar según las necesidades que presente el campo laboral. Cada módulo se trabajará de manera grupal utilizando con fines pedagógicos todos los recursos, situaciones y expectativas del entorno.

## 5 RECOMENDACIONES

Luego de obtener el diseño breve en este proyecto, se pueden efectuar las siguientes recomendaciones.

La universidad debe implementar métodos que le permitan al estudiante tener un enfoque más relativo al campo laboral que es donde se va a desempeñar.

Mayor creación de manuales de aprendizaje ya que estos conllevan a mejorar los métodos de estudio ayudando a organizar la universidad de la costa y vincular con éxito a todos los actores comprometidos con la certificación de calidad de la educación superior.

Mejorar las bases de información realizando actualizaciones acerca de los temas más relativos en carrera de ingeniería eléctrica.

Implementar un software que le permita al estudiante simular aplicaciones reales que se presentan en los sistemas de potencia eléctrica contando con disponibilidad de algunos recursos básicos (formación, recursos informáticos u otros).

Implementar una infraestructura que permita realizar prácticas reales donde el estudiante pueda conocer los componentes que conforman los sistemas de potencias eléctricos y puedan interactuar con ellos.

## 6 GLOSARIO

**ACOMETIDA:** Derivación de la red local del servicio respectivo, que llega hasta el registro de corte del inmueble. En edificios de propiedad horizontal o condominios, la acometida llega hasta el registro de corte general.

**CALIBRE:** Corte transversal del conductor. Generalmente se expresa bajo el acrónimo AWG (*American Wire Gauge*) que denota un código para un área determinado del conductor.

**CARGA:** Capacidad de potencia instalada en un sector específico.

**CIRCUITO ELÉCTRICO:** Conjunto de elementos que permiten la propagación de la energía eléctrica desde una fuente hasta un usuario o carga.

**COMERCIALIZACIÓN:** Actividad económica de intercambiar un producto o servicio por algún medio de pago.

**CONDUCTOR:** Material que ofrece poca resistencia al paso de la corriente eléctrica a través de él.

**CORRIENTE:** Flujo de carga por unidad de tiempo que recorre un material.

**CORTOCIRCUITO:** Falla en un aparato o línea eléctrica por el cual la corriente eléctrica pasa directamente del conductor activo (fase) al neutro o tierra en sistemas monofásicos de corriente alterna, entre varias fases, o todas las fases con la tierra.

**DISTANCIA ENTRE FASES:** Distancia mínima estandarizada entre conductores para que no exista inducción electromagnética indeseable en un conductor específico.

**DISTRIBUCIÓN:** Es la parte del sistema de suministro de energía cuya función es entregar la energía desde la subestación de distribución hasta los usuarios finales.

**DOBLE CIRCUITO:** Circuito eléctrico que debido a la magnitud de corriente eléctrica requiere de dos conductores por fase para poder suministrar la energía eléctrica de un punto a otro.

**ENERGÍA ELÉCTRICA:** Forma de energía que resulta de la existencia de una diferencia de potencial entre dos puntos generando una corriente eléctrica cuando

se los interconecta con un conductor. Generalmente se conoce como la potencia eléctrica en el tiempo.

**FALLA:** Anormalidad que causa disminución del aislamiento entre conductores de fases o entre conductores y tierra, por debajo de los valores normales de la impedancia de carga.

**FLUJO DE CARGA:** Corriente eléctrica circulada por un conductor para suministrar energía eléctrica a una carga.

**GALVANIZADA:** Estructura fabricada con un proceso electroquímico con el cual se puede cubrir un metal con otro.

**GENERACIÓN:** Transformación de cualquier clase de energía en energía eléctrica.

**GENERADOR:** Máquina eléctrica encargada de transformar alguna clase de energía (térmica, cinética, química, nuclear, etc.) en energía eléctrica.

**INDUCTANCIA:** Tipo de reactancia hallada en inductores (bobinas).

**LÍNEA DE TRANSMISIÓN:** Estructura utilizada para dirigir la transmisión de energía eléctrica de un punto hacia otro.

**NEPLAN:** Software aplicado a simulación de Sistemas Eléctricos de Potencia.

**NÚMERO COMPLEJO:** Número comprendido por la suma de un número real y uno imaginario, este a su vez es múltiplo de la unidad de los números imaginarios, denominada como  $i$ . Puede expresarse en su forma rectangular:  $2+3i$ . O en su forma polar  $2\angle 45^\circ$ .

**PARÁMETRO:** Dato que se deriva de una investigación dada en algún sistema.

**PÉRDIDA:** Cantidad de potencia disipada en la red a través de la energía térmica generada en los elementos del sistema de potencia por su resistividad al paso de la corriente.

**POTENCIA:** Relación de pasa de energía de un flujo por unidad de tiempo, es decir, cantidad de energía entregada o absorbida por un elemento. Generalmente se le describe como el Trabajo en función del tiempo.

**POTENCIA ACTIVA:** Potencia capaz de transformar la energía eléctrica en trabajo.

**POTENCIA APARENTE:** Suma vectorial de la potencia real (activa) y la potencia de formación de campo magnético (reactiva).

**POTENCIA REACTIVA:** Potencia requerida para generar campos magnéticos.

**PVC:** Producto de la polimerización del cloruro de vinilo a policloruro de vinilo.

**REACTANCIA:** Oposición al paso de la corriente alterna por elementos inductivos o capacitivos.

**REACTANCIA CAPACITIVA:** Tipo de reactancia hallada en capacitores.

**REGULACIÓN:** Porcentaje máximo permitido de caída de tensión en un circuito eléctrico.

**RESISTENCIA:** Oposición al paso de la corriente eléctrica, generalmente se usa para cualquier elemento que funcione en la transmisión de la energía eléctrica.

**SISTEMA DE POTENCIA:** Conjunto de elementos que hacen posible la transmisión de la energía eléctrica de un punto a otro.

**SISTEMA INTERCONECTADO:** Conjunto de redes de alta tensión cuyo objetivo es transmitir la energía eléctrica desde los generadores hasta las subestaciones de distribución.

**SISTEMA POR UNIDAD:** Conversión de unidades fundamentales de una variable a valores correspondientes al porcentual o a la unidad.

**TENSIÓN:** Diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos.

**TORRES DE TRANSMISIÓN:** Estructuras metálicas cuya función es soportar los elementos de la red.

**TRANSFORMADOR:** Máquina eléctrica encargada de modificar la tensión para su uso adecuado. Pueden ser transformadores elevadores (si se eleva la tensión), reductores (si se reduce la tensión) o reguladores (si se estabiliza el nivel de tensión).

**TRANSMISIÓN:** Actividad que permite el transporte de energía eléctrica entre dos subestaciones en niveles de tensión relativamente altos.

**TUBERÍA:** Conducto que cumple la función de sostener los conductores de media y baja tensión que suministran energía a una carga.

USUARIO FINAL: Usuario que aprovecha todo el proceso de generación, transmisión y comercialización de la energía para alimentar una demanda específica.

## 7 Bibliografía

- [1] C. Rodríguez, F. Zilli y A. Zunín, Análisis de fenómenos dinámicos en sistemas eléctricos de potencia, Montevideo: Universidad de la República.
- [2] Universidad de la Costa, «Información general,» 2011. [En línea]. Available: [http://www.cuc.edu.co/index.php?option=com\\_flexicontent&view=items&cid=110&id=270&Itemid=419](http://www.cuc.edu.co/index.php?option=com_flexicontent&view=items&cid=110&id=270&Itemid=419). [Último acceso: 13 Diciembre 2013].
- [3] M. Balbis Morejón, Identificación de las competencias profesionales del Ingeniero Eléctrico de la Corporación Universitaria de la Costa CUC, Barranquilla: Universidad de la Costa, 2011.
- [4] J. D. Glover y M. S. Sarma, «Sistemas de potencia: Análisis y diseño,» Tercera ed., Mexico, Thomson, 2004.
- [5] T. Zurita, «Proceso de investigación: Planteamiento del problema,» 20 Febrero 2008. [En línea]. Available: <http://www.slideshare.net/TitoZurita/proceso-de-investigacion-planteamiento-del-problema>. [Último acceso: 27 Agosto 2013].
- [6] M. J. Quintero Durán, Diseño de circuito de media tensión para alimentar al corregimiento de San José de Oriente (Cesar), Barranquilla: CUC, 2013.
- [7] Instituto Colombiano de Normas Técnicas, «Electrotecnia. Tensión y Frecuencia Nominales en Sistemas de Energía Eléctrica en Redes de Servicio Público,» NTC 1340, ICONTEC, Santa Fe de Bogotá, 2004.
- [8] Instituto Colombiano de Normas Técnicas, «Código eléctrico colombiano,» NTC 2050, ICONTEC, Bogotá, 1998.
- [9] Colombia Ministerio de Minas y Energía, «Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas,» Bogotá, 2008.
- [1] Empresa de Energía del Quindío S.A. E.S.P., «Reglamento Técnico: Redes 0] Aéreas,» Quindío, 2011.
- [1] D. Bica, C. Moldovan y M. Muji, «Power engineering education using NEPLAN 1] software,» *Universities Power Engineering Conference, International*, pp. 1-4, Sept. 2008.
- [1] N. G. Caicedo, C. A. Lozano, J. F. Díaz, C. Rueda, G. Gutiérrez y C. Olarte, 2] «Loss reduction in distribution networks using concurrent constraint programming,» *Probabilistic Methods Applied to Power Systems, International conference*, pp. 295-300, Sept. 2004.
- [1] Universidad de la Costa, «Presentación de la universidad: Historia,» [En línea]. 3] Available: [http://www.cuc.edu.co/index.php?option=com\\_flexicontent&view=items&cid=38&id=63&Itemid=89](http://www.cuc.edu.co/index.php?option=com_flexicontent&view=items&cid=38&id=63&Itemid=89). [Último acceso: 20 Agosto 2012].
- [1] S. J. Chapman, Máquinas eléctricas, Tercera ed., Londres: Mc Graw Hill, 2000. 4]
- [1] T. Wildi, Máquinas eléctricas y sistemas de potencia, Sexta ed., México: 5] Pearson Educación, 2007.

- [1 J. Coto Aladro, Análisis de sistemas de energía eléctrica, Primera ed., Oviedo: Servicio de publicaciones. Universidad de Oviedo, 2002.
- [1 S. Sabunal García y F. Gómez Moñuz, Centrales térmicas de ciclo combinado: Teoría y proyecto, Primera ed., Fernández: Endesa, 2006.
- [1 W. H. Severns, H. E. Degler y J. C. Miles, Energía mediante vapor, aire, o gas, Primera ed., Barcelona: Reverté S.A., 2007.
- [1 D. G. Fink, H. W. Beaty y J. M. Carroll, Manual práctico de electricidad para ingenieros, Undécima ed., vol. III, Barcelona: Reverté S.A., 1984.
- [2 M. Álvarez Pulido, Transformadores: Cálculo fácil de transformadores y autotransformadores, monofásicos y trifásicos de baja tensión, Primera ed., Barcelona: Marcombo S.A., 2009.
- [2 J. J. Manzano Orrego, Máquinas eléctricas, Primera ed., Madrid: Paraninfo, 2010.
- [2 F. Barrero, Sistemas de energía eléctrica, Primera ed., Madrid: Thomson, 2004.
- [2 E. Ras, Transformadores de potencia, de medida y de protección, Séptima ed., Barcelona: Marcombo S.A., 1994.
- [2 G. Enríquez Harper, El ABC de las máquinas eléctricas 1: Transformadores, Primera ed., México: Noriega Editores, 2004.
- [2 T. Croft, C. L. Carr y J. H. Watt, Manual del montador electricista, Tercera ed., Barcelona: Reverté S.A., 1994.
- [2 P. Avelino Pérez, Transformadores de distribución: Teoría, cálculo, construcción y pruebas, Segunda ed., México: Reverté S.A., 2001.
- [2 P. Jara, «Transformadores trifásicos,» Monografías, [En línea]. Available: <http://www.monografias.com/trabajos93/analisis-de-transformadores-trifasicos/analisis-de-transformadores-trifasicos.shtml>. [Último acceso: 13 Diciembre 2013].
- [2 G. Enríquez Harper, El libro práctico de los generadores, transformadores y motores eléctricos, Primera ed., México: Limusa, 2004.
- [2 P. Concha, «Circuitos equivalentes,» patricioconcha, [En línea]. Available: [http://patricioconcha.ubb.cl/transformadores/pagina\\_n1.htm](http://patricioconcha.ubb.cl/transformadores/pagina_n1.htm). [Último acceso: 13 Diciembre 2013].
- [3 J. L. Tora Galván, Transporte de la energía eléctrica, Primera ed., Madrid: Universidad Pontificia Comillas de Madrid, 1997.
- [3 A. Senner, Principios de electrotecnia, Primera ed., Barcelona: Reverté, S.A., 1994.
- [3 M. Hornemann, H. Jagla y L. Pauly, Electrotecnia de potencia, Barcelona: Reverté, S.A., 1994.
- [3 Tuveras;, «Parámetros de una línea eléctrica en A.T.,» tuveras, [En línea]. Available: <http://www.tuveras.com/lineas/parametros/parametros.htm>. [Último acceso: 13 Diciembre 2013].

- [3 B. M. Weedy, Sistemas eléctricos de gran potencia, Primera ed., Barcelona:  
4] Reverté S.A., 1982.
- [3 R. M. Mujal Rosas, Protección de sistemas eléctricos de potencia, Primera ed.,  
5] Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, 2002.
- [3 R. M. Mujal Rosas, Cálculo de líneas y redes eléctricas, Primera ed.,  
6] Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya, 2002.
- [3 M. Logan, «Tipos de cargas eléctricas,» ehowenespanol, [En línea]. Available:  
7] [http://www.ehowenespanol.com/tipos-cargas-electricas-info\\_107950/](http://www.ehowenespanol.com/tipos-cargas-electricas-info_107950/). [Último  
acceso: 13 Diciembre 2013].
- [3 R. J. Fowler, Electricidad: principios y aplicaciones, Primera ed., Barcelona:  
8] Reverté S.A., 1994.
- [3 C. J. Carrillo González y J. Cidrás Pidre, «Compensadores estáticos de  
9] potencia reactiva (SVC),» webs.uvigo, 2013. [En línea]. Available:  
<http://webs.uvigo.es/carrillo/publicaciones/SVC.pdf>. [Último acceso: 13  
Diciembre 2013].
- [4 G. Enríquez Harper, Elementos de diseño de subestaciones eléctricas,  
0] Segunda ed., México D.F.: Limusa, 2005.
- [4 L. M. Munayco Candela, «Teorema de Thévenin y Norton,» monografias, [En  
1] línea]. Available: [http://www.monografias.com/trabajos81/teorema-thevenin-y-  
norton/teorema-thevenin-y-norton2.shtml](http://www.monografias.com/trabajos81/teorema-thevenin-y-norton/teorema-thevenin-y-norton2.shtml). [Último acceso: 13 Diciembre 2013].
- [4 R. L. Boylestad, Introducción al análisis de circuitos, Décima ed., México:  
2] Pearson Education, 2004.
- [4 L. P. Singh, Advanced Power System Analysis and Dynamics, Fourth ed.,  
3] Delhi: New age international publishers, 2006.
- [4 K. L. Su, Introducción al estudio de los circuitos, la electrónica y el análisis de  
4] señales, Primera ed., Barcelona: Reverté, S.A., 1979.
- [4 Mathematics dictionary, «Plano complejo,» [En línea]. Available:  
5] <http://www.mathematicsdictionary.com/spanish/vmd/full/c/complexplane.htm>.  
[Último acceso: 10 Noviembre 2013].
- [4 G. Enríquez Harper, Protección de instalaciones eléctricas industriales y  
6] comerciales, Segunda ed., México D.F.: Limusa, 2003.
- [4 R. García Díaz, Diccionario técnico, Segunda ed., México D.F.: Limusa, 2003.  
7]
- [4 G. Moreno Ospino, J. A. Valencia Velásquez, C. A. Cárdenas Agudelo y W. M.  
8] Villa Acevedo, Fundamentos e ingeniería de las puestas a tierra: Respuestas  
ante fallas eléctricas y rayos, Primera ed., Medellín: Universidad de Antioquia,  
2007.
- [4 M. O. Nieto Mesa, «Guía para facilitar el planteamiento del problema de la  
9] investigación,» Agosto 2010. [En línea]. Available: [http://  
es.scribd.com/doc/38111532/guia-para-facilitar-el-planteamiento-del-  
problema-de-la-investigacion](http://es.scribd.com/doc/38111532/guia-para-facilitar-el-planteamiento-del-problema-de-la-investigacion). [Último acceso: 27 Agosto 2013].

[5 A. J. Coto, Análisis de sistemas de energía eléctrica, Primera ed., Oviedo:  
0] Servicio de Publicaciones. Universidad de Oviedo, 2002.

**ANEXOS**

**Anexo 1. Programa: sistemas de potencia**

<b>TEMAS</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
INTRODUCCIÓN	Conformación de grupos, evaluación, proyecto
1. REVISIÓN DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS Y OPERACIONES FASORIALES.	Entender el funcionamiento de los números complejos y el uso de estos en los circuitos eléctricos.
2. INSTRUCTIVO DE USO DE NEPLAN PARA DISEÑOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.	Desarrollar a manera competente la orientación para el diseño del sistema eléctrico de potencia con la ubicación exacta de las herramientas a necesitar.
3. CÁLCULOS PARA LAS PÉRDIDAS DE TENSIÓN ( $\Delta V$ ) Y PÉRDIDAS DE POTENCIA ( $\Delta S$ )	Utilizar los números complejos para cálculos del circuito y análisis matemático por tramos del mismo, obteniendo así la funcionalidad plena del suministro de energía.
4. REALIZAR CÁLCULOS DE PORCENTAJE DE REGULACIÓN USANDO DE APOYO EL INSTRUCTIVO DE CÁLCULOS DE PÉRDIDAS DE TENSIÓN Y POTENCIA.	Realizar los porcentajes de regulación basados en las normativas técnicas colombianas para el cumplimiento estándar y eficiente del sistema.
5. PARÁMETROS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.	Diferenciar los tipos de líneas de transmisión a través de las distancias y conocer sus características.
6. INSTRUCTIVO DE CÁLCULOS DE SPU	Utilizar el método de spu para cálculos, más ágil, de fallas y perdidas en el sistema.
7. FLUJOS DE CARGA EN NEPLAN	Distribución y manejo de cargabilidad.
8. DISEÑO DE UN SISTEMA INTERCONECTADO REGIONAL	Diseñar un sistema eléctrico de potencia teniendo en cuenta todas las características de equipos y líneas de transmisión.

9. ANÁLISIS DE FALLAS EN PUNTOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.	Realizar simulaciones de fallas en diferentes puntos del sistema y realizar los cálculos pertinentes de los puntos ante las simulaciones.
10. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DEL CIRCUITO ANTE EVENTUALIDADES (FALLAS)	Análisis del comportamiento del circuito frente a simulaciones de fallas.
11. SIMULACIONES DE CORTOCIRCUITOS NEPLAN	Realizar simulaciones de fallas en diferentes puntos del sistema y realizar los cálculos (ya esto Neplan lo hace) pertinentes de los puntos ante las simulaciones.
INTERPRETACIONES DE RESULTADOS.	Análisis de resultados matemáticos respecto al comportamiento del sistema ante las fallas presentadas y las consecuencias a las cargas y equipos.

## **Anexo 2. Introducción**

Esta guía de trabajo independiente de Sistemas de Potencia contiene 11 módulos elaborados con base en un enfoque teórico-práctico apoyado con el software NEPLAN y en soporte con las herramientas ofimáticas de Microsoft Excel. Estos permiten realizar una serie de análisis, cálculos y revisiones, las cuales se explican en su totalidad para revisar el buen funcionamiento de un sistema de suministro de energía en cualquiera de sus etapas.

El trabajo práctico constituye una actividad de importancia para el estudiante de Ingeniería Eléctrica. Analizar el comportamiento y funcionamiento de un sistema eléctrico de potencia constituye un entrenamiento fundamental para comprender la realización de estudios de flujos de cargas, pérdidas en tramos por tensión y/o potencia, simulaciones de fallas y calcular las distintas formas en las que los sistemas de potencia pueden ser aplicados.

Partiendo de estas descripciones, la presente guía servirá de entrenamiento para los cálculos y diseños necesarios para el acabado final de un sistema de puesta a tierra desde edificaciones de baja tensión hasta subestaciones de alta y extra alta tensión.

### **Características de las guías de laboratorio**

Los aspectos presentados en esta guía sedimentan las bases para el desarrollo de la práctica e implementación de los Sistemas de Potencia. Al desarrollar esta guía el estudiante tendrá las capacidades para llevar a cabo un análisis estructural y diseño de un SP. Por tanto, cada una de las guías están conformadas por dos partes: procedimiento e informe.

### **Anexo 3. COMPETENCIAS**

Realizar los cálculos de pérdidas y simulaciones de fallas en los diferentes tramos de un sistema eléctrico de potencia junto al análisis y comportamiento frente a cada uno de los equipos que interactúan en el suministro de energía e interpretación de los datos de acuerdo a los resultados obtenidos y a las regulaciones de leyes vigentes.

