



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS DE

INGENIERIA Y APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TESIS DE GRADO

TEMA:

**“ELABORACIÓN DE GUÍAS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA
REALIZACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA I, UTILIZANDO EL
SIMULADOR POWERWORLD PARA LA UNIVERSIDAD
TÉCNICA DE COTOPAXI”**

Tesis presentada previa a la obtención del Título de Ingeniero en Sistemas Eléctricos de Potencia.

Autor:

Casa Casa Luis Guillermo.

Director De Tesis:

Ing. Isaél Román López M.

Latacunga – Ecuador

Abril 2013

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

El contenido de este documento es de propiedad y responsabilidad de su autor, lo que incluye su autenticidad y originalidad. La información citada o presentada tiene y se respeta sus Derechos Reservados de Autoría.

Luis Guillermo Casa Casa.

INFORME FINAL DE DIRECTOR DE TESIS

Cumpliendo con lo estipulado en el Capítulo IV, Artículo 26, Literal h) del Reglamento de Graduación en el Nivel de Pregrado de la Universidad Técnica de Cotopaxi, es grato informar que el Sr. Luis Guillermo Casa Casa, desarrolló su trabajo de investigación de grado, de acuerdo a los planteamientos formulados en el Proyecto de Tesis, asesoría y dirección correspondiente.

En virtud de lo antes expuesto considero que está habilitado para presentarse al acto de defensa de Tesis, cuyo tema es: **“ELABORACIÓN DE GUÍAS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA REALIZACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA I, UTILIZANDO EL SIMULADOR POWERWORLD PARA LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”**

Latacunga, 03 de diciembre de 2012.

Ing. Eléc. Isaél Román López Miniguano

DIRECTOR DE TESIS

C. C.: 1800958132



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y
APLICADAS
Latacunga-Ecuador

APROBACION DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de Miembros del Tribunal de Grado aprueban el presente Informe técnico de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Unidad Académica de Ciencias de la ingeniería y aplicadas; por cuanto, los postulantes: Luis Guillermo Casa Casa con el título de tesis: “ELABORACIÓN DE GUÍAS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA REALIZACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA I, UTILIZANDO EL SIMULADOR POWERWORLD PARA LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI” han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Defensa de Tesis.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, 10 de Abril del 2013.

Para constancia firman:

Ing. Marcelo Barrera.
PRESIDENTE

Dra. Teresa Medina
MIEMBRO

Ing. Xavier Proaño
OPOSITOR

CERTIFICADO

Yo, Lcda. Ana Lucia Constante Noroña CI. 050259647-1, en mi calidad de Docente del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi a petición verbal del interesado:

Certifico que el contenido correspondiente al ABSTRACT de la tesis: **“ELABORACIÓN DE GUÍAS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA REALIZACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA I, UTILIZANDO EL SIMULADOR POWERWORLD PARA LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”** de autoría del señor Luis Guillermo Casa Casa portador de la cédula de ciudadanía N° 1712299872, expresa gramática y estructuralmente similar significado al RESUMEN de mencionado documento.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, facultando al señor Casa hacer uso del presente documento, en la forma que estime conveniente.

Latacunga, 26 de noviembre de 2012.

Lcda. Ana Lucia Constante N.
Docente Centro de Idiomas – UTC.

AGRADECIMIENTO

Por su valiosa colaboración,

Ing. Eléc. Isaél López.

Ing. Eléc. Jaime Pilatásig.

Ing. Eléc. Roberto Aguirre.

Ing. Eléc. Wendy Almeida.

Ing. Eléc. Linda Chimborazo

Gracias...

DEDICATORIA

Dedicado a

Vilma, Antonela, Benjamín, Rafael, Rosario, Piedad, Jairo, Rita, Rolando

Mi Familia.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
INFORME FINAL DE DIRECTOR DE TESIS	III
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI.....	IV
UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS.....	IV
LATACUNGA-ECUADOR	IV
APROBACION DEL TRIBUNAL DE GRADO	IV
EN CALIDAD DE MIEMBROS DEL TRIBUNAL DE GRADO APRUEBAN EL PRESENTE INFORME TÉCNICO DE INVESTIGACIÓN DE ACUERDO A LAS DISPOSICIONES REGLAMENTARIAS EMITIDAS POR LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI, Y POR LA UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS; POR CUANTO, LOS POSTULANTES: LUIS GUILLERMO CASA CASA CON EL TÍTULO DE TESIS: “ELABORACIÓN DE GUÍAS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA REALIZACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA I, UTILIZANDO EL SIMULADOR POWERWORLD PARA LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI” HAN CONSIDERADO LAS RECOMENDACIONES EMITIDAS OPORTUNAMENTE Y REÚNE LOS MÉRITOS SUFICIENTES PARA SER SOMETIDO AL ACTO DE DEFENSA DE TESIS.....	IV
POR LO ANTES EXPUESTO, SE AUTORIZA REALIZAR LOS EMPASTADOS CORRESPONDIENTES, SEGÚN LA NORMATIVA INSTITUCIONAL.	IV
LATACUNGA, 10 DE ABRIL DEL 2013.....	IV
PARA CONSTANCIA FIRMAN:	IV
ING. MARCELO BARRERA. DRA. TERESA MEDINA	IV
PRESIDENTE MIEMBRO.....	IV

ING. XAVIER PROAÑO	IV
OPOSITOR	IV
CERTIFICADO.....	V
AGRADECIMIENTO.....	VI
DEDICATORIA	VII
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS Y GRÁFICOS	XII
ÍNDICE DE TABLAS Y CUADROS.....	XIV
RESUMEN.....	XV
ABSTRACT.....	XVII
CERTIFICADO.....	XIX
INTRODUCCIÓN.....	XX
CAPÍTULO 1	1
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	1
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA	2
1.1 INTRODUCCIÓN	2
1.2 FUNDAMENTOS DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.....	2
1.3 GENERADORES SÍNCRONOS.....	4
1.3.1 MODELO DEL GENERADOR	5
1.3.2 CONTROL DEL FACTOR DE POTENCIA	10
1.3.3 CARACTERÍSTICAS DEL ÁNGULO DE POTENCIA	13
1.3.4 GENERADORES SINCRÓNICOS DE POLOS SALIENTES.....	15
1.4 TRANSFORMADORES DE POTENCIA	17
1.4.1 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR	18
1.4.2 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE.....	22
1.4.3 RENDIMIENTO DEL TRANSFORMADOR.....	24
1.4.4.....	25
CONEXIONES EN TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS	25
1.4.5 MODELO POR FASE DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO	26
1.4.6 AUTOTRANSFORMADORES	28

1.4.6.1	MODELO DEL AUTOTRANSFORMADOR	30
1.4.7	TRANSFORMADORES DE TRES DEVANADOS	30
1.4.7.1	MODELO DEL TRANSFORMADOR DE TRES DEVANADOS	31
1.4.8	CONTROL DE VOLTAJE DE TRANSFORMADORES	32
1.4.8.1	TRANSFORMADORES CON INTERCAMBIADOR DE TOMAS	33
1.4.8.2	TRANSFORMADORES DE REGULACIÓN O BOOSTERS.....	34
1.4.8.2.1	CONTROL DE LA MAGNITUD DE VOLTAJE.....	34
1.4.8.2.2	CONTROL DEL ÁNGULO DE FASE.....	35
1.5	PARÁMETROS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	37
1.5.1	RESISTENCIA DE LA LÍNEA	38
1.5.2	INDUCTANCIA DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN TRIFÁSICAS	39
1.5.2.1	ESPACIAMIENTO SIMÉTRICO	39
1.5.2.2	ESPACIAMIENTO ASIMÉTRICO	40
1.5.2.3	LÍNEA TRANSPUESTA	41
1.5.2.4	INDUCTANCIA DE LÍNEAS TRIFÁSICAS DE DOBLE CIRCUITO.....	42
1.5.3	CAPACITANCIA DE LA LÍNEA.....	43
1.5.3.1	CAPACITANCIA DE LÍNEAS TRIFÁSICAS.....	43
1.5.3.2	CAPACITANCIA DE LÍNEAS TRIFÁSICAS DE DOBLE CIRCUITO.....	44
1.6	MODELO DE LÍNEAS	45
1.6.1	MODELO LÍNEA CORTA	45
1.6.2	MODELO LÍNEA MEDIA.....	46
1.6.3	MODELO DE LÍNEA LARGA.....	47
1.6.4	SIL – SURGE IMPEDANCE LOADING	48
1.6.5	COMPENSACIÓN EN LÍNEAS	49
1.6.5.1	REACTORES EN DERIVACIÓN.....	49
1.6.5.2	COMPENSACIÓN CAPACITOR EN DERIVACIÓN.....	50
1.6.5.3	COMPENSACIÓN POR CAPACITOR SERIE.....	51
1.7	FLUJOS DE POTENCIA.....	51
1.7.1	MÉTODO DE NEWTON RAPHSON	52
1.7.2	SOLUCIÓN AL FLUJO DE POTENCIA.....	54
1.7.3	ECUACIÓN DE FLUJO DE POTENCIA.....	55
1.8	56
FALLAS BALANCEADAS.....	56
1.8.1	FALLA TRIFÁSICA BALANCEADA	57
1.8.2	CAPACIDAD DE CORTO CIRCUITO	58
1.9	COMPONENTES SIMÉTRICAS Y FALLAS DESBALANCEADAS	58
1.9.1	COMPONENTES SIMÉTRICAS.....	59
CAPITULO II.....	63
INVESTIGACIÓN DE CAMPO.....	63
2.1	CARACTERIZACIÓN DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI	64
2.2	DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE ENSEÑANZA DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA EN LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI	65
2.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN, APLICADAS EN LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI	66
2.3.1	Entrevista	66
2.3.1.1	Ficha de entrevista.....	66

2.3.1.2 Resultado.....	67
2.3.2 Encuesta	68
2.3.2.1 Población.....	68
2.3.2.2 Análisis por pregunta.....	69
2.3.3 Observación.....	81
2.3.3.1 Ficha de Observación	81
2.3.3.2 Resultado.....	82
2.4 VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS	82

CAPÍTULO III

PROPUESTA

ELABORACIÓN DE GUÍAS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA REALIZACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA I, UTILIZANDO EL SIMULADOR POWERWORLD PARA LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

3.1 PRESENTACIÓN.....

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

3.2.1 CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

3.3 JUSTIFICACIÓN.....

3.4 OBJETIVOS

3.4.1 General.....

3.4.2 Específicos

3.5 DESARROLLO DE LA PROPUESTA

3.5.1 Diseño de las guías de laboratorio para mejorar la comprensión de Sistemas Eléctricos de Potencia I utilizando estrategias y metodologías.

3.5.2 Estrategias para complementar la enseñanza de sistemas eléctricos de potencia I en la Universidad Técnica de Cotopaxi.

3.5.3 Aplicación de estas guías, por parte de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, Universidad Técnica de Cotopaxi.

3.5.4 Aporte de las prácticas, hacia el estudiante de la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

CONCLUSIONES.....

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS Y GRÁFICOS

3. ENTREVISTA TÉCNICA LLEVADA A CABO AL COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, PERMITE OBTENER INFORMACIÓN DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA COORDINACIÓN, PARA LO QUE SE PLANTEAN 10 INTERROGANTES.....

Ficha de entrevista

ÍNDICE DE FIGURAS Y GRÁFICOS

FIGURA 1 GENERADOR SÍNCRONO TRIFÁSICO – DOS POLOS	5
FIGURA 2 CAMPO MAGNÉTICO ROTATORIO.....	6
FIGURA 4 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA MÁQUINA SINCRÓNICA.	9
FIGURA 5 MÁQUINA SINCRÓNICA CONECTADA A UNA BARRA INFINITA.	9
FIGURA 6 DIAGRAMA FASORIAL DE UN GENERADOR SINCRÓNICO....	9
FIGURA 7 VARIACIÓN DE LA CORRIENTE DE CAMPO A POTENCIA CONSTANTE.....	11
FIGURA 8 CURVA V DE GENERADOR TÍPICO.....	12
FIGURA 9 DIAGRAMA FASORIAL PARA UN GENERADOR DE POLOS SALIENTES.	15
FIGURA 10 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR.....	18
FIGURA 11 CIRCUITO EQUIVALENTE EXACTO REFERIDO AL LADO PRIMARIO.	20
FIGURA 12 CIRCUITO EQUIVALENTE APROXIMADO REFERIDO AL PRIMARIO.	20
FIGURA 13 CIRCUITO EQUIVALENTE APROXIMADO REFERIDO AL SECUNDARIO.....	21
FIGURA 14 CIRCUITOS SIMPLIFICADOS REFERIDOS A UN LADO.	22
FIGURA 15 CIRCUITO EQUIVALENTE PARA LA PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO.	22
FIGURA 16 CIRCUITO EQUIVALENTE PARA LA PRUEBA DE CORTO CIRCUITO.....	23
FIGURA 17 CONEXIONES DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.....	25
FIGURA 18 VOLTAJES LÍNEA-LÍNEA – CONEXIÓN $Y - \Delta$	27
FIGURA 19 CIRCUITO EQUIVALENTE POR FASE.....	28
FIGURA 20 (A) TRANSFORMADOR DE DOS DEVANADOS, (B) CONECTADO COMO AUTOTRANSFORMADOR.	29
FIGURA 21 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN AUTOTRANSFORMADOR.	30
FIGURA 22 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR DE TRES DEVANADOS.	31
FIGURA 23 TRANSFORMADOR REGULADOR PARA CONTROL DE MAGNITUD DE VOLTAJE.	35
FIGURA 24 TRANSFORMADOR REGULADOR PARA CONTROL DE ÁNGULO DE FASE DE VOLTAJE.	35
FIGURA 25 DIAGRAMA FASORIAL – DESPLAZAMIENTO DE FASE A. ...	36
FIGURA 26 LÍNEA TRIFÁSICA CON ESPACIAMIENTO SIMÉTRICO.	39
FIGURA 28 LÍNEA TRIFÁSICA TRANSPUESTA.	41
FIGURA 29 LÍNEA TRANSPUESTA DOBLE CIRCUITO.....	42
FIGURA 30 LÍNEA TRIFÁSICA.	44
FIGURA 31 MODELO LÍNEA CORTA.	46

FIGURA 32 MODELO π NOMINAL PARA LÍNEA MEDIA.	47
FIGURA 33 PARÁMETROS DISTRIBUIDOS PARA LÍNEA LARGA.	47
FIGURA 34 MODELO π EQUIVALENTE PARA LÍNEA LARGA.	48
FIGURA 35 COMPENSACIÓN CON REACTOR EN DERIVACIÓN.	49
FIGURA 36 COMPENSACIÓN POR CAPACITOR SERIE Y EN DERIVACIÓN.....	51
FIGURA 37 REPRESENTACIÓN DE COMPONENTES SIMÉTRICAS.	59
GRÁFICO 1 OPCIONES EN PORCENTAJES, PREGUNTA NO. 1.....	69
GRÁFICO 2 RESPUESTAS EN PORCENTAJES, PREGUNTA NO. 2 TEORÍA	70
GRÁFICO 3 RESPUESTAS EN PORCENTAJES, PREGUNTA NO. 2 LABORATORIO	71
GRÁFICO 4 OPCIONES EN PORCENTAJE, PREGUNTA NO. 3.....	72
GRÁFICO 5 OPCIONES EN PORCENTAJES, PREGUNTA NO. 4.....	73
GRÁFICO 6 OPCIONES EN PORCENTAJES, PREGUNTA NO. 5.....	74
GRÁFICO 7 OPCIONES EN PORCENTAJES, PREGUNTA NO. 6.....	75
GRÁFICO 8 OPCIONES EN PORCENTAJES, PREGUNTA NO. 7.....	76
GRÁFICO 9 OPCIONES EN PORCENTAJE, PREGUNTA NO. 8.....	77
GRÁFICO 10 OPCIONES EN PORCENTAJE, PREGUNTA NO. 9.....	78
GRÁFICO 11 OPCIONES EN PORCENTAJE, PREGUNTA NO. 10.....	79
GRÁFICO 12 OPCIONES EN PORCENTAJE, PREGUNTA NO. 11	81

ÍNDICE DE TABLAS Y CUADROS

CUADRO 1 PREGUNTA NO.1, VALORACIÓN DE OPCIONES.....	69
CUADRO 3 PREGUNTA NO. 2, VALORACIÓN DE RESPUESTAS.....	71
CUADRO 4 PREGUNTA NO. 3, VALORACIÓN DE OPCIONES.....	72
CUADRO 5 PREGUNTA NO. 4, VALORACIÓN DE OPCIONES.....	73
CUADRO 7 PREGUNTA NO. 6, VALORACIÓN DE OPCIONES.....	75
CUADRO 8 PREGUNTA NO. 7, VALORACIÓN DE OPCIONES.....	76
CUADRO 9 PREGUNTA NO. 8, VALORACIÓN DE OPCIONES.....	77
CUADRO 11 PREGUNTA NO. 10, VALORACIÓN DE OPCIONES.....	79
CUADRO 13 ALUMNOS MATRICULADOS POR PERÍODO, INGENIERÍA ELÉCTRICA.....	87
CUADRO 14 GRADUADOS POR AÑO, INGENIERÍA ELÉCTRICA.....	88

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se desarrollan guías para la realización de prácticas de laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia I, utilizando el simulador PowerWorld para la Universidad Técnica de Cotopaxi, esto, busca fortalecer tópicos de relevancia en los sistemas eléctricos bajo estudio, complementariamente es importante su difusión y aplicación por parte de la carrera de Ingeniería Eléctrica. El documento está detallado en tres capítulos que se describen en párrafos siguientes.

Primer capítulo, se presentan fundamentos teóricos acerca de generadores, transformadores de potencia, líneas de transmisión, equipos de compensación de reactivos y extractos del tópico propósito del presente trabajo, como son los flujos de potencia y las fallas en un sistema eléctrico de potencia.

Segundo capítulo, se establece la metodología para la investigación de campo, se procesa la información levantada y se determina los resultados de encuestas efectuadas a 50 estudiantes de la Carrera Ingeniería Eléctrica de sexto y séptimo nivel, una entrevista realizada al Coordinador de Carrera; al término se establece la factibilidad del tema de investigación planteado.

Tercer capítulo, se describe la concepción de la propuesta, realizando una breve descripción de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, la metodología de desarrollo de siete prácticas que incluyen ejemplos de acuerdo a la relevancia del tópico tratado, complementado con ilustraciones y actividades adicionales que buscan la comprensión y análisis de los casos propuestos, se proporcionan los archivos de simulación del software PowerWorld, cada archivo tiene un alto grado interactivo y gráfico, amigable con el usuario. Estas guías utilizan datos reales de componentes del Sistema Nacional Interconectado, cortesía del CENACE.

En la parte final se emiten conclusiones y recomendaciones alcanzadas durante el desarrollo de esta investigación, se proporcionan criterios específicos del contenido del documento y algunas sugerencias para la aplicación de las guías.

ABSTRACT

In the present research, handbooks are developed using the Power World simulator to perform laboratory practice of Electrical Power Systems I at the Cotopaxi Technical University. It seeks to strengthen relevant topics in power systems which are in study, besides it is important its diffusion and application by the Electrical Engineering degree. This study is detailed in three chapters that are described in the following paragraphs.

In chapter I, it is presented theoretical basis about generators, power transformers, transmission lines, reactive compensation equipment and parts of the topic which are the foundation of the objective in this research, such as power flows and electrical power system defects.

In chapter II, it is provided the field research methodology, the process of the gathered information allowed to determine the surveys' results carried out with 50 students of sixth and seventh cycles of the Electrical Engineering degree, and an interview with the Degree's Coordinator which establishes the feasibility of the proposed research.

In chapter III, it is described the proposal design giving a short description of the Electrical Engineering degree, the developed methodology of seven practices which include examples according to the relevance of the study performed, illustrations and additional activities which seek the analysis and understanding of the proposed cases. Power World simulation software files are provided, each file is highly interactive and graphical. These handbooks use real data from the National Interconnected System components, courtesy of CENACE.

In the final issue conclusions and recommendations reached during the course of this research, we provide specific criteria for the content of the document and some suggestions for the implementation of the guidelines.

CERTIFICADO

Yo, Lcda. Ana Lucia Constante Noroña CI. 050259647-1, en mi calidad de Docente del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi a petición verbal del interesado:

Certifico que el contenido correspondiente al ABSTRACT de la tesis: **“ELABORACIÓN DE GUÍAS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA REALIZACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA I, UTILIZANDO EL SIMULADOR POWERWORLD PARA LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”** de autoría del señor Luis Guillermo Casa Casa portador de la cédula de ciudadanía N° 1712299872, expresa gramática y estructuralmente similar significado al RESUMEN de mencionado documento.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad, facultando al señor Casa hacer uso del presente documento, en la forma que estime conveniente.

Latacunga, 26 de noviembre de 2012.

Lcda. Ana Lucia Constante N.
Docente Centro de Idiomas – UTC.

INTRODUCCIÓN

La Universidad Técnica de Cotopaxi, con la visión de fortalecer su calidad académica, complementariamente con la implementación de laboratorios en las diferentes carreras, permitió la ejecución de este trabajo, que es un aporte necesario para la carrera de ingeniería eléctrica.

Esta propuesta se inició con el objetivo de obtener mejores herramientas que permitan facilitar el conocimiento de una manera más clara y didáctica, en especial de los Sistemas Eléctricos de Potencia, propuesta que se llevó a cabo en diferentes etapas de desarrollo, tales como el requerimiento de información necesaria para su elaboración, esto permitió acceder a diferentes entidades del sector eléctrico nacional, como son el CENACE y CELEC EP TRANSELECTRIC.

La propuesta desarrollada contiene tópicos relacionados a la operación en estado estable de sistemas de potencia e incluye pautas para el manejo del Simulador PowerWorld, también se incentiva la interpretación de los resultados que se obtienen de la simulación, el simulador utilizado es de versión libre sujeto a un número limitado de barras.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

1.1 INTRODUCCIÓN

Cada paso en el proceso de la generación, transmisión, distribución y la utilización de la energía eléctrica es de vital importancia para los ingenieros eléctricos, al estar rodeados probablemente por una industria más grande y compleja en comparación a otras, ya que encontrará desafíos en el diseño de futuros sistemas de potencia para entregar crecientes cantidades de energía eléctrica de forma segura, limpia y económica.

El objetivo de este capítulo es brevemente la revisión de la teoría y conceptos básicos de los sistemas eléctricos de potencia, en particular, se revisará lo correspondiente a los flujos de potencia a través de los componentes de una red eléctrica, posteriormente, se encamina a presentar herramientas de análisis y simulación de sistemas de potencia, tal como, el simulador PowerWorld.

1.2 FUNDAMENTOS DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

En cursos previos, de teoría de redes eléctricas y de máquinas eléctricas, el estudiante ha revisado los siguientes tópicos, lo cual, es importante citarlos, para que pueda revisarse el material correspondiente, a cada uno:

- a. Fasores.
- b. Potencia instantánea en circuitos eléctricos.
- c. Potencia compleja.
- d. Ecuaciones de redes.

- e. Circuitos trifásicos balanceados.
- f. Potencia en circuitos trifásicos balanceados.
- g. Máquinas eléctricas.

Es importante, que los conceptos estén bien comprendidos para el desenvolvimiento a través de este documento, pues muchos enunciados parten de los fundamentos básicos.

Antes que las redes de los sistemas de potencia puedan ser resueltas, primero deben ser modeladas. Los sistemas trifásicos balanceados se representan por una fase básica; la representación monofásica se usa también para sistemas desbalanceados mediante las componentes simétricas; El presente trabajo considera un sistema balanceado, donde las líneas de transmisión son representadas por el modelo π , otros componentes esenciales de un sistema de potencia son los generadores y transformadores, se usan modelos simples para su operación en estado estable balanceado.

Los diagramas unifilares de un sistema de potencia, muestran generadores, transformadores, líneas de transmisión, capacitores, reactores y cargas. El diagrama es usualmente limitado a grandes sistemas de transmisión. Como una regla, los circuitos de distribución y las cargas pequeñas no se muestran en detalle, pero son tomados en cuenta únicamente como cargas conectadas a las barras de subestaciones.

En el análisis de los sistemas de potencia, es conveniente usar el sistema por unidad. La ventaja de este método es la eliminación de transformadores por simples impedancias. Los sistemas por unidad se representan, seguidos por el diagrama de impedancias de la red, expresadas a una MVA base común.

1.3 GENERADORES SÍNCRONOS

La potencia a gran escala se genera por generadores síncronos trifásicos, conocidos como alternadores, impulsados ya sea por turbinas a vapor, turbinas hidráulicas o turbinas a gas. Los devanados de la armadura están ubicados en la parte estacionaria llamada estator y son diseñados para la generación de voltajes trifásicos balanceados y están arreglados para desarrollar el mismo número de polos magnéticos como el devanado de campo que se encuentra en el rotor.

El campo, el cual requiere una potencia relativamente pequeña, del 0,2 al 3 por ciento de los valores nominales de la máquina para su excitación, se ubica en el rotor. El rotor también está equipado con uno o más devanados cortocircuitados conocidos como devanados de choque. El rotor es impulsado por un motor primario a velocidad constante y su circuito de campo es excitado con corriente continua.

La excitación puede ser provista a través de anillos deslizantes y escobillas por medio de generadores de corriente continua, montados en el mismo eje del rotor de la máquina síncrona. Sin embargo, los sistemas modernos de excitación generalmente usan generadores de corriente alterna con rectificadores rodantes, y son conocidos como excitación sin escobillas. El sistema de excitación del generador mantiene el voltaje en el generador y controla el flujo de potencia reactiva.

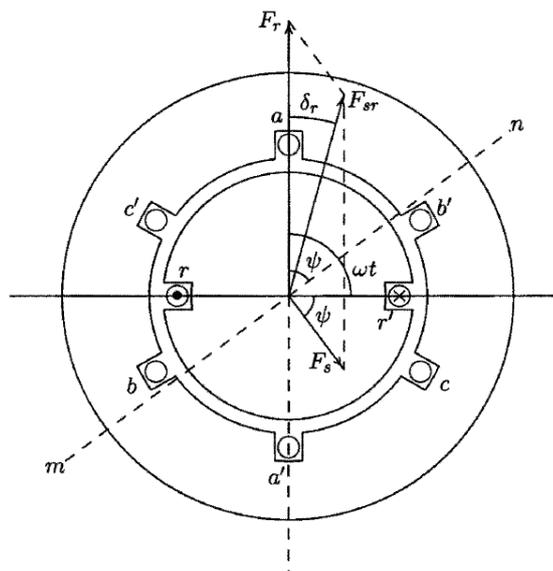
El rotor de una máquina síncrona puede ser de construcción cilíndrica o saliente. El rotor de tipo cilíndrico, tiene un devanado distribuido y un entrehierro uniforme. Estos generadores son impulsados por turbinas de vapor y están diseñados para altas velocidades de operación (3600 o 1800 revoluciones por minuto, máquinas de dos y cuatro polos, respectivamente). El rotor de estos generadores tiene relativamente una gran longitud axial y diámetro pequeño para

limitar las fuerzas centrífugas. Aproximadamente el 70% de los generadores síncronos grandes son de rotor cilíndrico de entre rangos de 150 hasta 1500 MVA. El rotor de tipo saliente, tiene devanados concentrados en los polos y entrehierros nada uniformes. Tiene un gran número de polos, corta longitud axial, y un gran diámetro. Los generadores en estaciones de potencia hidroeléctrica son impulsados por turbinas hidráulicas, y tienen rotores de polos salientes.

1.3.1 MODELO DEL GENERADOR

En la mayoría de la literatura técnica se parte de un sencillo generador trifásico de dos polos como el que se muestra en la figura 1, El estator contiene tres bobinas aa' , bb' , y cc' , desplazadas una de la otra en 120 grados eléctricos. Las bobinas aquí mostradas pueden ser consideradas para representar devanados distribuidos produciendo ondas de fuerza magneto motriz sinusoidal concentrada en los ejes magnéticos de las fases respectivas.

FIGURA 1 GENERADOR SÍNCRONO TRIFÁSICO – DOS POLOS

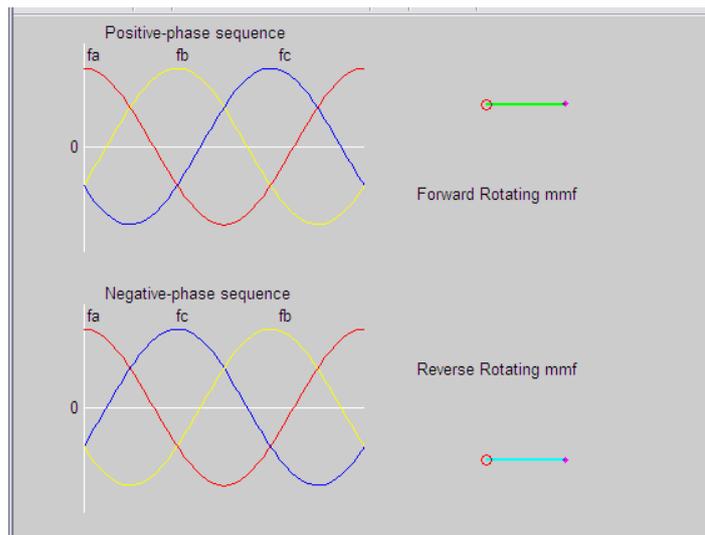


FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

Posterior al análisis matemático respectivo, los autores que Concluyen en que la fuerza magneto motriz resultante de la armadura tiene una amplitud constante perpendicular a la línea mn y que gira a una velocidad constante y en sincronismo con la fuerza magneto motriz del campo F_r .

FIGURA 2 CAMPO MAGNÉTICO ROTATORIO.



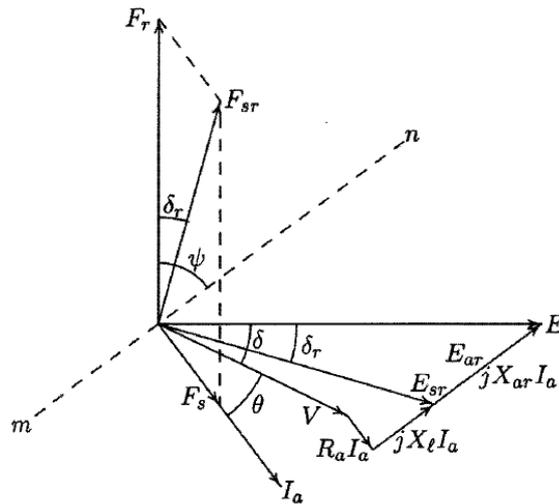
FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

El campo de una máquina sincrónica típica ajustado para operación como un generador se muestra en la figura, usando vectores espacio para representar los diversos campos. Cuando el rotor está girando a velocidad sincrónica y la corriente en la armadura es cero, el campo de la fuerza magneto motriz F_r produce fuerza electromotriz E generada sin carga en cada fase. El voltaje generado sin carga que es proporcional a la corriente de campo, es el voltaje de excitación. El fasor de voltaje para la fase a, que está retrasado a F_r en 90° . Se combina en el diagrama del vector de la fuerza magneto motriz¹.

¹ Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., y Umans, S., Máquinas Eléctricas, sexta edición, McGraw-Hill, México, 2003.

FIGURA 3 DIAGRAMA COMBINADO FASOR-VECTOR, UNA FASE; ROTOR CILÍNDRICO.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

Este diagrama fasor/vector combinado conduce a un modelo de circuito para la máquina sincrónica. Se debe enfatizar que las fuerzas magneto motrices son vectores espacio, y, las fuerzas electromotrices son fasores de tiempo. Cuando en la armadura están circulando corrientes trifásicas balanceadas, F_s es producida perpendicularmente a la línea mn . La interacción de las fuerzas magneto motrices en la armadura y el campo, conocido como reacción en la armadura, aumenta la fuerza magneto motriz resultante en el entrehierro F_{sr} , que es el vector suma de ambas fuerzas.

La fuerza magneto motriz resultante es la responsable del flujo resultante en el entrehierro Φ_{sr} que induce la fuerza electromotriz generada bajo carga E_{sr} . La fuerza magneto motriz en la armadura F_s induce la fuerza electromotriz E_{ar} , conocida como voltaje de reacción de armadura, que es perpendicular a F_s . El voltaje E_{ar} adelanta a I_a en 90° y así puede ser representado como una caída de voltaje a través de una reactancia X_{ar} debido a la corriente I_a . X_{ar} es la reactancia

de reacción de armadura. El fasor suma de E y E_{ar} se representa por E_{sr} perpendicular a F_{sr} , que representa la fuerza electromotriz generada bajo carga:

$$E = E_{sr} + jX_{ar}I_a$$

El voltaje terminal V es menor que E_{sr} por la cantidad de caída de voltaje resistiva $R_a I_a$ y la caída de voltaje en la reactancia de fuga $X_l I_a$ así:

$$E = V + [R_a + j(X_l + X_{ar})]I_a$$

O,

$$E = V + [R_a + jX_s]I_a$$

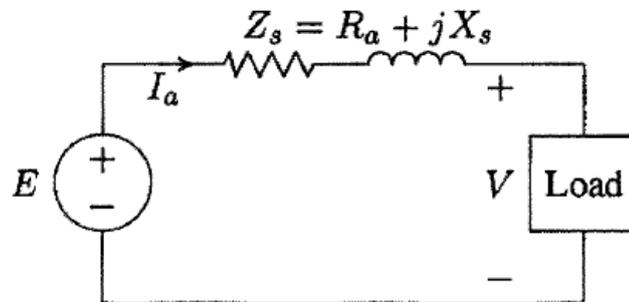
Donde $X_s = (X_l + X_{ar})$ es la reactancia sincrónica. El coseno del ángulo entre I y V , es el $\cos \theta$ que representa el factor de potencia en los terminales del generador. El ángulo entre E y E_{sr} es igual al ángulo entre las fuerzas magneto motrices del rotor F_r y del entrehierro F_{sr} , denominado δ_r . La potencia desarrollada por la máquina es proporcional al producto de F_r, F_{sr} y $\sin \delta_r$. Las posiciones relativas de estas fuerzas magneto motrices dicta la acción de la máquina sincrónica.

Cuando F_r adelanta a F_{sr} un ángulo δ_r , la máquina opera como un generador, y cuando F_r sigue a F_{sr} , la máquina actuará como un motor. Como E y E_{sr} son proporcionales a F_r y F_{sr} , respectivamente, la potencia desarrollada por la máquina es proporcional al producto de E_r, E_{sr} y $\sin \delta_r$. El ángulo δ_r , es el ángulo de potencia. Es muy importante porque relaciona el ángulo temporal entre los fasores de las fuerzas magneto-motrices con el ángulo espacial entre los campos magnéticos de la máquina. Usualmente, la potencia desarrollada se expresa en términos del voltaje de excitación E , el voltaje terminal V , y el $\sin \delta$. El ángulo δ es aproximadamente igual a δ_r porque la impedancia de fuga es muy pequeña comparada a la reactancia de magnetización.

Debido a la no linealidad de la curva de magnetización de la máquina, la reactancia sincrónica no es constante. La reactancia sincrónica no saturada puede ser encontrada de los datos de circuito abierto y de corto circuito. Para operación a un voltaje terminal cercano al nominal, se asume que la máquina es equivalente a una no saturada, con curva de magnetización lineal desde el origen atravesando el punto de voltaje nominal en circuito abierto. Para el análisis en estado estable, un valor constante conocido como valor saturado de la reactancia sincrónica corresponde al voltaje nominal usado. Un modelo simple por fase para un generador de rotor cilíndrico se presenta en la figura. La resistencia en la armadura generalmente es mucho menor que la reactancia sincrónica y por tanto se desprecia. El circuito equivalente conectado a una barra infinita es el siguiente:

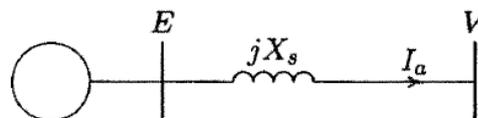
$$E = V + jX_s I_a$$

FIGURA 4 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UNA MÁQUINA SINCRÓNICA.



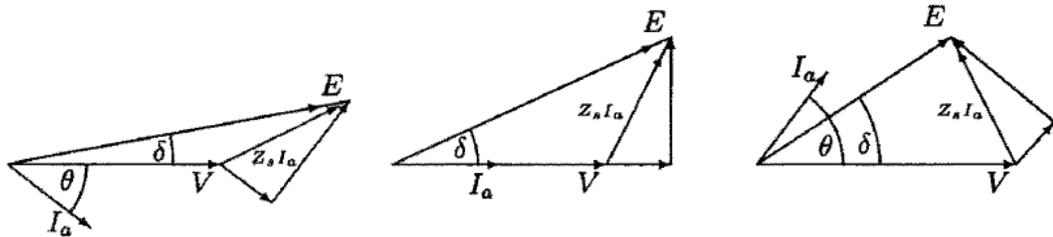
FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.
ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

FIGURA 5 MÁQUINA SINCRÓNICA CONECTADA A UNA BARRA INFINITA.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.
ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

FIGURA 6 DIAGRAMA FASORIAL DE UN GENERADOR SINCRÓNICO.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.
 ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

En esta figura, se muestra el diagrama fasorial del generador con el voltaje terminal como la referencia para excitaciones que determinan un factor de potencia en retraso, unidad y en adelante. La regulación de voltaje se define como el porcentaje de cambio en el voltaje terminal bajo la condición de sin carga y con carga nominal. Permite obtener un indicador del cambio en la corriente de campo requerida para mantener el voltaje del sistema cuando se presenta condiciones desde sin carga hasta la carga nominal a un factor de potencia específico.

$$VR = \frac{|V_{\text{sin carga}}| - |V_{\text{nominal}}|}{|V_{\text{nominal}}|} * 100 = \frac{|E| - |V_{\text{nominal}}|}{|V_{\text{nominal}}|} * 100$$

El valor calculado de E se usa para encontrar la corriente de campo desde una curva de magnetización asumida como lineal.

1.3.2 CONTROL DEL FACTOR DE POTENCIA

La mayoría de máquinas sincrónicas están conectadas a grandes redes de potencia eléctrica interconectadas. Estas redes tienen la característica importante que el voltaje del sistema en el punto de conexión es constante en magnitud, ángulo de fase y frecuencia. Tal punto en un sistema de potencia es referido a una barra infinita. Eso es, el voltaje en la barra del generador no será alterado por cambios en la condición de operación del generador.

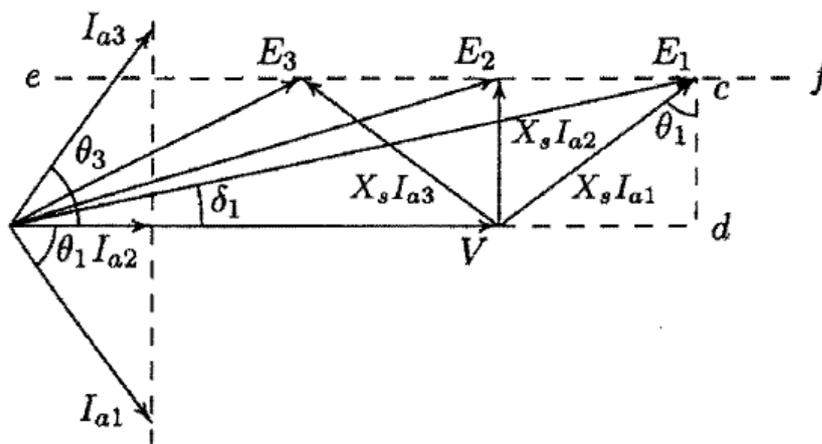
La habilidad para variar la excitación del rotor es una característica importante de la máquina síncrona, por tanto, se considera este efecto de variación cuando la máquina opera como un generador con potencia mecánica constante. El circuito equivalente por fase de un generador síncrono conectado a una barra infinita se mostró en la figura 5. Se desprecia la resistencia de la armadura, la salida de potencia es igual a la potencia desarrollada, la cual se asume que permanece constante, de acuerdo a²:

$$P_{3\phi} = \Re[3VI_a^*] = 3[V][I_a] \cos \theta$$

Donde V es el voltaje terminal fase – neutro, considerado constante. La ecuación muestra que la potencia constante desarrollada a un voltaje terminal fijo V , $I_a \cos \theta$ debe ser constante. El pico del fasor de la corriente de armadura debe caer en una línea vertical como el factor de potencia varía con la variación de la corriente de campo.

$$cd = E_1 \sin \delta_1 = X_s I_{a1} \cos \theta_1$$

FIGURA 7 VARIACIÓN DE LA CORRIENTE DE CAMPO A POTENCIA CONSTANTE.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

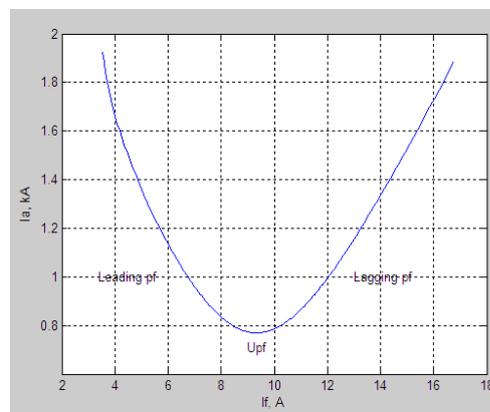
ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

² Chapman Stephen J., Máquinas Eléctricas, McGraw-Hill, 2000.

Así, $E_1 \sin \delta_1$ es una constante, y el punto de E_1 esta sobre la línea ef . En la figura, los diagramas fasoriales están dibujados para las tres corrientes de armadura. Si θ es cero, el generador opera en factor de potencia unitario y la corriente en la armadura tiene un valor mínimo (I_{a2}), con lo cual resulta en E_2 . Similarmente, E_3 se obtiene con respecto a I_{a3} en un factor de potencia en adelanto. La generación de potencia reactiva puede ser controlada por medio de la excitación del rotor mientras se mantiene una salida de potencia activa constante. La variación en la magnitud de la corriente de armadura y el voltaje de excitación se representan mejor por una curva. Usualmente la corriente de campo es usada como la abscisa en vez del voltaje de excitación porque la corriente de campo es fácilmente medida.

La curva de la corriente de armadura como función de la corriente de campo, permite obtener la curva V de máquinas síncronas, que constituye una de las características más importantes del generador; pues hay un límite más allá del cual la excitación no puede ser reducida. Este límite es alcanzado cuando $\delta = 90^\circ$. Cualquier reducción en la excitación baja el límite de estabilidad para una carga en particular que causará que el rotor salga de sincronismo. La curva V se ilustra en la siguiente figura:

FIGURA 8 CURVA V DE GENERADOR TÍPICO.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

1.3.3 CARACTERÍSTICAS DEL ÁNGULO DE POTENCIA³

Considérese el circuito equivalente por fase de la figura 4, La potencia compleja trifásica en el terminal del generador es $S_{3\phi} = 3VI_a^*$, expresando los fasores de voltaje en forma polar, la corriente de armadura es:

$$I_a = \frac{|E|\angle\delta - |V|\angle 0}{|Z_s|\angle\zeta}$$

Substituyendo por I_a^* , resulta:

$$S_{3\phi} = 3 \frac{|E||V|}{|Z_s|} \angle\zeta - \delta - 3 \frac{|V|^2}{|Z_s|} \angle\zeta$$

Así, la potencia activa $P_{3\phi}$ y la potencia reactiva $Q_{3\phi}$ son:

$$P_{3\phi} = 3 \frac{|E||V|}{|Z_s|} \cos(\zeta - \delta) - 3 \frac{|V|^2}{|Z_s|} \cos \zeta$$

$$Q_{3\phi} = 3 \frac{|E||V|}{|Z_s|} \sin(\zeta - \delta) - 3 \frac{|V|^2}{|Z_s|} \sin \zeta$$

Sí R_a es despreciado, entonces $Z_s = jX_s$ y $\zeta = 90^\circ$. Estas ecuaciones se reducen a:

$$P_{3\phi} = 3 \frac{|E||V|}{|X_s|} \sin \delta$$

$$Q_{3\phi} = 3 \frac{|V|}{|X_s|} (|E| \cos \delta - |V|)$$

³ Fraile Mora Jesús, Máquinas Eléctricas, cuarta edición, McGraw-Hill Interamericana de México, 2002.

Para la potencia activa, si $|E|$ y $|V|$ se mantienen fijos y el ángulo de potencia δ se cambia variando el torque mecánico, la potencia transferida varía sinusoidalmente con el ángulo δ . La potencia máxima teórica ocurre cuando $\delta = 90^\circ$.

$$P_{\max(3\phi)} = 3 \frac{|E||V|}{X_s}$$

El comportamiento de la máquina síncrona puede ser descrito como sigue, si empezamos con $\delta = 0^\circ$ e incrementamos el torque, la máquina acelera y la fuerza magneto motriz del rotor F_r adelanta con respecto a la fuerza magneto motriz resultante F_{sr} . Esto resulta en un incremento en δ , causando que la máquina entregue potencia eléctrica. En algún valor de δ la máquina alcanza el equilibrio donde la salida de potencia eléctrica iguala en cantidad al incremento de potencia mecánica a causa del aumento de torque. Es claro que si, un intento fuese hecho para adelantar δ más allá de 90° incrementando el torque, la salida de potencia eléctrica decrecería desde el punto P_{max} . Por otro lado, el exceso de torque continua acelerando la máquina, y las fuerzas magneto-motrices no se acoplarán magnéticamente. La máquina pierde sincronismo y el equipo automático lo desconecta del sistema. El valor de P_{max} se llama límite de estabilidad de estado estable o límite de estabilidad estático. En general, las consideraciones de estabilidad dictan que una máquina síncrona alcanza la operación en estado estable para un ángulo de potencia considerablemente menor a 90° . El control de flujo de potencia activa se mantiene por el gobernador del generador a través del canal de control frecuencia-potencia.

Para δ pequeño, $\cos \delta$ es cercanamente a la unidad y la potencia reactiva puede ser aproximada a:

$$Q_{3\phi} \approx 3 \frac{|V|}{X_s} (|E| - |V|)$$

Se analiza que cuando $|E| > |V|$, el generador entrega potencia reactiva a la barra, se dice que el generador esta sobrecitado. Si $|E| < |V|$, la potencia reactiva

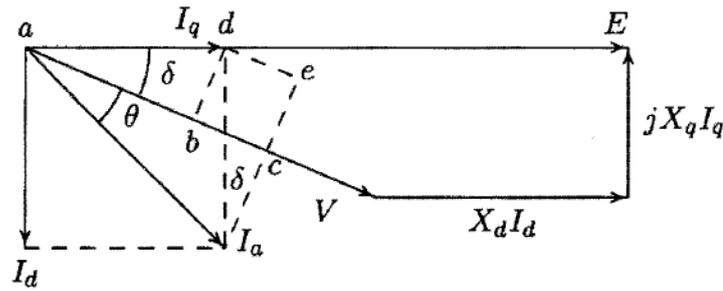
entregada a la barra es negativa; esto es, la barra está suministrando potencia reactiva positiva al generador. Los generadores normalmente son operados en el modo sobrecargado debido a que son la fuente principal de potencia reactiva para cargas inductivas en todo el sistema. En tal virtud, el flujo de potencia reactiva se maneja principalmente por la diferencia en el voltaje de excitación $|E|$ y el voltaje en barras $|V|$. El ajuste del voltaje de excitación para el control de potencia reactiva es a través del sistema de excitación del generador.

1.3.4 GENERADORES SINCRÓNICOS DE POLOS SALIENTES⁴

El modelo desarrollado en la sección precedente, únicamente es válido para generadores de rotor cilíndrico con entrehierros uniformes. El rotor de polos salientes resulta en deformidad de la reluctancia magnética del entrehierro. La reluctancia a lo largo del eje polar, comúnmente referido como rotor de eje directo, es apreciablemente menor que a lo largo del eje interpolar, comúnmente referido como eje de cuadratura. En tal razón, la reactancia tiene un valor alto X_d a lo largo del eje directo, y un valor bajo X_q a lo largo del eje de cuadratura. Estas reactancias producen caída de voltaje en la armadura y puede ser tomado en cuenta para encontrar la corriente de armadura I_a en dos componentes I_q , en fase, e I_d en cuadratura, con el voltaje de excitación. El diagrama fasorial con la resistencia de armadura despreciada se muestra a continuación.

FIGURA 9 DIAGRAMA FASORIAL PARA UN GENERADOR DE POLOS SALIENTES.

⁴ Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., y Umans, S., Máquinas Eléctricas, sexta edición, McGraw-Hill, México, 2003.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

La magnitud del voltaje de excitación es: $|E| = |V| \cos \delta + X_d I_d$; La potencia activa trifásica en terminales del generador es: $P = 3|V||I_a| \cos \theta$; La componente de potencia de la corriente de armadura puede expresarse en términos de I_d como sigue: $|I_a| \cos \theta = ab + de = I_q \cos \delta + I_d \sin \delta$; Con estas dos ecuaciones, se obtiene:

$$P = 3|V|(I_q \cos \delta + I_d \sin \delta)$$

Según el diagrama fasorial: $|V| \sin \delta = X_q I_q$; O, $I_q = \frac{|V| \sin \delta}{X_q}$; También I_d está dada por:

$$I_d = \frac{|E| - |V| \cos \delta}{X_d}$$

Substituyendo para I_d e I_q , la potencia activa con la corriente de armadura despreciada se convierte en:

$$P_{3\phi} = 3 \frac{|E||V|}{X_d} \sin \delta + 3|V|^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\delta$$

La ecuación de potencia contiene un término adicional conocido como potencia de reluctancia. Esta ecuación puede ser empleada para análisis en estado estable. Para análisis de cortocircuito, asumiendo una relación alta X/R , el factor de potencia alcanza cero y el componente cuadratura de corriente puede ser a menudo despreciado. En tal caso, X_d únicamente reemplaza a X_s usada para la máquina de rotor cilíndrico. Los generadores son modelados así por su reactancia de eje directo en serie con una fuente de potencia a voltaje constante. Estas reactancias

generalmente se expresan en por unidad y están disponibles de los datos del fabricante.