#### **LOGROS**

- Comprende que es un número complejo, su funcionamiento y la aplicación de estos en los circuitos eléctricos.
- Conoce y comprende que es un sistema eléctrico de potencia y como es su funcionamiento.
- Realiza correctamente cálculos para pérdidas de tensión y potencia.
- Desarrolla análisis cualitativo y cuantitativo, correctamente, de las caídas de tensiones y potencia en los tramos de un sistema de potencia.
- Realiza correctamente cálculos para regulación, por tramo, del sistema eléctrico.
- Desarrolla análisis cualitativo y cuantitativo, correctamente, de los cálculos de regulación de tensión, teniendo presente cada una de las leyes y normativas colombianas que nos rigen, en los tramos de un sistema de potencia.
- Simula fallas diferentes puntos del circuito del sistema de suministro de energía analizando el comportamiento de la eventualidad en todos los puntos afectados del sistema.
- Desarrolla, correctamente, un sistema por unidad entendiendo las ventajas que este presenta para la realización cálculos, de todos los caracteres posibles, del sistema.
- Maneja a nivel básico-intermedio el software NEPLAN para diseños de sistemas eléctricos de potencia.
- Utiliza y se apoya en NEPLAN para realizar los cálculos necesarios para el análisis de un sistema eléctrico de potencia.
- Realiza correctamente, en NEPLAN, distribución y manejo de cargabilidad para controlar el flujo de carga.
- Realiza correctamente simulaciones de fallas en NELAN, en todo el sistema de suministro de energía, con excelentes interpretaciones de resultados.

## **Anexo 4. REVISIÓN DE CIRCUITOS ELÉCTRICOS Y OPERACIONES FASORIALES.**

### **OBJETIVO**

#### **General**

- Comprender el funcionamiento de los números complejos y la relación que tienen los números con los sistemas eléctricos de potencia.

#### **Específico**

- Entender la aplicación de números complejos en un circuito.
- Identificar las diferentes operaciones capaces de desarrollar con los números complejos.

**NOTA: VALIDAR SUS CALCULOS DE EXCEL A MANO Y ADJUNTARLOS A LA EXPERIENCIA.**

### **TEORIA**

Los números complejos conforman un grupo de cifras resultantes de la suma entre un número real y uno de tipo imaginario. Un número real, de acuerdo a la definición, es aquel que puede ser expresado por un número entero (4, 15, 2686) o decimal (1,25; 38,1236; 29854,152). En cambio, un número imaginario es aquél cuyo cuadrado es negativo. El concepto de número imaginario fue desarrollado por Leonhard Euler en 1777, cuando le otorgó a  $\sqrt{-1}$  el nombre de  $i$  (de "imaginario").

La noción de número complejo aparece ante la imposibilidad de los números reales de abarcar a las raíces de orden par del conjunto de los números negativos. Los números complejos pueden, por lo tanto, reflejar a todas las raíces de los polinomios, algo que los números reales no están en condiciones de hacer.

Este tipo de números es utilizado en los sistemas eléctricos de potencia ya que hay una relación directa de la potencia activa y reactiva con la parte real e imaginaria de los números complejos, por esta razón conviene aprender a realizar todo tipo de operaciones con estos números, esto ayudara a comprender todo

sobre sistemas de potencia. Combinando esto con Excel, se dispondría de una herramienta útil. En el siguiente cuadro se muestra la variedad de comandos de Excel que pueden ser usados para la operación de números complejos.

No.	COMANDO	DESCRIPCIÓN	EJEMPLO
1	<b>COMPLEJO</b>	<p>COMPLEJO(núm_real;núm_i;su fijo)</p> <p>Convierte coeficientes reales e imaginarios en números complejos de la forma <math>x + yi</math> o <math>x + yj</math>.</p>	<p>=COMPLEJO(3;4)</p> <p>Número complejo con 3 y 4 como los coeficientes real e imaginario (3 + 4i)</p>
2	<b>IM.REAL</b>	<p>IM.REAL(núm_complejo)</p> <p>Devuelve el coeficiente de la parte real de un número complejo con el formato de texto <math>x + yi</math> o <math>x + yj</math>.</p>	<p>=IM.REAL("6-9i")</p> <p>Coeficiente real de 6-9i (6)</p>
3	<b>IMAGINARIO</b>	<p>IMAGINARIO(núm_complejo)</p> <p>Devuelve el coeficiente de la parte imaginaria de un número complejo con el formato de texto <math>x + yi</math> o <math>x + yj</math>.</p>	<p>=IMAGINARIO("3+4i")</p> <p>Coeficiente imaginario del número complejo 3+4i (4)</p>
4	<b>IM.ABS</b>	<p>IM.ABS(núm_complejo)</p> <p>Devuelve el valor absoluto (módulo) de un número complejo con el formato de texto <math>x + yi</math> o <math>x + yj</math>.</p> <p>Use COMPLEJO para convertir coeficientes reales e imaginarios en un número complejo. El valor absoluto de un número complejo es:</p> $\text{IM.ABS}(z) =  z  = \sqrt{x^2 + y^2}$	<p>=IM.ABS("5+12i")</p> <p>Valor absoluto de 5+12i (13)</p>

5	<b>IM.ANGULO</b>	<p>IM.ANGULO(núm_complejo)</p> $\text{IM.ANGULO}(z) = \tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) = \theta$ <p>Devuelve el argumento <math>\theta</math>(theta), un ángulo expresado en radianes</p>	<p>=IM.ANGULO("3+4i")</p> <p>Argumento Theta de 3+4i, en radianes (0,927295)</p>
6	<b>IM.CONJUGADA</b>	<p>IM.CONJUGADA(núm_complejo)</p> <p>Devuelve la conjugada compleja de un número complejo con el formato de texto x + yi o x + yj.</p>	<p>=IM.CONJUGADA("3+4i")</p> <p>Conjugada compleja de 3+4i (3 - 4i)</p>
		$\text{IM.CONJUGADO}(x + yi) = \bar{z} = (x - yi)$	
7	<b>IM.POT</b>	<p>IM.POT(núm_complejo; número)</p> <p>Devuelve el resultado de un número complejo elevado a una potencia entera con el formato de texto x + yi o x + yj.</p>	<p>=IM.POT("2+3i";3)</p> <p>2+3i elevado a la potencia de 3 (-46 + 9i)</p>
8	<b>IM.SUM</b>	<p>IM.SUM(núm_complejo1; núm_complejo2; ...)</p> <p>Devuelve la suma de dos o más números complejos con el formato de texto x + yi o x + yj.</p>	<p>=IM.SUM("3+4i";"5-3i")</p> <p>Suma de los dos números complejos en la fórmula (8+i)</p>

Tabla 1. Comandos básicos usados en Excel.

Adicional a los comandos mencionados en la tabla anterior, usted deberá llenar la siguiente tabla con comandos adicionales que se use en Excel ara operaciones con números complejos.

No.	COMANDO	DESCRIPCIÓN	EJEMPLO
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			

Tabla 2. Resumen de comandos complementarios.

### PRACTICA

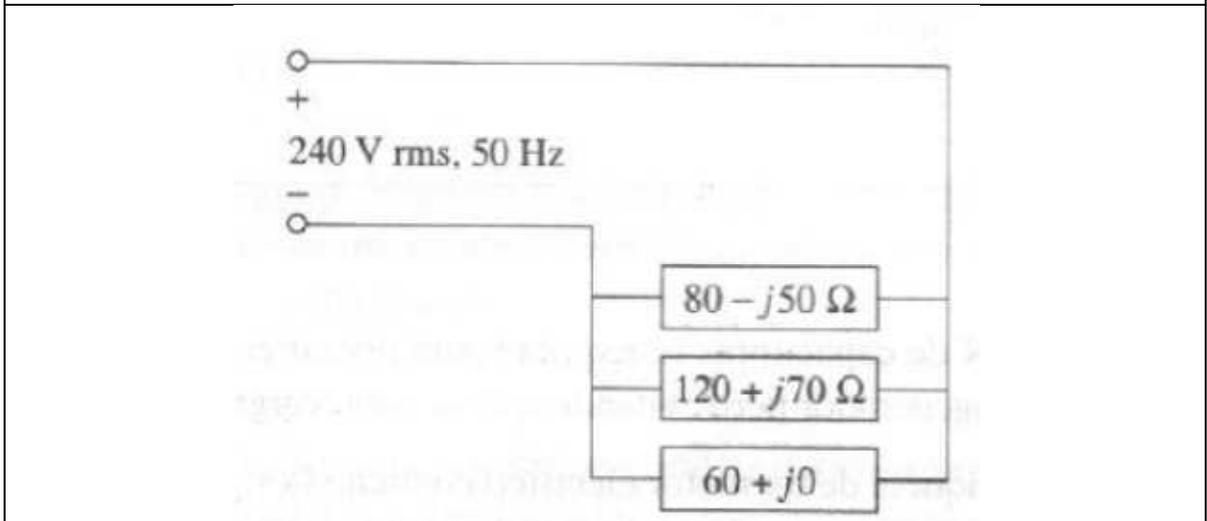
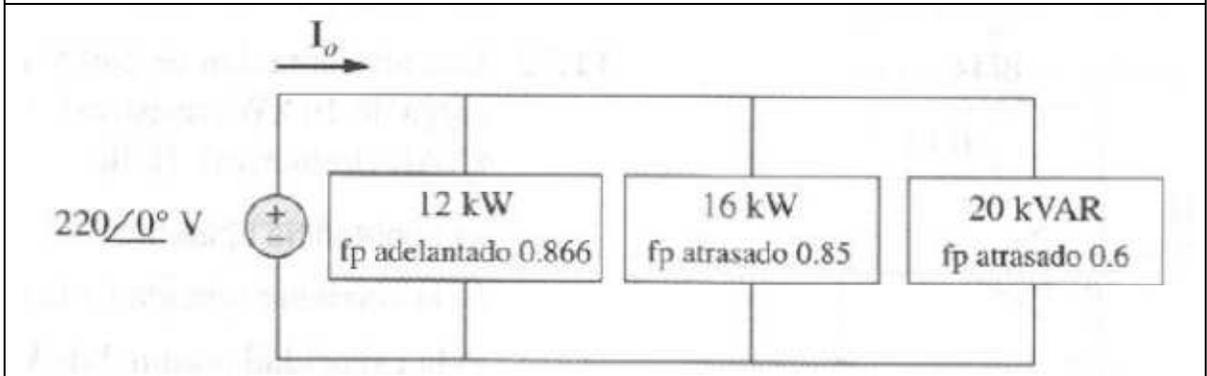
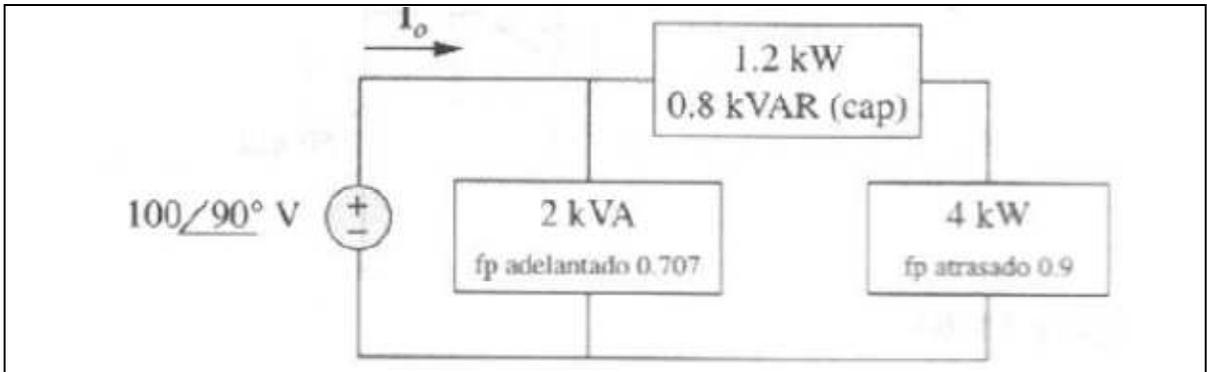
Con base a los comandos de Excel para realizar operaciones con números complejos, a continuación se tienen una serie de ejercicios en los cuales tendrá que realizar de manera manual y en Excel.

▪ **Pregunta 1:**

$\sqrt{\frac{(5 \angle 10^\circ) * (10 \angle -40^\circ)}{(4 \angle -80^\circ) * (-6 \angle 50^\circ)}}$	$\frac{13 \angle 45^\circ}{3 - j4} + j2$
$\left(\frac{10 + j20}{3 + j4}\right)^2 \sqrt{(10 + j5)(16 - j20)}$	$\frac{2 + j3}{1 - j6} + \frac{7 - j8}{-5 + j11}$

▪ **Pregunta 2:**

Para los siguientes circuitos debe calcular la potencia activa, reactiva, aparente, factor de potencia que absorbe la carga equivalente. Determine cuál debe ser el elemento reactivo a conectar con su respectivo valor para garantizar un factor de potencia superior a 0,95.



## INFORME DE LA PRÁCTICA

**TEMA DE LA PRÁCTICA:**

FECHA: día \_\_\_\_\_ mes \_\_\_\_\_ año \_\_\_\_\_

**INTEGRANTES:**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_


Tabla de Excel para cálculos

## **Anexo 5. INSTRUCTIVO DE USO DE NEPLAN PARA DISEÑO DE SISTEMA ELECTRICO DE POTENCIA.**

### **OBJETIVO**

#### **General**

- Familiarizar e introducir a los estudiantes, la temática para el uso del simulador NEPLAN para simular un sistema de potencia eléctrico.

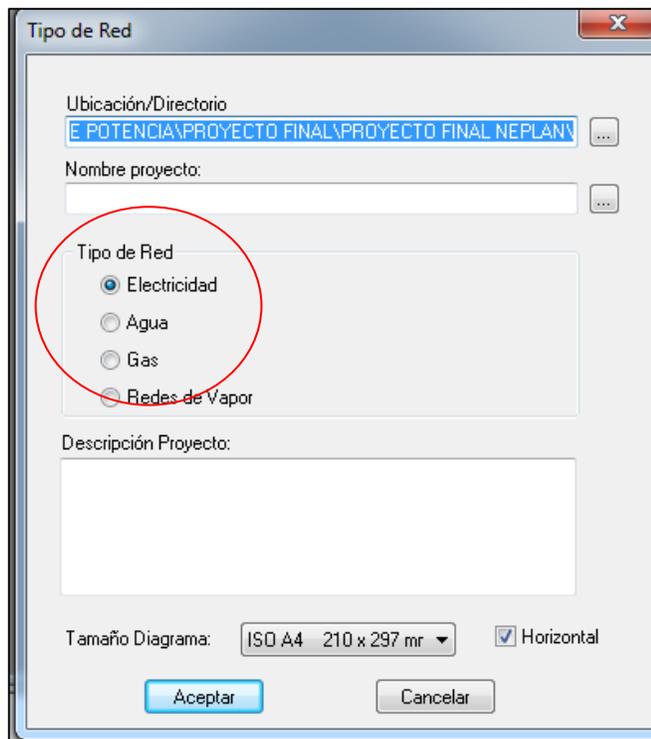
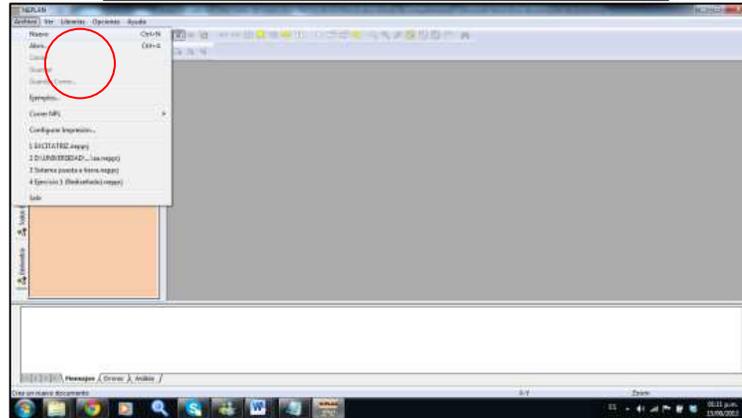
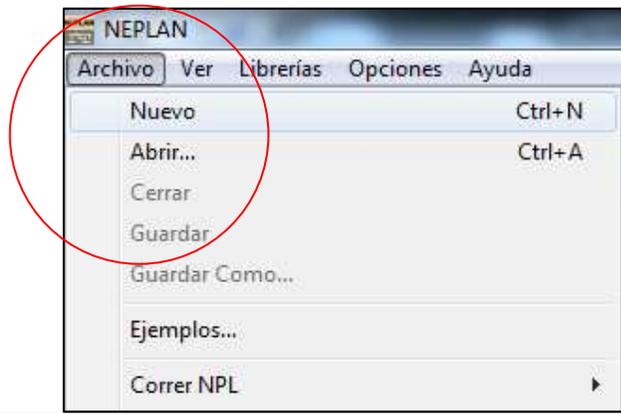
#### **Específicos**

- Aprender el manejo del software para el diseño de sistemas eléctricos.
- Interpretar de manera pertinente los valores tomados del análisis del circuito por parte de NEPLAN.

### **TEORIA**

NEPLAN es una herramienta informática para analizar, planear, optimizar y simular redes eléctricas, de agua, gas y calefacción. La mejor y más amigable interfaz gráfica de usuario, permite desarrollar casos de estudio muy eficientemente. El software personalizable tiene un concepto modular y cubre todos los aspectos eléctricos en redes de Transmisión, Distribución, Generación/Industriales.

Para iniciar el diseño de un circuito de potencia se da la opción Archivo, luego nuevo y luego colocas el nombre del proyecto, posteriormente se selecciona el tipo de red (Eléctrica, agua, gas, red de vapor) que se quiere simular.



## INTERFASE DEL USUARIO

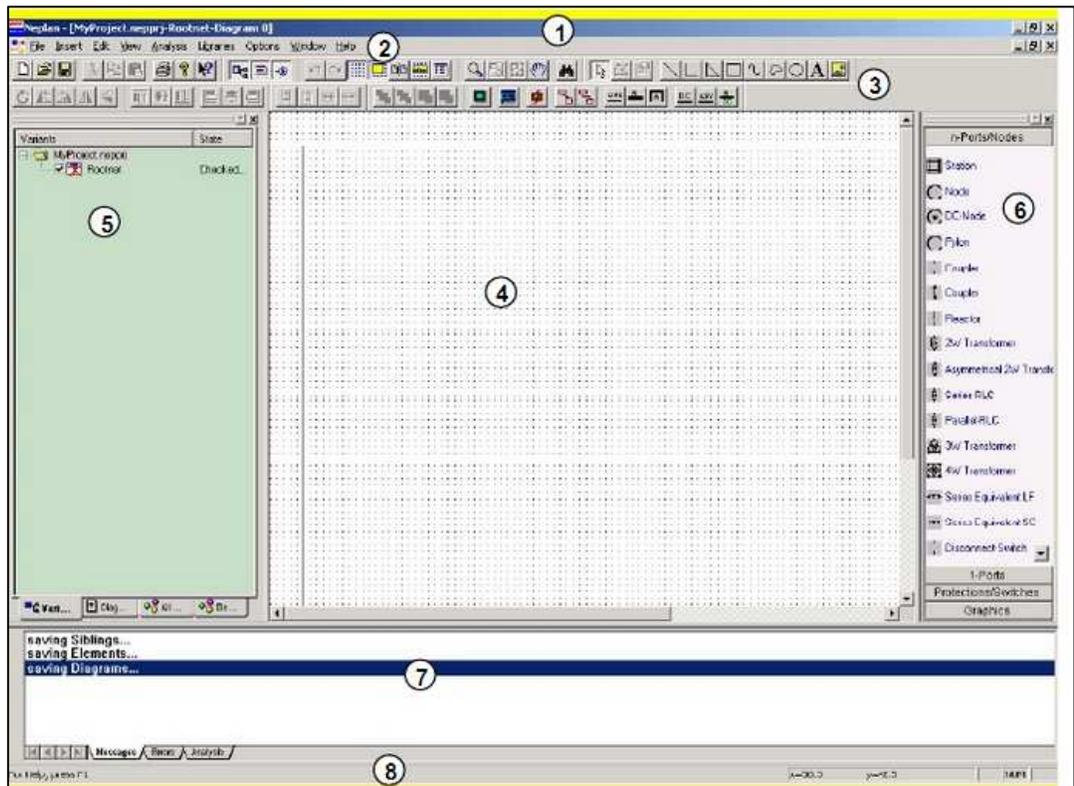


Fig. Ventana estándar del interface del usuario

Los números indican las siguientes ventanas estándar:

- 1 .Barra de titulo
- 2 .Barra de opciones de menú
- 3 .Barra de herramientas
- 4 .Área de trabajo con los diagramas y tablas de datos
- 5 .Administrados de variantes
- 6 .Ventana de símbolos
- 7 .Ventana de mensajes
- 8 .Barra de estado

### Barra de Herramientas

Todos los botones de comando están equipados con ayudas textuales desplegables, las cuales aparecen cuando el cursor es sostenido inmóvil por un momento sobre el botón, sin presionar ninguna tecla. Muchos comandos, los cuales pueden ser ejecutados en la barra de herramientas, también pueden ser encontrados en los menús respectivos.

## **Área de Trabajo**

En el área de trabajo pueden abrirse diferentes diagramas. El mismo diagrama puede ser usado para crear la red, construir los sistemas de control o elaborar dibujos.

## **Administrador de Variantes**

El Administrador de Variantes proporciona una buena visión de los proyectos y variantes abiertas. Pueden ser manejados nuevos proyectos y variantes, lo cual significa que estas pueden ser eliminadas, adicionadas, activadas o desactivadas. Desde el Administrador de Variantes, el usuario puede pasar hacia el Administrador de Diagramas, el cual administra los diagramas abiertos con sus capas gráficas.

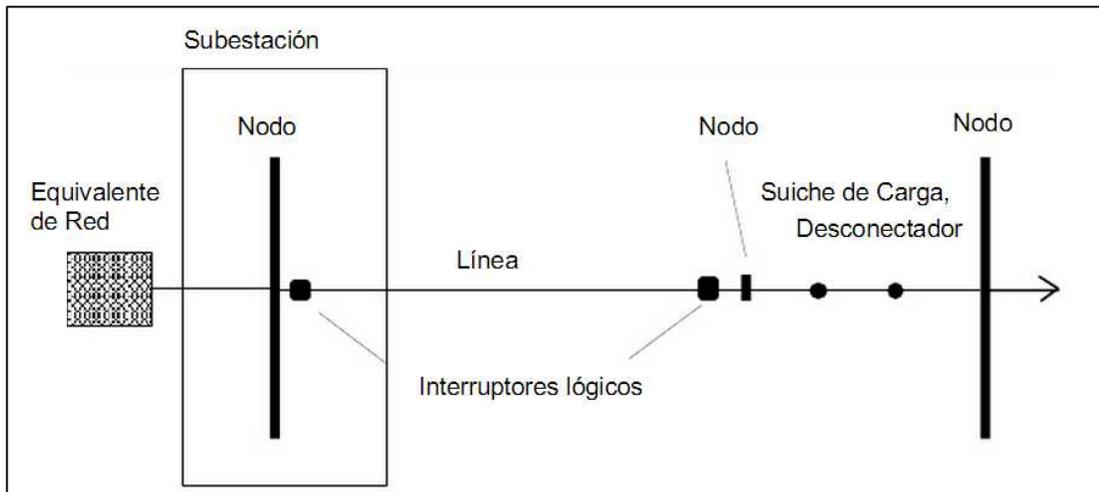
## **Ventana de Símbolos**

La Ventana de Símbolos contiene todos los símbolos de los elementos disponibles. Aparte de los símbolos estándares, para algunos elementos existen otros símbolos con una apariencia gráfica diferente, pero exactamente con las mismas características. Se pueden crear nuevos símbolos o modificar los existentes con la Librería de Símbolos.

## **Ventana de Mensajes**

La ventana de mensajes es el canal de comunicación con el usuario. Esta suministra información acerca de los procesos ejecutados, mensajes de error e información adicional.

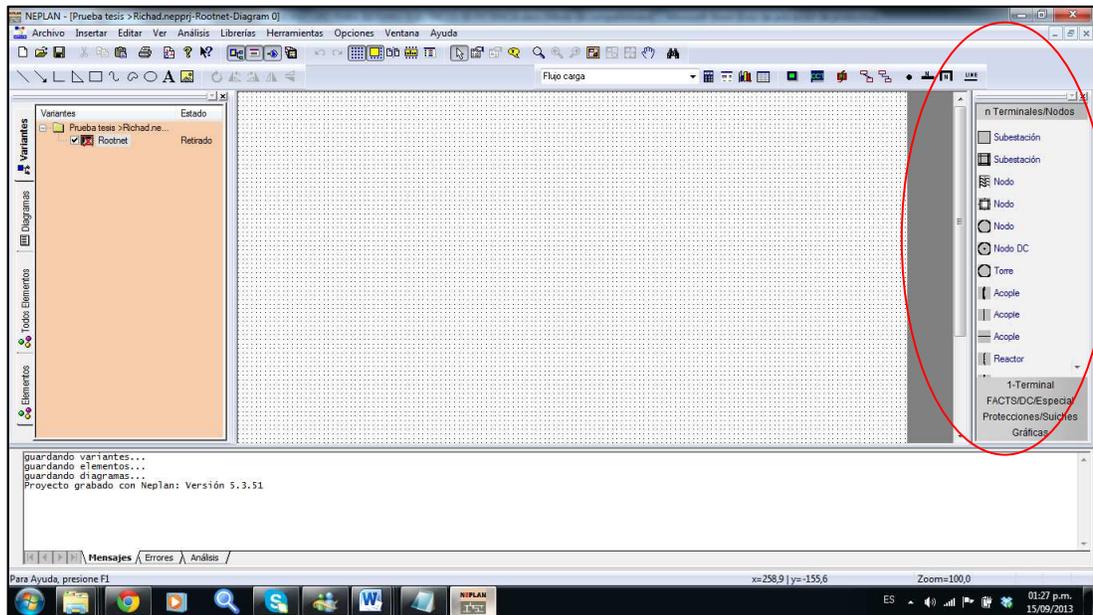
## CONCEPTOS BASICOS DE NEPLAN



De los componentes que existen los más importantes para iniciar el aprendizaje del software NEPLAN son los siguientes:

- Generador (Equivalente de red)
- Transformador
- Línea de Transmisión
- Nodo (Subestación)
- Carga

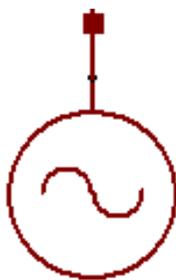
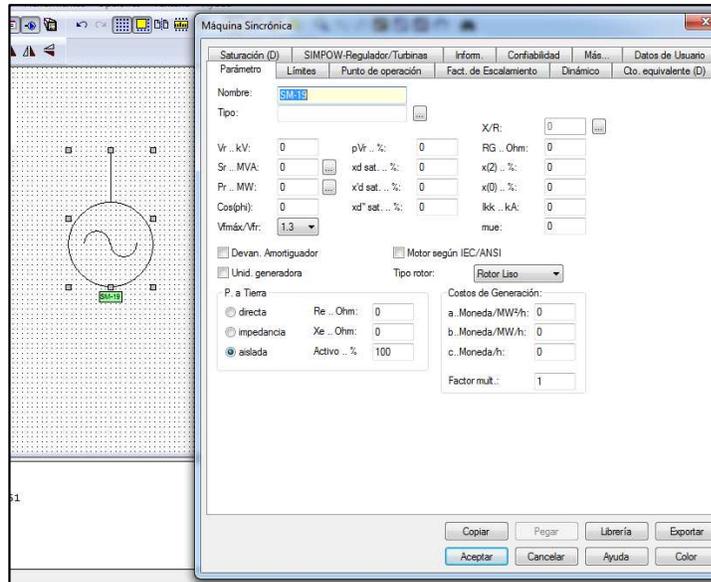
Al habilitar la configuración inicial ya se podrá iniciar con el montaje de circuito a simular.



NEPLAN cuenta con una zona de trabajo, en la parte superior una barra de opciones básicas como archivo, insertar, editar entre otras aplicaciones útiles, pero la barra más importante se encuentra en la parte derecha del software, aquí podrás encontrar los elementos eléctricos necesarios para los distintos diseños eléctricos que el software proporciona.

### Configuración de un generador:

Los datos del generador son los que se utilizan para definir las características de ellos en la simulación, estos datos son el **voltaje** al cual está generando, la **potencia aparente** que entrega y la **impedancia real y transitoria**, en la figura 1 vemos el símbolo del generador, y en la figura 2, observamos las casillas en las cuales se digitan los valores de fabricante del generador.



GEN 1(SM-58)

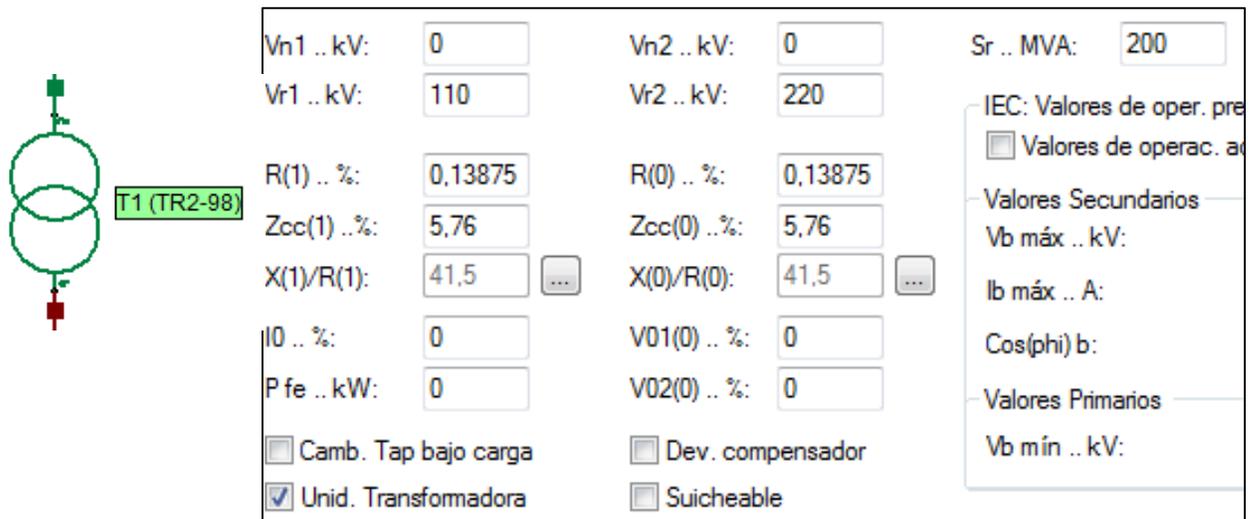
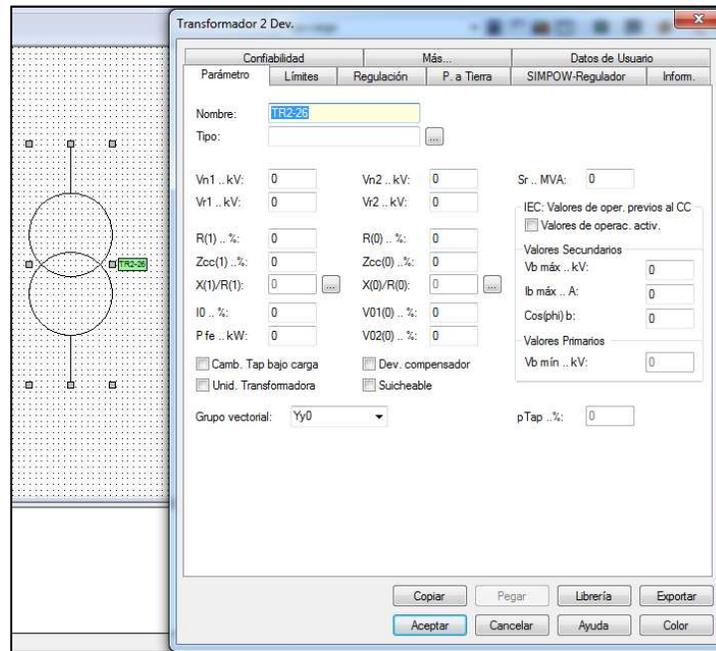
Vr .. kV:	16,5	pVr .. %:	0	x(2) .. %:	6,08
Sr .. MVA:	247,5	xd sat .. %:	6,08	x(0) .. %:	1,29
Pr .. MW:	222,75	x'd sat .. %:	4		
Cos(phi):	0,9	xd'' sat .. %:	2		

Devan. Amortiguador       Motor según IEC/ANSI  
 Unid. generadora      Tipo rotor: Rotor Liso

Los valores de impedancia, van acorde al la convencion de ser de secuencia positiva, negativa y cero, y ademas, el valor de x(0), se determina dividiendo x(2) entre 4.7, este ultimo numero (4,7) se utiliza para los generadores que funcionan con un mecanismo hidroelectrico, y por ultimo se asumio el factor de potencia en 0.9 y los valores de x'd sad .. %: y xd'' sad .. %: también se asumen solo por cuestiones de aprendizaje, más adelante se profundizara en esos detalles, por lo pronto solo se necesita la información básica de un generador.  $x_d \text{ sad} = x(2)$ .

### Configuración de un transformador:

Los datos del transformador son los que se utilizan para definir las características de ellos en la simulación, estos datos son, la relación de voltajes, potencia aparente, y las impedancias.

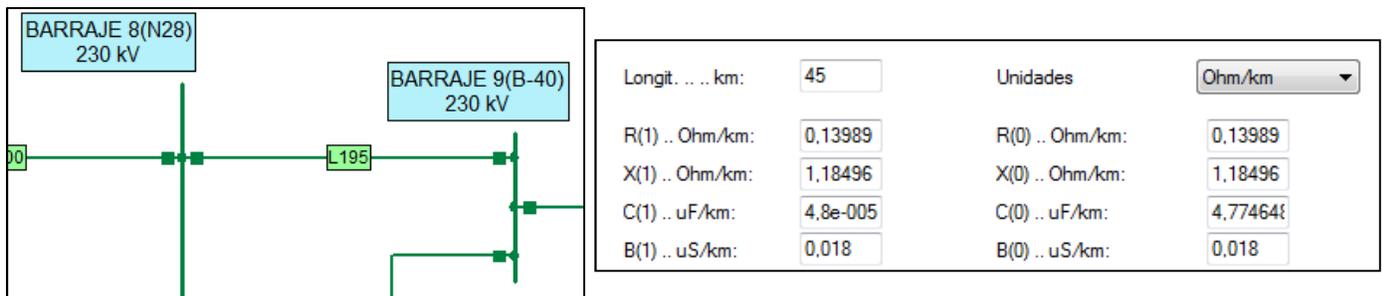


Los valores de impedancia, van acorde a la convencion de ser de secuencia positiva, negativa y cero, en otras palabras, digitamos para el transformador los valores de potencia **Sr .. MVA:** , tensión del primario del transformador **Vr1 .. KV:**, tensión del secundario **Vr2 .. KV:** el valor de impedancia **Zcc(1) ..%** y **Zcc(0) ..%**.

## Configuración del tramo (Nodos y líneas):

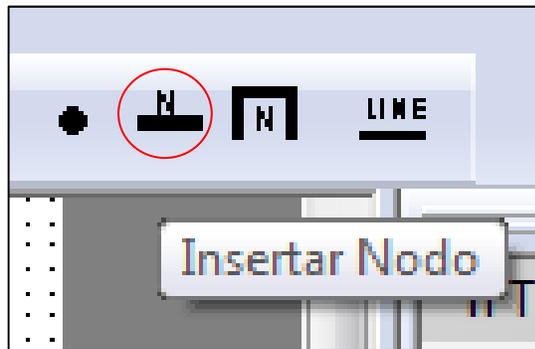
Las líneas de transmisiones, son unos materiales conductores, capaces de transmitir grandes potencias de energía, estos cables, soportan altos flujos de corriente, dichos materiales poseen unas características especiales, datos y variables que hay que tenerlas en cuenta para el diseño de sistemas de potencia.

Cada tramo, tiene sus propias características de fabricación, tales características hay que tenerlas en cuenta, el software las necesita para simular de la mejor manera, por eso cada vez que se va a simular un tramo hay que digitar sus parámetros característicos, y con ayuda de estos datos, el software, calcula  $C(1)$  y  $C(0)$  que son valores de capacitancia que se presentan en las líneas y que dependen de la tensión, la potencia de transmisión entre otros factores.



Como pueden ver en la imagen se tiene un ejemplo de dos nodos a un nivel de tensión de 230kV, al configurar estos tramos el software pide digitar la distancia del tramo, la resistencia y la impedancia del mismo en Ohm/Km, el resto de los valores son calculados por el software.

Para inserta un nodo hay que dirigirse a la barra de herramientas y buscar la opción NODO.



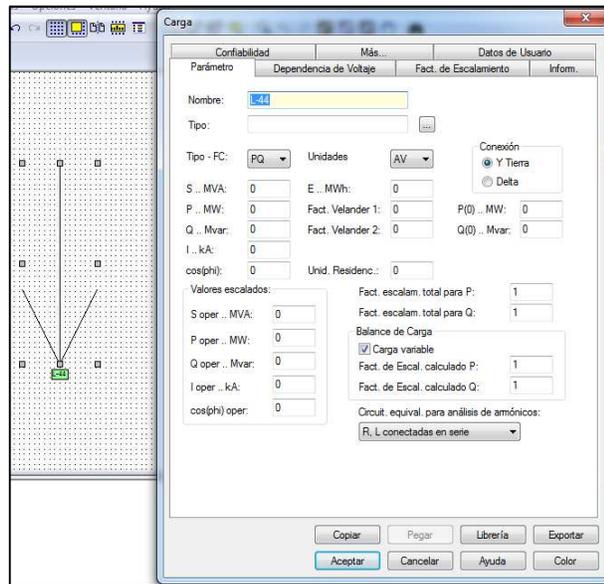
Luego de seleccionar este botón el mouse se transforma en una cruz indicando que ya puede dibujar el símbolo de nodo que se representa con una línea, este nodo se configura con el nivel de tensión y la frecuencia requerida por el mismo recordando que los nodos representan el nivel de tensión de la subestación.



Luego de que se tengan los nodos montados, es ahí donde se instala la línea de transmisión con sus respectivos kilómetros y características básicas (Longitud, resistencia e impedancia).

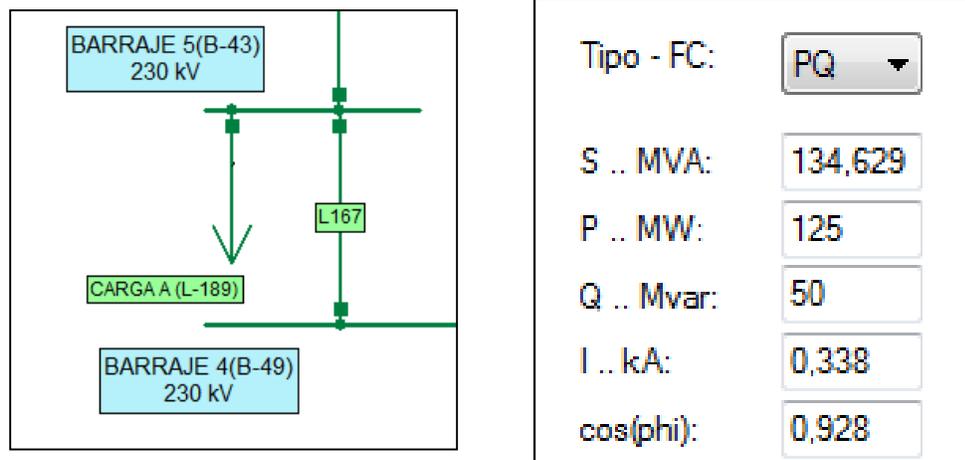
### **Configuración de carga a alimentar:**

La carga, son los elementos de componentes resistivas, capacitivas e inductivas que se pueden conectar en los sistemas de potencias, estas cargas, necesita, dependiendo de su tipo y tamaño, exigen una determinada cantidad de potencia para su buen funcionamiento, como son los motores, las bombas, calderas, edificaciones, industrias, entre otras más. A continuación veremos las cargas que existen en este sistema de potencia y sus características más importantes, para así, poder ser instalada y simulada y evaluar entre otras cosas si el sistema supe con la demanda que estas cargas exigen.



Las características de la carga, son los valores de potencia aparente, activa, reactiva y factor de potencia, la corriente que demanda esta carga el software la calcula y la muestra en la casilla correspondiente a I .. kA: que está ubicada en el mismo cuadro de dialogo que se muestra al dar doble clic en la carga. Las cargas van conectadas a los barrajes.

Aquí un ejemplo:



En tipo FC se coloca la opción PQ que quiere decir valores de potencia activa y reactiva, de esta manera el mismo software calculara la potencia aparente, de lo contrario no lo calculara. Hay otra opción FC en la que solo digitas la potencia

aparente y el factor de potencia y automáticamente se calcula P y Q, todo esto es opcional para el usuario.

## PROCEDIMIENTO

A continuación se le muestra un diseño de sistema de potencia el cual deberá realizar desde su computador siguiendo las indicaciones ya mencionadas para la simulación de estos sistemas.

Características de los elementos:

Generador SM – 113:

- Tensión: 22kV
- Potencia: 90 MVA
- FP: 0.89
- Impedancia:  $x_d \text{ sad\%} = 18$  ;  $x(2)\% = 18$ ;  $x'_d \text{ sad\%} = 4$  ;  $x''_d \text{ sad\%} = 2$ . Nota: Recuerde digitar el valor de  $x(0)\%$ .