1.4 TRANSFORMADORES DE POTENCIA

El transformador de potencia, es un componente principal de un sistema de potencia, pues permite la transmisión de potencia de manera económica con alta eficiencia y bajas caídas de voltaje. Debido a que la potencia eléctrica es proporcional al producto del voltaje y la corriente, niveles bajos de corriente (por ende bajas pérdidas I^2R y bajas caídas de voltaje IZ) pueden ser mantenidos para niveles de potencia dados mediante altos voltajes.

Los transformadores de potencia transforman voltaje y corriente alternos a niveles óptimos para generación, transmisión, distribución y la utilización de la potencia eléctrica.

El desarrollo de un transformador práctico comercialmente por William Stanley en 1885, hizo que los sistemas de potencia de corriente alterna (ac) sean más atractivos que los sistemas de potencia de corriente directa (dc). El sistema ac con un transformador superó los problemas de voltaje encontrados en sistemas dc como incremento de niveles de carga y distancias de transmisión. Los transformadores de potencia modernos están cercanamente al 100 % de eficiencia, con valores nominales hasta y más allá de 1300 MVA.

La revisión se enmarca en la teoría básica de transformadores y el desarrollo de circuitos equivalentes para transformadores prácticos operando en condiciones sinusoidales de estado estable, el modelo se basa en un transformador ideal, que asume las siguientes consideraciones:

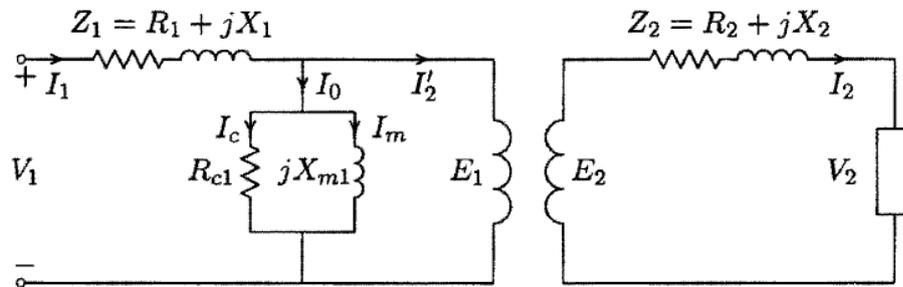
- a. Los devanados tienen resistencia cero, por tanto, las pérdidas I^2R en los devanados son cero.
- b. La permeabilidad del núcleo μ_c , es infinita, lo cual corresponde a cero reluctancia en el núcleo.

- c. No hay fuga de flujo, esto es, todo el flujo Φ_c , está confinado al núcleo y enlaza ambos devanados.
- d. No hay pérdidas en el núcleo.

1.4.1 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR

El modelo de circuito equivalente de un transformador monofásico se muestra en la figura.

FIGURA 10 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

Consiste de un transformador ideal de relación $N_1:N_2$ conjuntamente con elementos que representan las imperfecciones del transformador real. Un transformador ideal tendría devanados con resistencia cero y sin pérdidas, núcleo con permeabilidad infinita. El voltaje E_1 a través del primario del transformador ideal representa el voltaje eficaz inducido en el devanado primario por el flujo mutuo Φ . Esta es la porción de flujo del núcleo el cual enlaza ambas bobinas, primario y secundario.

En un transformador real, la reluctancia del núcleo es finita, y cuando la corriente secundaria I_2 es cero, la corriente primaria tiene un valor finito. Sin carga, el voltaje inducido E_1 es casi igual al voltaje de suministro V_1 , el voltaje y el flujo inducido son sinusoidales. Sin embargo, a causa de la característica no lineal del núcleo ferro-magnético, la corriente sin carga no es sinusoidal y contiene

componentes armónicas. La tercera armónica es particularmente un problema en ciertas conexiones trifásicas de transformadores.

Para el propósito de modelación, se asume una corriente sin carga sinusoidal con el valor eficaz de I_0 , conocida como corriente sin carga. Esta corriente tiene una componente I_m , en fase con el flujo, conocida como corriente de magnetización, para establecer el flujo del núcleo. Al estar el flujo en retraso al voltaje inducido E_1 en 90° ; I_m también está en retraso al voltaje inducido E_1 en 90° . Así, este componente puede ser representado en el circuito por la reactancia de magnetización jX_{m1} . La otra componente de I_0 es I_C , que suministra las pérdidas por corrientes inducidas e histéresis en el núcleo. Esta es una componente de potencia, está en fase con E_1 y se representa por la resistencia R_{C1} .

En un transformador real con reluctancia finita, todo el flujo no rodea ambos devanados primario y secundario. El flujo tiene tres componentes: flujo mutuo, flujo de dispersión primario, y flujo de dispersión secundario. El flujo de dispersión de un devanado no enlaza al otro, y las caídas de voltaje causan que el flujo de dispersión se exprese en términos de reactancias de fuga X_1 y X_2 . Finalmente R_1 y R_2 son incluidas para representar la resistencia de los devanados primario y secundario.

Para obtener las características de rendimiento de un transformador, es conveniente usar un modelo de circuito equivalente referido a un lado del transformador, de la ley de voltaje de Kirchhoff, la ecuación de voltaje en el secundario es⁵:

$$E_2 = V_2 + Z_2 I_2$$

⁵ Fraile Mora Jesús, Máquinas Eléctricas, cuarta edición, McGraw-Hill Interamericana de México, 2002.

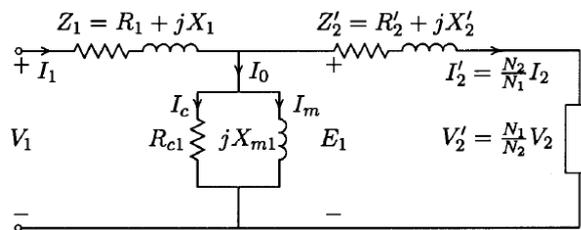
De la relación usada para un transformador ideal, el voltaje y la corriente inducidos en el secundario son $E_2 = (N_2/N_1) * E_1$ e $I_2 = (N_1/N_2) * I'_2$ respectivamente,

$$E_1 = \frac{N_1}{N_2} V_2 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_2 I'_2 = V'_2 + Z'_2 I'_2$$

Donde,

$$Z'_2 = R'_2 + jX'_2 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_2 + j \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 X_2$$

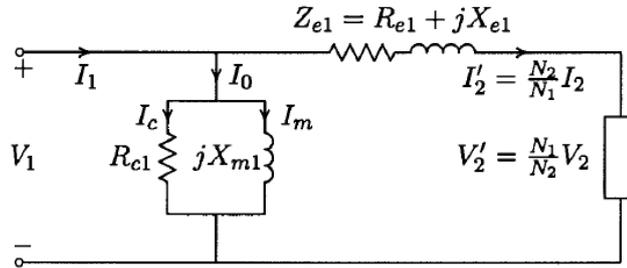
FIGURA 11 CIRCUITO EQUIVALENTE EXACTO REFERIDO AL LADO PRIMARIO.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.
ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

Sin carga, la caída de voltaje primaria es muy pequeña, y V_1 puede usarse en lugar de E_1 para el cálculo de la corriente sin carga I_0 . Así, la rama en derivación puede moverse a la izquierda de la impedancia serie primaria con muy poca pérdida de precisión. De esta forma, las cantidades primarias R_1 y X_1 pueden combinarse con las cantidades referidas al secundario R'_2 y X'_2 para obtener las cantidades equivalentes del primario R_{e1} y X_{e1} .

FIGURA 12 CIRCUITO EQUIVALENTE APROXIMADO REFERIDO AL PRIMARIO.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.
 ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

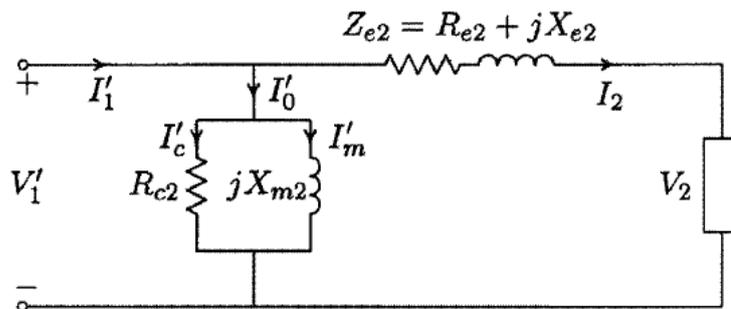
$$V_1 = V_2' + (R_{e1} + jX_{e1})I_2'$$

Donde,

$$R_{e1} = R_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_2 \quad X_{e1} = X_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 X_2 \quad e \quad I_2' = \frac{S_L^*}{3V_2'^*}$$

$$V_1' = V_2 + (R_{e2} + jX_{e2})I_2$$

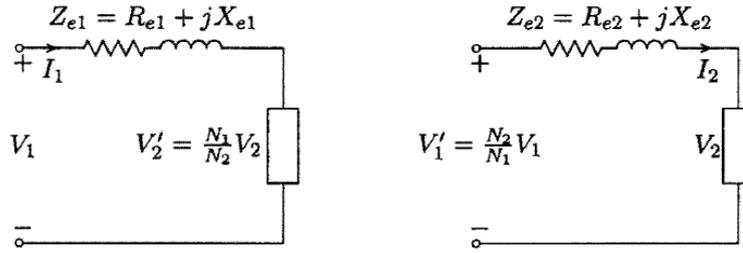
FIGURA 13 CIRCUITO EQUIVALENTE APROXIMADO REFERIDO AL SECUNDARIO.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.
 ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

Los transformadores de potencia son generalmente diseñados con permeabilidad de núcleo muy alta y pérdidas de núcleo muy pequeñas. Consecuentemente, una aproximación mayor del circuito equivalente puede hacerse omitiendo la rama en derivación. El circuito equivalente referido al secundario se muestra a continuación:

FIGURA 14 CIRCUITOS SIMPLIFICADOS REFERIDOS A UN LADO.



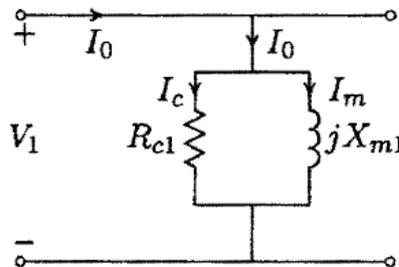
FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

1.4.2 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DEL CIRCUITO EQUIVALENTE

Los parámetros del circuito equivalente aproximado son fácilmente obtenidos de las pruebas de circuito abierto y de corto circuito⁶. En la prueba de circuito abierto, se conectan los instrumentos para medir el voltaje de entrada V_1 , la corriente de entrada sin carga I_0 , y la potencia de entrada P_0 . Si el secundario está abierto, la corriente referida al secundario I_2' será cero, y únicamente una corriente pequeña sin carga circulará desde la fuente. También la caída de voltaje primaria $(R_1 + jX_1)I_0$ puede ser despreciada, y el circuito equivalente se reduce al mostrado en la figura.

FIGURA 15 CIRCUITO EQUIVALENTE PARA LA PRUEBA DE CIRCUITO ABIERTO.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

⁶ Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., y Umans, S., Máquinas Eléctricas, sexta edición, McGraw-Hill, México, 2003.

Cómo se considera que las pérdidas en el cobre del devanado secundario son cero y las del primario $R_1 I_0^2$ son insignificantes, la potencia de entrada sin carga P_0 representa las pérdidas del núcleo del transformador comúnmente referidas a las pérdidas en el hierro. Los elementos paralelos R_c y X_m pueden ser determinados de la siguiente relación:

$$R_{c1} = \frac{V_1^2}{P_0}$$

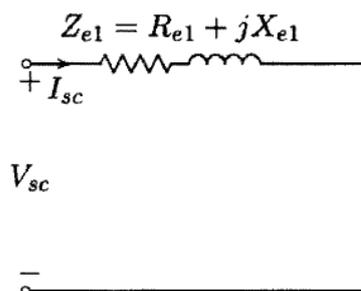
Las dos componentes de la corriente sin carga son:

$$I_c = \frac{V_1}{R_{c1}}; \text{ E, } I_m = \sqrt{I_0^2 - I_c^2}$$

Por tanto, la reactancia de magnetización es: $X_{m1} = \frac{V_1}{I_m}$

En la prueba de corto circuito, un voltaje reducido V_{sc} se aplica a los terminales de uno de los devanados mientras los terminales del otro devanado están en corto circuito. Se conectan los instrumentos para medir el voltaje de entrada V_{sc} , la corriente de entrada I_{sc} , y la potencia de entrada P_{sc} . El voltaje aplicado se ajusta hasta que la corriente nominal fluya en los devanados. El voltaje primario que se requiere para producir la corriente nominal es únicamente un porcentaje pequeño del voltaje nominal. En el correspondiente valor pequeño de flujo del núcleo, la corriente de excitación y pérdidas del núcleo son completamente insignificantes, y la rama paralela puede omitirse. Así, la entrada de potencia puede tomarse para representar las pérdidas en el cobre del devanado. El transformador aparece como un corto cuando se ve desde el primario con la impedancia de dispersión equivalente Z_{e1} que consiste de la impedancia de dispersión primaria y la impedancia de dispersión referida al secundario.

FIGURA 16 CIRCUITO EQUIVALENTE PARA LA PRUEBA DE CORTO CIRCUITO.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

Los elementos serie R_{e1} y X_{e1} pueden determinarse de la relación:

$$Z_{e1} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}}; Y, R_{e1} = \frac{P_{sc}}{(I_{sc})^2}$$

Por tanto, la reactancia de dispersión equivalente es: $X_{e1} = \sqrt{Z_{e1}^2 - R_{e1}^2}$

1.4.3 RENDIMIENTO DEL TRANSFORMADOR

El circuito equivalente puede ser usado para predecir las características de rendimiento del transformador. Un aspecto importante es la eficiencia del transformador. La eficiencia del transformador de potencia varía desde el 95% al 99%, las eficiencias más altas se obtienen de transformadores con potencias nominales elevadas. La eficiencia actual de un transformador está dada por:

$$\eta = \frac{\text{Potencia de salida}}{\text{Potencia de entrada}}$$

La eficiencia máxima ocurre cuando las pérdidas en el cobre son iguales a las pérdidas en el núcleo a una n-carga dada en por unidad:

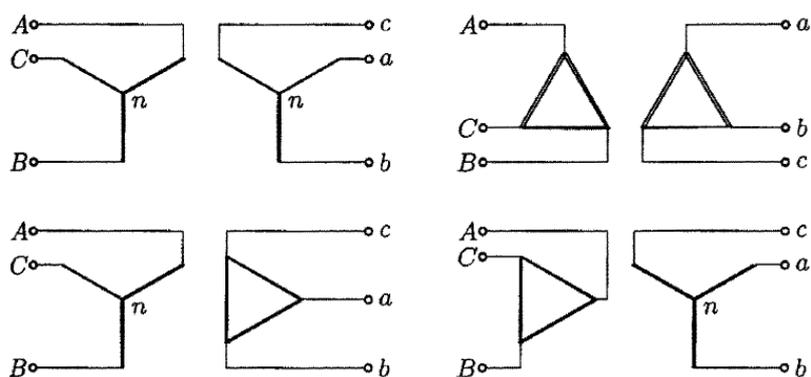
$$n = \sqrt{\frac{P_c}{P_{cu}}}$$

1.4.4 CONEXIONES EN TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS⁷

La potencia trifásica se transforma con el uso de unidades trifásicas. Sin embargo, en unidades de extra alto voltaje, las distancias de aislamiento y las limitaciones de envío pueden requerir un banco de tres transformadores monofásicos conectados en disposiciones trifásicas.

Los devanados primario y secundario se pueden conectar ya sea en configuraciones en estrella (Y) o en delta (Δ). Con lo cual se pueden tener cuatro posibles combinaciones de conexiones: Y-Y, Δ - Δ , Y- Δ y Δ -Y como se muestra en el esquema simple.

FIGURA 17 CONEXIONES DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

⁷ Electrical Transmission and Distribution Reference Book, ABB, quinta edición, 1997.

Las líneas gruesas indican los devanados del transformador; los devanados mostrados en paralelo están ubicados en el mismo núcleo y sus voltajes están en fase. La conexión Y-Y ofrece las ventajas de reducción en los costos por aislamiento y la disponibilidad de neutro para propósitos de puesta a tierra. Sin embargo, a causa de los problemas asociados con la tercera armónica y operación desbalanceada, esta conexión raramente se usa. Para eliminar las armónicas, un tercer conjunto de devanados, llamado devanado terciario, se conecta en delta, acoplado al núcleo para proveer una trayectoria a las corrientes de la tercera armónica. A este transformador se le conoce como de tres devanados. El terciario se puede cargar con reactores o capacitores conmutados para la compensación de potencia reactiva. El Δ - Δ provee una conexión sin neutro y cada transformador debe resistir el pleno voltaje línea-línea. La conexión Δ provee una trayectoria para el flujo de corrientes con tercera armónica; esta conexión tiene la ventaja que un transformador puede removerse para reparación, con los dos restantes entregando potencia trifásica reducida a un 58% de la nominal del banco original; se conoce como la conexión delta abierta V. La conexión más común es Y- Δ o Δ -Y, esta conexión es más estable con respecto a cargas desbalanceadas, y si la conexión Y se usa en el lado de alto voltaje, los costos por aislamiento se reducen. La conexión Y- Δ se usa para reducir un alto voltaje a un voltaje más bajo. El punto neutro en el lado de alto voltaje puede ser puesto a tierra; que es deseable en la mayoría de casos. La conexión Δ -Y se usa para elevar a un voltaje alto.

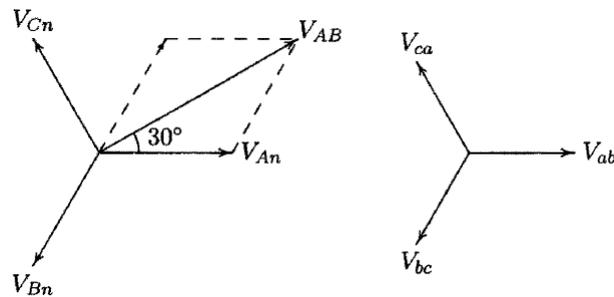
1.4.5 MODELO POR FASE DE UN TRANSFORMADOR TRIFÁSICO⁸

En las conexiones Y-Y y Δ - Δ , la relación de los voltajes de línea en los lados de alto y bajo voltaje es la misma como la relación de los voltajes de fase en ambos lados. Además, no hay cambio de fase entre los voltajes de línea correspondiente en los lados de alto y bajo voltaje. Sin embargo, las conexiones Y- Δ y Δ -Y resultarán en un cambio de fase de 30° entre los voltajes línea a línea en el primario y secundario. Los devanados están dispuestos de acuerdo a las normas

⁸ Winders John J., Power Transformers Principles and Applications, Marcel Dekker, 2002.

internacionales, tal que, el voltaje de línea en el lado de alto voltaje adelanta al voltaje de línea correspondiente en el lado de bajo voltaje en 30° independientemente de qué lado es Y o Δ . Considérese el diagrama esquemático Y- Δ la secuencia positiva de fase para el diagrama fasorial de voltaje se muestra a continuación, donde, V_{An} es la referencia.

FIGURA 18 VOLTAJES LÍNEA-LÍNEA – CONEXIÓN Y – Δ .



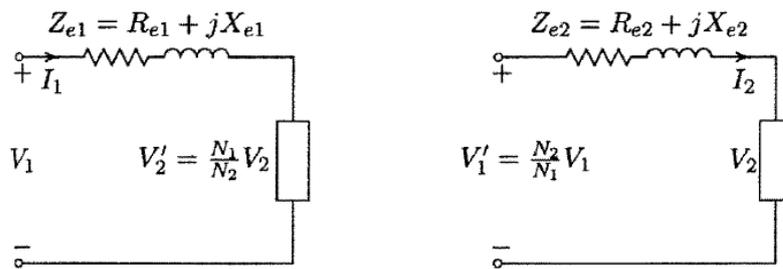
FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

A causa que las pérdidas en el núcleo y de la corriente de magnetización para transformadores de potencia esta en el orden del 1% de los datos nominales máximos, la impedancia paralelo se desprecia y únicamente la resistencia del devanado y la reactancia de fuga se usan para modelar el transformador. En el manejo de bancos Y- Δ o Δ -Y, es conveniente reemplazar la conexión Δ por una conexión Y equivalente y entonces trabajar con una sola fase. Como para operaciones balanceadas, Y neutral y el neutro del Y equivalente de la conexión Δ están al mismo potencial, pueden conectarse juntos y representarse por un conductor neutro. Cuando la impedancia serie equivalente de un transformador es referida al lado delta, las impedancias conectadas en delta del transformador se reemplazan por impedancias equivalentes conectadas en Y, dadas por $Z_Y = Z_\Delta/3$.

El modelo equivalente por fase con la rama paralela despreciada se muestra en la figura. Z_{e1} y Z_{e2} son las impedancias equivalentes basadas en las conexiones línea a neutro, y los voltajes son los valores línea a neutro.

FIGURA 19 CIRCUITO EQUIVALENTE POR FASE.



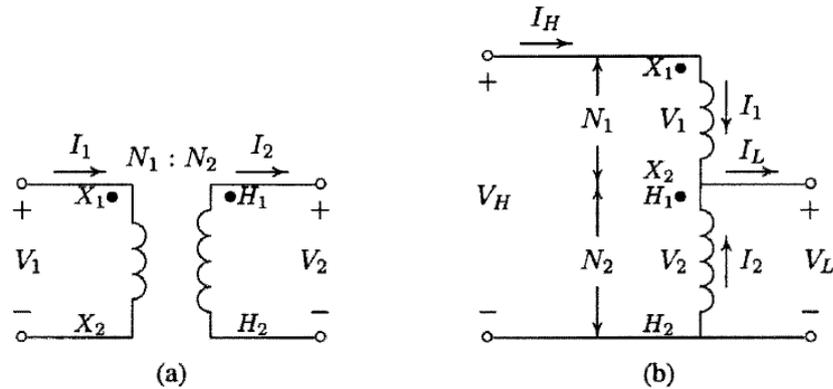
FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.
ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

1.4.6 AUTOTRANSFORMADORES

Los transformadores pueden ser construidos de tal forma que las bobinas primaria y secundaria estén conectadas eléctricamente, a este tipo de transformador se le denomina autotransformador. Un transformador convencional de dos devanados puede convertirse en autotransformador conectando en serie los devanados primario y secundario, para esto debe considerarse la polaridad de éstos. Las corrientes y voltajes de los dos devanados están relacionados por:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a; \quad \frac{I_2}{I_1} = \frac{N_1}{N_2} = a$$

FIGURA 20 (A) TRANSFORMADOR DE DOS DEVANADOS, (B) CONECTADO COMO AUTOTRANSFORMADOR.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.
ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

Donde, a es la relación de vueltas del transformador de dos devanados.

La relación de la potencia aparente nominal de un autotransformador a un transformador de dos devanados, conocida como potencia nominal de ventaja, se encuentra de:

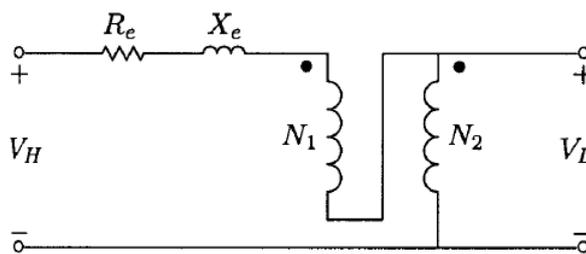
$$\frac{S_{auto}}{S_{2\ devanados}} = \frac{(V_1 + V_2)I_1}{V_1 I_1} = 1 + \frac{N_2}{N_1} = 1 + \frac{1}{a}$$

Se puede apreciar que se obtiene datos nominales altos con un autotransformador con un gran número de vueltas del devanado común (N_2). Esto es consecuencia del hecho que únicamente $S_{2\ devanados}$ se transforma por inducción electromagnética. El resto pasa del primario al secundario sin estar acoplados a través de los devanados del transformador, conocida como la potencia conducida. Comparado con un transformador de dos devanados con los mismos datos nominales, un autotransformador es más pequeño, más eficiente y tiene menor impedancia interna. Los autotransformadores trifásicos se usan extensamente en sistemas de potencia donde los voltajes de los dos sistemas acoplados por el transformador no difieren en un factor mayor a 3.

1.4.6.1 MODELO DEL AUTOTRANSFORMADOR

Cuando un transformador de dos devanados se conecta como un autotransformador, su impedancia equivalente expresada en por unidad es mucho más pequeña comparada al valor equivalente de la conexión de dos devanados. La impedancia efectiva en por unidad de un autotransformador es más pequeña por un factor igual al recíproco de la potencia de ventaja de la conexión como autotransformador. Es práctica común considerar un autotransformador como un transformador de dos devanados con sus dos devanados conectados en serie, donde la impedancia equivalente está referida al lado $N_1 - vueltas$.