Transformador TR2 – 114

- Tensión: 22kV – 220kV
- Potencia: 50 MVA
- R(1) y R(0): 0,33293
- Zcc(1) y Zcc(0): 10

Transformador TR2 – 115

- Tensión: 22kV – 110kV
- Potencia: 40 MVA
- R(1) y R(0): 0,2283
- Zcc(1) y Zcc(0): 6,4

Transformador TR2 – 116

- Tensión: 220kV – 11kV
- Potencia: 50 MVA
- R(1) y R(0): 0,21403
- Zcc(1) y Zcc(0): 6

### Transformador TR2 – 117

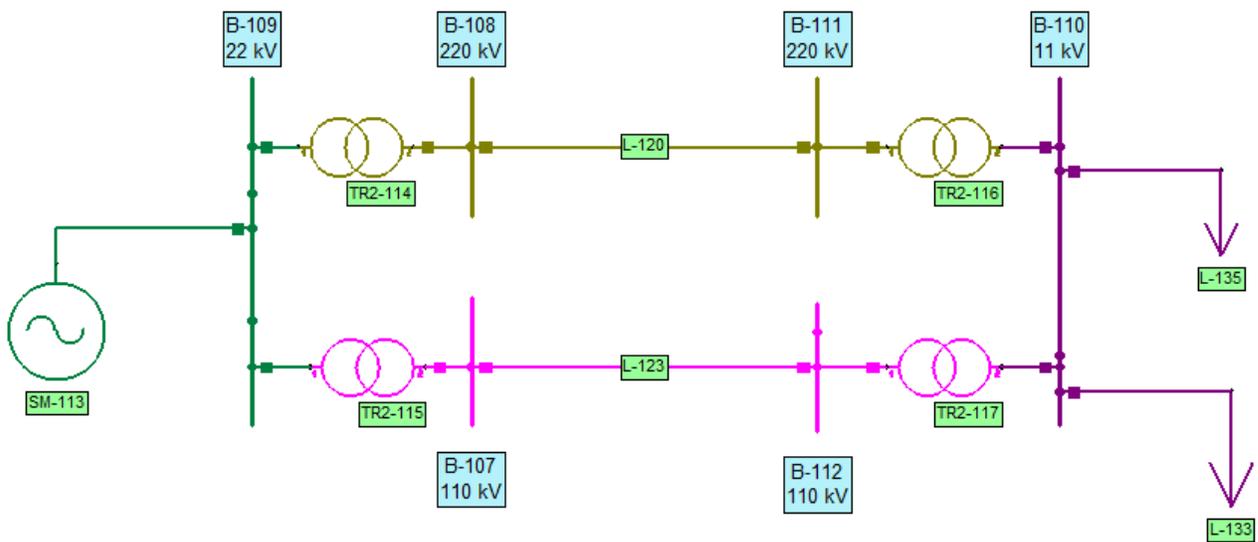
- Tensión: 110kV – 110kV
- Potencia: 40 MVA
- $R(1)$  y  $R(0)$ : 0,28537
- $Z_{cc}(1)$  y  $Z_{cc}(0)$ : 8

### Carga L – 135

- S: 66,5 MVA
- P: 53,2 MW
- FP: 0,86

### Carga L – 133

- S: 57 MVA
- P: 34,2 MW
- FP: 0,6



Ejercicio de aplicacion

▪ **Pregunta 1:**

Como se calcula para el caso del generador el valor de impedancia  $X(0)$  teniendo en cuenta que el generador es de carácter hidroeléctrico.

---

---

---

---

▪ **Pregunta 2:**

EL software NEPLAN como identifica o nombra en su barra de herramientas al generador y que condición hay que activar en el software para que este se comporte como un generador eléctrico.

---

---

---

---

▪ **Pregunta 3:**

Luego de montar el circuito el software tiene la opción de evaluar si hay alguna anomalía en el montaje. ¿Qué botón de la barra de herramientas ofrece esta función y que resultado muestra este al finalizar su montaje?

---

---

---

---

## INFORME DE LA PRÁCTICA

**TEMA DE LA PRÁCTICA:**

FECHA: día \_\_\_\_\_ mes \_\_\_\_\_ año \_\_\_\_\_

**INTEGRANTES:**

_____	_____
_____	_____

## **Anexo 6. CÁLCULO DE PÉRDIDAS DE TENSIÓN ( $\Delta V$ ) Y PÉRDIDAS DE POTENCIA ( $\Delta S$ ) DE UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.**

### **OBJETIVOS**

#### **General**

- Realizar los cálculos de pérdida de tensión ( $\Delta V$ ) y pérdida de potencia de un sistema eléctrico de potencia basado en las normativas técnicas colombianas para el cumplimiento estándar y eficiente del sistema, teniendo como guía el instructivo anterior de pérdidas de tensión y potencia.

#### **Específicos**

- Calcular la pérdidas de tensión y pérdidas de potencia en un sistema eléctrico.
- Calcular la tensión total del generador.
- Interpretar los resultados obtenidos en el sistema.

### **REQUISITOS TEORICOS**

Antes de llegar al laboratorio los estudiantes deben documentarse en los siguientes temas:

- Conceptos de líneas de transmisión y los componentes que la conforman.
- Conceptos de pérdidas de tensión y pérdidas de potencia en un sistema eléctrico.
- Tipos de sistema de potencia
- Interpretación de pérdidas de tensión y potencia en un sistema de potencia.

## PROCEDIMIENTO

Para el cálculo de pérdida de tensión y pérdida de potencia en un sistema eléctrico de potencia, se necesitan seguir los siguientes pasos a cabalidad:

- Identifica y visualizar el tipo sistema eléctrico de potencia a trabajar.
- Establecer como son las condiciones de fuente, corriente y cuerpos para operar.
- Se aplica la formula  $\Delta V = \frac{PR+QXL}{V_{OUT}} + j \frac{PR+QXL}{V_{OUT}}$  para hallar la perdida de tensión,

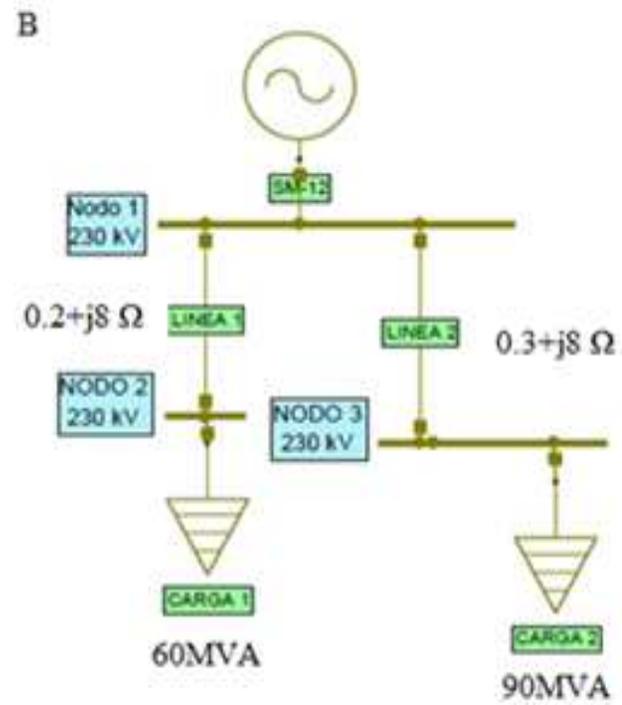
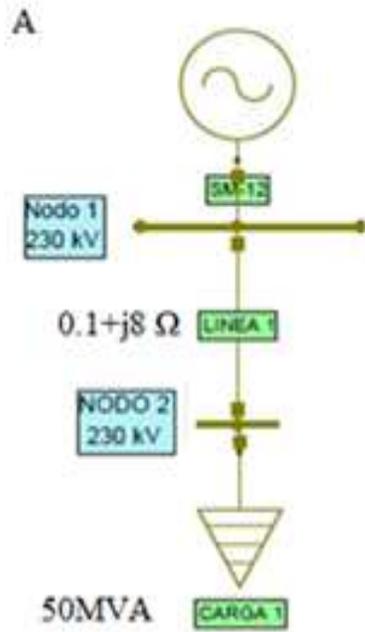
### Donde:

P=potencia activa de la carga  
R=resistencia del conductor  
X=reactancia del conductor  
Q=potencia reactiva de la carga  
Vout= tensión de la carga  
Z= impedancia de la línea

- Después se aplica la formula  $\Delta S = \frac{P^2+Q^2}{V_{out}^2} * Z_{Linea}$  para hallar pérdida de potencia.
- Interprete los resultados.

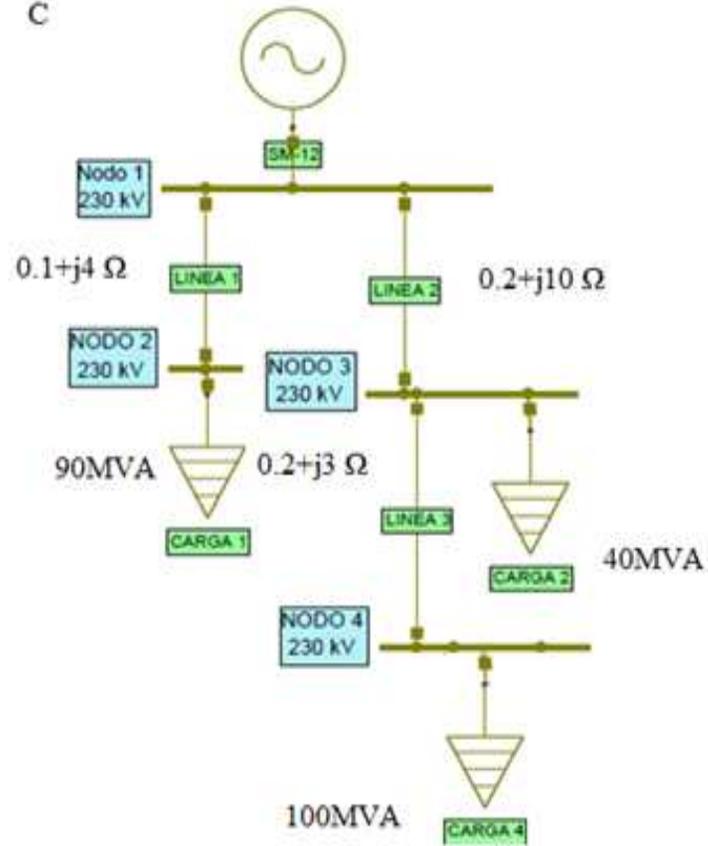
## Ejercicios

A partir del análisis respectivo y utilizando los conceptos previos realice los siguientes ejercicios.

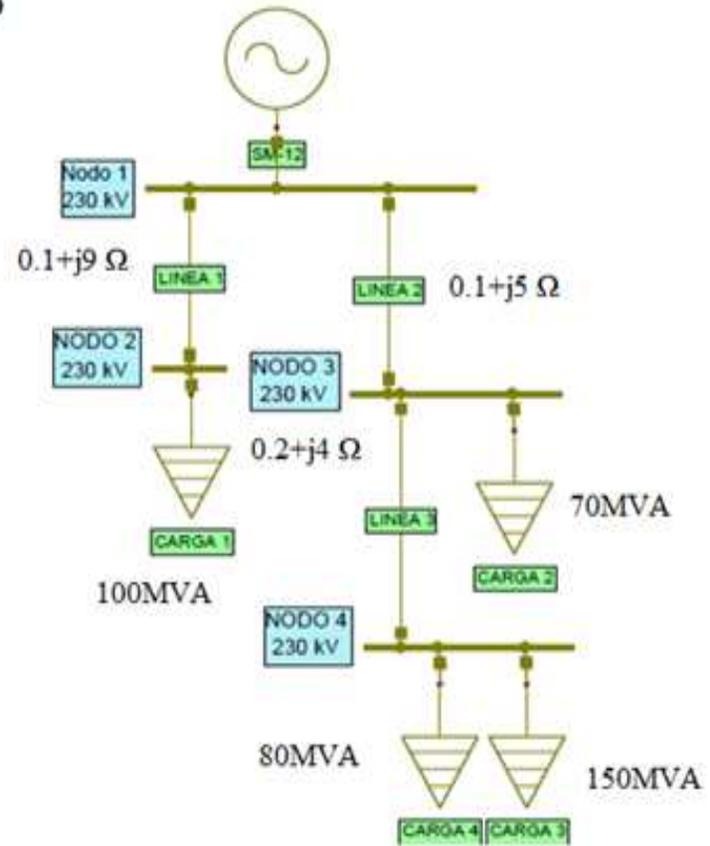


Ejercicio de aplicación

C



D



Ejercicio de aplicación

## INFORME DE LA PRÁCTICA

**TEMA DE LA PRÁCTICA:**

FECHA: día \_\_\_\_\_ mes \_\_\_\_\_ año \_\_\_\_\_

**INTEGRANTES:**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## **Anexo 7. CÁLCULOS DE PORCENTAJE REGULACIÓN DE TENSIÓN Y POTENCIA APOYADO EN EL INSTRUCTIVO ANTERIOR.**

### **OBJETIVOS**

#### **General**

- Realizar los cálculos de porcentajes de regulación de tensión y potencia, basados en las normativas técnicas colombianas para el cumplimiento estándar y eficiente del sistema, teniendo como guía el instructivo anterior de pérdidas de tensión y potencia.

#### **Específicos**

- Calcular la tensión de la carga.
- Calcular la tensión total del generador.
- Interpretar los resultados obtenidos en el sistema.

### **REQUISITOS TEORICOS**

Antes de llegar al laboratorio los estudiantes deben documentarse en los siguientes temas:

- Conceptos de regulación de tensión.
- Interpretación de pérdidas de tensión y potencia en un sistema de potencia.
- Remitirse a el proyecto de grado (Guía de trabajo independiente para SP (sistemas de potencia – Luis Aguas y Richard Jiménez).

## PROCEDIMIENTO

Para el cálculo de regulación de tensión en un sistema eléctrico de potencia, se necesitan seguir los siguientes pasos a cabalidad:

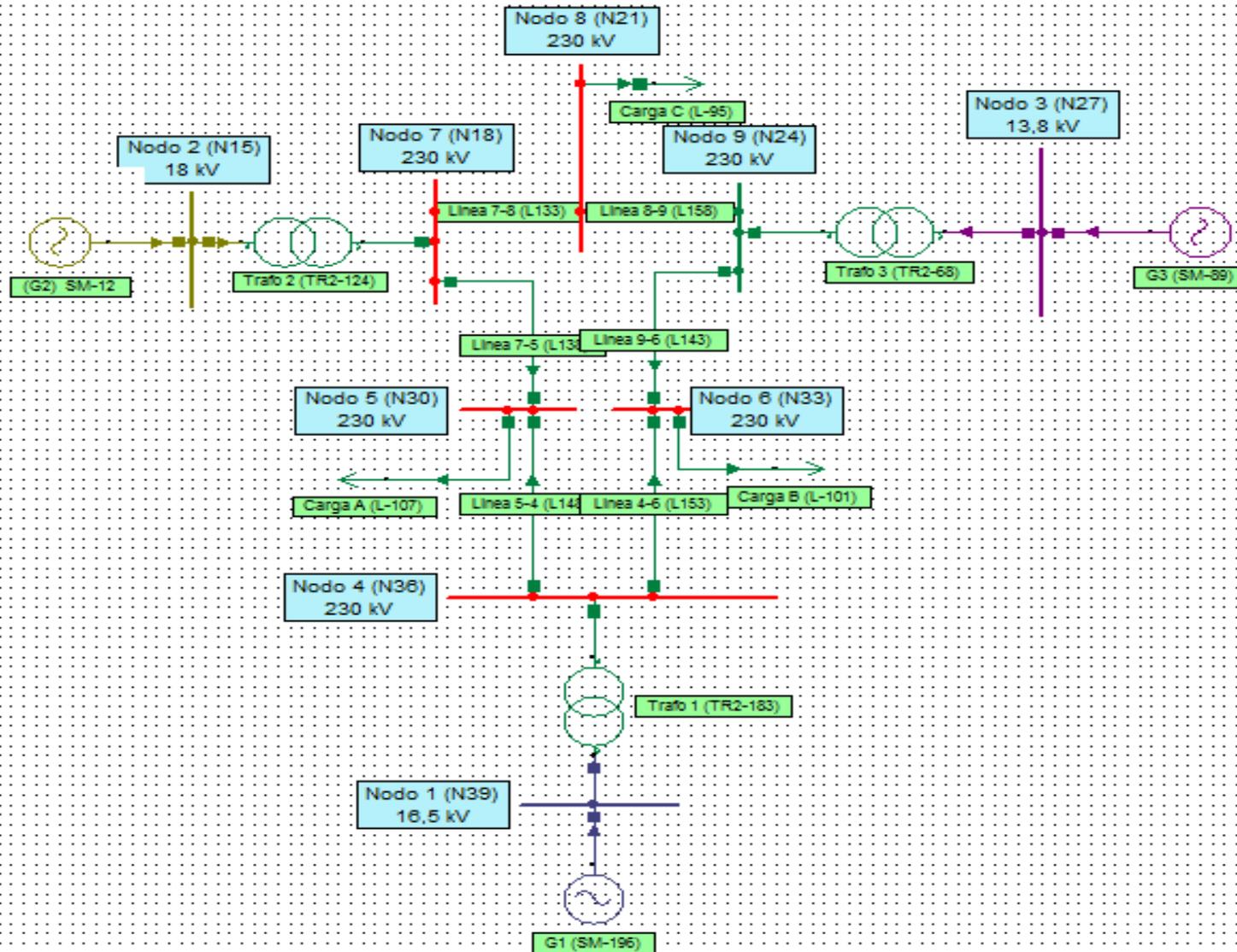
- De acuerdo al ejercicio ya realizado en la guía anterior, cálculos de pérdidas de tensión y potencia en los diferentes tramos del circuito, calcule el  $V_{gen} = \Delta V + V_{carga}$  y  $S_{gen} = \Delta S + S_{carga}$
- Aplique la fórmula de regulación de tensión.  $\%Reg = \frac{\Delta V}{V_{out}}$ .
- Interprete los resultados.

## EJERCICIOS

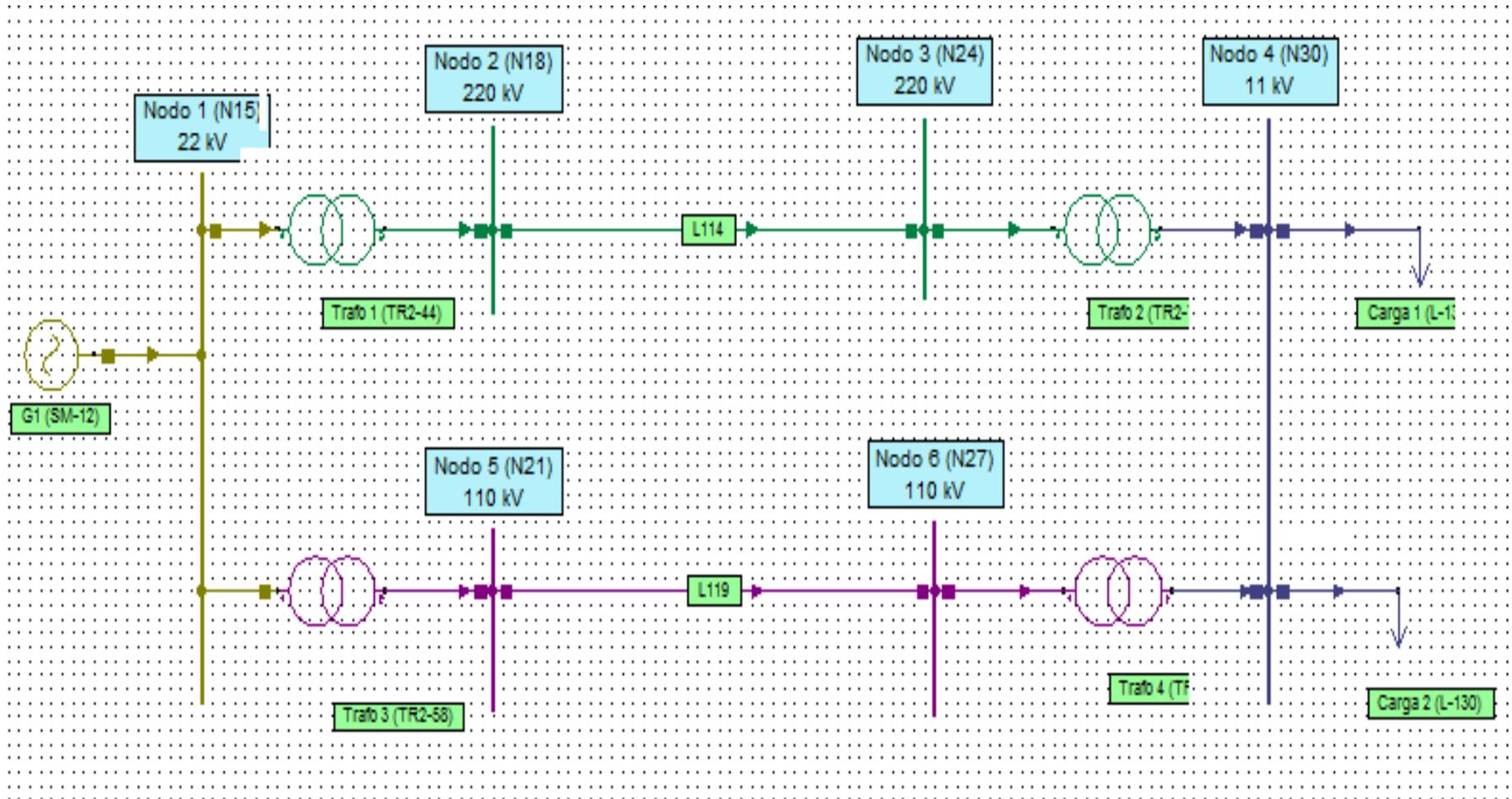
Para el primer y segundo ejercicio, los estudiantes deberán seleccionar las distancias de las líneas de transmisión logrando una diferencia de resultados entre los diferentes grupos y, adicional a lo mencionado, una interpretación de cualitativa del sistema eléctrico de potencia.

Por otro lado, usted determinará, de acuerdo a los barrajes, las tensiones de operación nominal de los transformadores y si son elevadores o reductores; al igual que la potencia del generador y las impedancias necesarias para el desarrollo del ejercicio.