FIGURA 21 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN AUTOTRANSFORMADOR.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

1.4.7 TRANSFORMADORES DE TRES DEVANADOS

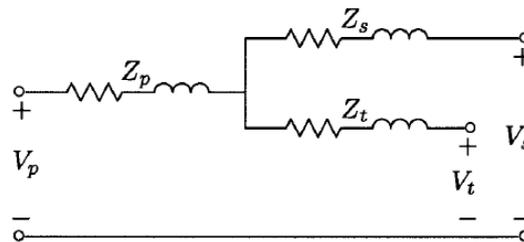
Los transformadores de tres devanados son usados para interconectar tres circuitos los cuales pueden tener diferentes voltajes. Sus devanados se denominan: primario, secundario y terciario. Las aplicaciones típicas en sistemas de potencia son para suministro a dos cargas independientes a diferentes voltajes desde la misma fuente e interconexión de dos sistemas de transmisión de diferentes voltajes. Generalmente, el terciario se usa para proveer voltaje para propósitos auxiliares en la subestación o suministrar al sistema local de distribución. Adicionalmente los reactores o capacitores conmutados también se conectan a la

barra del terciario para compensación de potencia reactiva. A veces los transformadores trifásicos Y-Y y autotransformadores conectados en Y, son provistos de devanados terciarios conectados en delta para supresión de armónicos.

1.4.7.1 MODELO DEL TRANSFORMADOR DE TRES DEVANADOS

Sí la corriente de excitación de un transformador de tres devanados se desprecia, es posible dibujar un simple circuito T monofásico equivalente.

FIGURA 22 CIRCUITO EQUIVALENTE DE UN TRANSFORMADOR DE TRES DEVANADOS.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

Tres pruebas de corto circuito pueden llevarse a cabo en transformadores de tres devanados con N_p , N_s y N_t vueltas por fase en los tres devanados, respectivamente. Estas pruebas son similares en cada caso, un devanado queda abierto, uno en corto circuito; se aplica voltaje reducido al devanado faltante. Las siguientes impedancias se miden en el lado donde el voltaje se aplica⁹.

⁹ Grainger John J., Stevenson William D., Análisis de Sistemas de Potencia, McGraw-Hill Interamericana de México, 1996.

Z_{ps} = Impedancia medida en el primario con el secundario en corto circuito y el terciario abierto.

Z_{pt} = Impedancia medida en el primario con el terciario en corto circuito y el secundario abierto.

Z'_{st} = Impedancia medida en el secundario con el terciario en corto circuito y el primario abierto.

Z'_{st} Referida al lado primario, se obtiene $Z_{st} = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 Z'_{st}$; Si Z_p, Z_s y Z_t son las impedancias de los tres devanados separados referidos al lado primario, entonces:

$$Z_{ps} = Z_p + Z_s$$

$$Z_{pt} = Z_p + Z_t$$

$$Z_{st} = Z_s + Z_t$$

Resolviendo estas ecuaciones:

$$Z_p = \frac{1}{2}(Z_{ps} + Z_{pt} - Z_{st})$$

$$Z_s = \frac{1}{2}(Z_{ps} + Z_{st} - Z_{pt})$$

$$Z_t = \frac{1}{2}(Z_{pt} + Z_{st} - Z_{ps})$$

1.4.8 CONTROL DE VOLTAJE DE TRANSFORMADORES

El control de voltaje en transformadores se requiere para compensar la variación de caída de voltaje en el sistema y para controlar el flujo de potencia reactiva en las líneas de transmisión. Los transformadores también pueden ser usados para controlar el ángulo de fase y por lo tanto, el flujo de potencia activa. Los dos métodos comúnmente usados son transformadores con intercambiador de tomas de derivación y transformadores de regulación.

1.4.8.1 TRANSFORMADORES CON INTERCAMBIADOR DE TOMAS

Prácticamente todos los transformadores de potencia y muchos transformadores de distribución tienen tomas de derivación en uno o más devanados para cambiar la relación de vueltas. Este método es el más popular usado para controlar voltajes en todos los niveles. Intercambiar tomas, alterando la magnitud de voltaje afecta la distribución de voltaje amperios reactivos y por tanto, puede ser usado para controlar el flujo de potencia reactiva. Hay dos tipos de transformadores con intercambiadores de tomas de derivación:

- a. Transformadores con intercambiador de tomas de derivación sin carga.
- b. Transformadores con intercambiador de tomas de derivación con carga.

El primero requiere la desconexión del transformador cuando el ajuste de toma será cambiado, estos intercambiadores se usan cuando no se requiere cambio en tomas frecuentemente a causa del crecimiento de la carga o algún cambio estacional. Un transformador típico podría tener cuatro tomas adicionales al de ajuste nominal, con pasos de 2.5% de voltaje a plena carga entre ellos. Tal disposición provee para ajustes de hasta 5% por encima y por debajo del voltaje nominal del transformador.

El segundo, se usa cuando los cambios en la relación pueden ser frecuentes o cuando es indeseable desconectar el transformador para cambio de tomas. Se usan en transformadores y autotransformadores para transmisión interconectada, grandes unidades de distribución, y en otros puntos de carga. Básicamente es un transformador con la habilidad de cambiar tomas de derivación mientras la potencia está conectada. Los transformadores pueden tener sensores de voltaje que automáticamente cambian la toma de derivación para mantener el voltaje del sistema constante. Unidades reductoras, generalmente disponen del intercambiador en lado de bajo voltaje.

1.4.8.2 TRANSFORMADORES DE REGULACIÓN O BOOSTERS¹⁰

Los transformadores de regulación conocidos como BOOSTERS, se usan para cambiar la magnitud de voltaje y el ángulo de fase en un cierto punto del sistema en una cantidad pequeña. Un booster consiste de un transformador de excitación y un transformador en serie.

1.4.8.2.1 CONTROL DE LA MAGNITUD DE VOLTAJE

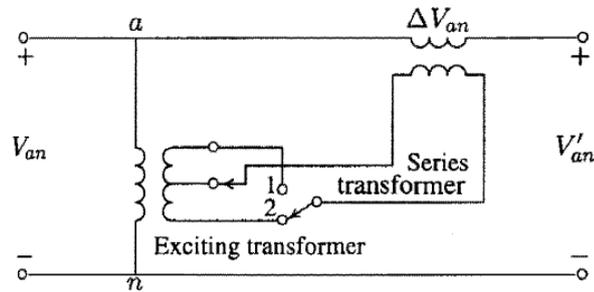
La figura muestra la conexión de un transformador de regulación para la fase a de un sistema trifásico para el control de la magnitud de voltaje. Otras fases tienen disposiciones idénticas. El secundario del transformador de excitación está conmutado y el voltaje obtenido se aplica al primario del transformador serie. El voltaje correspondiente al secundario del transformador serie se adiciona al voltaje de entrada, así la salida de voltaje es:

$$V'_{an} = V_{an} + \Delta V_{an}$$

La salida de voltaje puede ajustarse cambiando la toma del transformador de excitación de la posición 1 a la 2, la polaridad del voltaje a través del transformador en serie se invierte, así que ahora la salida de voltaje es menor que el voltaje de entrada.

¹⁰ Winders John J., Power Transformers Principles and Applications, Marcel Dekker, 2002.

FIGURA 23 TRANSFORMADOR REGULADOR PARA CONTROL DE MAGNITUD DE VOLTAJE.

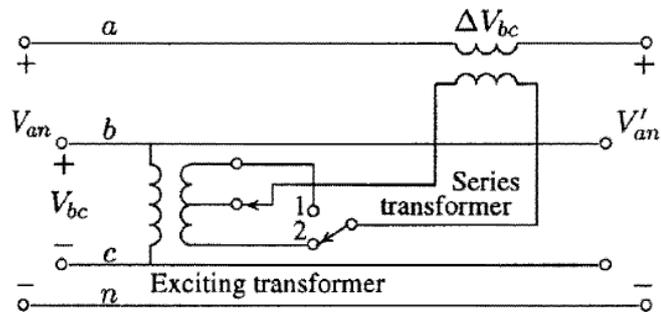


FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.
 ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

1.4.8.2.2 CONTROL DEL ÁNGULO DE FASE

Los transformadores de regulación también se usan para controlar el ángulo de fase del voltaje. Si el voltaje inyectado está fuera de fase con el voltaje de entrada, el voltaje resultante tendrá un cambio de fase con respecto al voltaje de entrada. El cambiador de fase se usa para controlar el flujo de potencia activa en las principales barras de interconexión. Una disposición típica para la fase a de un sistema trifásico se muestra en la figura.

FIGURA 24 TRANSFORMADOR REGULADOR PARA CONTROL DE ÁNGULO DE FASE DE VOLTAJE.



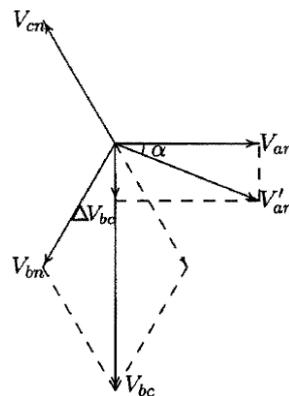
FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.
 ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

El transformador serie de la fase a se alimenta desde el secundario del transformador de excitación bc . El voltaje inyectado ΔV_{bc} está en cuadratura con el voltaje V_{an} así, el voltaje resultante V'_{an} va a través de un cambio de fase α . La salida de voltaje es:

$$V'_{an} = V_{an} + \Delta V_{bc}$$

La cantidad de cambio de fase puede ajustarse cambiando la toma del transformador de excitación desde la posición 1 a la 2; la salida de voltaje puede estar en retraso o en adelanto al voltaje de entrada.

FIGURA 25 DIAGRAMA FASORIAL – DESPLAZAMIENTO DE FASE A.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

Las ventajas de los transformadores de regulación son:

- a. Los transformadores principales están libres de tomas.
- b. Los transformadores de regulación pueden usarse en cualquier punto intermedio del sistema.
- c. Los transformadores de regulación y el mecanismo de intercambio de tomas pueden salir de servicio para mantenimiento sin afectar al sistema.

1.5 PARÁMETROS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

El propósito de una red de transmisión es transferir energía eléctrica desde las unidades de generación en varias ubicaciones hacia el sistema de distribución el cual suministra a la carga. Las líneas de transmisión también interconectan empresas eléctricas vecinas que permiten no únicamente el despacho económico de potencia dentro de estas regiones durante condiciones normales, pero también transfieren potencia entre regiones durante emergencias.

Toda línea de transmisión en un sistema de potencia presenta las propiedades eléctricas de resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia. La inductancia y la capacitancia aparecen debido al efecto de los campos magnético y eléctrico alrededor del conductor. Estos parámetros son esenciales para el desarrollo de modelos de líneas de transmisión usados en el análisis de sistemas de potencia. La conductancia de derivación cuenta para corrientes de fuga fluyendo a través de aisladores y trayectorias ionizadas en el aire. Las corrientes de fuga son mínimas comparadas a la corriente fluyendo en las líneas de transmisión y se pueden despreciar.

Un circuito de transmisión consiste de conductores, aisladores y generalmente conductores de pantalla (guardia); las líneas de transmisión cuelgan desde una torre, generalmente construida de acero, madera o concreto reforzado con su propio derecho de vía. Las torres de acero pueden ser diseñadas para circuitos sencillos o dobles; las torres de acero multi-circuito han sido construidas, donde la torre soporta de tres a 10 líneas a 69 kV sobre un ancho dado de derecho de vía. Menos del 1% del total de líneas de transmisión de una nación son subterráneas. Aunque este tipo de transmisión presentaría una solución a algunos problemas ambientales y estéticos propios de las líneas de transmisión aéreas, existen razones técnicas y económicas que hacen prohibitivo el uso de este tipo de transmisión.

La selección de un nivel de voltaje económico para la línea de transmisión se basa en la cantidad de potencia y la distancia de transmisión. La selección del voltaje y tamaño de conductor principalmente es un proceso de pérdidas RI^2 , ruido audible y niveles de interferencia de radio contra cargos fijos en la inversión.

Para voltajes superiores a 230 kV, es preferible usar más de un conductor por fase, lo cual se conoce como haz de conductores. El haz consiste de dos, tres o cuatro conductores. El haz incrementa el radio efectivo del conductor de la línea y reduce el fuerte campo eléctrico cerca de los conductores, esto reduce las pérdidas de potencia por efecto corona, el ruido audible y la interferencia de radio. Otra ventaja importante del haz es que reduce la reactancia de la línea.

1.5.1 RESISTENCIA DE LA LÍNEA¹¹

La resistencia del conductor es muy importante en la evaluación de eficiencia de transmisión y estudios económicos. La resistencia dc de un conductor cilíndrico a temperatura específica está dada por:

$$R_{dc} = \frac{\rho l}{A}$$

Donde, ρ es la resistividad del conductor; l es la longitud del conductor; A es el área de sección transversal del conductor. La resistencia del conductor se ve afectada por tres factores: frecuencia, enrollado y temperatura.

Cuando corriente alterna fluye a través de un conductor, la distribución de corriente no es uniforme sobre el área de sección transversal del conductor y la densidad de corriente es mayor en la superficie del conductor. Esto causa que la resistencia ac sea un poco más grande que la resistencia dc . Este comportamiento

¹¹ Checa Luis María, Líneas de Transporte de Energía, Alfaomega, 2000.

se conoce como efecto piel. A 60 Hz la resistencia *ac* está alrededor de 2% más grande que la resistencia *dc*.

$$R_2 = R_1 \frac{T + t_2}{T + t_1}$$

Donde, R_2 y R_1 son las resistencias de conductor en t_2 y t_1 grados centígrados, respectivamente. T es una temperatura constante que depende del material del conductor. A causa de los efectos citados, la resistencia del conductor se determina de los datos del fabricante.

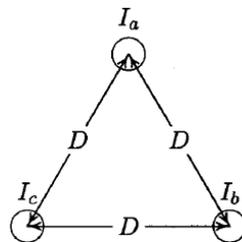
1.5.2 INDUCTANCIA DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN TRIFÁSICAS¹²

1.5.2.1 ESPACIAMIENTO SIMÉTRICO

Considerando una línea trifásica con longitud un metro, con tres conductores, cada uno con radio r , espaciados simétricamente en configuración triangular; se asumen corrientes trifásicas balanceadas, las tres inductancias serán idénticas, por lo tanto, la inductancia por fase por kilómetro de longitud es:

$$L = 0.2 \ln \frac{D}{D_s} \left(\frac{mH}{km} \right)$$

FIGURA 26 LÍNEA TRIFÁSICA CON ESPACIAMIENTO SIMÉTRICO.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

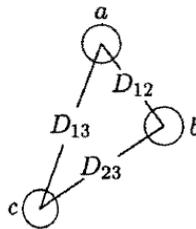
¹² Grainger John J., Stevenson William D., Análisis de Sistemas de Potencia, McGraw-Hill Interamericana de México, 1996.

Donde, r' es el radio medio geométrico, GMR, y se representa por D_s . Para un conductor cilíndrico sólido $D_s = r e^{-1/4}$.

1.5.2.2 ESPACIAMIENTO ASIMÉTRICO

Las líneas de transmisión en la práctica no pueden mantener un espaciamiento simétrico de conductores debido a las consideraciones de construcción. Con espaciamiento asimétrico, aún con corrientes balanceadas, la caída de voltaje debido a la inductancia de la línea será desbalanceada. Considerando una línea trifásica de un metro de longitud con tres conductores, cada uno con radio r . Los conductores están espaciados en distancias asimétricas.

FIGURA 27 LÍNEA TRIFÁSICA CON ESPACIAMIENTO ASIMÉTRICO.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

Los flujos resultarán:

$$\lambda_a = 2 * 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r'} + I_b \ln \frac{1}{D_{12}} + I_c \ln \frac{1}{D_{13}} \right)$$

$$\lambda_b = 2 * 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{D_{12}} + I_b \ln \frac{1}{r'} + I_c \ln \frac{1}{D_{23}} \right)$$

$$\lambda_c = 2 * 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{D_{13}} + I_b \ln \frac{1}{D_{23}} + I_c \ln \frac{1}{r'} \right)$$

Usando el operador $a = 1 \angle 120^\circ$ y $a^2 = 1 \angle 240^\circ$. Resulta:

$$L_a = \frac{\lambda_a}{I_a} = 2 * 10^{-7} \left(\ln \frac{1}{r'} + a^2 \ln \frac{1}{D_{12}} + a \ln \frac{1}{D_{13}} \right)$$

$$L_b = \frac{\lambda_b}{I_b} = 2 * 10^{-7} \left(a \ln \frac{1}{D_{12}} + \ln \frac{1}{r'} + a^2 \ln \frac{1}{D_{23}} \right)$$

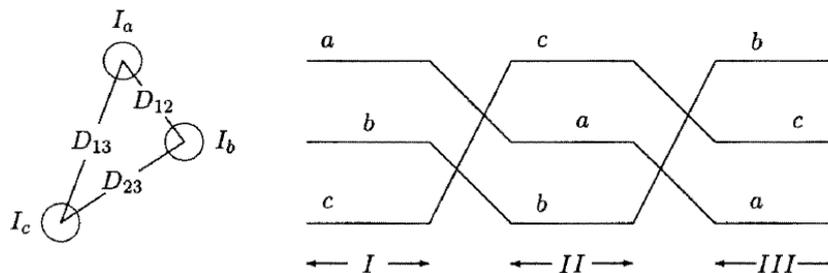
$$L_c = \frac{\lambda_c}{I_c} = 2 * 10^{-7} \left(a^2 \ln \frac{1}{D_{13}} + a \ln \frac{1}{D_{23}} + \ln \frac{1}{r'} \right)$$

Las inductancias de fase no son iguales y contienen un término imaginario debido a la inductancia mutua.

1.5.2.3 LÍNEA TRANSPUESTA

Un modelo por fase de la línea de transmisión se requiere en la mayoría de análisis de sistemas de potencia. Una forma de recuperar simetría en buena medida y obtener un modelo por fase es considerar la transposición. Esto consiste del intercambio de la configuración de fase cada tercio de la longitud de forma que cada conductor se mueva a ocupar la siguiente posición física en secuencia regular.

FIGURA 28 LÍNEA TRIFÁSICA TRANSPUESTA.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

La inductancia por fase por kilómetro de longitud es:

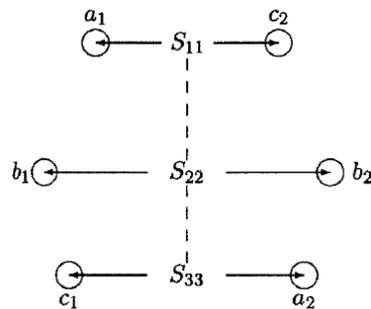
$$L = 0.2 \ln \frac{GMD}{D_s} \left(\frac{mH}{km} \right)$$

Donde $GMD = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{13}}$, es la distancia media geométrica, equivalente al espaciado entre conductores D_s es el radio medio geométrico, GMR; Para conductores trenzados se obtiene de los datos del fabricante. Para conductores sólidos $D_s = r' = re^{-\frac{1}{4}}$. En líneas de transmisión modernas, no se usa generalmente la transposición. Sin embargo, para propósitos de modelamiento, es la mejor práctica para tratar los circuitos como transpuestos.

1.5.2.4 INDUCTANCIA DE LÍNEAS TRIFÁSICAS DE DOBLE CIRCUITO

Una línea trifásica de doble circuito consiste de dos circuitos trifásicos idénticos. Los circuitos son operados con $a_1 - a_2$; $b_1 - b_2$; y $c_1 - c_2$ en paralelo. A causa de las diferencias geométricas entre conductores, la caída de voltaje debido a la inductancia de línea será desbalanceada. Para alcanzar el balance, cada conductor de fase debe ser transpuesto dentro de su grupo y con respecto a la línea trifásica paralela. Considerando una línea trifásica doble circuito con posiciones de fase relativas $a_1 b_1 c_1 - c_2 b_2 a_2$.

FIGURA 29 LÍNEA TRANSPUESTA DOBLE CIRCUITO.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

$$D_{AB} = \sqrt[4]{D_{a1b1}D_{a1b2}D_{a2b1}D_{a2b2}}$$

$$D_{BC} = \sqrt[4]{D_{b1c1}D_{b1c2}D_{b2c1}D_{b2c2}}$$

$$D_{AC} = \sqrt[4]{D_{a1c1}D_{a1c2}D_{a2c1}D_{a2c2}}$$

El GMD equivalente por fase es:

$$GMD = \sqrt[3]{D_{AB}D_{BC}D_{AC}}$$

El GMR de cada grupo de fase es:

$$D_{SA} = \sqrt[4]{(D_s^b D_{a1a2})^2} = \sqrt{D_s^b D_{a1a2}}$$

$$D_{SB} = \sqrt[4]{(D_s^b D_{b1b2})^2} = \sqrt{D_s^b D_{b1b2}}$$

$$D_{SC} = \sqrt[4]{(D_s^b D_{c1c2})^2} = \sqrt{D_s^b D_{c1c2}}$$

Donde D_s^b es el radio medio geométrico para varios conductores por fase. El radio medio geométrico equivalente para calcular la inductancia por fase a neutro es:

$$GMR_L = \sqrt[3]{D_{SA}D_{SB}D_{SC}}$$

La inductancia por fase es:

$$L = 0.2 \ln \frac{GMD}{GMR_L} \left(\frac{mH}{km} \right)$$

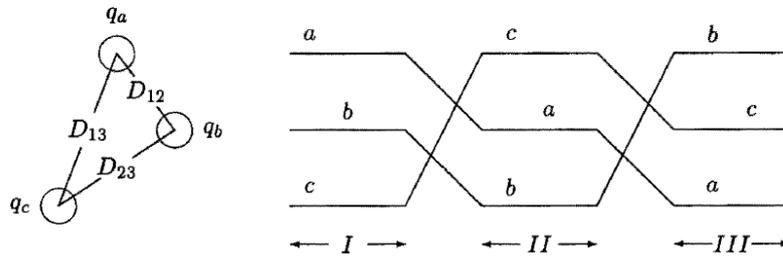
1.5.3 CAPACITANCIA DE LA LÍNEA

1.5.3.1 CAPACITANCIA DE LÍNEAS TRIFÁSICAS¹³

Considerando una línea trifásica de un metro de longitud con tres conductores, cada uno con radio r , y con su espaciamiento entre conductores.

¹³ Checa Luis María, Líneas de Transporte de Energía, Alfaomega, 2000.

FIGURA 30 LÍNEA TRIFÁSICA.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

La capacitancia al neutro en micro faradios por kilómetro es:

$$C = \frac{0.0556}{\ln \frac{GMD}{r}} \left(\frac{\mu F}{km} \right)$$

1.5.3.2 CAPACITANCIA DE LÍNEAS TRIFÁSICAS DE DOBLE CIRCUITO

Considerando una línea trifásica de doble circuito con posiciones de fase relativas $a_1b_1c_1 - c_2b_2a_2$. Cada conductor de fase está transpuesto dentro de su grupo y con respecto a la línea trifásica paralela. El efecto del cable de guardia y el suelo son considerados para ser despreciados para esta condición de balance.

$$C = \frac{0.0556}{\ln \frac{GMD}{GMR_C}} \left(\frac{\mu F}{km} \right)$$

La expresión para GMD es la misma que se usa para la inductancia; El GMR_C de cada grupo de fase es similar al GMR_L con la excepción que se usará r^b en vez de D_s^b ; esto resulta en la siguiente ecuación:

$$r_A = \sqrt{r^b D_{a1a2}}$$

$$r_B = \sqrt{r^b D_{b1b2}}$$

$$r_C = \sqrt{r^b D_{c1c2}}$$

Donde r^b es el radio medio geométrico para conductores en haz. El radio medio geométrico equivalente para obtener la capacitancia por fase al neutro es:

$$GMR_C = \sqrt[3]{r_A r_B r_C}$$

1.6 MODELO DE LÍNEAS¹⁴

Las líneas de transmisión se representan por un modelo equivalente con parámetros apropiados del circuito en base a una fase. Los voltajes terminales se expresan de línea a neutro, la corriente para una fase, y así, el sistema trifásico se reduce a un sistema monofásico equivalente. El modelo usado para calcular voltajes, corrientes y flujos de potencia depende de la longitud de la línea.

1.6.1 MODELO LÍNEA CORTA

Sí las líneas son menores a 80 km de longitud, o si su voltaje no supera los 69 kV la capacitancia puede ignorarse, el modelo se obtiene multiplicando la impedancia serie por unidad de longitud y la longitud de la línea.

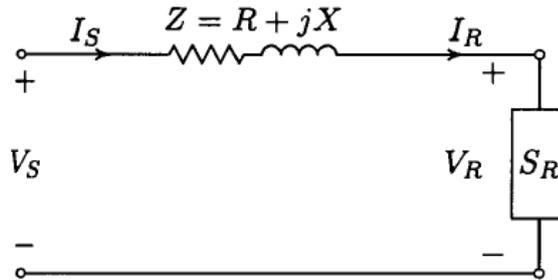
$$Z = (r + j\omega L)l = R + jX$$

Donde r y L son la resistencia por fase e inductancia por unidad de longitud, respectivamente; l es la longitud de la línea V_s y I_s son el voltaje de fase y

¹⁴ Turan Gonen, Electric Power Transmission System Engineering, John Wiley & Sons, 1988.

corriente en el terminal emisor de la línea; V_R y I_R son el voltaje de fase y la corriente en el terminal receptor de la línea.

FIGURA 31 MODELO LÍNEA CORTA.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.
ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

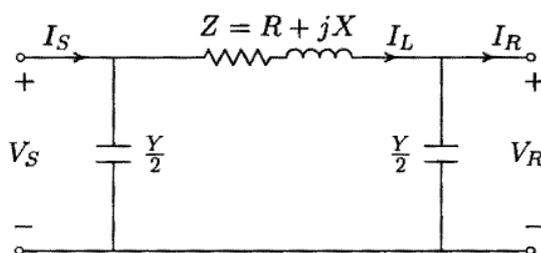
1.6.2 MODELO LÍNEA MEDIA

Para líneas con longitudes entre 80 y 250 km, la corriente de carga de la línea se vuelve apreciable; por tanto, la capacitancia en derivación debe considerarse; una práctica considerada es ubicar media capacitancia en cada uno de los extremos de la línea. Este es el modelo nominal π ; Z es la impedancia serie total de la línea; Y es la admitancia en derivación total de la línea.

$$Y = (g + j\omega C)l$$

Bajo condiciones normales, la conductancia en derivación por unidad de longitud, representa la corriente de fuga en los aisladores y debido a la corona se desprecia y g se asume como cero C es la capacitancia línea-neutro por km y l es la longitud de la línea.

FIGURA 32 MODELO π NOMINAL PARA LÍNEA MEDIA.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

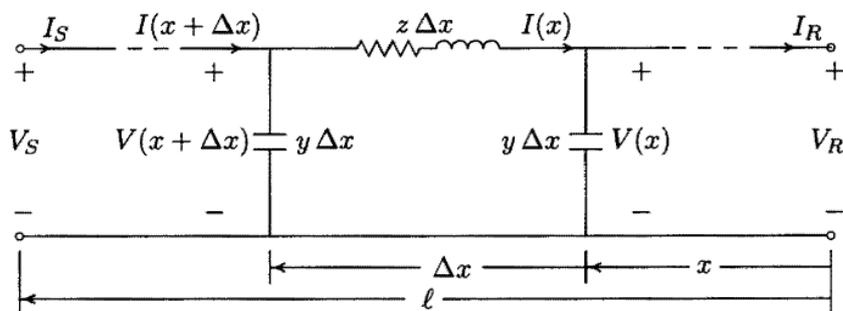
ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

1.6.3 MODELO DE LÍNEA LARGA

Para líneas de longitud corta y media la precisión de los modelos consideran parámetros de línea concentrados. Para líneas de longitud mayor a 250 km, y, en busca de una solución más precisa se debe considerar parámetros distribuidos. Aquí el voltaje y corriente puede ser encontrado en cualquier punto de la línea. Para esto se obtiene un modelo π equivalente para líneas de longitud larga. Los fasores de voltajes y corrientes en ambos lados de un segmento dado, están como función de distancia:

$$V(x + \Delta x) = V(x) + z\Delta x I(x)$$

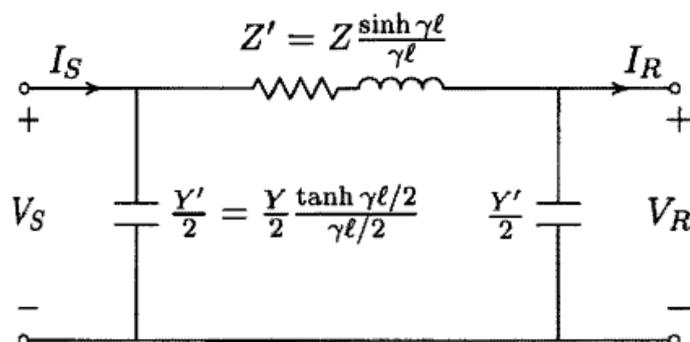
FIGURA 33 PARÁMETROS DISTRIBUIDOS PARA LÍNEA LARGA.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

FIGURA 34 MODELO π EQUIVALENTE PARA LÍNEA LARGA.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

1.6.4 SIL – SURGE IMPEDANCE LOADING

Cuando la línea está cargada con una impedancia igual a su impedancia característica, la corriente en el terminal receptor es:

$$I_R = \frac{V_R}{Z_c}$$

Para una línea sin pérdidas Z_c es puramente resistiva. La carga correspondiente a la impedancia de sobre voltaje a voltaje nominal se conoce como Surge Impedance Loading (SIL), dado por:

$$SIL = 3V_R I_R^* = \frac{3|V_R|^2}{Z_c}$$

Desde $V_R = \frac{V_{Lnominal}}{\sqrt{3}}$ en MW

$$SIL = \frac{(kV_{Lnominal})^2}{Z_c}$$

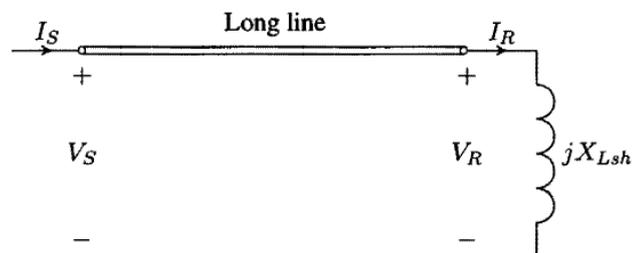
1.6.5 COMPENSACIÓN EN LÍNEAS¹⁵

Una línea de transmisión cargada a su SIL no tiene flujo de potencia reactiva hacia y fuera de la línea y tendrá aproximadamente un perfil plano de voltaje a lo largo de su longitud. En líneas largas de transmisión, las cargas ligeras apreciablemente menores al SIL resulta en un incremento de voltaje en el terminal receptor, cargas fuertes mayores al SIL producirá una gran reducción de voltaje. Los reactores en derivación son ampliamente usados para reducir altos voltajes bajo condiciones de carga ligera o línea abierta. Sí el sistema tiene carga fuerte, los capacitores en derivación, control de var estático y condensadores sincrónicos se usan para mejorar el voltaje, incrementar la transferencia de potencia y mejorar la estabilidad del sistema.

1.6.5.1 REACTORES EN DERIVACIÓN

Se aplican para compensar efectos indeseables en el voltaje asociados con la capacitancia de la línea. La cantidad de compensación del reactor requerida en una línea de transmisión para mantener el voltaje en el terminal receptor a un valor específico se obtiene cuando:

FIGURA 35 COMPENSACIÓN CON REACTOR EN DERIVACIÓN.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

¹⁵ Fusco Giuseppe , Russo Mario, Adaptive Voltage Control in Power Systems Modeling, Design and Applications, Springer, 2007.

Considerando un reactor de reactancia X_{Lsh} conectado en el terminal receptor de una línea de transmisión larga, la corriente en el terminal receptor es:

$$I_R = \frac{V_R}{jX_{Lsh}}$$
$$V_S = V_R \left(\cos \beta l + \frac{Z_C}{X_{Lsh}} \sin \beta l \right)$$

V_S y V_R Están en fase, lo que es consistente debido al hecho que no se está transmitiendo potencia real por la línea.

$$X_{Lsh} = \frac{\sin \beta l}{\frac{V_S}{V_R} - \cos \beta l} Z_C$$

Con un reactor únicamente en el terminal receptor, el perfil de voltaje no será uniforme.

$$V_{max} = \frac{V_R}{\cos \frac{\beta l}{2}}$$

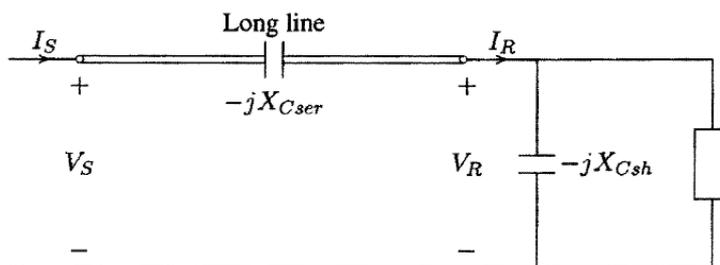
1.6.5.2 COMPENSACIÓN CAPACITOR EN DERIVACIÓN

Los capacitores en derivación se usan para circuitos con factor de potencia en retraso que se produce por cargas pesadas. El efecto es suministrar la potencia reactiva requerida para mantener el voltaje en el terminal receptor en un nivel satisfactorio. Los capacitores se conectan ya sea directamente a una barra o al devanado terciario de un transformador principal, y están dispuestos a lo largo de la ruta para minimizar las pérdidas y las caídas de voltaje. Con V_S y V_R dados, pueden usarse para calcular los MVAR del capacitor requerido en el terminal receptor para una carga específica.

1.6.5.3 COMPENSACIÓN POR CAPACITOR SERIE

Los capacitores serie son conectados en serie con la línea, usualmente se ubican en el punto medio, para reducir la reactancia serie entre la carga y el punto de suministro. Esto resulta en mejora de la estabilidad transitoria y de estado estable, mayor cargabilidad económica, y bajones de voltaje mínimos en las barras de carga. Los capacitores serie poseen buenas características que su producción de potencia reactiva varía concurrentemente con la carga de la línea. Estudios han demostrado que la adición de capacitores serie en líneas de transmisión de voltaje extra alto pueden más del doble del límite de carga de estabilidad transitoria de líneas largas en una fracción del costo de una nueva línea.

FIGURA 36 COMPENSACIÓN POR CAPACITOR SERIE Y EN DERIVACIÓN.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

1.7 FLUJOS DE POTENCIA

Para el análisis de estado estable de un sistema de potencia interconectado durante operación normal, se asume operación bajo condiciones balanceadas y se representa por una red monofásica, que puede contener cientos de nodos y ramas con impedancias especificadas en por unidad sobre una base común de MVA.

Las ecuaciones de la red pueden formularse sistemáticamente en una variedad de formas. Sin embargo, el método de voltaje de nodo es la forma más adecuada para muchos análisis de sistemas de potencia; la formulación de las ecuaciones de red

en la forma de admitancias de nodo resulta en ecuaciones algebraicas lineales complejas simultáneas en términos de las corrientes de nodo. Cuando las corrientes de nodo se especifican, el conjunto de ecuaciones lineales pueden resolverse para voltajes de nodo. Sin embargo, en un sistema de potencia, las potencias son más conocidas que las corrientes. Las ecuaciones resultan en términos de potencia, conocida como ecuación de flujo de potencia, de cualidad no lineal y se debe resolver mediante técnicas iterativas.

Los estudios de flujo de potencia son el fundamento para el diseño y análisis de sistemas de potencia, son necesarios para la planificación, operación, despacho económico e intercambio de potencia entre compañías eléctricas; sirven también para ejecutar estudios de estabilidad transitoria y de contingencias.

Las técnicas iterativas comúnmente usadas son los métodos de Gauss-Seidel y de Newton-Raphson para resolver ecuaciones algebraicas no lineales.

Para facilidad de cálculo se emplea la matriz de admitancia de barra, El elemento de la diagonal de cada nodo es la suma de las admitancias conectadas a ese nodo:

$$Y_{ii} = \sum_{j=0}^n y_{ij} \quad j \neq i$$

El elemento fuera de la diagonal es igual al negativo de la admitancia entre los nodos:

$$Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij}$$

1.7.1 MÉTODO DE NEWTON RAPHSON¹⁶

¹⁶ Kothari D. P., Nagrath I. J., Sistemas Eléctricos de Potencia, McGraw-Hill Interamericana de México, 2008.

Es el método ampliamente más usado para resolver ecuaciones algebraicas no lineales simultáneas; su procedimiento es a través de aproximaciones sucesivas basadas en un estimado inicial de lo desconocido y el uso de las series de expansión de Taylor.

Dada la siguiente ecuación:

$$f(x) = c$$

Si $x^{(0)}$ es un estimado inicial de la solución, y $\Delta x^{(0)}$ es una pequeña desviación de la solución correcta, se tiene:

$$f(x^{(0)} + \Delta x^{(0)}) = c$$

Expandiendo en series de Taylor:

$$f(x^{(0)}) + \left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)} \Delta x^{(0)} + \frac{1}{2!} \left(\frac{d^2f}{dx^2}\right)^{(0)} (\Delta x^{(0)})^2 + \dots = c$$

Asumiendo un error muy pequeño $\Delta x^{(0)}$, los términos de orden superior pueden despreciarse:

$$\Delta c^{(0)} \simeq \left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)} \Delta x^{(0)}$$

Donde,

$$\Delta c^{(0)} = c - f(x^{(0)})$$

Incorporando $\Delta x^{(0)}$ al estimado inicial resulta la segunda aproximación:

$$x^{(1)} = x^{(0)} + \frac{\Delta c^{(0)}}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(0)}}$$

El uso sucesivo de este procedimiento es el algoritmo de Newton Raphson.

$$\Delta c^{(k)} = c - f(x^{(k)})$$

$$\Delta x^{(k)} = \frac{\Delta c^{(k)}}{\left(\frac{df}{dx}\right)^{(k)}}; \text{ordenando para } \Delta c^{(k)} = j^{(k)} \Delta x^{(k)} \text{ donde } j^{(k)} = \left(\frac{df}{dx}\right)^{(k)}$$

$$x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)}$$

En forma matricial:

$$\Delta X^{(k)} = [J^{(k)}]^{-1} \Delta C^{(k)}$$

Para n casos:

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} + \Delta X^{(k)}$$

Donde,

$$\Delta X^{(k)} = \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(k)} \\ \Delta x_2^{(k)} \\ \Delta x_n^{(k)} \end{bmatrix}$$

$$\Delta C^{(k)} = \begin{bmatrix} c1 - (f1)^{(k)} \\ c2 - (f2)^{(k)} \\ cn - (fn)^{(k)} \end{bmatrix}$$

$$J^{(k)} = \begin{bmatrix} \left(\frac{df1}{dx1}\right)^{(k)} & \left(\frac{df1}{dx2}\right)^{(k)} & \left(\frac{df1}{dxn}\right)^{(k)} \\ \left(\frac{df2}{dx1}\right)^{(k)} & \left(\frac{df2}{dx2}\right)^{(k)} & \left(\frac{df2}{dxn}\right)^{(k)} \\ \left(\frac{dfn}{dx1}\right)^{(k)} & \left(\frac{dfn}{dx2}\right)^{(k)} & \left(\frac{dfn}{dxn}\right)^{(k)} \end{bmatrix}$$

$J^{(k)}$ es la matriz Jacobiana, los elementos de esta matriz son las derivadas parciales evaluadas en cada iteración.

1.7.2 SOLUCIÓN AL FLUJO DE POTENCIA

El problema consiste en determinar las magnitudes y ángulos de fase de los voltajes en cada barra y el flujo de potencia activa y reactiva en cada línea. Para su resolución se asume un sistema balanceado y se usa un modelo monofásico; Así

cuatro cantidades están asociadas con cada barra: magnitud de voltaje $|V|$, ángulo de fase δ , potencia activa P y potencia reactiva Q .

Las barras del sistema se clasifican en tres tipos:

Barra oscilante, es la referencia donde se especifica la magnitud y ángulo de fase del voltaje. Esta barra cubre con la diferencia del sistema en cuanto a carga despachada y pérdidas de la red.

Barra de carga, se especifican la potencia activa y reactiva de la carga; Se desconoce la magnitud y ángulo de fase del voltaje, se llaman barras P-Q.

Barra regulada, son también barras de generador o de voltaje controlado, se especifica la potencia activa y la magnitud de voltaje, se debe determinar los ángulos de fase del voltaje y la potencia reactiva; se llaman barras P-V.

1.7.3 ECUACIÓN DE FLUJO DE POTENCIA¹⁷

$$P_k + jQ_k = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n e^{j(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn})}$$

Con las admitancias en forma rectangular, y separando la parte imaginaria:

$$P_K = V_K \sum_{n=1}^N V_n [G_{kn} \cos(\delta_k - \delta_n) + B_{kn} \sin(\delta_k - \delta_n)]$$

$$Q_K = V_K \sum_{n=1}^N V_n [G_{kn} \sin(\delta_k - \delta_n) + B_{kn} \cos(\delta_k - \delta_n)]; k = 1, 2, \dots, N$$

¹⁷ Das Debapriya, Electrical Power System, New Age International, 2006

Ecuaciones que constituyen un conjunto de ecuaciones algebraicas no lineales en términos de variables independientes, la magnitud de voltaje en por unidad y el ángulo de fase en radianes. Existen dos ecuaciones para cada barra de carga y una ecuación para cada barra de voltaje controlado. Los elementos de la matriz Jacobiana son las derivadas parciales de las ecuaciones de P y Q, evaluadas en las variaciones de ángulo y magnitud de voltaje; generalmente, da la relación entre los pequeños cambios en el ángulo y magnitud de voltaje con los pequeños cambios en las ecuaciones de Potencia activa y reactiva.

1.8 FALLAS BALANCEADAS

Los estudios de fallas forman una parte importante del análisis de sistemas de potencia. El problema consiste en determinar los voltajes de barra y corrientes de línea durante varios tipos de fallas. Las fallas en los sistemas de potencia están divididas en fallas trifásicas balanceadas y fallas desbalanceadas. Los diferentes tipos de fallas desbalanceadas son: falla monofásica línea a tierra, falla línea a línea y falla doble línea a tierra. La información obtenida de los estudios de fallas se usa para ajustar y coordinar adecuadamente los relés de protección. La información de falla trifásica balanceada se usa para seleccionar y ajustar los relés de fase, mientras que la de falla línea a tierra se usa para relés de tierra (neutro). Los estudios de fallas se usan también para obtener los datos de especificación de interruptores de protección.

La magnitud de las corrientes de falla depende de la impedancia interna de los generadores más la impedancia del circuito que interviene. Se conoce que la reactancia de un generador bajo condición de corto circuito no es constante. Para el propósito de estudios de fallas, el comportamiento del generador puede ser dividido en tres períodos: período sub-transitorio, únicamente los primeros pocos ciclos; período transitorio, cubre un tiempo relativamente más largo; y finalmente,

período de estado estable. La matriz de impedancia de barra es vital en los estudios de fallas.

1.8.1 FALLA TRIFÁSICA BALANCEADA

Este tipo de falla se define como corto circuito simultáneo a través de todas las tres fases. Ocurre con escasa frecuencia, pero es el tipo más severo de falla encontrado. A causa que la red está balanceada, se resuelve en base a una fase; las otras dos fases transportarán corrientes idénticas excepto para el cambio de fase.

La reactancia sub-transitoria X_d'' para los primeros pocos ciclos de la corriente de corto circuito, la reactancia transitoria X_d' para los siguientes 30 ciclos, y la reactancia sincrónica X_d . Desde que la duración de la corriente de corto circuito depende del tiempo de operación del sistema de protección, no siempre es fácil decidir cual reactancia usar. Generalmente, la reactancia sub-transitoria se usa para determinar la capacidad de interrupción de los interruptores del circuito. En estudios de fallas requeridos para ajuste y coordinación de relés, se usa la reactancia transitoria, en estudios de estabilidad transitoria típica también se la usa.

Una falla representa un cambio estructural en la red equivalente con el causado por la adición de una impedancia en el lugar de la falla; Sí la impedancia de falla es cero, la falla se refiere como franca o sólida. La red en falla puede resolverse convenientemente por el método de Thévenin. Las corrientes de carga se deprecian y todos los voltajes pre-falla se asumen igual a 1 por unidad; para mejorar la precisión, los voltajes de barra de pre-falla pueden obtenerse de la solución de flujo de potencia; una forma de incluir los efectos de las corrientes de carga en el análisis de falla es expresar las cargas como una impedancia constante, evaluada en los voltajes barra en pre-falla; esto es una buena aproximación que resulta en ecuaciones lineales de nodo, un procedimiento se pueden enunciar en los siguientes pasos.

- Los voltajes de pre-falla se obtienen de los resultados de la solución del flujo de potencia.
- Para preservar la característica lineal de la red, las cargas se convierten en admitancias constantes usando los voltajes de pre-falla.
- La red en falla se reduce en el circuito equivalente de Thévenin visto desde la barra en falla. Aplicando el teorema, se obtiene los cambios en los voltajes de barra.
- Los voltajes de barra durante la falla se obtienen por superposición de los voltajes de pre-falla y los cambios en los voltajes de barra calculados en el paso previo.
- Se obtienen las corrientes durante la falla en todas las ramas de la red.

1.8.2 CAPACIDAD DE CORTO CIRCUITO

La capacidad de corto circuito en una barra es una medida común de la robustez de una barra. La capacidad de corto circuito o el MVA de corto circuito en una barra k se definen como el producto de las magnitudes del voltaje nominal de barra y la corriente de falla. El MVA de corto circuito se usa para determinar la dimensión de una barra y la capacidad de interrupción de un interruptor de circuito. La capacidad de interrupción es únicamente uno de los tantos datos nominales de un interruptor y no se debe confundir con el trabajo momentáneo del interruptor.

1.9 COMPONENTES SIMÉTRICAS Y FALLAS DESBALANCEADAS

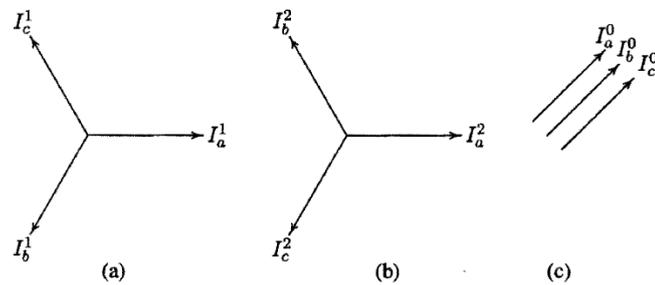
Varios métodos han sido inventados para la solución de fallas desbalanceadas. Sin embargo, desde que el diagrama unifilar simplifica la solución de los problemas trifásicos balanceados, el método de componentes simétricas resuelve un circuito desbalanceado a través de la solución de un número de circuitos balanceados. Este

método se aplica a fallas desbalanceadas, que permite una vez más el tratamiento del problema en base a un simple diagrama unifilar.

1.9.1 COMPONENTES SIMÉTRICAS¹⁸

Las componentes simétricas permiten que las cantidades de fase desbalanceadas tales como corrientes y voltajes, sean remplazadas por tres componentes simétricas balanceadas separadas. En sistemas trifásicos la secuencia de fase se define como el orden en el cual pasa a través de un máximo positivo. En la siguiente figura se representa fasorialmente corrientes trifásicas balanceadas.

FIGURA 37 REPRESENTACIÓN DE COMPONENTES SIMÉTRICAS.



FUENTE: FITZGERALD A. MÁQUINAS ELÉCTRICAS.

ELABORADOR POR: GUILLERMO CASA.

Por convención, la dirección de rotación de los fasores es a la izquierda o en sentido anti-horario; los tres fasores se escriben como:

$$\begin{aligned}
 I_a^1 &= I_a^1 \angle 0^\circ = I_a^1 \\
 I_b^1 &= I_a^1 \angle 240^\circ = a^2 I_a^1 \\
 I_c^1 &= I_a^1 \angle 120^\circ = a I_a^1
 \end{aligned}$$

¹⁸ Anderson Paul M., Analysis of Faulted Power Systems, IEEE Press, 1995.

Donde, se define el operador a que causa una rotación de 120° , así:

$$a = 1\angle 120^\circ = -0.5 + j0.866$$

$$a^2 = 1\angle 240^\circ = -0.5 - j0.866$$

$$a^3 = 1\angle 360^\circ = 1 + j0$$

Es claro que: $1 + a + a^2 = 0$

El orden de los fasores es abc o secuencia positiva de fase; con orden acb o secuencia negativa de fase, que se representa:

$$I_a^2 = I_a^2\angle 0^\circ = I_a^2$$

$$I_b^2 = I_a^2\angle 120^\circ = aI_a^2$$

$$I_c^2 = I_a^2\angle 240^\circ = a^2I_a^2$$

Cuando se analizan ciertos tipos de fallas desbalanceadas, aparece un tercer conjunto de fasores balanceados, conocidos como secuencia cero de fase, que están en fase uno del otro.

$$I_a^0 = I_b^0 = I_c^0$$

El método de las componentes simétricas fue introducido por el Doctor C. L. Fortescue en 1918, basado en su teoría, los fasores trifásicos desbalanceados de un sistema trifásico pueden ser resueltos en tres sistemas balanceados de fasores:

- Componentes de secuencia positiva consisten de un conjunto de componentes trifásicas balanceadas con secuencia abc de fase.
- Componentes de secuencia negativa consisten de un conjunto de componentes trifásicas balanceadas con secuencia acb de fase.
- Componentes de secuencia cero consisten de tres componentes monofásicas, iguales en magnitud pero con los mismos ángulos de fase.

Considerando corrientes trifásicas desbalanceadas I_a, I_b e I_c , las tres componentes simétricas de la corriente son:

$$I_a = I_a^0 + I_a^1 + I_a^2$$

$$I_b = I_b^0 + I_b^1 + I_b^2$$

$$I_c = I_c^0 + I_c^1 + I_c^2$$

En términos de componentes de fase a :

$$I_a = I_a^0 + I_a^1 + I_a^2$$

$$I_b = I_a^0 + a^2 I_a^1 + a I_a^2$$

$$I_c = I_a^0 + a I_a^1 + a^2 I_a^2$$

O también:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a^0 \\ I_a^1 \\ I_a^2 \end{bmatrix}$$

Como notación matricial:

$$I_a^{012} = A^{-1} I^{abc}$$

De manera similar se aplica para los voltajes.