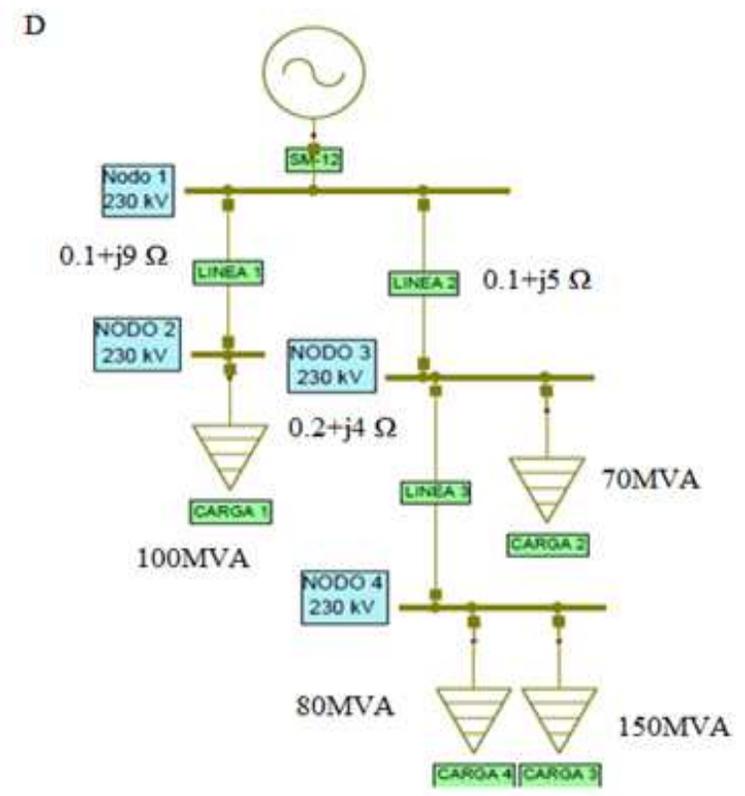
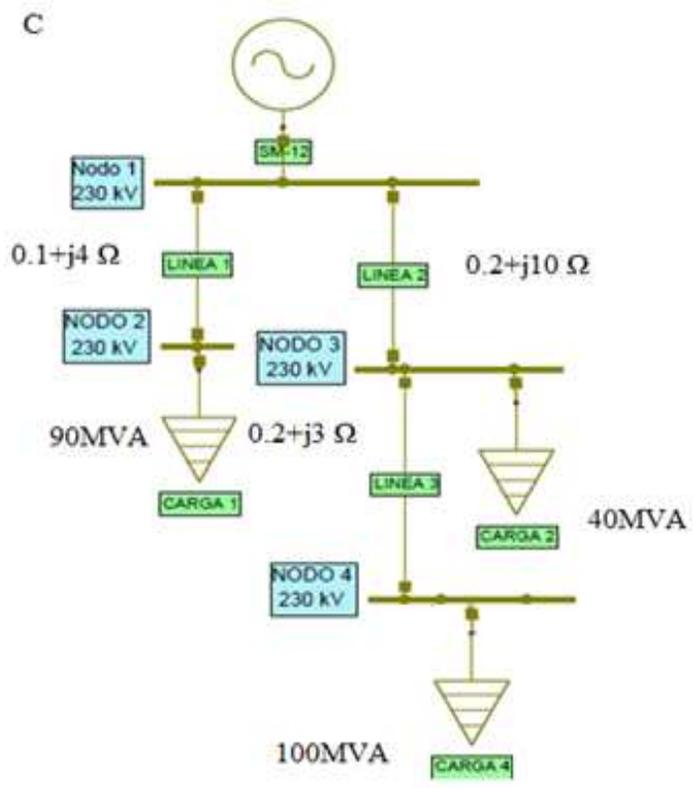
### Ejercicio de aplicación



### Ejercicio de aplicación



Ejercicio de aplicación



## Análisis de los datos y respuestas a las preguntas

▪ **Pregunta 1:**

¿Por qué en la fórmula de  $V_{gen}$  se suman las pérdidas de tensión con la tensión de la carga?

---

---

---

---

---

▪ **Pregunta 2:**

Defina el concepto de regulación de tensión.

---

---

---

---

---

▪ **Pregunta 3:**

Según la normativa eléctrica colombiana ¿Cuál es el porcentaje de regulación de tensión permitido por tramos?

---

---

---

---

---

▪ **Pregunta 4:**

Según la normativa eléctrica colombiana ¿Cuál es el porcentaje de regulación de tensión permitido en el circuito desde el punto de inicio hasta la entrega de energía a la carga?

---

---

---

---

---

## INFORME DE LA PRÁCTICA

**TEMA DE LA PRÁCTICA:**

FECHA: día \_\_\_\_\_ mes \_\_\_\_\_ año \_\_\_\_\_

**INTEGRANTES:**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## **Anexo 8. PARÁMETROS DE LÍNEAS DE TRASMISIÓN.OBJETIVOS**

### **General**

- Conocer las líneas de transmisión, parámetros, características y uso en los sistemas eléctricos.

### **Específicos**

- Identificar una línea de transmisión de energía a partir de sus distancias.
- Entender la topología de líneas de transmisión.
- Interpretar cada topología (modelo) de línea.

### **REQUISITOS TEORICOS**

Antes de llegar al laboratorio los estudiantes deben documentarse en los siguientes temas:

- Conceptos de líneas de transmisión y los componentes que la conforman.
- Características de una línea de transmisión.
- Modelos existentes y funcionamiento.

### **TEORIA**

Las líneas de transmisión de energía, son el conjunto de dispositivos para transportar o guiar la energía eléctrica desde Una fuente de generación a los centros de consumo (las cargas). Y estos son utilizados normalmente cuando no es costeable producir la energía eléctrica en los centros de consumo o cuando afecta el medio ambiente (visual, acústico o físico), buscando siempre maximizar la eficiencia, haciendo las perdidas por calor o por radiaciones las más pequeñas posibles.

El modelo adecuado de una línea depende del tipo de estudio para el cual se usara, y en caso de una línea de transmisión funcionando en régimen estacionario, esta puede ser representada mediante un circuito equivalente con parámetros concentrados.

Las líneas de transmisión de energía, manejan modelos cuadripolos y simplificados.

### Modelos cuadripolos

Un modelo cuadripolo puede representarse con un circuito "π" o "T" de parámetros concentrados, según se muestra en la siguiente figura:

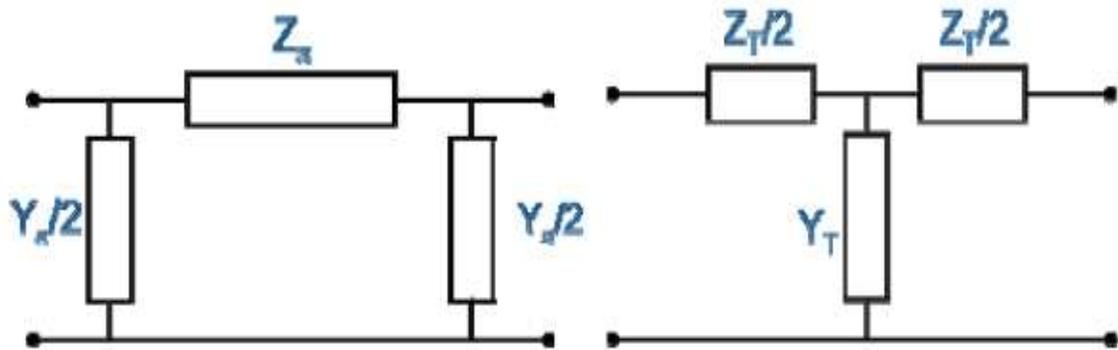


Figura 1. Cuadripolos "π" y "T"

Una aplicación típica de modelos de líneas como cuadripolos con elementos concentrados en la resolución de flujos de carga, en donde se prefiere el circuito "π" en lugar del "T" dado que este último tiene un nodo adicional, lo cual incrementa innecesariamente la dimensión de las matrices, y consecuentemente del tiempo de cálculo.

Independientemente del circuito utilizado para representar el cuadripolo, es posible obtener los valores de impedancia ( $Z$ ) y admitancia ( $Y$ ) en función de constantes ABCD y viceversa.

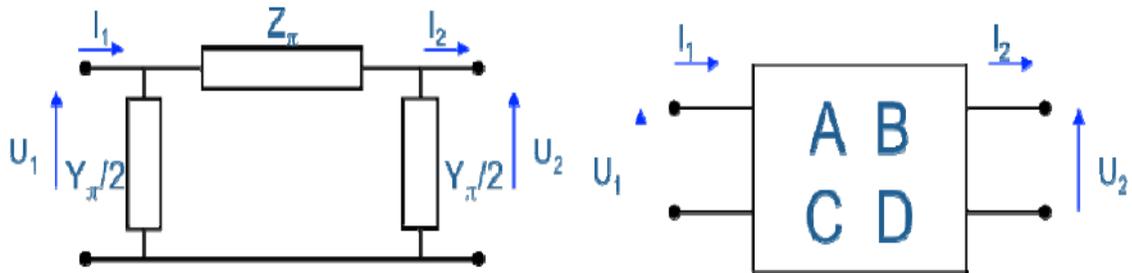


Figura 2. Funciones de constantes y representaciones

### Modelos simplificados

Basados en función de la longitud de la línea. Solo para análisis de 50 o 60 Hz, puede considerarse que la línea es corta, media, o larga según los siguientes criterios:

#### Línea Corta

- Es cuando puede despreciarse su admitancia transversal. Es en general razonable considerar así a las líneas de longitud inferior a 80 km aproximadamente, o de hasta 132 Kv.

#### Línea Media

- Para las longitudes de 80 a 250 km, en donde no es correcto despreciar su admitancia, aunque todavía puede considerarse a los términos hiperbólicos iguales a la unidad.

#### Línea Larga

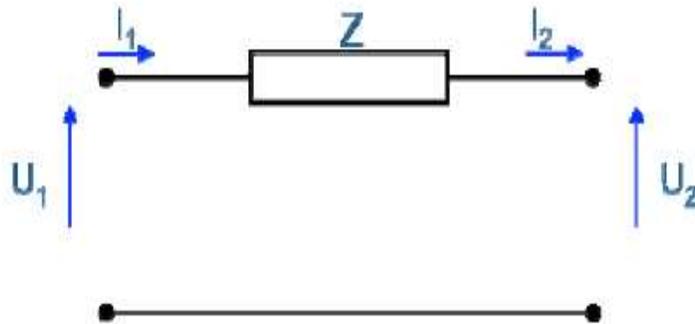
- Son aquellas líneas de longitud mayor a 250 km, en donde no se puede despreciar los términos hiperbólicos, y por lo tanto debe utilizarse el circuito "π" exacto

Es de mencionar sin embargo que los términos de corta, media y larga, no está únicamente asociados a la longitud en km de la línea sino que también hay que considerar la frecuencia a la cual hay que utilizar el modelo. A manera de ejemplo, para una línea de 50 km de longitud deberá utilizarse un modelo de línea larga si el análisis del comportamiento de la línea se hará a 5000 hz,

Ejemplo:

### EQUIVALENTE “ $\pi$ ” DE UNA LINEA CORTA

Dado que para una línea corta puede despreciarse su admitancia transversal y, el circuito “ $\pi$ ” de la misma se transforma en el siguiente



Con una simple inspección del mismo, se deduce que:

$$U_1 = U_2 + ZI_2$$

$$I_1 = I_2$$

Y por lo tanto

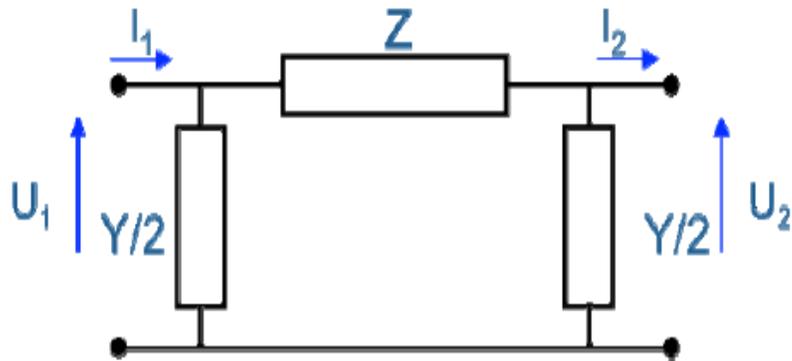
$$A = 1$$

$$B = Z$$

$$C = 0$$

$$D = A = 1$$

## EQUIVALENTE “ $\pi$ ” DE UNA LINEA MEDIA



Aplicando ley de Kirchhoff al circuito.

$$U_1 = U_2 + ZI_L \quad \text{con} \quad I_L = I_2 + \frac{U_2 Y}{2}$$

$$U_1 = \left( U_2 \frac{Y}{2} + I_2 \right) \cdot Z + U_2$$

$$U_1 = \left( \frac{ZY}{2} + 1 \right) \cdot U_2 + ZI_2$$

$$I_1 = Y \cdot \left( 1 + \frac{ZY}{4} \right) \cdot U_2 + \left( 1 + \frac{ZY}{2} \right) \cdot I_2$$

Con lo cual se deduce que:

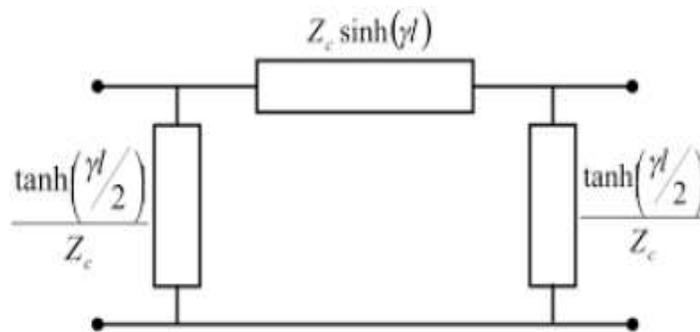
$$A = \left( \frac{ZY}{2} + 1 \right)$$

$$B = Z$$

$$C = Y \cdot \left( 1 + \frac{ZY}{4} \right)$$

$$D = A = \left( 1 + \frac{ZY}{2} \right)$$

### EQUIVALENTE “ $\pi$ ” DE UNA LINEA LARGA



Aplicando Kirchhoff

$$U_1 = U_2 \cosh \gamma l + I_2 Z_c \sinh \gamma l$$

$$I_1 = \frac{U_2}{Z_c} \sinh \gamma l + I_2 \cosh \gamma l$$

Por lo tanto

$$A = \cosh \gamma l$$

$$B = Z_c \sinh \gamma l$$

$$C = \frac{1}{Z_c} \sinh \gamma l$$

$$D = A$$

## INFORME DE LA PRÁCTICA

**TEMA DE LA PRÁCTICA:**

FECHA: día \_\_\_\_\_ mes \_\_\_\_\_ año \_\_\_\_\_

**INTEGRANTES:**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## **Anexo 9. INSTRUCTIVO DE CALCULOS PARA SISTEMAS POR UNIDAD OBJETIVO**

### **General**

- Conocer los sistemas por unidad y las grandes ventajas que estos proporcionan a un diseño de sistemas eléctricos de potencia.

### **Específicos**

- Desarrollar cálculos de circuitos en sistemas por unidad.
- Comprender e interpretar los resultados y beneficios que se obtienen al manejar los SPU.

### **TEORIA**

El sistema por unidad de cualquier cantidad define como la relación entre esta cantidad y la cantidad base y se expresa como un decimal. En la Ingeniería Eléctrica, en el campo de los sistemas eléctricos de potencia, se expresan las cantidades eléctricas (potencia, tensión, Corriente, impedancia) como valores en por unidad.

$$X_{pu} = \frac{X \text{ Real}}{X \text{ Base}}$$

La relación en por ciento (%) es 100 veces el valor en por unidad (1/0). Ambos métodos de cálculo; el porcentual y el por unidad son más simples y más informativos que los voltios, amperios y ohmios reales.

El método por unidad tiene una ventaja sobre el porcentual: el producto de dos cantidades expresadas en por unidad se expresa también en por unidad, mientras que el producto de dos cantidades dadas en por ciento se debe dividir entre 100 para obtener el resultado en por ciento.

### **Ventajas**

Las ventajas que podemos encontrar en los cálculos por unidad, además de facilidad de cálculos, son las siguientes:

- Una de las ventajas principales de utilizar cálculos en por unidad en el análisis de sistemas eléctricos de potencia es que cuando se especifican apropiadamente las bases para las diferentes partes del sistema, los valores en por unidad de las impedancias en donde se encuentran, son iguales a aquellos vistos desde la otra parte. Por lo que solo es necesario calcular cada impedancia sobre la base en donde se encuentra. En resumen la gran ventaja proviene en que no se requieren cálculos para referir la impedancia de un lado del transformador al otro.
- Para otras partes del sistema, es decir para otros lados del transformador, se determinan los kilovoltios base de cada parte de acuerdo con las relaciones de voltaje línea a línea de los transformadores. Los kilo amperes base serán los mismos en todo el sistema.
- Generalmente la información disponible sobre la impedancia de los transformadores trifásicos está disponible en por unidad o en por ciento sobre la base de sus valores nominales.
- Para tres transformadores monofásicos conectados como una unidad trifásica, los valores nominales trifásicos se determinan de los nominales monofásicos de cada transformador. La impedancia en por ciento, de la unidad trifásica es la misma que la de los transformadores individuales.
- Generalmente los fabricantes especifican la impedancia de una pieza de equipo en por ciento o en por unidad sobre la base de los valores de placa nominales.
- Las impedancias en por unidad de maquinas del mismo tipo y valores nominales muy diferentes quedan dentro de un estrecho rango, aunque sus valores óhmicos difieran grandemente. Por esta razón es posible seleccionar, cuando no se conoce la impedancia, valores promedio tabulados razonablemente correctos.
- De una manera general, la experiencia de trabajar con valores en por unidad, familiariza con valores típicos de impedancia de los diferentes equipos, además de otras cantidades que tienen también un comportamiento visiblemente típico en los rangos por unidad como las corrientes de cortocircuito y los voltajes de los buses.
- La impedancia en por unidad una vez que es referida sobre una base apropiada es la misma independientemente del lado del transformador a la que este referida.

- La manera en que se conectan los transformadores en circuitos trifásicos no afecta a las impedancias en por unidad del circuito equivalente, aunque la conexión del transformador determine la relación de los voltajes base a los lados del transformador.

### **Requisitos teóricos**

Antes de llegar al laboratorio los estudiantes deben documentarse en los siguientes temas:

- Conocimientos de un sistema por unidad, ventajas, el por qué de su uso y para que se aplica.
- Formulas de cálculos para valores base, real y por unidad.
- Conocimientos de circuitos.
- Conocimientos de fallas en derivación.
- Cálculos de pérdidas de tensión y potencia, regulación de tensión.).

### **PROCEDIMIENTOS**

- Se divide el sistema eléctrico de potencia por zonas, tomando como guías o referencias los transformadores.
- Se toma la  $S_{base}$ , recomendable la mayor de los trafos, para cada zona.
- Se calcula la  $V_{base}$  para las diferentes zonas, determinando como  $V_{base}$  principal la tensión del generador.
- Se procede a calcular la impedancia base de cada una de las zonas
- Se realizan los cálculos para la corriente de las zonas.
- Luego de los procedimientos anteriores, se realizan los cálculos de las impedancias por unidad de cada uno de los equipos (transformadores y generadores) que estén en el sistema, teniendo en cuenta los valores de  $Z_{pu}$  y  $Z_{base}$ .
- Para los cálculos de  $Z_{pu}$  de cada transformador y/o generador, se realizan los siguientes procedimientos:
  - Se toma la  $Z_{pu}$  del dato de placa del trafa o generador.
  - Se calcula la  $Z_{base}$  del trafa y/o generador (esto se hace con la tensión que está manejando en esa zona y con la potencia aparenten del equipo)

- Se calcula la Zreal del transformador y/o generador para esa zona exactamente, este cálculo se realiza con la Zpu del dato de placa del equipo y la Zbase ya calculada en el punto 7.2.
- Luego de tener la Zreal, se calcula la Zpu, tomando como Zbase la impedancia del sistema que se maneja en esa zona.
- El resultado del procedimiento anterior, es la Zpu del trafo y/o generador para el sistema eléctrico en general.
- Se reorganiza el diagrama del sistema eléctrico de potencia, reemplazando cada uno de los transformadores por bobinas, adicionando los valores por unidad del sistema.
- Con todos los valores por unidad se proceden a realizar los cálculos solicitados por el docente.

### **FORMULAS NECESARIAS PARA LA EXPERIENCIA**

$$1. Z_{base} = \frac{V^2_{base}}{S_{base}}$$

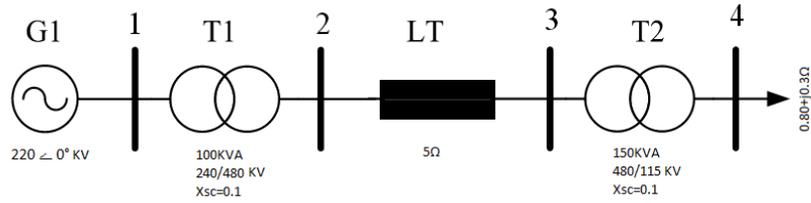
$$2. I_{base} = \frac{S_{base}}{V_{base} \cdot \sqrt{3}}$$

$$3. V_{base} - \text{trafo} = \text{tensionrecibida} \frac{\text{Tension secundario}}{\text{Tension primario}}$$

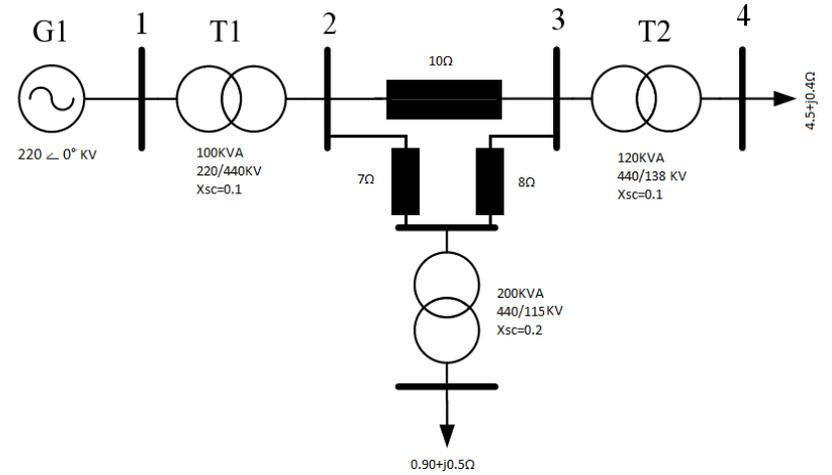
$$4. Z_{pu} = \frac{Z_{real}}{Z_{base}}$$

## Ejercicios

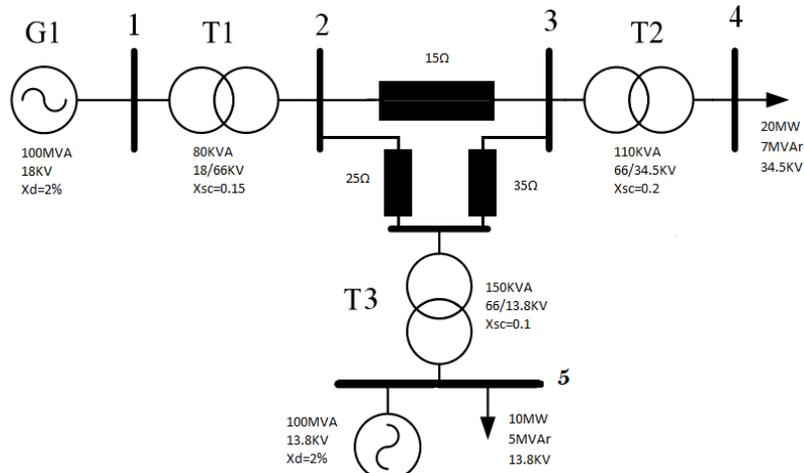
**A**



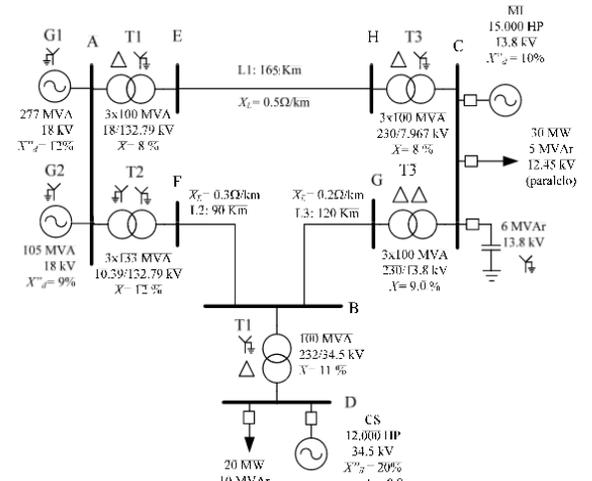
**B**



**C**



**D**



## INFORME DE LA PRÁCTICA

**TEMA DE LA PRÁCTICA:**

FECHA: día \_\_\_\_\_ mes \_\_\_\_\_ año \_\_\_\_\_

**INTEGRANTES:**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

## Anexo 10. FLUJO DE CARGA EN NEPLAN

### OBJETIVOS

#### GENERAL

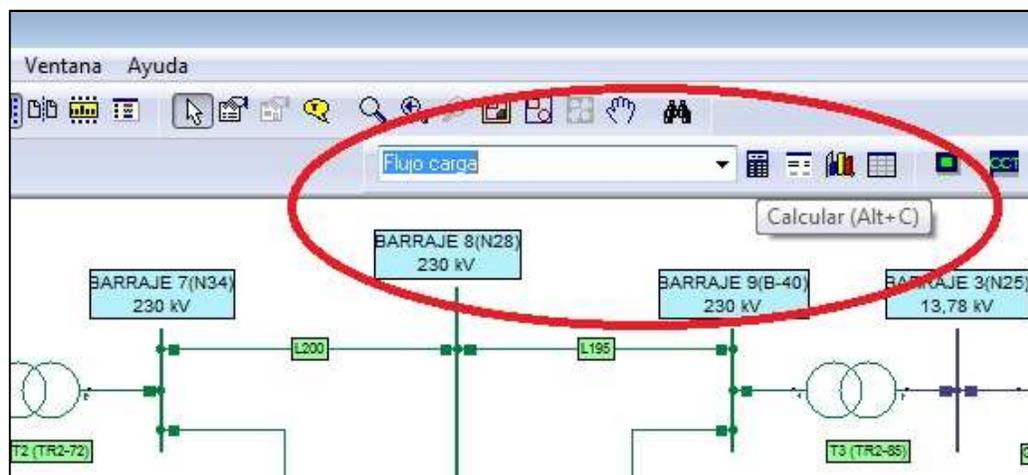
- Usar NEPLAN para simular un FLUJOS DE CARGA en sistemas de potencia eléctrica.

#### ESPECIFICOS

- Interpretar los datos característicos de NEPLAN para flujos de cargas
- Conocer el comportamiento de un sistema de potencia a través de flujos de cargas.

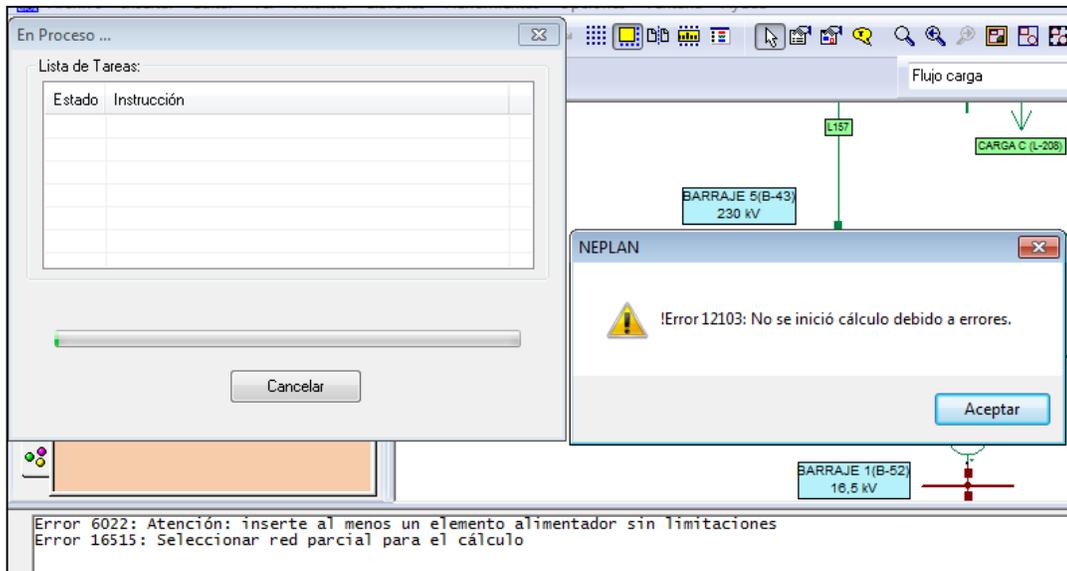
#### TEORIA

Para saber el comportamiento de un sistema de potencia, se debe seleccionar la opción, flujo de carga, luego de escogerla, se oprime el botón calcular, al realizar esta operación, pueden pasar dos cosas, primero, que el circuito este bien montado y su flujo de carga se comporte de manera normal y sin riesgo de daños, el caso contrario sería que muestre errores.



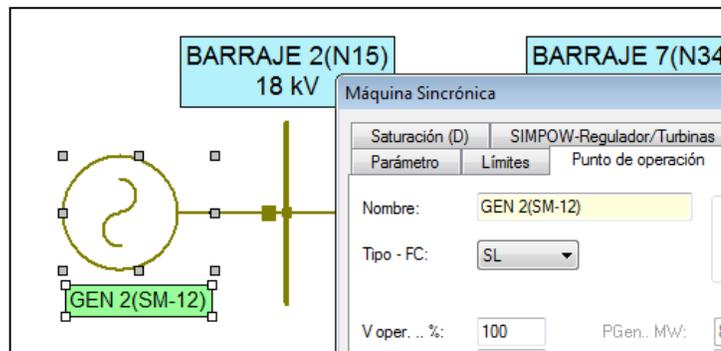
Para saber el comportamiento de un sistema de potencia, se debe seleccionar la opción, flujo de carga, luego de escogerla, se oprime el botón calcular, al realizar esta operación, pueden pasar dos cosas, primero, que el circuito este bien

montado y su flujo de carga se comporte de manera normal y sin riesgo de daños, el caso contrario sería que muestre errores.



Al realizar los cálculos de flujo de potencia, se pueden presentar errores como el de la foto anterior en el cuadro de errores, el error 6022, dice que insertemos al menos un elemento alimentador sin limitaciones, esto lo que quiere decir, es que ninguno de los generadores que están en el sistema, a sido destinado para que supla el 100% de la carga instalada, para solucionar este error, mínimo un generador debe comportarse como esclavo, ósea configurarlo de tal manera que funcione en la condición ya mencionada.

Una de las soluciones que se da en este caso, es asignar como esclavo, o modo SL, los generadores.



Luego de realizar esta configuración en el generador, se podrá observar vemos que el Tipo – FC se cambió a SL y el V de operación en % se coloca en 100, que significa que asumirá toda la carga que se le requiera esto en caso en que las otras unidades generadoras salgan de servicio.

### Inspección visual

El programa arroja cuadros de resultados correspondientes a los nodos, en este ejemplo los nodos 4, 5, 6, 7 y 8 tienen problemas ya que las caídas de tensión U(%) son menores al 90 %, esto podría traer problemas en los transformadores ya que sus barrajes estarían llegando tensiones diferentes a las nominales pudiendo generar problemas de funcionamiento.

	ID	Nombre	V	u	V áng	P carga	Q carga	P Gen	Q Gen
			kV	%	°	MW	MVar	MW	MVar
1	52	BARRAJE 1(B-52)	16,5	100	0	0	1487,089	64,626	0
2	15	BARRAJE 2(N15)	18	100	0	0	0	86,522	195,003
3	25	BARRAJE 3(N25)	13,78	100	0	0	0	132,355	229,997
4	49	BARRAJE 4(B-49)	115,62	50,27	-2	0	0	0	0
5	43	BARRAJE 5(B-43)	117,7	51,17	-3,4	125	50	0	0
6	46	BARRAJE 6(B-46)	145,225	63,14	-4,4	90	30	0	0
7	34	BARRAJE 7(N34)	201,646	87,67	-2,9	0	0	0	0
8	28	BARRAJE 8(N28)	204,527	88,92	-4,6	100	35	0	0
9	40	BARRAJE 9(B-40)	219,386	95,39	-1,4	0	0	0	0

circuitos por lo que se recomienda revisar detalladamente su instalación.

## PRACTICA

- **Pregunta 1:**

Realice a su circuito un análisis de flujo de carga e intérprete los errores que este le arroja en el caso que tenga.

---

---

---

---

- **Pregunta 2:**

Verifique si los parámetros mostrados por el flujo de carga tienen relación con los datos característicos del circuito, si encuentra algún valor desconocido interprete ese valor y sus características para con el circuito.

---

---

---

---

## INFORME DE LA PRÁCTICA

**TEMA DE LA PRÁCTICA:**

FECHA: día \_\_\_\_\_ mes \_\_\_\_\_ año \_\_\_\_\_

**INTEGRANTES:**

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

## **Anexo 11. DISEÑO DE UN SISTEMA INTERCONECTADO REGIONAL.**

### **OBJETIVOS**

#### **General**

- Realizar el diseño de un sistema que permita la interconexión de ciudades sus respectivas demandas.

#### **Específico**

- Entender y aplicar los diferentes parámetros de un diseño de interconexión regional.
- Identificar las diferentes operaciones capaces de desarrollar para la realización del diseño de interconexión regional.

#### **Requisitos Teóricos**

Antes de llegar al laboratorio los estudiantes deben documentarse en los siguientes temas:

- Conceptos de líneas de transmisión y parámetros que la conforman.
- Conceptos de circuito I y circuitos II.
- Conceptos de pérdidas de tensión y pérdidas de potencia en un sistema eléctrico.
- Tipos de sistema de potencia.
- Tipos de estructuras para líneas de transmisión.
- Interpretación de pérdidas de tensión y potencia en un sistema de potencia.
- Conceptos de regulación de tensión.
- Cálculos de matriz.
- Concepto de admitancia.

A continuación se muestra la variedad de formulas necesarias que pueden ser usados para la operación del diseño de un sistema de interconectado regional.

$$1. P = \cos\varphi * S \quad [MW]$$

$$2. Q = P \tan\varphi \quad [MVAR]$$

$$3. steel = 4,34 * \sqrt{l + 16P} \quad l \leq 250 \text{ km} ; P \leq 60MW \quad \dots \quad Illarionov = \frac{1000}{\sqrt{\frac{500}{l} + \frac{2500}{P}}}$$

$$4. I = \frac{P}{\sqrt{3} V \cos\varphi} \quad [A]$$

$$5. (\text{corriente para seleccion de conductor}) = I * 1.25$$

$$6. D_T = \sqrt[3]{d_1 * d_2 * d_3} \quad [m]$$

$$d_1 = \frac{\sqrt{RS * RT * RS' * RT'}}{RR'} ; d_2 = \frac{\sqrt{SR * ST * SR' * ST'}}{SS'} ; d_3 = \frac{\sqrt{TS * TR * TS' * TR'}}{TT'}$$

$$7. r_G = \sqrt[3]{R_1 * R_2 * R_3}$$

$$R_1 = \sqrt{r_G * RR'} ; R_2 = \sqrt{r_G * SS'} ; R_3 = \sqrt{r_G * TT'}$$

$r_G =$  Radio medio geometrico proporcionado por la tabla

$$8. L_A = 2 \ln \frac{D}{r_c} * 10^{-7} \quad [H_m / \text{fase}]$$

$$9. L_{A \text{ total}} = L_A * d \quad \dots \quad d = \text{distancia de tramo}$$

$$10. X_L = 2\pi * f * (L_{A \text{ total}}) \quad [\Omega_{km} / \text{fase}]$$

$$11. R = R_{AC} = \left( \frac{T_{DC} + T_{ambiente}}{T_{DC} + T_{AC}} \right)$$

$$12. Z = R + jX ; \text{ Donde } X = XL$$

$$13. \Delta V = \frac{PR + QXL}{V} + j \left[ \frac{PXL - QR}{V} \right]$$

$$14. \% Reg = \frac{\Delta V}{V}$$

$$15. \Delta S = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} * Z$$

## PROCEDIMIENTO

Para el diseño de un sistema de interconexión regional, se necesitan seguir los siguientes pasos a cabalidad:

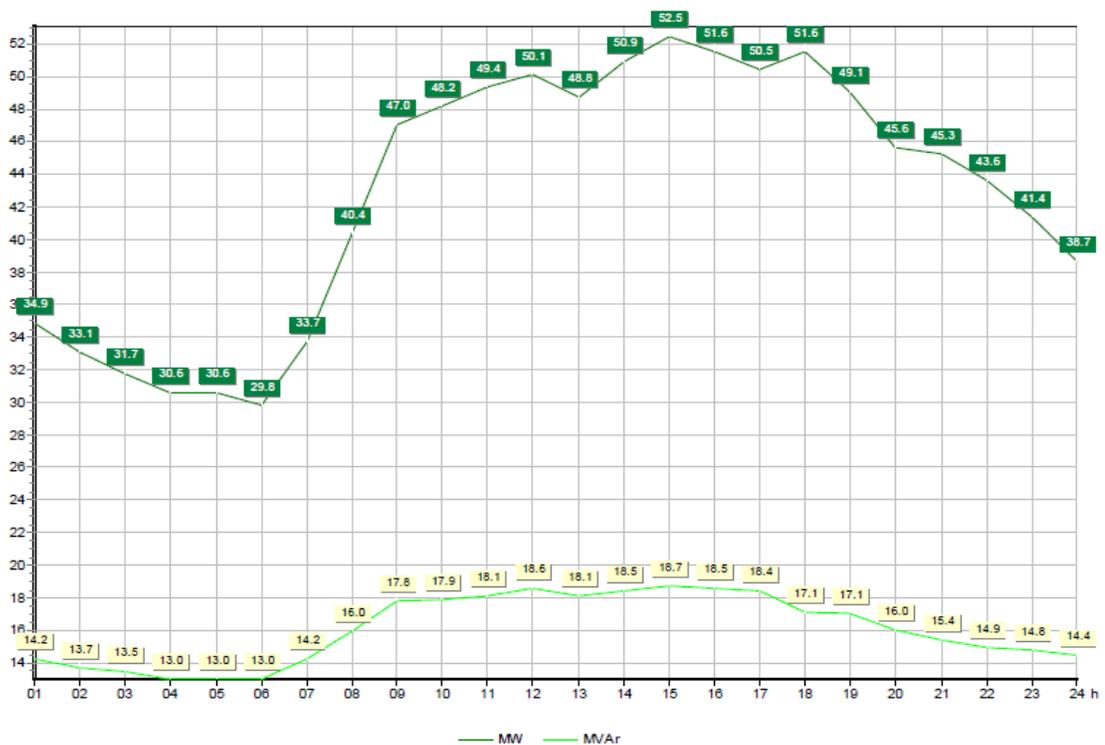
- Determinar las ciudades o subestaciones que van hacer conectadas en el sistema de interconexión regional (las propiedades de cargas).
- Identificar y visualizar el tipo de conexión necesaria de acuerdo a los parámetros requeridos por el sistema de conexión de interconexión (Diseño del sistema interconectado).
- Establecer y ubicar el generador que va a suplir la carga demanda por el sistema.
- Recopilación de datos necesario para el estudio del diseño:
  - Potencia máximas demanda.
  - Corriente demanda.
  - Voltaje de transmisión.
  - Distancias entre ciudades y subestaciones.
  - Inspección de lugares por donde pasara la línea y la estructura (que no se presente dificultades de pantanos o reservas naturales).
- Calcule las distancias de separación entre ciudades.
- Determinar las estructuras a interconectar y el nivel de tensión de operación.
- Mediante los datos recopilados determinar los cálculos de parámetros de líneas mediante las formulas dadas al comienzo de esta guía para la escogencia del calibre de conductor adecuado que genere menos perdidas en la transmisión del sistema interconectado regional.
- Establecer la disposición de los conductores.
- Calcular los porcentajes de regulación de las líneas asociadas.
- Justificar los tramos.
- Representar la matriz de admitancia del sistema
- Calcule los niveles de tensión mediante matriz de admitancia.
- Interpretación de los resultados.
- Conclusiones y recomendaciones.

## Ejercicios

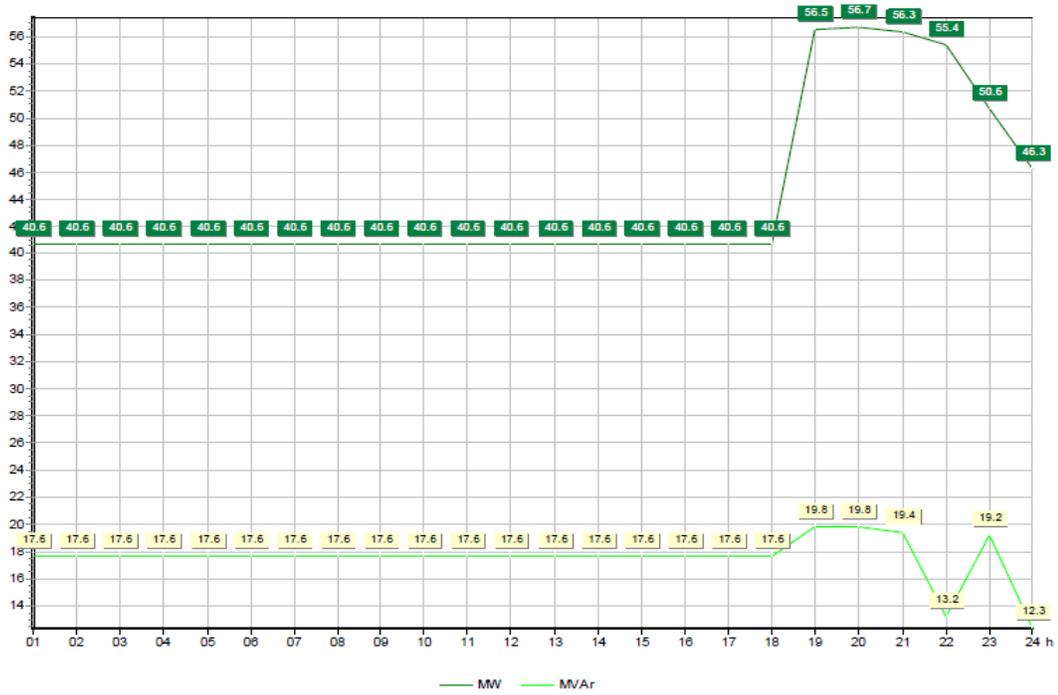
Diseñar un sistema que permita la interconexión de ciudades (Barranquilla, Cartagena, Santa marta, Montería, Valledupar) y sus respectivas demandas en función de las curvas existentes de potencia activa y reactiva mediante las siguientes especificaciones del diseño; Se debe entregar un sistema interconectado entre ciudades donde se determinen:

- Las capacidades de corriente por tramos de líneas.
- Niveles de tensión,
- Porcentajes de regulación por tramos.
- Parámetros de las líneas de transmisión (Resistencia e inductancia)
- Estructuras seleccionadas.
- Punto de generación.
- Justificación de los cálculos.
- Tablas de cálculo.