Una parte importante y complementaria en el análisis de fallas desbalanceadas son las redes de secuencia, que se pueden citar las siguientes observaciones:

- Las tres secuencias son independientes.
- La red de secuencia positiva es la misma que el diagrama unifilar usado en el estudio de corrientes y voltajes trifásicos balanceados.
- Únicamente la red de secuencia positiva tiene una fuente de voltaje. Por tanto, la corriente de secuencia positiva causa únicamente caídas de voltajes de secuencia positiva.

- No hay fuente de voltaje en las redes de secuencia negativa y cero.
- Las corrientes de secuencia negativa y cero causan únicamente caídas de voltaje de secuencia negativa y cero.
- El neutro del sistema es la referencia para redes de secuencia positiva y negativa, pero la tierra es la referencia para las redes de secuencia cero. Por tanto, la corriente de secuencia cero puede fluir únicamente si el circuito desde el neutro del sistema hacia tierra se completa.
- La impedancia de tierra se refleja en la red de secuencia cero como $3Z_n$.
- Los sistemas de tres secuencias pueden resolverse separadamente en base a una fase; las corrientes y voltajes de fase pueden determinarse por superposición de sus componentes simétricas de corriente y voltaje, respectivamente.

Al dominar estas herramientas matemáticas, se facilitará el análisis de varios tipos de fallas desbalanceadas, iniciando con la obtención de la corriente de falla usando el método de Thévenin y la manipulación algebraica de redes de secuencia; el análisis se extiende para encontrar los voltajes de barra y la corriente de falla durante la falla, para los diferentes tipos de fallas usando la matriz de impedancias.

CAPITULO II
INVESTIGACIÓN DE CAMPO

INVESTIGACIÓN DE CAMPO

2.1 CARACTERIZACIÓN DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

La Universidad Técnica de Cotopaxi, es una institución de educación superior, con personería jurídica de Derecho Público, autónoma, laica, sin fines de lucro, creada mediante Ley promulgada en el Registro Oficial No. 618 del 24 de enero de 1995.

Su Visión, Universidad líder a nivel nacional en la formación integral de profesionales, con una planta docente de excelencia a tiempo completo, que genere proyectos investigativos, comunitarios y de prestación de servicios, que aporten al desarrollo local, regional en un marco de alianzas estratégicas nacionales e internacionales. Difunda el arte, la cultura y el deporte, dotada de una infraestructura adecuada que permita el cumplimiento de actividades académicas, científicas, tecnológicas, recreativas y culturales, fundamentadas en la práctica axiológica y de compromiso social, con la participación activa del personal administrativo profesional y capacitado.

Su Misión, Es una universidad pública, laica y gratuita, con plena autonomía, desarrolla una educación liberadora, para la transformación social, que satisface las demandas de formación y superación profesional, en el avance científico-tecnológico de la sociedad, en el desarrollo cultural, universal y ancestral de la población ecuatoriana. Generadora de ciencia, investigación y tecnología con sentido: humanista, de equidad, de conservación ambiental, de compromiso social y de reconocimiento de la interculturalidad; para ello, desarrolla la actividad académica de calidad, potencia la investigación científica, se vincula fuertemente con la colectividad y lidera una gestión participativa y transparente, con niveles de eficiencia, eficacia y efectividad, para lograr una sociedad justa y equitativa.

En su Estatuto Orgánico, se contemplan varios objetivos:

- a) Ofrecer enseñanza libre, sin restricciones de carácter político, racial, regional o de cualquier otro orden amparada en la Constitución y leyes conexas;
- b) Formar profesionales capacitados en el plano de las ciencias, la cultura nacional y universal, con pleno conocimiento de la realidad, y dotados de una conciencia crítica y humanística, promoviendo el conocimiento, la afirmación y la defensa de los valores de la nación ecuatoriana, como un país multinacional, multiétnico y pluricultural.
- c) Promover el conocimiento, la afirmación y la defensa de los valores de la nacionalidad, la expansión de las áreas de creación y goce de la cultura, la incorporación integral de los estudiantes a los beneficios del desarrollo que de ella se deriven y la defensa, protección y aprovechamiento racional de los recursos naturales para adecuarlos a la satisfacción de las necesidades humanas;
- d) Defender la libertad de cátedra, conforme a la Ley, Estatuto y demás Reglamentos;
- e) Promover y defender la libertad de aprendizaje, entendida como la que tiene el estudiante para acceder a todas las fuentes de información científica y para utilizar esa información en el incremento y profundización de sus conocimientos;
- f) Defender y mantener abierta la Universidad a todas las corrientes del pensamiento humano que serán expuestas al estudio científico, a fin de que coadyuven al desarrollo del país con justicia, equidad e identidad social
- g) Establecer relaciones académicas, políticas, culturales con otras universidades y centros superiores nacionales y extranjeros interesados en el intercambio de conocimientos entre profesores, estudiantes, empleados y trabajadores.

2.2 DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE ENSEÑANZA DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA EN LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI.

El diagnóstico que se alcanzará es superficial debido a que se basa en los datos obtenidos al analizar la encuesta efectuada a los estudiantes de la carrera de ingeniería eléctrica que se encuentran cursando sexto y séptimo nivel, por tanto, podría tratarse como un indicador del grado de percepción de quienes están involucrados directamente en el proceso de enseñanza de los sistemas eléctricos

de potencia, el objetivo de este documento y la concepción del autor no es la de ser juez alguno, más bien enmarcado en la mejora continua del proceso de enseñanza a nivel superior.

2.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LAS TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN, APLICADAS EN LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI.

El desarrollo de este proyecto de investigación se realiza mediante una metodología fundamentada en una investigación de campo, descriptiva y aplicada; que emplea los métodos científico, analítico – sintético y descriptivo, aliados con técnicas de recolección de información tales como: la observación, la entrevista y la encuesta, dirigidas a un universo específico.

Se ha definido trabajar con un universo correspondiente a 50 personas, estudiantes de sexto y séptimo nivel de la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

2.3.1 Entrevista

Esta técnica llevada a cabo al Coordinador de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, permite obtener información desde el punto de vista de la coordinación, para lo que se plantean 10 interrogantes.

2.3.1.1 Ficha de entrevista

1. ¿Cuáles son sus funciones principales en la Coordinación de la Carrera de Ingeniería Eléctrica?
2. ¿Está de acuerdo con la implementación de guías de prácticas de laboratorio para la enseñanza de Sistemas Eléctricos de Potencia I?

3. ¿Usted, tiene el apoyo y visto bueno de parte de la Dirección Académica para la mejora continua de la enseñanza de Sistemas Eléctricos de Potencia I?
4. ¿En la Carrera de Ingeniería Eléctrica, se cuenta con personal docente especializado y capacitado permanentemente en el manejo de nuevas tecnologías y metodologías aplicadas en la enseñanza?
5. ¿Qué tiempo le tomaría a la Carrera de Ingeniería Eléctrica implementar un laboratorio totalmente equipado para Sistemas Eléctricos de Potencia?
6. ¿Se controla guías o procedimientos de laboratorio, al personal docente de la Carrera de Ingeniería Eléctrica?
7. ¿El personal docente bajo su coordinación, está consciente de los objetivos de la Carrera encaminados en el Sistema Calidad de la enseñanza?
8. ¿Cómo afectan a los procedimientos de la Carrera de Ingeniería Eléctrica el Sistema de Calidad de la enseñanza?
9. ¿Considera Usted, que se justifica económica y técnicamente la implementación de laboratorios o alguna mejora para la Carrera de Ingeniería Eléctrica?
10. ¿Cómo se ha manejado las relaciones interinstitucionales específicamente con las empresas y entidades del sector eléctrico, en busca de establecer vínculos que permitan que los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Eléctrica sean aceptados para elaborar trabajos investigativos y pasantías?

2.3.1.2 Resultado

De la entrevista efectuada, se presenta lo siguiente:

Las funciones de la Coordinación de Carrera, no están definidas a través de un Reglamento; sin embargo, se enfatiza en la gestión académica de la Carrera; es así, que el cuerpo docente de la Carrera cuenta con ocho profesionales del ramo en continua capacitación, docentes con pleno conocimiento y trabajando en la continua mejora de metodologías para la enseñanza. Cabe resaltar que, la Universidad Técnica de Cotopaxi está desarrollando gestión académica por procesos, precisamente para encaminar a las Carreras ofertadas hacia la excelencia académica.

La Dirección Académica permanentemente apoya las actividades académicas de la Carrera, siempre encaminadas en los objetivos de mejora. Es fundamental tanto la existencia de guías de laboratorio como la implementación de un laboratorio, para su aplicación. En la implementación de un laboratorio totalmente equipado, no se puede determinar el factor tiempo, ya que depende de la asignación presupuestaria recibida del Gobierno Central. De ahí que, no se controle guías o procedimientos para prácticas de laboratorio.

Toda inversión en busca de mejoras en la enseñanza a nivel superior se justifica como parte fundamental en la formación del futuro profesional.

En el ámbito de la inserción laboral, particularmente la Carrera de Ingeniería Eléctrica, tiene nexos con empresas eléctricas y empresas privadas que han recibido gustosamente a sus estudiantes e inclusive esto ha permitido que se encuentren laborando en estas instituciones.

2.3.2 Encuesta

Mediante esta técnica de recopilación de datos, se han formulado preguntas que permiten obtener con mayor certeza información en beneficio de la ejecución o no de este proyecto, para ello se han planteado once interrogantes estrechamente ligadas al proyecto, (Anexo 2.1).

2.3.2.1 Población

Se ha determinado ejecutar esta técnica, a los estudiantes de sexto y séptimo nivel de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, correspondiente a 50 casos. Esto permite obtener resultados reales.

2.3.2.2 Análisis por pregunta

- 1) ¿Cómo calificaría Usted, la enseñanza de Sistemas Eléctricos de Potencia I, en la Carrera de Ingeniería Eléctrica?

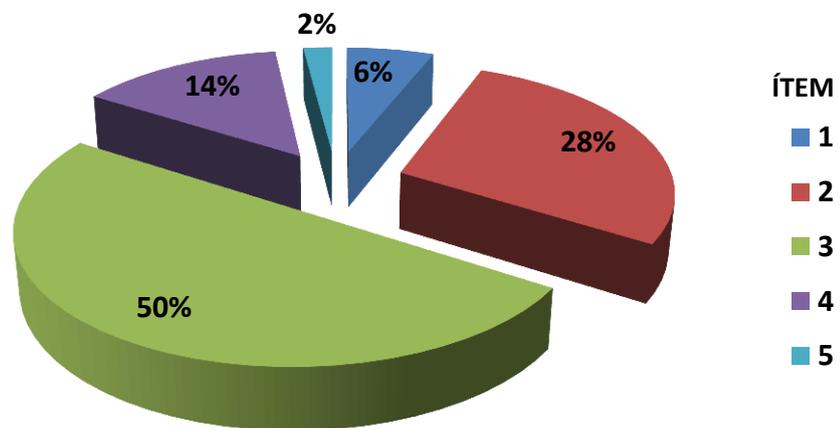
Los resultados obtenidos, son los siguientes:

CUADRO 1 PREGUNTA NO.1, VALORACIÓN DE OPCIONES.

ÍTEM	OPCIONES	VALOR	%
1	EXCELENTE	3	6,0
2	MUY BUENA	14	28,0
3	BUENA	25	50,0
4	REGULAR	7	14,0
5	INSUFICIENTE	1	2,0
TOTAL		50	100,0

FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

GRÁFICO 1 OPCIONES EN PORCENTAJES, PREGUNTA NO. 1



FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

Análisis e interpretación

Esta pregunta se encaminó, en la búsqueda del grado de percepción por parte de los estudiantes en la forma de enseñanza de la asignatura, resultando en un 50% que la enseñanza es buena, seguido por un 28% que la considera muy buena; en general un 84% considera aceptable la forma de enseñanza.

- 2) ¿Cuántas horas académicas, Usted recibe de Sistemas Eléctricos de Potencia I, en la Carrera de Ingeniería Eléctrica?

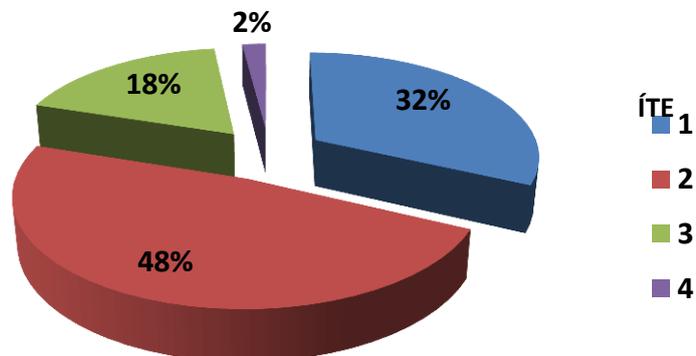
Los resultados obtenidos, son los siguientes:

CUADRO 2 PREGUNTA NO. 2, VALORACIÓN DE RESPUESTAS.

ÍTEM	RESPUESTAS	VALOR	%
1	6 Horas	16	32,0
2	5 Horas	24	48,0
3	4 Horas	9	18,0
4	2 Horas	1	2,0
TOTAL		50	100,0

FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

GRÁFICO 2 RESPUESTAS EN PORCENTAJES, PREGUNTA NO. 2



FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

Análisis e interpretación

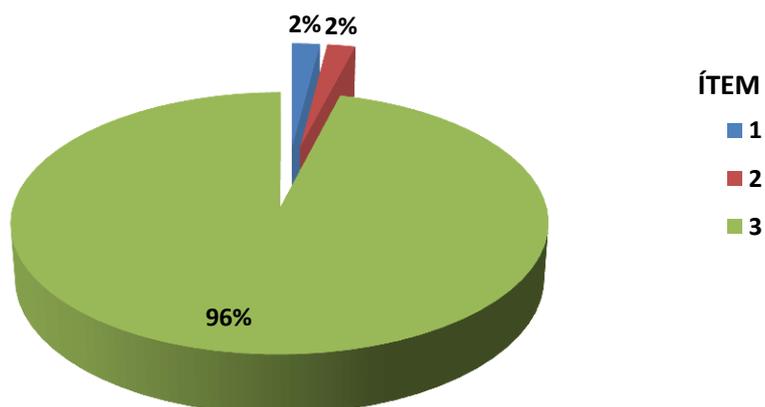
Esta pregunta en su primera parte hace referencia a conocer las horas académicas impartidas en teoría, resultado que causa sorpresa debido a que un 48% determinó como 5 horas/semana, la carga académica; tan solo un 32% coincidió con la carga horaria establecida en las mallas curriculares de 6 horas/semana.

CUADRO 3 PREGUNTA NO. 2, VALORACIÓN DE RESPUESTAS

ÍTEM	RESPUESTAS	VALOR	%
1	2 Horas	1	2,0
2	1 Hora	1	2,0
3	0 Horas	48	96,0
TOTAL		50	100,0

FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

GRÁFICO 3 RESPUESTAS EN PORCENTAJES, PREGUNTA NO. 2 LABORATORIO



FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

Análisis e interpretación

Esta pregunta se complementa en conocer las horas académicas impartidas en laboratorio, resultado que contundentemente muestra un 96% determinando cero horas/semana, la Carrera de Ingeniería Eléctrica, no considera la asignatura de laboratorio en su malla curricular.

3) ¿Considera Usted, qué la carga horaria descrita en el numeral 2 es?

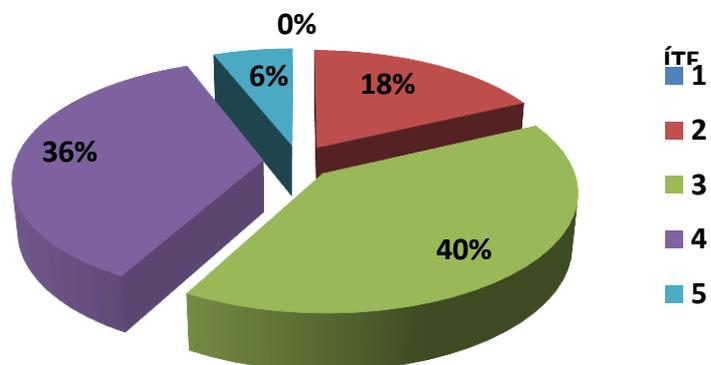
Los resultados obtenidos, son los siguientes:

CUADRO 4 PREGUNTA NO. 3, VALORACIÓN DE OPCIONES

ÍTEM	OPCIONES	VALOR	%
1	EXCELENTE	0	0,0
2	MUY BUENA	9	18,0
3	BUENA	20	40,0
4	REGULAR	18	36,0
5	INSUFICIENTE	3	6,0
TOTAL		50	100,0

FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

GRÁFICO 4 OPCIONES EN PORCENTAJE, PREGUNTA NO. 3



FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

Análisis e interpretación

Esta pregunta permite obtener el grado de percepción de los estudiantes acerca de la carga horaria determinada en el numeral anterior, resultando entre regular y buena con un 76%.

- 4) ¿Cuáles de los siguientes programas, Usted conoce, maneja o ha escuchado?

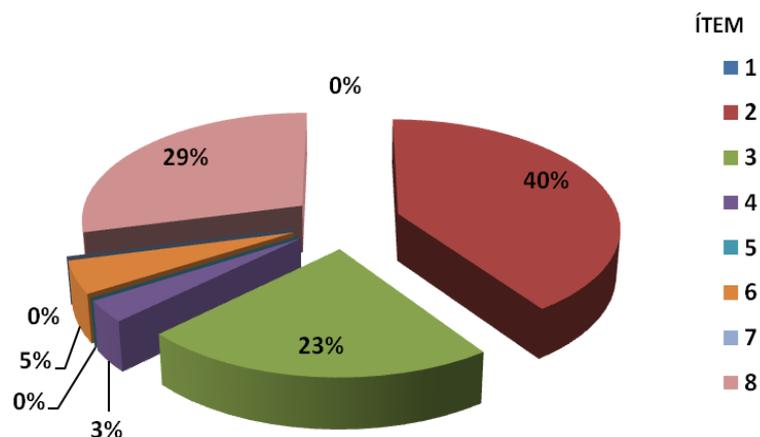
Los resultados obtenidos, son los siguientes:

CUADRO 5 PREGUNTA NO. 4, VALORACIÓN DE OPCIONES

ÍTEM	OPCIONES	VALOR	%
1	Power Factory de DigSilent	0	0,0
2	PowerWorld	25	40,3
3	Neplan	14	22,6
4	Etap	2	3,2
5	Cyme	0	0,0
6	EasyPower	3	4,8
7	PSAT	0	0,0
8	Ninguno	18	29,0
TOTAL		62	100,0

FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

GRÁFICO 5 OPCIONES EN PORCENTAJES, PREGUNTA NO. 4



FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

Análisis e interpretación

Esta interrogante determinó que un 40% conoce, ha manejado o escuchado del programa para simulación de sistemas eléctricos de potencia PowerWorld, contrariamente, un 29% aseguró no tener conocimiento alguno sobre programas de simulación de SEP.

- 5) ¿Considera Usted, qué de acuerdo a lo descrito en el numeral 4, su conocimiento o manejo de éstos programas es?

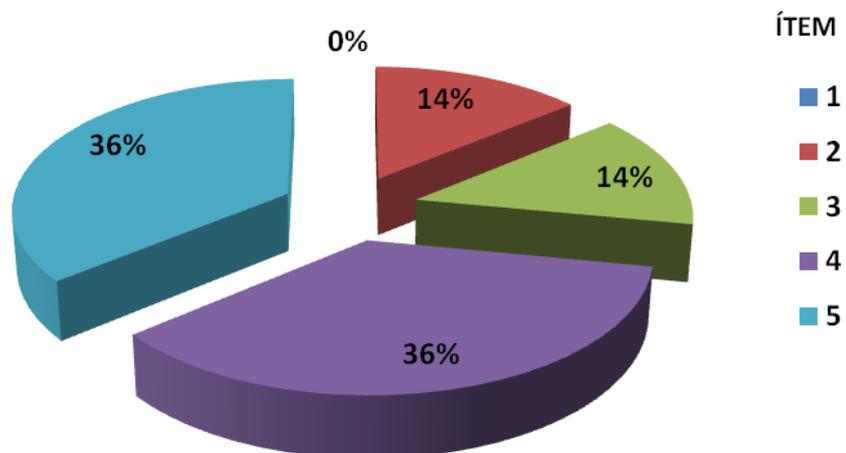
Los resultados obtenidos, son los siguientes:

CUADRO 6 PREGUNTA NO. 5, VALORACIÓN DE OPCIONES

ÍTEM	OPCIONES	VALOR	%
1	EXCELENTE	0	0,0
2	MUY BUENA	7	14,0
3	BUENA	7	14,0
4	REGULAR	18	36,0
5	INSUFICIENTE	18	36,0
TOTAL		50	100,0

FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

GRÁFICO 6 OPCIONES EN PORCENTAJES, PREGUNTA NO. 5



FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

Análisis e interpretación

En esta inquietud se plantea, saber el grado de manejo del software determinado en el numeral anterior, un 72% determino como regular e insuficiente, que indica que es poco el uso de nuevas tecnologías.

- 6) ¿Cuáles de los programas citados se usan para la enseñanza de Sistemas Eléctricos de Potencia I, en la Carrera de Ingeniería Eléctrica?

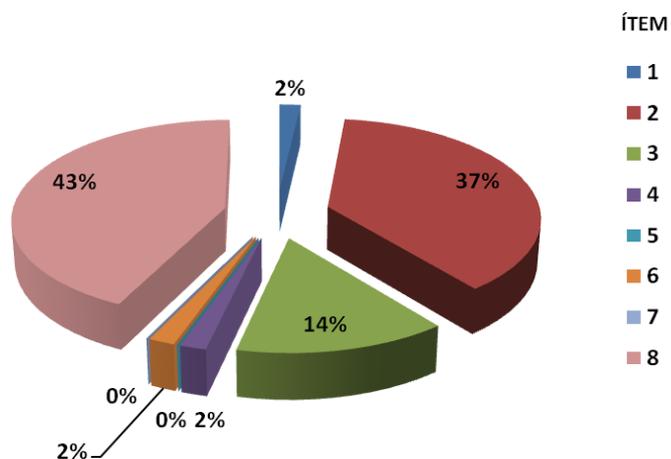
Los resultados obtenidos, son los siguientes:

CUADRO 7 PREGUNTA NO. 6, VALORACIÓN DE OPCIONES

ÍTEM	OPCIONES	VALOR	%
1	Power Factory de DigSilent	1	1,8
2	PowerWorld	21	37,5
3	Neplan	8	14,3
4	Etap	1	1,8
5	Cyme	0	0,0
6	EasyPower	1	1,8
7	PSAT	0	0,0
8	Ninguno	24	42,9
TOTAL		56	100,0

FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

GRÁFICO 7 OPCIONES EN PORCENTAJES, PREGUNTA NO. 6



FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

Análisis e interpretación

Esta inquietud, tiene relación con las anteriores, ya que se trata de medir el grado de utilidad de un programa de simulación de sistemas eléctricos de potencia, el resultado determina que un 43% dijo que no se usa ningún programa; un 37% determinó al software PowerWorld y un 14% usa Neplan de manera esporádica.

- 7) ¿Para el uso del programa en la enseñanza de Sistemas Eléctricos de Potencia I, conoce Usted el empleo de guías o procedimientos de laboratorio?

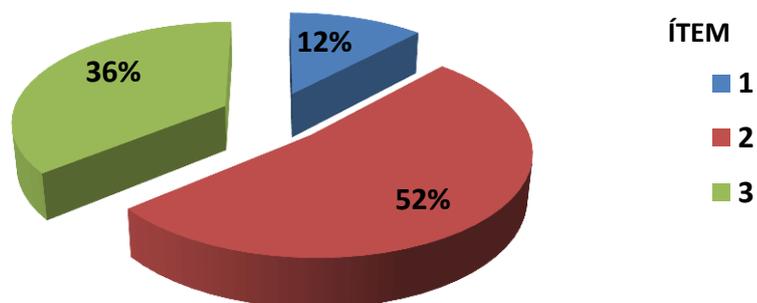
Los resultados obtenidos, son los siguientes:

CUADRO 8 PREGUNTA NO. 7, VALORACIÓN DE OPCIONES

ÍTEM	OPCIONES	VALOR	%
1	SI	6	12,0
2	NO	26	52,0
3	NO SABE	18	36,0
TOTAL		50	100,0

FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

GRÁFICO 8 OPCIONES EN PORCENTAJES, PREGUNTA NO. 7



FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

Análisis e interpretación

En los resultados obtenidos en esta inquietud, el 52% no conoce el empleo de guías o procedimientos de laboratorio, un 36% no sabe y un 12% afirma conocer alguna guía de laboratorio.