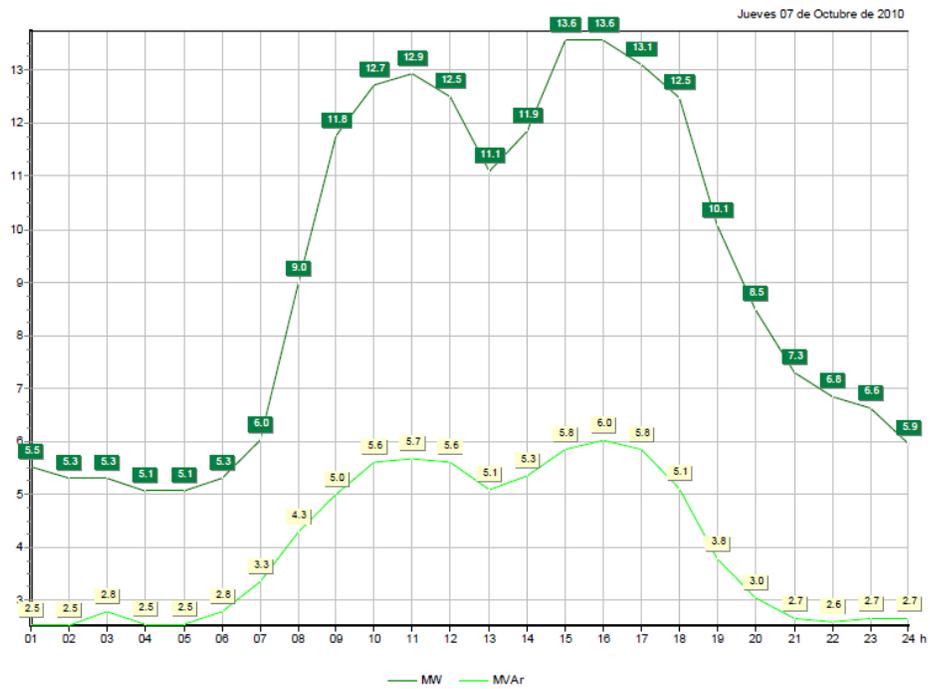
### CARATAGENA



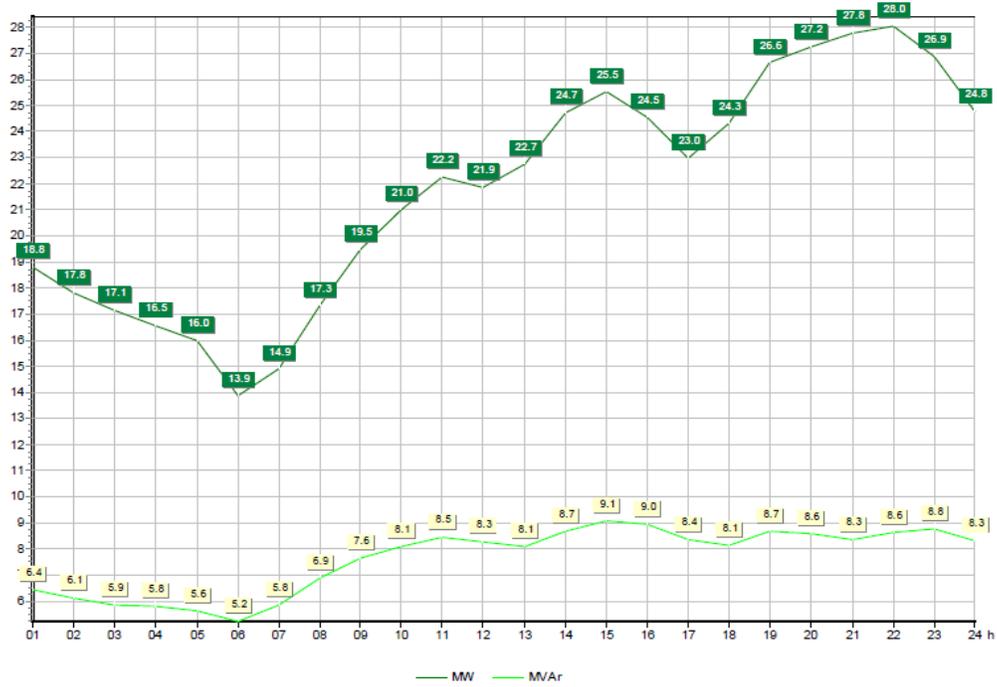
## BARRANQUILLA



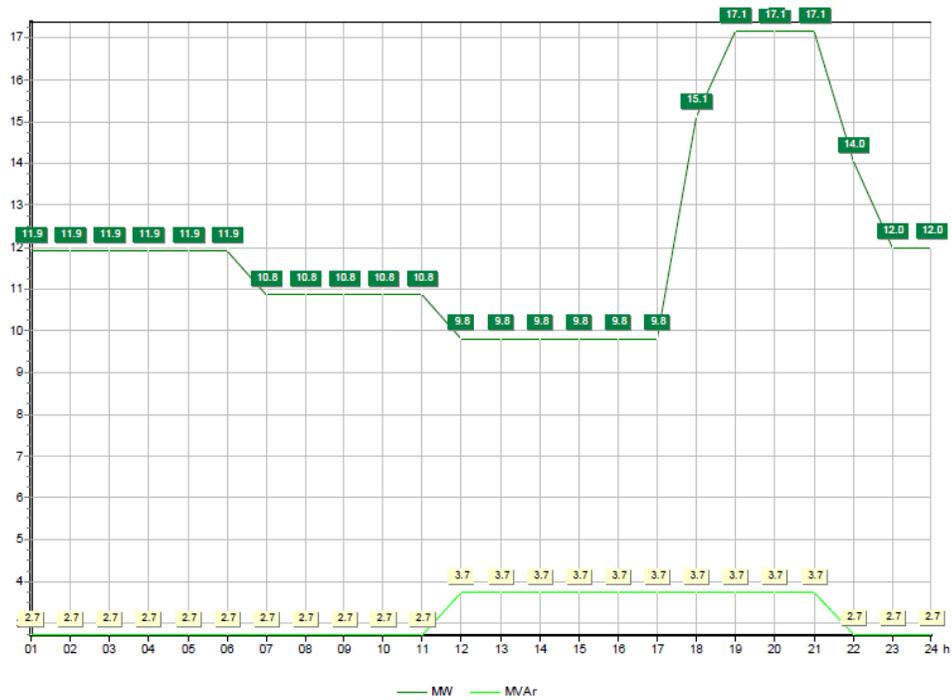
## SANTA MARTA



## VALLEDUPAR



## MONTERIA



## **Anexo 12. ANÁLISIS DE FALLAS EN PUNTOS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.**

### **OBJETIVOS**

#### **General**

- Realizar el análisis adecuado de fallas en un punto de los sistemas eléctricos de potencia.

#### **Específicos**

- Determinar las fallas que se presentan en un punto de un sistema eléctrico de potencia.
- Analizar adecuadamente las fallas en sistemas eléctricos de potencia..
- Interpretar los resultados obtenidos en el sistema.

### **REQUISITOS TEORICOS**

Antes de llegar al laboratorio los estudiantes deben documentarse en los siguientes temas:

- Que es una falla
- Causas de una falla
- Tipo de falla
- Formas de falla
- Corriente asimétrica
- Variación entre el tiempo de la corriente durante la falla
- Impedancia de Falla.

### **PROCEDIMIENTO**

- La estimación de los posibles lugares de falla dentro del área o áreas de desconexión de la red.
- El objetivo de esta primera etapa es establecer cuáles de los elementos del sistema eléctrico de potencia involucrados en el disturbio que cumplen con las condiciones para ser candidatos a punto de falla, además de clasificar la

operación de los interruptores relacionados a ellos comparando los estados de pre-falla y pos-falla del sistema.

- Aplicación de índices de posibilidad a partir de estado de interruptores
- En esta etapa se realiza el cálculo de índices, los cuales cuantifican la posibilidad de cada elemento candidato de ser punto de falla.
- Designación de niveles de certidumbre de ubicación de falla en relevadores y análisis de información difusa para determinar los elementos con mayor posibilidad de localización de falla.

En esta fase se analiza la información disponible de la operación de relevadores del sistema en el disturbio, la cual ratifica los resultados producto del análisis de la lógica de operación de interruptores, aumentando o disminuyendo los índices de posibilidad de los elementos candidatos. Basado en la información del tipo de relevador, su área de cobertura, ubicación y nivel de información útil, refiriendo a este último punto la información de zonas de operación y fases en las cuales el relevador indica haber detectado la falla, se estiman posibles zonas en las cuales la operación del relevador detecta la falla.

**Análisis de los datos y y respuestas a las preguntas.**

▪ **Pregunta 1:**

¿En qué consiste una falla?

---

---

---

---

---

▪ **Pregunta 2:**

¿Cuáles son los diferentes tipos de falla y cuál es la más peligrosa para un sistema eléctrico de potencia?

---

---

---

---

---

▪ **Pregunta 3:**

¿Requerimientos principales para detectar la falla en un punto de un sistema eléctrico de potencia?

---

---

---

---

▪ **Pregunta 4:**

Buscar más de tres referencias bibliográficas del concepto de fallas, anotarlas y referenciarlas.

---

---

---

---

## INFORME DE LA PRÁCTICA

**TEMA DE LA PRÁCTICA:**

FECHA: día \_\_\_\_\_ mes \_\_\_\_\_ año \_\_\_\_\_

**INTEGRANTES:**

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

## **Anexo 13. CÁLCULO DE CORRIENTE DE FALLA EN UN SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA.**

### **OBJETIVOS**

#### **General**

- Realizar el cálculo adecuado de la corriente de falla en unos sistemas eléctricos de potencia.

#### **Específicos**

- Calcular la corriente de fallas que se presentan en un sistema eléctrico de potencia.
- Interpretar los resultados obtenidos en el sistema.

### **REQUISITOS TEORICOS**

Antes de llegar al laboratorio los estudiantes deben documentarse en los siguientes temas:

- Impedancia de Falla.
- Fallas en derivación (falla trifásica, falla línea a tierra, falla doble línea a tierra, falla entre líneas).
- Fallas Serie (fase abierta, dos fases abiertas).
- Principio de superposición y el equivalente de Thevenin

### **PROCEDIMIENTO**

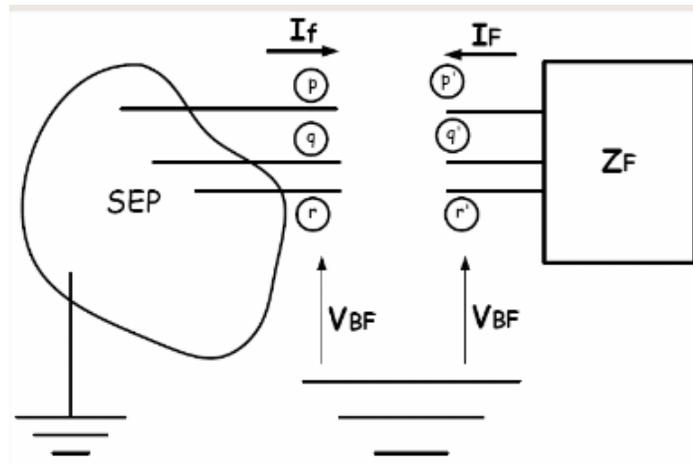
#### **Cálculo de Corrientes de Falla.**

- Determinar la corriente de falla. Este problema puede ser resuelto aplicando el principio de superposición y el equivalente de Thevenin del sistema eléctrico de potencia visto desde los puntos en que se presentan las fallas. Matemáticamente, esto puede expresarse como

$$V_{BF} = V_{PBF} + Z_{BF}I_F$$

Esta expresión representa al equivalente de Thevenin del sistema eléctrico de potencia visto desde los nodos en que se presentan las fallas.

- En forma similar, las fallas pueden ser expresadas como:  $V_{BF} = Z_F I_F$ , relacionando el voltaje en los nodos de falla con la inyección de las corrientes de falla. Esta relación puede representarse gráficamente como se muestra en la siguiente figura



- La corriente de falla se determina conectando los nodos del sistema eléctrico de potencia (p, q, r) con los de la impedancia de falla (p', q', r').
- Si en consecuencia los voltajes son iguales y las corrientes  $I_f$  e  $I_F$  son de igual magnitud, pero con sentido contrario, esto es  $I_f = I_F$ . Se tiene entonces que:

$$V_{BF} - Z_{BF} I_F = Z_F I_F$$

$$I_F = (Z_{BF} + Z_F)^{-1} V_{PBF}$$

$V_{PBF}$  = Es el voltaje de pre falla en los buses que se presentan las fallas e  
 $I_F$  es la corriente de falla

$Z_{BF}$  = Es la impedancia de Thevenin del sistema eléctrico de potencia vista desde los buses en que se presentan las fallas.

$Z_F$  = Es la matriz de impedancias de falla.

Se infiere, que la corriente de falla depende tanto del equivalente de Thevenin del SEP visto desde el (los) nodo(s) en que ocurre(n) la(s) fallas como de la (matriz de) impedancia(s) de falla.

- Cálculo de Corrientes de Falla en Sistemas Trifásicos.

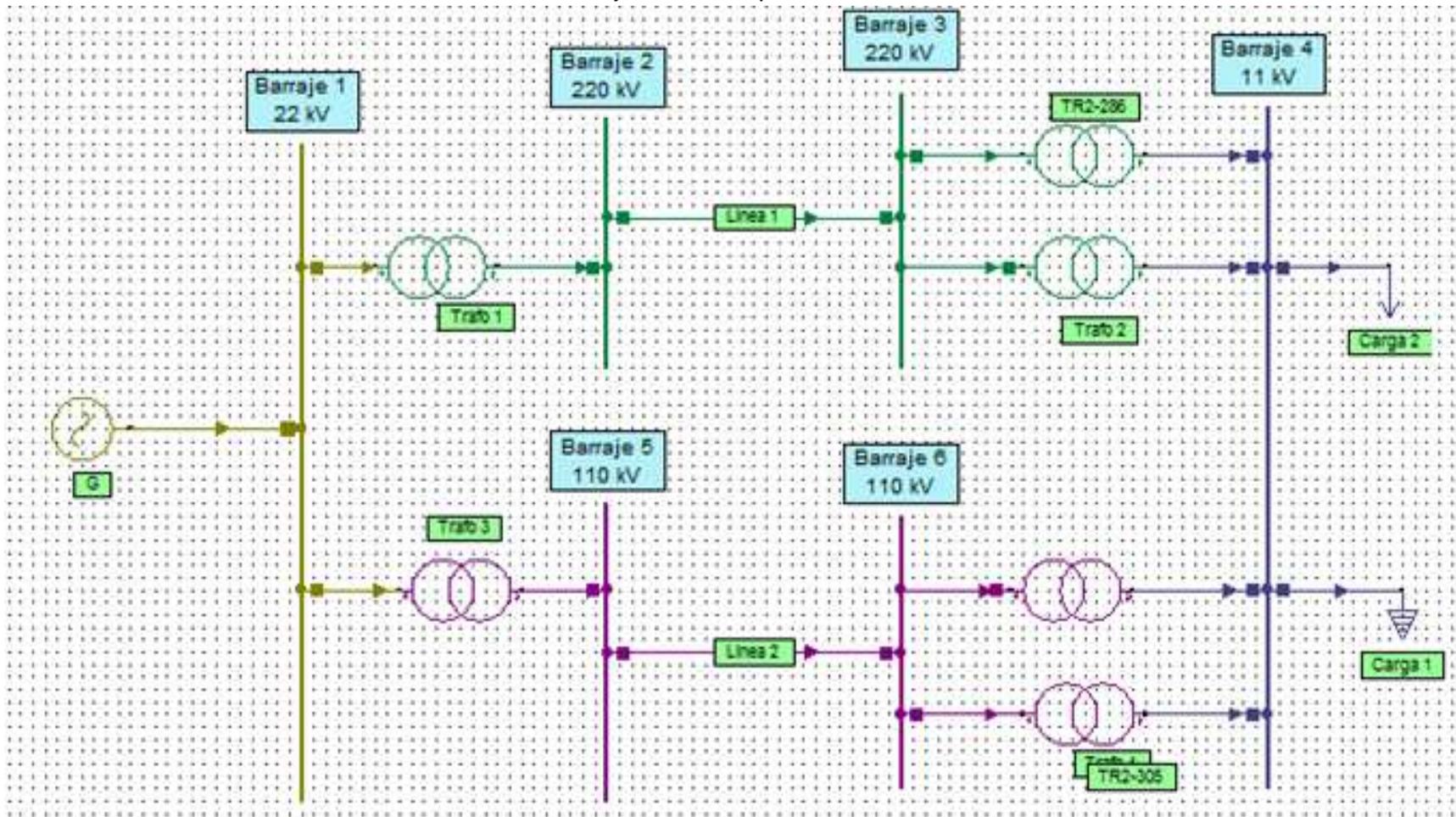
El procedimiento para el cálculo de las corrientes de falla en sistemas trifásicos balanceados, es similar al descrito anteriormente, solo que en el caso el modelo del SEP estará definido por la interconexión de sus redes de secuencia según el tipo de falla que habrá de ser analizada.

- Interprete los resultados.

### **Ejercicios**

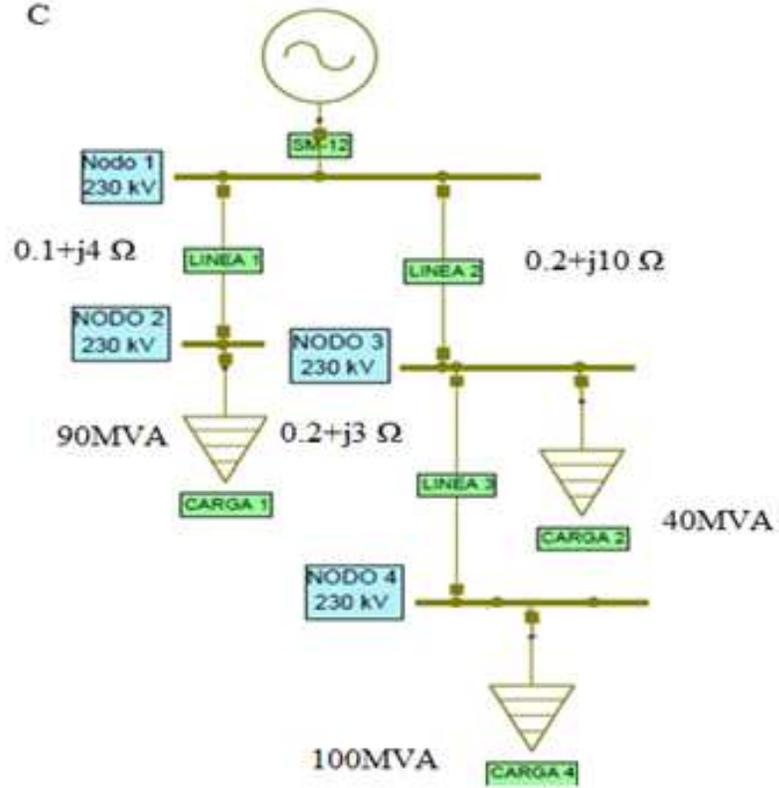
A partir del análisis respectivo y utilizando los conceptos previos calcular la corriente de falla de los siguientes ejercicios en los puntos indicados.

### Ejercicio de aplicación

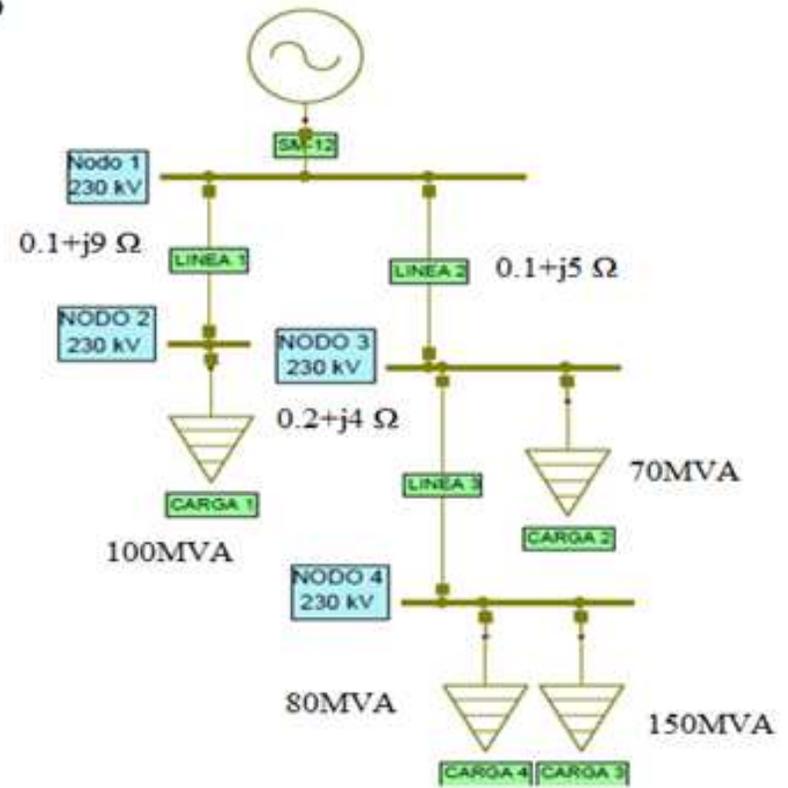


Ejercicio de aplicación

C



D



## INFORME DE LA PRÁCTICA

**TEMA DE LA PRÁCTICA:**

FECHA: día \_\_\_\_\_ mes \_\_\_\_\_ año \_\_\_\_\_

**INTEGRANTES:**

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

## **Anexo 14. SIMULACION DE CORTOS CIRCUITOS NEPLAN.**

### **OBJETIVOS**

#### **GENERAL**

- Usar NEPLAN para simular CORTOS CIRCUITOS en un sistema de potencia eléctrico.

#### **ESPECIFICOS**

- Comprender los datos arrojados por NEPLAN al momento de simular cortocircuito
- Identificar los tipos de fallas que se presentan en un sistema eléctrico de potencia.

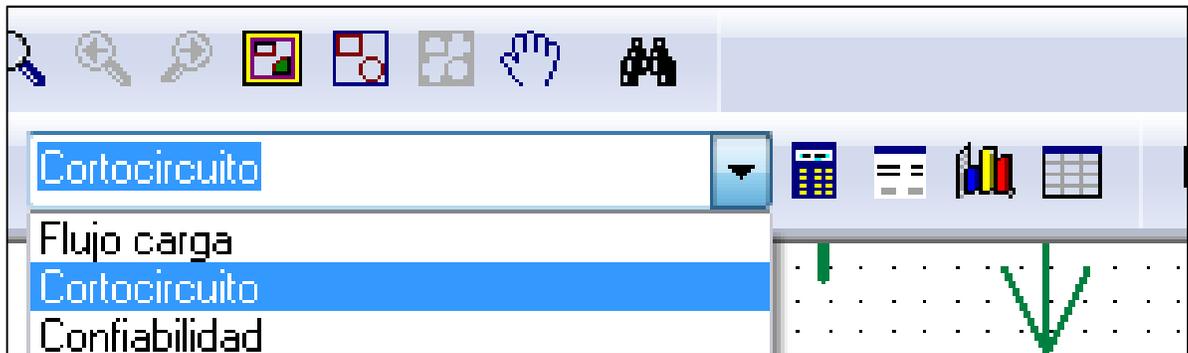
#### **TEORIA**

Existen cuatro tipos de fallas en los sistemas de puesta a tierra, y el software NEPLAN es capaz de simular este tipo de acontecimientos, los tipos de fallas son los siguientes:

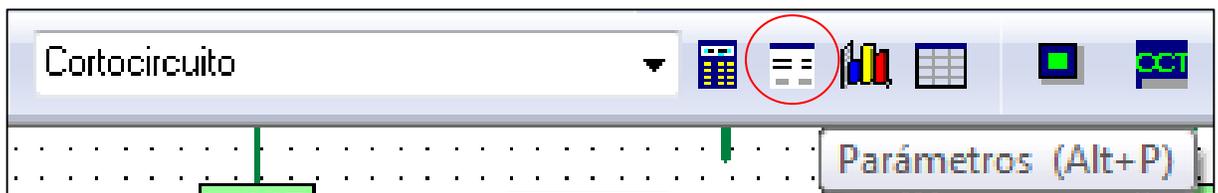
- Falla Trifásica
- Falla monofásica
- Falla bifásica
- Falla bifásica a tierra

Existen otros tipos de fallas pero para efectos educativos del software NEPLAN solo se simularan las mencionadas.

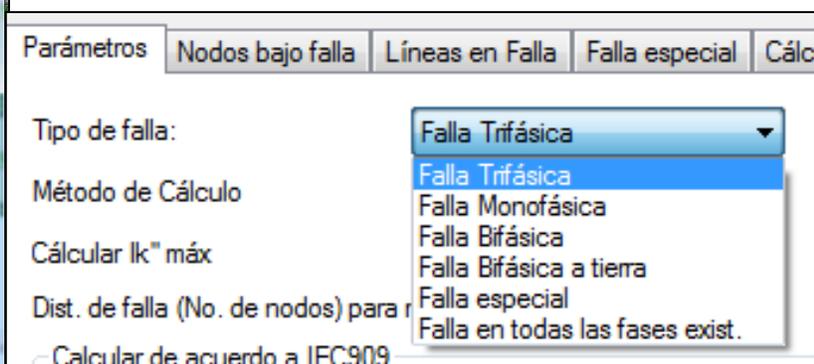
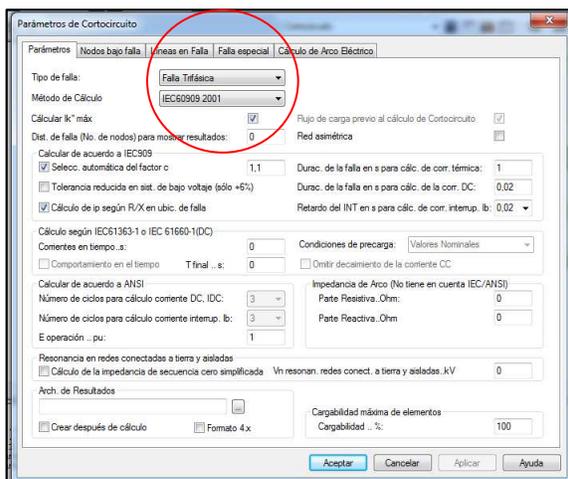
Para evaluar este tipo de fallas, la barra de herramientas tiene la opción de evaluar cortocircuitos como se verá en la siguiente imagen.



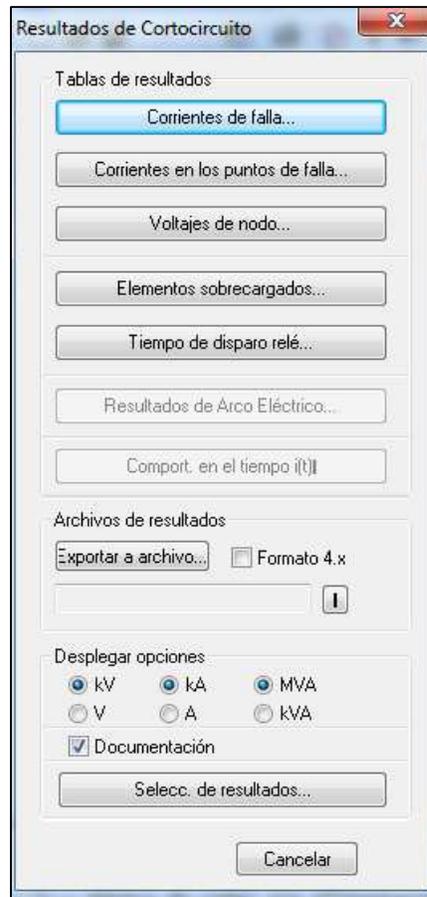
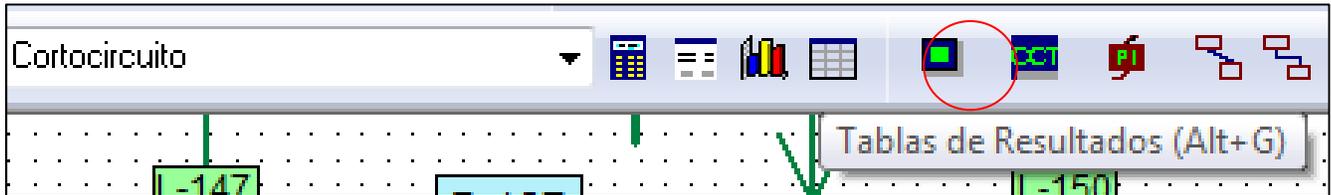
De la misma manera en que se evalúa el flujo de carga como en la experiencia anterior, también se puede evaluar los cortos circuitos. Para seleccionar el tipo de falla que quiere evaluar se oprime el botón Parámetros.



Al oprimir este botón se abrirá el siguiente recuadro y escoger el tipo de falla a evaluar:



Luego de esto se oprime la opción Tabla de Resultados



Como pueden ver en el cuadro “Resultados de Cortocircuito”, este ofrece una serie de opciones útiles para diversos tipos de evaluaciones.

- Corriente de falla
- Corrientes en los puntos de falla
- Voltajes de nodos
- Elementos sobrecargados
- Tiempo de disparo de relés

### Falla trifásica

	ID	Ubicación de Falla	Vn	$I_k''(RS T)$	$Alk''(RST)$	Falla
			kV	kA	°	tipo
1	127	BARRAJE 8 (	230,000	3,761	-84,82	Falla Trif
2	126	BARRAJE 3 (	13,780	292,62	-86,93	Falla Trif
3	124	BARRAJE 2(B	18,000	329,18	-86,97	Falla Trif
4	131	BARRAJE 6 (	230,000	3,032	-81,36	Falla Trif
5	132	BARRAJE 4 (	230,000	6,025	-85,63	Falla Trif
6	130	BARRAJE 5 (	230,000	5,278	-79,58	Falla Trifá
7	129	BARRAJE (B-	230,000	5,566	-86,29	Falla Trifá
8	128	BARRAJE 7 (	230,000	5,951	-85,95	Falla Trifá
9	133	BARRAJE 1 (	16,500	455,26	-86,94	Falla Trifá

- Falla Trifásica
- Falla Trifásica
- Falla Monofásica
- Falla Bifásica
- Falla Bifásica a tierra
- Falla especial
- Falla en todas las fases exist.

### Falla bifásica

	ID	Ubicación de Falla	Vn	$I_k''(RS T)$	$Alk''(RST)$	Falla
			kV	kA	°	tipo
1	127	BARRAJE 8 (	230,000	0,000	-90,00	Falla Bifásica
2				2,769	184,82	
3				2,769	4,82	
4	126	BARRAJE 3 (	13,780	0,000	-90,00	Falla Bifásica
5				74,84	182,46	
6				74,84	2,46	
7	124	BARRAJE 2(B	18,000	0,000	-90,00	Falla Bifásica
8				97,83	181,90	
9				97,83	1,90	
10	131	BARRAJE 6 (	230,000	0,000	-90,00	Falla Bifásica
11				2,402	187,84	
12				2,402	7,84	
13	132	BARRAJE 4 (	230,000	0,000	-90,00	Falla Bifásica
14				4,587	183,81	
15				4,587	3,81	
16	130	BARRAJE 5 (	230,000	0,000	-90,00	Falla Bifásica
17				4,085	189,25	
18				4,085	9,25	
19	129	BARRAJE (B-	230,000	0,000	-90,00	Falla Bifásica
20				3,385	183,94	
21				3,385	3,94	
22	128	BARRAJE 7 (	230,000	0,000	-90,00	Falla Bifásica
23				4,087	183,88	
24				4,087	3,88	
25	133	BARRAJE 1 (	16,500	0,000	-90,00	Falla Bifásica
26				204,46	181,89	
27				204,46	1,89	

- Falla Bifásica a tierra
- Falla Trifásica
- Falla Monofásica
- Falla Bifásica
- Falla Bifásica a tierra
- Falla especial
- Falla en todas las fases exist.

## Falla monofásica

	ID	Ubicación de Falla	Vn	Ik"(RS T)	AIk"(RST)	Falla
			kV	kA	°	tipo
1	127	BARRAJE 8 (	230,000	0,009	89,98	Falla Monofásica a Tierra
2				0,000	180,00	
3				0,000	180,00	
4	126	BARRAJE 3 (	13,780	0,147	89,98	Falla Monofásica a Tierra
5				0,000	180,00	
6				0,000	180,00	
7	124	BARRAJE 2(B	18,000	0,113	89,99	Falla Monofásica a Tierra
8				0,000	-90,00	
9				0,000	-90,00	
10	131	BARRAJE 6 (	230,000	0,009	89,97	Falla Monofásica a Tierra
11				0,000	-90,00	
12				0,000	-90,00	
13	132	BARRAJE 4 (	230,000	0,009	89,99	Falla Monofásica a Tierra
14				0,000	-90,00	
15				0,000	-90,00	
16	130	BARRAJE 5 (	230,000	0,009	89,98	Falla Monofásica a Tierra
17				0,000	0,00	
18				0,000	0,00	
19	129	BARRAJE (B-	230,000	0,009	89,98	Falla Monofásica a Tierra
20				0,000	-90,00	
21				0,000	-90,00	
22	128	BARRAJE 7 (	230,000	0,009	89,98	Falla Monofásica a Tierra
23				0,000	180,00	
24				0,000	180,00	
25	133	BARRAJE 1 (	16,500	0,123	89,99	Falla Monofásica a Tierra
26				0,000	-90,00	
27				0,000	-90,00	



## Falla Bifásica a tierra

	ID	Ubicación de Falla	Vn	Ik"(RST)	AIk"(RST)	Falla
			kV	kA	°	tipo
1	127	BARRAJE 8 (	230,000	0,000	-82,87	Falle Bifásica a Tierra
2				2,769	184,88	
3				2,768	4,77	
4	126	BARRAJE 3 (	13,780	0,000	91,79	Falle Bifásica a Tierra
5				74,819	182,51	
6				74,814	2,41	
7	124	BARRAJE 2(B	18,000	0,000	-89,10	Falle Bifásica a Tierra
8				97,819	181,93	
9				97,816	1,87	
10	131	BARRAJE 6 (	230,000	0,000	90,00	Falle Bifásica a Tierra
11				2,402	187,90	
12				2,401	7,79	
13	132	BARRAJE 4 (	230,000	0,000	-90,00	Falle Bifásica a Tierra
14				4,587	183,84	
15				4,586	3,78	
16	130	BARRAJE 5 (	230,000	0,000	93,58	Falle Bifásica a Tierra
17				4,085	189,29	
18				4,084	9,22	
19	129	BARRAJE (B-	230,000	0,000	-90,00	Falle Bifásica a Tierra
20				3,385	183,99	
21				3,384	3,89	
22	128	BARRAJE 7 (	230,000	0,000	-90,00	Falle Bifásica a Tierra
23				4,087	183,92	
24				4,087	3,85	
25	133	BARRAJE 1 (	16,500	0,000	91,79	Falle Bifásica a Tierra
26				204,449	181,90	
27				204,447	1,87	

## INFORME DE LA PRÁCTICA

**TEMA DE LA PRÁCTICA:**

FECHA: día \_\_\_\_\_ mes \_\_\_\_\_ año \_\_\_\_\_

**INTEGRANTES:**

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

**Anexo 15 Carta de entrega y autorización del autor para la consulta,  
reproducción parcial o total, y publicación electrónica del texto completo de  
tesis y trabajos de grado**

Barranquilla, 18 de Diciembre de 2013

Trabajo de grado

Yo **Richard Jiménez Chinchilla**, identificado con C.C. No.-1'065.641.268, actuando en nombre propio y como autores de la tesis y/o trabajo de grado titulado "Guías de trabajo independiente para sistemas eléctricos de potencia – Módulos de análisis y diseños en software Neplan, para el mejoramiento y aporte a la formación de los estudiantes de ingeniería eléctrica de la universidad de la costa, Cuc" aprobado en el año 2013 como requisito para optar al título de Ingeniero Eléctrico; hacemos entrega del ejemplar respectivo y de sus anexos de ser el caso, en formato digital o electrónico (DVD) y autorizamos a la UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC, para que en los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia, utilice y use en todas sus formas, los derechos patrimoniales de reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo público e importación) que me corresponden como creador de la obra objeto del presente documento.

Y autorizamos a la Unidad de información, para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad de la Costa, CUC, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en la página Web de la Facultad, de la Unidad de información, en el repositorio institucional y en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la institución y Permita la consulta, la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato DVD o digital desde Internet, Intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

Los AUTORES - ESTUDIANTES, manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y la realizaron sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es de su exclusiva autoría y detenta la titularidad ante la misma. PARÁGRAFO: En caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en

cuestión, LOS ESTUDIANTES - AUTORES, asumirán toda la responsabilidad, y saldrán en defensa de los derechos aquí autorizados; para todos los efectos, la Universidad actúa como un tercero de buena fe.

Para constancia se firma el presente documento en dos (02) ejemplares del mismo valor y tenor, en Barranquilla D.E.I.P., a los 18 días del mes de Diciembre de Dos Mil Trece 2013.

LOS AUTORES – ESTUDIANTE:

---

FIRMA

**Anexo 16 Carta de entrega y autorización del autor para la consulta,  
reproducción parcial o total, y publicación electrónica del texto completo de  
tesis y trabajos de grado**

Barranquilla, 18 de Diciembre de 2013

Trabajo de grado

Yo **Luis Aguas Romero** identificado con C.C. No **1'143.127.687**, actuando en nombre propio y como autores de la tesis y/o trabajo de grado titulado "Guías de trabajo independiente para sistemas eléctricos de potencia – Módulos de análisis y diseños en software Neplan, para el mejoramiento y aporte a la formación de los estudiantes de ingeniería eléctrica de la universidad de la costa Cuc" aprobado en el año 2013 como requisito para optar al título de Ingeniero Eléctrico; hacemos entrega del ejemplar respectivo y de sus anexos de ser el caso, en formato digital o electrónico (DVD) y autorizamos a la UNIVERSIDAD DE LA COSTA, CUC, para que en los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia, utilice y use en todas sus formas, los derechos patrimoniales de reproducción, comunicación pública, transformación y distribución (alquiler, préstamo público e importación) que me corresponden como creador de la obra objeto del presente documento.

Y autorizamos a la Unidad de información, para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad de la Costa, CUC, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en la página Web de la Facultad, de la Unidad de información, en el repositorio institucional y en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la institución y Permita la consulta, la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato DVD o digital desde Internet, Intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer.

Los AUTORES - ESTUDIANTES, manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y la realizaron sin violar o usurpar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es de su exclusiva autoría y detenta la titularidad ante la misma. PARÁGRAFO: En caso de presentarse cualquier reclamación o acción por parte de un tercero en cuanto a los derechos de autor sobre la obra en

cuestión, LOS ESTUDIANTES - AUTORES, asumirán toda la responsabilidad, y saldrán en defensa de los derechos aquí autorizados; para todos los efectos, la Universidad actúa como un tercero de buena fe.

Para constancia se firma el presente documento en dos (02) ejemplares del mismo valor y tenor, en Barranquilla D.E.I.P., a los 18 días del mes de Diciembre de Dos Mil Trece 2013.

LOS AUTORES – ESTUDIANTE:

---

FIRMA

## Anexo 17. Formulario de la descripción de la tesis de grado

### TÍTULO COMPLETO DE LA TESIS O TRABAJO DE GRADO:

GUÍA DE TRABAJOS INDEPENDIENTES PARA SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA.

### AUTOR AUTORES

<b>Apellidos completos</b>	<b>Nombres completos</b>
Jiménez Chinchilla	Richard
Aguas Romero	Luis

### DIRECTOR (ES)

<b>Apellidos completos</b>	<b>Nombres completos</b>
Silva Ortega	Jorge Iván

### JURADO (S)

<b>Apellidos completos</b>	<b>Nombres completos</b>
Balbis Morejon	Milen
Ospino Castro	Adalberto

### ASESOR (ES) O CODIRECTOR

<b>Apellidos completos</b>	<b>Nombres completos</b>

TRABAJO PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO ELÉCTRICO

FACULTAD: INGENIERÍA

PROGRAMA: Pregrado

NOMBRE DEL PROGRAMA: INGENIERÍA ELÉCTRICA

## Anexo 18. Material anexo

**CIUDAD:** Barranquilla

**AÑO DE PRESENTACIÓN DEL TRABAJO DE GRADO:** 2013

**NÚMERO DE PÁGINAS:** 157

**TIPO DE ILUSTRACIONES:**

Ilustraciones  Planos

Láminas  Mapas

Retratos  Fotografías

Tablas, gráficos y diagramas

**MATERIAL ANEXO** (Vídeo, audio, multimedia o producción electrónica):

Duración del audiovisual: \_\_\_\_\_ minutos.

**Número de casetes de vídeo:** \_\_\_\_\_ Formato: VHS \_\_\_\_\_ Beta Max \_\_\_\_\_  $\frac{3}{4}$  \_\_\_\_\_  
Beta Cam \_\_\_\_\_

Mini DV \_\_\_\_\_ DV Cam \_\_\_\_\_ DVC Pro \_\_\_\_\_ Vídeo 8 \_\_\_\_\_ Hi 8 \_\_\_\_\_

Otro. ¿Cuál? \_\_\_\_\_

Sistema: Americano NTSC \_\_\_\_\_ Europeo PAL \_\_\_\_\_ SECAM \_\_\_\_\_

**Número de casetes de audio:** \_\_\_\_\_

**Número de archivos dentro del DVD** (En caso de incluirse un DVD diferente al trabajo de grado):

---

**PREMIO O DISTINCIÓN** (En caso de ser LAUREADAS o tener una mención especial):

---

**DESCRIPTORES O PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:** Son los términos que definen los temas que identifican el contenido. (En caso de duda para designar estos descriptores, se recomienda consultar con la Unidad de Procesos Técnicos de la Unidad de información en el correo biblioteca@cuc.edu.co, donde se les orientará).

ESPAÑOL

INGLÉS

<hr/>	<hr/>
<hr/>	<hr/>
<hr/>	<hr/>

**RESUMEN DEL CONTENIDO EN ESPAÑOL E INGLÉS:**(Máximo 250 palabras-1530 caracteres):

---

---

---

---

---