- 8) ¿Conoce Usted, de las bondades, capacidades y características del programa PowerWorld aplicado en los grandes Sistemas Eléctricos de Potencia?

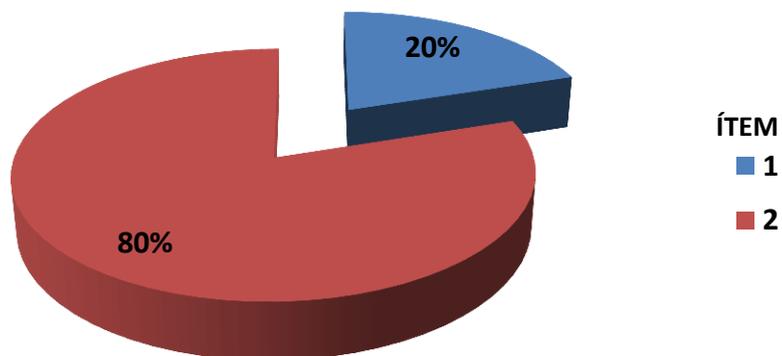
Los resultados obtenidos, son los siguientes:

CUADRO 9 PREGUNTA NO. 8, VALORACIÓN DE OPCIONES

ÍTEM	OPCIONES	VALOR	%
1	SI	10	20,0
2	NO	40	80,0
TOTAL		50	100,0

FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

GRÁFICO 9 OPCIONES EN PORCENTAJE, PREGUNTA NO. 8



FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

Análisis e interpretación

En esta inquietud, el 80% desconoce las bondades y características del programa PowerWorld, mientras que la parte complementaria, el 20% afirma si conocer alguna cualidad del software.

- 9) ¿Considera Usted, qué sería una buena opción el uso del programa PowerWorld en la enseñanza de Sistemas Eléctricos de Potencia I, en la Carrera de Ingeniería Eléctrica?

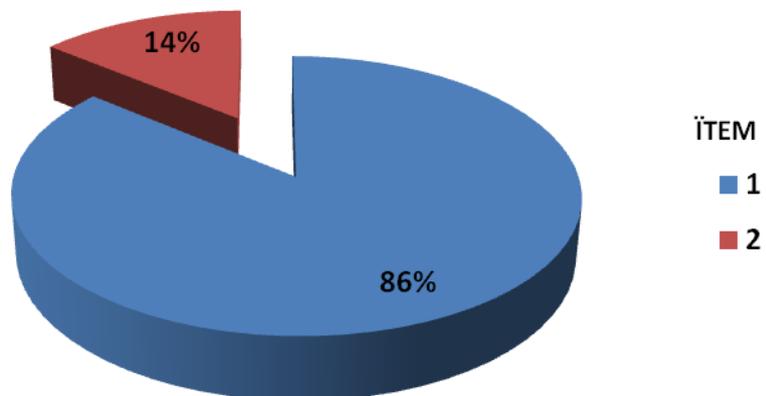
Los resultados obtenidos, son los siguientes:

CUADRO 10 PREGUNTA NO. 9, VALORACIÓN DE OPCIONES

ÍTEM	OPCIONES	VALOR	%
1	SI	43	86,0
2	NO	7	14,0
TOTAL		50	100,0

FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

GRÁFICO 10 OPCIONES EN PORCENTAJE, PREGUNTA NO. 9



FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

Análisis e interpretación

El 86 % considera será de gran ayuda y facilidad el uso del programa PowerWorld en la enseñanza de Sistemas Eléctricos de Potencia, su parte contraria del 14% no considera relevante esta opción.

10) ¿Considera Usted, qué le sería de gran utilidad una guía de laboratorio en base al Sistema Eléctrico Nacional, que sea aplicable en la enseñanza de Sistemas Eléctricos de Potencia I, en la Carrera de Ingeniería Eléctrica?

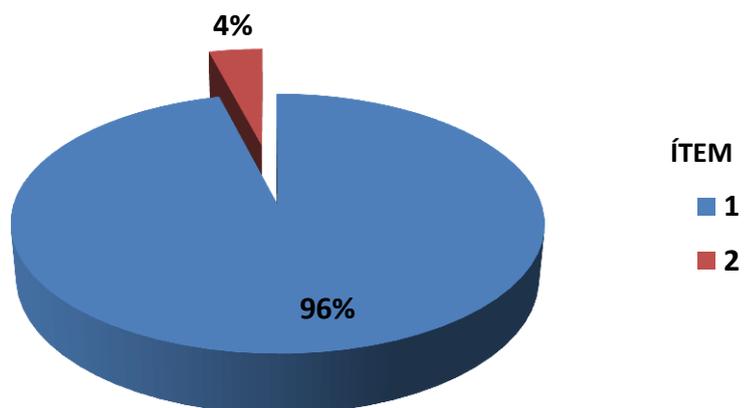
Los resultados obtenidos, son los siguientes:

CUADRO 11 PREGUNTA NO. 10, VALORACIÓN DE OPCIONES

ÍTEM	OPCIONES	VALOR	%
1	SI	48	96,0
2	NO	2	4,0
TOTAL		50	100,0

FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

GRÁFICO 11 OPCIONES EN PORCENTAJE, PREGUNTA NO. 10



FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

Análisis e interpretación

El 96 % considera que sería de gran utilidad el uso de una guía de laboratorio considerando el sistema eléctrico nacional, sobre todo en la enseñanza de SEP; tan solo un 4% dijo que no sería de utilidad.

11) ¿Conoce Usted, en las siguientes entidades ligadas al sector eléctrico, cuál programa usan para análisis, planificación y operación de Sistemas Eléctricos de Potencia?

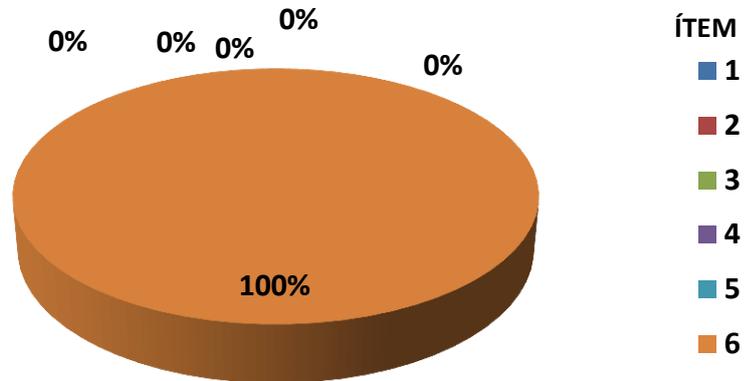
Los resultados obtenidos, son los siguientes:

CUADRO 12 PREGUNTA NO. 11, VALORACIÓN DE OPCIONES

ÍTEM	OPCIONES	VALOR	%
1	MEER:	0	0,0
2	CONELEC:	0	0,0
3	CENACE:	0	0,0
4	CELEC - TRANSELECTRIC:	0	0,0
5	E. E. DISTRIBUIDORAS:	0	0,0
6	NO SABE	50	100,0
TOTAL		50	100,0

FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

GRÁFICO 12 OPCIONES EN PORCENTAJE, PREGUNTA NO. 11



FUENTE: TÉCNICA DE ENCUESTA.
ELABORADO POR: GUILLERMO CASA.

Análisis e interpretación

La finalidad de esta interrogante fue la de conocer el grado de conocimiento de tecnologías usadas en las entidades ligadas al sector eléctrico, claramente el 100% determina que no saben en este caso en particular que software usan estas entidades del sector eléctrico.

2.3.3 Observación

Para la ejecución de esta técnica se planteó una ficha de observación, verificada por la visualización directa de las instalaciones de la Carrera de Ingeniería Eléctrica:

2.3.3.1 Ficha de Observación

- ¿Cuenta con infraestructura adecuada para la implementación de laboratorios?
- ¿Posee la Carrera de Ingeniería Eléctrica, equipo y herramienta necesaria para prácticas de laboratorio?

- c. ¿Existe espacio suficiente para los estudios técnicos y pruebas (laboratorio)?
- d. ¿Existe documentación técnica sobre nuevas tecnologías, y tópicos inherentes a la Carrera?

2.3.3.2 Resultado

La Carrera de Ingeniería Eléctrica, no cuenta con un laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia, además su espacio físico es limitado debido a la gran demanda de estudiantes; posee pocos equipos y herramientas para laboratorio de circuitos eléctricos, en cuanto a equipo de cómputo exclusivo, no lo dispone. En los laboratorios existentes de circuitos eléctricos, no se cuenta con espacio adicional para un área de estudios y pruebas de laboratorio.

En lo que se refiere a documentación técnica, existe deficiencia, que además no permite la actualización de su personal docente, en nuevas tendencias de tecnología en equipos de medio y alto voltaje y para análisis de Sistemas Eléctricos.

2.4 VERIFICACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Partiendo de la hipótesis planteada para la ejecución o no de este proyecto, se puede, una vez interpretadas las técnicas de investigación, determinar que la interrogante:

¿Será factible la estructuración de un manual de guías y procedimientos para la realización de prácticas de laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia I, y permitirá utilizar el simulador PowerWorld para la Universidad Técnica de Cotopaxi y articular la teoría con la práctica?

Posterior al análisis se concluye que es factible, y los resultados de las técnicas de entrevista, encuesta y observación verifican dicha inquietud, siendo posible la aplicación de la misma para la ejecución del presente trabajo.

CAPÍTULO III

PROPUESTA

ELABORACIÓN DE GUÍAS Y PROCEDIMIENTOS PARA LA REALIZACIÓN DE PRÁCTICAS DE LABORATORIO DE SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA I, UTILIZANDO EL SIMULADOR POWERWORLD PARA LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

3.1 PRESENTACIÓN

En el capítulo que antecede al presente, mediante las técnicas de investigación aplicadas se buscó establecer los justificativos para desarrollar este trabajo de investigación y desarrollo tecnológico, una vez obtenidos los resultados se determinó su necesidad y la factibilidad de ejecutarlo; el documento ha sido preparado considerando las mejores prácticas y procedimientos para la enseñanza de los Sistemas Eléctricos de Potencia I, esencialmente se fundamenta en lo detallado en párrafos posteriores.

3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI.

La Unidad Académica de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas, administra la carrera de Ingeniería Eléctrica, enmarcada en:

Misión: Formar profesionales creativos, críticos y humanistas que utilizan el conocimiento científico y técnico, mediante la promoción y ejecución de actividades de investigación y aplicaciones tecnológicas para contribuir en la solución de los problemas de la sociedad.

Visión: Una Unidad Académica con un alto nivel científico, investigativo, técnico y profundamente humanista, generadora de tecnologías, con trabajos inter y multidisciplinario, que se concretan en proyectos investigativos, productivos,

comunitarios y de prestación de servicios, a través de convenios con instituciones públicas y privadas, locales, nacionales e internacionales con una administración democrática, horizontal, vinculada con la sociedad.

3.2.1 CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

El crecimiento del sector eléctrico, como fundamento esencial en el desarrollo de una nación y del mundo, obliga a contar con profesionales calificados, acorde con los avances tecnológicos de los últimos tiempos, en las distintas áreas de: generación, transmisión, distribución y comercialización de energía, para dotar de un servicio en condiciones de calidad, continuidad y confiabilidad, con el menor costo social y ambiental, para beneficio mutuo de clientes y empresas. El Ecuador en el campo de la energía eléctrica, al depender de la importación de energía de países vecinos, crea la necesidad de fomentar la solución de ese déficit energético, con alternativas de generación que requieren mano de obra calificada, por lo que la formación de Ingenieros Eléctricos es un imperativo.

El área eléctrica está relacionada con dos de los sectores de gran desarrollo productivo, pues es un insumo vital que permite el funcionamiento y operación de la maquinaria industrial. El sector eléctrico por tanto juega un rol importante en la economía del país, genera fuentes de trabajo, bienes y servicios. Su aporte dentro del Producto Interno Bruto ha permanecido constante entre 1993 y 2008, siendo su proporción del 3.8% La Universidad Técnica de Cotopaxi consciente de la relevancia de ser parte de esta evolución industrial en el centro del país y para mantener vigente el desarrollo de las provincias centrales ecuatorianas, considera de vital importancia formar profesionales que puedan aprovechar y optimizar de mejor manera los recursos energéticos del país, a través de un manejo técnico, comercial y administrativo, por lo que se justifica esta carrera en los siguientes aspectos:

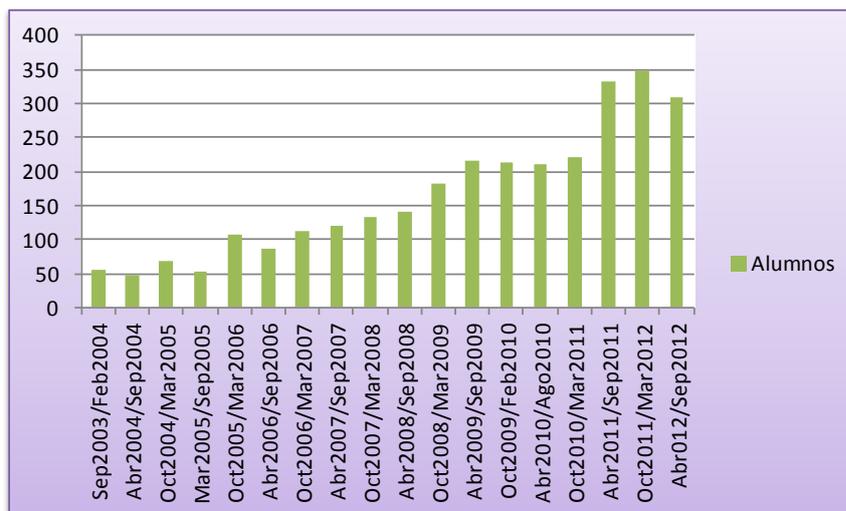
- Requiere que la universidad forme profesionales, para garantizar un servicio de calidad, cantidad y confiabilidad.
- Limitada difusión tecnológica y capacitación en el desarrollo de aplicaciones, dispositivos y sistemas eléctricos que están presentes en el mercado.
- La expansión del sistema eléctrico, obliga a las empresas generadoras, transmisoras, distribuidoras y comercializadoras, a contar con profesionales, capaces de diseñar, analizar, construir, operar y mantener los sistemas en óptimas condiciones de funcionamiento.
- Ante el déficit energético y aprovechando la configuración montañosa del centro del país, se requiere investigar y fomentar la utilización de nuevas alternativas o formas de energía que contribuyan al desarrollo socio económico del país.
- Considerando la dependencia tecnológica extranjera necesaria para diseñar, operar y mantener, los sistemas eléctricos de potencia, es importante contar con profesionales dinámicos y capaces de proponer proyectos innovadores que aporten a la solución del problema energético.
- Debido al desconocimiento del manejo eficiente de nuevas herramientas tecnológicas para: diseñar, operar y mantener, los sistemas eléctricos de potencia, es necesario contar con profesionales debidamente capacitados.
- El sector residencial, comercial e industrial del centro del país, requieren profesionales formados en el diseño, operación y mantenimiento de las instalaciones eléctricas interiores y/o exteriores.

Brevemente, se presenta un resumen del número de alumnos matriculados por período, claramente se aprecia la aceptación de la carrera como una buena opción profesional, desde su creación.

CUADRO 13 ALUMNOS MATRICULADOS POR PERÍODO, INGENIERÍA ELÉCTRICA

Período	Alumnos
Sep2003/Feb2004	55
Abr2004/Sep2004	48
Oct2004/Mar2005	69
Mar2005/Sep2005	54
Oct2005/Mar2006	106
Abr2006/Sep2006	86
Oct2006/Mar2007	113
Abr2007/Sep2007	119
Oct2007/Mar2008	134
Abr2008/Sep2008	140
Oct2008/Mar2009	182
Abr2009/Sep2009	217
Oct2009/Feb2010	212
Abr2010/Ago2010	211
Oct2010/Mar2011	222
Abr2011/Sep2011	331
Oct2011/Mar2012	349
Abr012/Sep2012	308

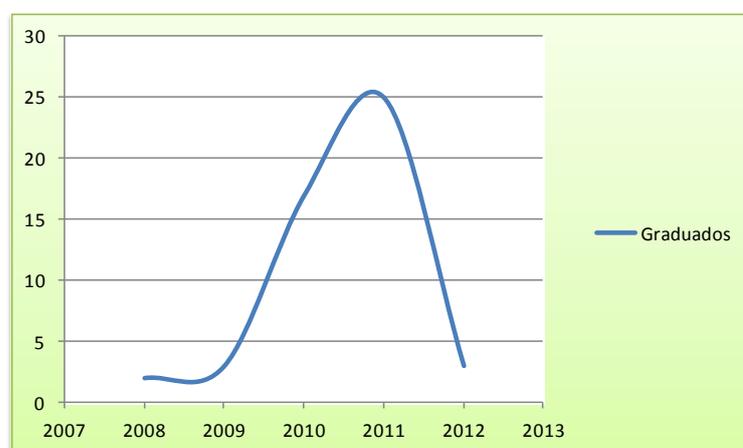
GRÁFICO 13 ALUMNOS MATRICULADOS POR PERÍODO, INGENIERÍA ELÉCTRICA



CUADRO 14 GRADUADOS POR AÑO, INGENIERÍA ELÉCTRICA

Año	Graduados
2008	2
2009	3
2010	17
2011	25
2012	3

GRÁFICO 14 GRADUADOS POR AÑO, INGENIERÍA ELÉCTRICA



En el Cuadro 14, se presenta el número de graduados por año, se percibe un incremento anual en el número de profesionales entregados a la sociedad, con respecto al año 2012, corresponde únicamente al primer semestre.

3.3 JUSTIFICACIÓN

El desarrollo de este proyecto es particularmente importante y necesario, dicho precepto se justifica en los siguientes aspectos:

- a) En la Carrera de Ingeniería Eléctrica, el proceso de enseñanza – aprendizaje, es predominantemente teórico que práctico, condición que dificulta familiarizarse con el equipamiento, tecnología y aplicativos para sistemas eléctricos que se emplean en la industria.
- b) La Universidad no cuenta con laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia, lo que dificulta el desarrollo de investigación, y por ende, la práctica complementaria en la enseñanza.
- c) Mejorar el currículo académico, siendo reconocidos y aceptados en el sector laboral, por una enseñanza de calidad.

Es virtud fundamental de un profesional la investigación para resolver problemas o mejorar procesos existentes; en nuestros días la aplicación de tecnología y mejores herramientas de análisis de operación técnica - económica, planeamiento, expansión, pronóstico, estimaciones son cada vez más requeridos.

La Universidad Técnica de Cotopaxi se beneficiará de este proyecto, apoyando el desarrollo integral y profesional de sus estudiantes de ingeniería eléctrica entregando profesionales con pleno conocimiento, de capacidad confiable y de calidad, constituyéndose en una institución eficiente y moderna que mantiene y mejora los estándares de calidad educativa.

3.4 OBJETIVOS

Al desarrollar este proyecto se pretende alcanzar lo siguiente:

3.4.1 General

Elaborar guías y procedimientos para la realización de prácticas de laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia I, utilizando el simulador PowerWorld, para la Universidad Técnica de Cotopaxi.

3.4.2 Específicos

- a) Elaborar guías y procedimientos de laboratorio idóneos al cronograma de enseñanza de Sistemas Eléctricos de Potencia I.
- b) Contribuir al fortalecimiento de la calidad educativa en la enseñanza de Sistemas Eléctricos de Potencia I, para los estudiantes de ingeniería eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi.
- c) Realizar simulaciones dinámicas y visuales de las prácticas de laboratorio en el simulador PowerWorld.

3.5 DESARROLLO DE LA PROPUESTA

Las guías han sido desarrolladas en base al contenido de la malla curricular de Sistemas Eléctricos de Potencia, priorizando la capacidad analítica del estudiante, partiendo de la base teórica y buscando encaminar en la investigación de los tópicos propuestos, permitiendo fortalecer la comprensión mediante la asesoría del profesor de la asignatura.

3.5.1 Diseño de las guías de laboratorio para mejorar la comprensión de Sistemas Eléctricos de Potencia I utilizando estrategias y metodologías.

Las guías han sido diseñadas para ofrecerle al estudiante ejemplos específicos sobre determinado tópico, presentando datos reales de redes, equipos y condiciones operativas del sistema eléctrico ecuatoriano, mejorado con instrucciones que le permitirán ágilmente alcanzar los objetivos propuestos, complementariamente, se aplica la metodología de aprender-haciendo, para esto, se propone al estudiante simular el procedimiento variando parámetros clave que modifican el comportamiento y estado del sistema, lo propuesto se afianza en que

permitirá al estudiante determinar los procedimientos, los resultados, el análisis, las conclusiones y las recomendaciones en cada tópico tratado.

Finalmente, aunque no se cita como objetivo, se espera que el estudiante mejore su capacidad analítica y proponga casos de estudio o mejoras a los casos presentados. Lo citado directa o indirectamente esta direccionado a contribuir en la mejora de los estándares de calidad educativa.

3.5.2 Estrategias para complementar la enseñanza de sistemas eléctricos de potencia I en la Universidad Técnica de Cotopaxi.

A título personal del autor, se considera que, una de las estrategias para complementar la enseñanza adicional a contar con docentes capacitados, es el fomento de guías de laboratorio que su similar en la industria son las pruebas de campo, consolidar una gama de software de simulación y análisis posterior a un estudio de las herramientas computacionales implementadas en el sector industrial, crear departamentos de investigación y provisión de servicios de asesoramiento y consultoría para el sector industrial, impulsar la participación a nivel nacional en la resolución de los problemas prioritarios del país.

3.5.3 Aplicación de estas guías, por parte de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, Universidad Técnica de Cotopaxi.

Las guías desarrolladas han sido elaboradas para el nivel de pregrado, especialmente para el sexto nivel de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, en tal virtud, se recomienda su aplicación con los estudiantes y docente de este nivel académico.

Se tiene plena confianza que estas guías aportarán positivamente al docente en la enseñanza de esta asignatura, para lo cual se provee el archivo digital editable conjuntamente con los archivos para simulación, esto permitirá que el docente lo adapte a su método de enseñanza.

3.5.4 Aporte de las prácticas, hacia el estudiante de la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

En la práctica 1, se presenta una introducción general al manejo de PowerWorld, para su modo de edición y simulación; en base al ejemplo citado, se pretende que el estudiante analice la capacidad de resolución del simulador, claro, poniendo énfasis en la calidad de datos de entrada, para esto se impulsa a leer el ejemplo de las páginas 324 a la 326 y ver su resolución mediante el libro, aquí se pueden analizar conceptos de valores en por unidad, siguiendo la intención del autor del libro que es mostrar un pequeño sistema de potencia, con la resolución de flujos de potencia.

Se considera que puede complementar los conceptos básicos de SEP dictados en la Unidad 1 Generalidades de los SEP.

Los ejemplos complementarios están diseñados para que el estudiante empiece a dibujar unifilares en el simulador, agregando líneas de transmisión, barras y cargas equivalentes, básicamente, jugando con el unifilar, es decir, abriendo y cerrando interruptores de líneas, cargas para observar el comportamiento del sistema.

RESULTADOS:

YBus Records			
Number	Name	Bus 1	Bus 2
1	Barra 1	0,00 - j4,17	-0,00 + j4,00
2	Barra 2	-0,00 + j4,00	0,00 - j4,00

Load Records										
Number of Bus	Name of Bus	Area Name of Load	Zone Name of Load	ID	Status	MW	Mvar	MVA	S MW	S Mvar
2	Barra 2	1	1	1	Closed	60	30	67,08	60	30
3	Barra 3	1	1	1	Closed	10	0	10	10	0

Gen Records														
Number of Bus	Name of Bus	ID	Status	Gen MW	Gen Mvar	Set Volt	AGC	AVR	Min MW	Max MW	Min Mvar	Max Mvar	Cost Model	Part. Factor
1	Barra 1	1	Closed	71,11	60,17	1	YES	YES	0	1000	-9900	9900	None	10

En la práctica 2, se complementa el contenido de transformadores abarcado en la Unidad 1 Generalidades de los SEP, poniendo énfasis en la regulación de voltaje y ángulo de fase en transformadores de dos devanados.

RESULTADOS:

YBus Records			
Number	Name	Bus 1	Bus 2
1	Paute-C-6-13.8kV	0,00 - j33,38	-0,00 + j33,18
2	Paute-C-230kV	-0,00 + j33,18	0,00 - j32,97

YBus Records			
Number	Name	Bus 1	Bus 2
1	Totoras_230kV	0,00 - j20,00	-0,00 + j20,00
2	Santa_Rosa_230kV	-0,00 + j20,00	0,00 - j20,00

YBus Records			
Number	Name	Bus 1	Bus 2
1	Totoras_230kV	0,00 - j20,00	0,52 + j19,99
2	Santa_Rosa_230kV	-0,52 + j19,99	0,00 - j20,00

En la práctica 3, va de la mano con el contenido tratado en la práctica que antecede, se considera importante, debido a que en el país se disponen de equipos de transformación de tres devanados o en esta configuración, se presenta la forma de modelarlo en el simulador, posteriormente, se indican ciertas condiciones en la simulación con la finalidad de comprender la importancia de mantener niveles aceptables de voltaje.

RESULTADOS:

YBus Records							
Number	Name	Bus 1	Bus 2	Bus 3	Bus 4	Bus 5	Bus 6
1	SANTA_ROSA_230kV	0,17 - j39,89				-0,10 + j19,63	-0,07 + j20,26
2	SANTA_ROSA_138kV		0,94 - j87,90			-0,53 + j43,57	-0,41 + j45,14
3	SANTA_ROSA_ATU13,8kV			0,15 - j12,96		-0,15 + j12,76	
4	SANTA_ROSA_ATT13,8kV				0,27 - j12,55		-0,27 + j12,55
5	SANTASTR	-0,10 + j19,63	-0,53 + j43,57	-0,15 + j12,76		0,78 - j75,95	
6	SANTASTR	-0,07 + j20,26	-0,41 + j45,14		-0,27 + j12,55		0,75 - j77,96

YBus Records							
Number	Name	Bus 1	Bus 2	Bus 3	Bus 4	Bus 5	Bus 6
1	SANTA_ROSA_230kV	0,17 - j39,89				-0,10 + j19,63	-0,07 + j20,26
2	SANTA_ROSA_138kV		0,94 - j87,90			-0,53 + j43,57	-0,41 + j45,14
3	SANTA_ROSA_ATU13,8kV			0,15 - j12,96		-0,15 + j12,76	
4	SANTA_ROSA_ATT13,8kV				0,27 - j12,55		-0,27 + j12,55
5	SANTASTR	-0,10 + j19,63	-0,53 + j43,57	-0,15 + j12,76		0,78 - j75,95	
6	SANTASTR	-0,07 + j20,26	-0,41 + j45,14		-0,27 + j12,55		0,75 - j77,96

YBus Records							
Number	Name	Bus 1	Bus 2	Bus 3	Bus 4	Bus 5	Bus 6
1	SANTA_ROSA_230kV	0,17 - j39,89				-0,10 + j19,63	-0,07 + j20,26
2	SANTA_ROSA_138kV		0,94 - j87,90			-0,53 + j43,57	-0,41 + j45,14
3	SANTA_ROSA_ATU13,8kV			0,15 - j12,96		-0,15 + j12,76	
4	SANTA_ROSA_ATT13,8kV				0,27 - j12,55		-0,27 + j12,55
5	SANTASTR	-0,10 + j19,63	-0,53 + j43,57	-0,15 + j12,76		0,78 - j75,95	
6	SANTASTR	-0,07 + j20,26	-0,41 + j45,14		-0,27 + j12,55		0,75 - j77,96

En la práctica 4, se enfoca en la operación de líneas de transmisión bajo la condición de estado estable, se considera complementaria a la Unidad 2 Modelo de SEP, se modela una línea de transmisión larga, y se analizan las condiciones para su operación, capacidad de transmisión de potencia y se introduce al tema de la compensación reactiva, es un tratado bastante extenso que se recomienda tratarlo desde el inicio de la Unidad.

RESULTADOS:

YBus Records			
Number	Name	Bus 1	Bus 2
1	PIFO500kV	0,00 - j24,59	-0,00 + j25,81
2	YAGUACHI500kV	-0,00 + j25,81	0,00 - j24,59

YBus Records			
Number	Name	Bus 1	Bus 2
1	MOLINO_230kV	0,00 - j19,60	-0,00 + j22,55
2	SANTO_DOMINGO_230kV	-0,00 + j22,55	0,00 - j19,60

YBus Records					
Number	Name	Bus 1	Bus 2	Bus 3	Bus 4
1	MOLINO_230kV	0,00 - j64,03	-0,00 + j64,99		
2	TOTORAS_230kV	-0,00 + j64,99	0,00 - j128,06	-0,00 + j64,99	
3	SANTA_ROSA_230kV		-0,00 + j64,99	0,00 - j128,06	-0,00 + j64,99
4	SANTO_DOMINGO_230kV			-0,00 + j64,99	0,00 - j64,03

YBus Records					
Number	Name	Bus 1	Bus 2	Bus 3	Bus 4
1	PIFO_500kV	0,00 + j172,07		-0,00 - j172,07	
2	YAGUACHI_500kV		0,00 + j172,07		-0,00 - j172,07
3	3	-0,00 - j172,07		0,00 + j147,48	-0,00 + j25,81
4	4		-0,00 - j172,07	-0,00 + j25,81	0,00 + j147,48

En la práctica 5, está ligado a la Unidad 3 Formulación Analítica General de Flujos de Potencia y Métodos de Resolución, la finalidad es familiarizar al estudiante con los datos de entrada para el cálculo de los flujos de potencia, obtener la solución mediante los métodos de Gauss-Seidel y de Newton-Raphson; para esto, en base al ejemplo citado, esto permitirá comparar resultados del simulador con los obtenidos en el texto.

RESULTADOS:

YBus Records					
Number	Name	Bus 4	Bus 2	Bus 3	Bus 1
1	Abedul		-3,82 + j19,08	-5,17 + j25,85	8,99 - j44,84
2	Olmo	-5,17 + j25,85	8,99 - j44,84		-3,82 + j19,08
3	Pino	-3,02 + j15,12		8,19 - j40,86	-5,17 + j25,85
4	Arce	8,19 - j40,86	-5,17 + j25,85	-3,02 + j15,12	

YBus Records					
Number	Name	Bus 1	Bus 2	Bus 3	Bus 4
1	Abedul	8,99 - j44,84	-3,82 + j19,08	-5,17 + j25,85	
2	Olmo	-3,82 + j19,08	8,99 - j44,84		-5,17 + j25,85
3	Pino	-5,17 + j25,85		8,19 - j40,86	-3,02 + j15,12
4	Arce		-5,17 + j25,85	-3,02 + j15,12	8,19 - j40,86

Bus Records										
Number	Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar
1	Abedul	Análisis Sistemas de Potencia	230	1	230	0	50	30,99	186,79	114,49
2	Olmo	Análisis Sistemas de Potencia	230	0,98242	225,957	-0,98	170	105,35		
3	Pino	Análisis Sistemas de Potencia	230	0,96901	222,872	-1,87	200	123,94		
4	Arce	Análisis Sistemas de Potencia	230	1,02	234,6	1,52	80	49,58	318	181,42

En la práctica 6, se complementa los estudios de flujos de potencia en barras principales del Sistema Nacional de Transmisión de Ecuador, se han concebido el número de barras de acuerdo a la posibilidad del simulador de alrededor de 42 barras en la versión estudiantil usada, se han obtenido equivalentes de carga conectada con la finalidad de mantener intacto el anillo a 230 kV.

RESULTADOS:

Parte de los resultados de YBus Records											
Number	Name	Bus 1	Bus 2	Bus 3	Bus 4	Bus 5	Bus 6	Bus 7	Bus 8	Bus 9	Bus 10
1	MOLINO_230kV	21,77 - j211,9	-0,82 + j6,75	-0,64 + j5,31							-1,46 + j11,70
2	RIOBAMBA_230kV	-0,82 + j6,75	3,82 - j31,35	-3,00 + j24,78							
3	TOTORAS_230kV	-0,64 + j5,31	-3,00 + j24,78	12,87 - j113,2	-6,84 + j48,5	-2,34 + j19,30					
4	SAN_FRANCISCO_230kV			-6,84 + j48,5	6,84 - j48,41						
5	SANTA_ROSA_230kV			-2,34 + j19,30		10,84 - j131,8	-3,28 + j27,12				
6	SANTO_DOMINGO_230kV					-3,28 + j27,12	6,13 - j87,23	-2,65 + j21,19			
7	QUEVEDO_230kV						-2,65 + j21,19	5,76 - j45,50	-1,21 + j9,70	-1,90 + j15,17	
8	SAN_GREGORIO_230kV							-1,21 + j9,70	1,21 - j9,60		
9	PASCUALES_230kV	-1,46 + j11,70						-1,90 + j15,17		24,79 - j241,9	-13,77 + j110
10	DOS_CERRITOS_230kV									-13,77 + j110	17,00 - j135,9
11	MILAGRO_230kV									-2,61 + j20,91	-3,23 + j25,81
12	ZHORAY_230kV	-18,64 + j149,51									
13	TRINITARIA_230kV									-4,87 + j38,97	
14	ESCLUSAS_230kV										
15	N_PROSPERINA_230kV									-0,00 + j5,00	
16	SININCAY_230kV										
17	MACHALA_230kV										
18	ZORRITOS_220kV										
19	POMASQUI_230kV					-5,04 + j45,75					
20	JAMONDINO_220kV										
21	MOLINO_138kV										
22	MOLINO_AT2										
23	MOLINO_AT1										
24	MOLINSTR	-0,10 + j19,70									
25	MOLINSTR	-0,10 + j19,70									
26	SANTA_ROSA_138kV										
27	SROSA_ATU										
28	SROSA_ATT										
29	SROSASTR					-0,10 + j19,63					
30	SROSASTR					-0,07 + j20,26					
31	PASCUALES_138kV										
32	PASC_ATT										
33	PASC_ATU										
34	PASC_STR									-0,07 + j20,81	
35	PASC_STR									-0,10 + j19,88	
36	TOTORAS_138kV										
37	TOTORAS_13,8kV										
38	TOTORSTR			-0,05 + j15,88							
39	BAÑOS_138kV										
40	SANTO_DOMINGO_138kV						-0,20 + j39,25				
41	ESMERALDAS_138kV										

En la práctica 7, está ligado al tema tratado de componentes simétricas y redes de secuencia, pues se tratan las fallas simétricas y asimétricas, se pretende que mediante el simulador se determine la corriente y voltaje de falla de acuerdo a una condición dada.

RESULTADOS:

Fault Data - Buses							
Number	Name	Phase Volt A	Phase Volt B	Phase Volt C	Phase Ang A	Phase Ang B	Phase Ang C
1	MOLINO_230kV	0,84933	0,84933	0,84933	16,12	-103,88	136,12
2	RIOBAMBA_230kV	0,75704	0,75704	0,75704	12,09	-107,91	132,09
3	TOTORAS_230kV	0,73296	0,73296	0,73296	11,87	-108,13	131,87
4	SAN_FRANCISCO_230kV	0,76909	0,76909	0,76909	13,52	-106,48	133,52
5	SANTA_ROSA_230kV	0,52077	0,52077	0,52077	4,87	-115,13	124,87
6	SANTO_DOMINGO_230kV	0,31505	0,31505	0,31505	4,9	-115,1	124,9
7	QUEVEDO_230kV	0	0	0	0	0	0
8	SAN_GREGORIO_230kV	0	0	0	0	0	0
9	PASCUALES_230kV	0,56839	0,56839	0,56839	5,2	-114,8	125,2
10	DOS_CERRITOS_230kV	0,58404	0,58404	0,58404	5,1	-114,9	125,1
11	MILAGRO_230kV	0,65991	0,65991	0,65991	6,56	-113,44	126,56
12	ZHORAY_230kV	0,8401	0,8401	0,8401	15,52	-104,48	135,52
13	TRINITARIA_230kV	0,63125	0,63125	0,63125	7,43	-112,57	127,43
14	ESCLUSAS_230kV	0,63301	0,63301	0,63301	7,53	-112,47	127,53
15	N_PROSPERINA_230kV	0,61581	0,61581	0,61581	5,92	-114,08	125,92
16	SININCAY_230kV	0,8383	0,8383	0,8383	14,94	-105,06	134,94
17	MACHALA_230kV	0,69559	0,69559	0,69559	3,36	-116,64	123,36
18	ZORRITOS_220kV	0,7517	0,7517	0,7517	5,21	-114,79	125,21
19	POMASQUI_230kV	0,56222	0,56222	0,56222	8,01	-111,99	128,01
20	JAMONDINO_220kV	0,67157	0,67157	0,67157	17,77	-102,23	137,77
21	MOLINO_138kV	0,8715	0,8715	0,8715	16,31	-103,69	136,31
22	MOLINO_AT2	0,85661	0,85661	0,85661	16,26	-103,74	136,26
23	MOLINO_AT1	0,85661	0,85661	0,85661	16,26	-103,74	136,26
24	MOLINSTR	0,86331	0,86331	0,86331	16,26	-103,74	136,26
25	MOLINSTR	0,86331	0,86331	0,86331	16,26	-103,74	136,26
26	SANTA_ROSA_138kV	0,52816	0,52816	0,52816	-7,65	-127,65	112,35
27	SROSA_ATU	0,52337	0,52337	0,52337	-3,81	-123,81	116,19
28	SROSA_ATT	0,52334	0,52334	0,52334	-3,82	-123,82	116,18
29	SROSTR	0,52337	0,52337	0,52337	-3,81	-123,81	116,19
30	SROSTR	0,52334	0,52334	0,52334	-3,82	-123,82	116,18
31	PASCUALES_138kV	0,55056	0,55056	0,55056	-6,75	-126,75	113,25
32	PASC_ATT	0,55383	0,55383	0,55383	-2,74	-122,74	117,26
33	PASC_ATU	0,55366	0,55366	0,55366	-2,95	-122,95	117,05
34	PASC_STR	0,55383	0,55383	0,55383	-2,74	-122,74	117,26
35	PASC_STR	0,55366	0,55366	0,55366	-2,95	-122,95	117,05
36	TOTORAS_138kV	0,81056	0,81056	0,81056	11,02	-108,98	131,02
37	TOTORAS_13,8kV	0,79013	0,79013	0,79013	11,23	-108,77	131,23
38	TOTORSTR	0,79013	0,79013	0,79013	11,23	-108,77	131,23
39	BAÑOS_138kV	0,83034	0,83034	0,83034	11,55	-108,45	131,55
40	SANTO_DOMINGO_138kV	0,34029	0,34029	0,34029	5,6	-114,4	125,6
41	ESMERALDAS_138kV	0,43191	0,43191	0,43191	7,7	-112,3	127,7

CONCLUSIONES

El desarrollo del presente trabajo fue gratificante, pues permitió establecer vínculos profesionales y se corroboraron conceptos, muchos de ellos transmitidos en las guías desarrolladas, meta de este documento; se materializó la idea que surgió de la necesidad vivida por el autor, durante su período de estudiante de pregrado, pues se considera un valioso aporte para las promociones sucesoras de la Carrera de Ingeniería Eléctrica, al menos se espera que exista algo novedoso para el estudiante talentoso y destacado; quienes puedan usar y probar las guías podrán emitir su criterio de validación y calificación y a su vez mejorarlas, formalmente se enuncian algunos resultados.

- Se elaboraron guías para prácticas de laboratorio idóneas a la planificación de la enseñanza de Sistemas Eléctricos de Potencia I; contiene siete prácticas con catorce ejemplos de calidad visual y completamente dinámicos, interactivos y amigables con el usuario; adicionalmente, se provee el instalador del simulador PowerWorld en su versión educativa limitado a cuarenta y un barras.
- Las guías contienen conceptos básicos para abarcar un tópico principal de los sistemas eléctricos de potencia, como son los flujos de potencia y los cortocircuitos, concebidos de forma ilustrativa, cada uno de los ejemplos contienen datos reales, que permiten simulaciones cercanas a la realidad de determinados sectores del Sistema Nacional Interconectado..
- Estas guías contribuyen al fortalecimiento de la calidad educativa en la enseñanza de Sistemas Eléctricos de Potencia I, de los estudiantes de pregrado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Técnica de Cotopaxi.
- Es de gran ayuda el uso del simulador PowerWorld debido a sus bondades, principalmente concebido para la enseñanza en una universidad norteamericana, convertido en PowerWorld Corporation, sigue la línea de

investigación y desarrollo, dando como resultados la inclusión de paquetes complementarios que fortalecen esta herramienta, por citar algunos, Flujo Óptimo de Potencia (OPF), Estabilidad Transitoria, Estabilidad de Voltaje (PVQV), Corrientes Inducidas Geomagnéticamente (GIC), visite www.powerworld.com, puede obtener mayor información de las características del simulador.

- En el sector eléctrico ecuatoriano, Celec-Transelectric y CENACE afianzan su operación y planificación a través del simulador Power Factory de DIgSILENT, en el sector eléctrico industrial tiene gran aceptación el simulador ETAP.

RECOMENDACIONES

En el desenlace de este documento, con una visión futurista, se considera las siguientes sugerencias.

- Este aporte se considera como complemento didáctico, en tal virtud, se sugiere su difusión y aplicación en la Carrera de Ingeniería Eléctrica.
- Al haberse enunciado y verificado las bondades del simulador PowerWorld, se sugiere su adquisición e inclusión en el laboratorio de Sistemas de Potencia de la Carrera de Ingeniería Eléctrica.
- A la par, al emplearse en el sector eléctrico del país, los simuladores Power Factory y Etap, se debería considerar su adquisición y fortalecer el laboratorio de Sistemas de Potencia de la Carrera de Ingeniería Eléctrica.
- Al disponer de al menos una de las herramientas citadas previamente, se debe incentivar a la investigación de los Sistemas Eléctricos de Potencia, previo que el país está por ampliar el sistema eléctrico a un nivel de transmisión de potencia a 500kV, y complementariamente ofertar servicios de consultoría.
- La carrera de Ingeniería Eléctrica tiene un amplio campo de acción por lo que es necesario los convenios interinstitucionales con las diferentes entidades del Sector Eléctrico tales como CENACE, CELEC EP TRANSELECTRIC, CONELEC, entre otras, lo que facilitaría enormemente a los estudiantes de pregrado obtener información del sistema eléctrico del país y facilitar pasantías pre-profesionales.

BIBLIOGRAFÍA

- A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, and S. Umans, Máquinas Eléctricas, sexta edición. México; McGraw-Hill, 1983.
- Chapman Stephen J., Máquinas Eléctricas, McGraw-Hill, 2000.
- Checa Luis María, Líneas de Transporte de Energía, Alfaomega, 2000
- Turan Gonen, Electric Power Transmission System Engineering, John Wiley & Sons, 1988.
- Das Debapriya, Electrical Power System, New Age International, 2006.
- Electric Power Research Institute (EPRI), EPRI AC Transmission Line Reference Book-200 kV and above (Palo Alto, CA; EPRI, www.epri.com, December 2005.
- Electrical Transmission and Distribution Reference Book, ABB, quinta edición, 1997.
- Fraile Mora Jesús, Máquinas Eléctricas, cuarta edición, McGraw-Hill Interamericana de México, 2002.
- Fusco Giuseppe, Russo Mario, Adaptive Voltage Control in Power Systems Modeling, Design and Applications, Springer, 2007.
- Grainger John J., Stevenson William D., Análisis de Sistemas de Potencia, McGraw-Hill Interamericana de México, 1996.
- Kothari D. P., Nagrath I. J., Sistemas Eléctricos de Potencia, McGraw-Hill Interamericana de México, 2008.
- P. M. Anderson, Analysis of Faulted Power Systems (Ames, IA; Iowa State University Press, 1973).
- T. Overbye and J. Weber, “Visualizing the Electric Grid,” IEEE Spectrum, 38, 2 (February 2001), pp, 52 - 58.
- W. A. Blackwell and L. L. Grigsby, Introducción a Teoría de Redes. Boston; PWS, 1985.
- W. D. Stevenson, Jr., Elementos de Análisis de Sistemas de Potencia, cuarta edición. New York; McGraw-Hill, 1982.

- W. F. Tinney and C. E. Hart, “Power Flow Solutions by Newton’s Method,” IEEE Trans. PAS, 86 (November 1967), p. 1449.
- W. F. Tinney and J. W. Walker, “Direct Solution of Sparse Network Equations by Optimally Ordered Triangular Factorization,” Proc. IEEE, 55 (November 1967), pp. 1801 – 1809.
- W. H. Hayt, Jr., and J. E. Kemmerly, Ingeniería de Análisis de Circuitos, séptima edición. New York; McGraw-Hill, 2006.
- Winders John J., Power Transformers Principles and Applications, Marcel Dekker, 2002.
- http://www.cenace.org.ec/index.php?option=com_phocadownload&view=sections&Itemid=50
- http://www.transelectric.com.ec/transelectric_portal/portal/main.do?sectionCode=17
- <http://www.powerworld.com/training/online-training>

ANEXOS Y GRÁFICOS

1. ESTADÍSTICA DE ALUMNOS DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.

Nivel	Periodo	No. Matriculados	Total	Nivel	Periodo	No. Matriculados	Total	
B. Común	Sep2003/Feb2004	38	55	B. Común	Oct2009/Feb2010	33	212	
7º	Sep2003/Feb2004	17		B. Común	Oct2009/Feb2010	33		
1º	Abr2004/Sep2004	31	48	1º	Oct2009/Feb2010	30		
8º	Abr2004/Sep2004	17		2º	Oct2009/Feb2010	29		
B. Común	Oct2004/Mar2005	48	69	3º	Oct2009/Feb2010	23		
1º	Oct2004/Mar2005	1		4º	Oct2009/Feb2010	23		
2º	Oct2004/Mar2005	20		6º	Oct2009/Feb2010	29		
1º	Mar2005/Sep2005	36	54	8º	Oct2009/Feb2010	12		
3º	Mar2005/Sep2005	18		9º	Oct2009/Feb2010	40		
B. Común	Oct2005/Mar2006	49	106	B. Común	Abr2010/Ago2010	20		211
1º	Oct2005/Mar2006	17		1º	Abr2010/Ago2010	31		
2º	Oct2005/Mar2006	22		2º	Abr2010/Ago2010	21		
4º	Oct2005/Mar2006	18		3º	Abr2010/Ago2010	23		
1º	Abr2006/Sep2006	34	86	4º	Abr2010/Ago2010	22		
2º	Abr2006/Sep2006	19		5º	Abr2010/Ago2010	22		
3º	Abr2006/Sep2006	17		7º	Abr2010/Ago2010	7		
5º	Abr2006/Sep2006	16		8º	Abr2010/Ago2010	25		
				9º	Abr2010/Ago2010	56		
B. Común	Oct2006/Mar2007	40	113	B. Común	Oct2010/Mar2011	24	222	
2º	Oct2006/Mar2007	25		1º	Oct2010/Mar2011	24		
3º	Oct2006/Mar2007	15		2º	Oct2010/Mar2011	22		
4º	Oct2006/Mar2007	19		3º	Oct2010/Mar2011	20		
6º	Oct2006/Mar2007	14		4º	Oct2010/Mar2011	22		
1º	Abr2007/Sep2007	52	119	5º	Oct2010/Mar2011	27		
3º	Abr2007/Sep2007	21		6º	Oct2010/Mar2011	19		
4º	Abr2007/Sep2007	16		8º	Oct2010/Mar2011	8		
5º	Abr2007/Sep2007	14		9º	Oct2010/Mar2011	37		
7º	Abr2007/Sep2007	26		B. Común	Abr2011/Sep2011	66		
B. Común	Oct2007/Mar2008	43	134	1º	Abr2011/Sep2011	24	331	
2º	Oct2007/Mar2008	20		2º	Abr2011/Sep2011	53		
4º	Oct2007/Mar2008	14		3º	Abr2011/Sep2011	18		
5º	Oct2007/Mar2008	17		4º	Abr2011/Sep2011	40		
6º	Oct2007/Mar2008	14		5º	Abr2011/Sep2011	31		
8º	Oct2007/Mar2008	26		6º	Abr2011/Sep2011	50		
B. Común	Abr2008/Sep2008	27	140	7º	Abr2011/Sep2011	12		349
1º	Abr2008/Sep2008	27		9º	Abr2011/Sep2011	85		
3º	Abr2008/Sep2008	21		B. Común	Oct2011/Mar2012	41		
5º	Abr2008/Sep2008	14		1º	Oct2011/Mar2012	40		
6º	Abr2008/Sep2009	13		2º	Oct2011/Mar2012	21		
7º	Abr2008/Sep2008	12		3º	Oct2011/Mar2012	27		
9º	Abr2008/Sep2008	48		4º	Oct2011/Mar2012	23		
B. Común	Oct2008/Mar2009	34	182	5º	Oct2011/Mar2012	37		
1º	Oct2008/Mar2009	25		6º	Oct2011/Mar2012	29		
2º	Oct2008/Mar2009	26		7º	Oct2011/Mar2012	35		
4º	Oct2008/Mar2009	18		8º	Oct2011/Mar2012	11		
6º	Oct2008/Mar2009	17		9º	Oct2011/Mar2012	25		
7º	Oct2008/Mar2009	14		B. Común	Abr012/Sep2012	50		
8º	Oct2008/Mar2009	49	217	1º	Abr012/Sep2012	38	308	
B. Común	Abr2009/Sep2009	36		2º	Abr012/Sep2012	33		
1º	Abr2009/Sep2009	30		3º	Abr012/Sep2012	36		
2º	Abr2009/Sep2009	22		4º	Abr012/Sep2012	7		
3º	Abr2009/Sep2009	24		5º	Abr012/Sep2012	47		
5º	Abr2009/Sep2009	27		6º	Abr012/Sep2012	22		
7º	Abr2009/Sep2009	19		7º	Abr012/Sep2012	34		
8º	Abr2009/Sep2009	10		8º	Abr012/Sep2012	16		
9º	Abr2009/Sep2009			9º	Abr012/Sep2012			

Convenio UTC-ELEPCOSA

2. ENCUESTA PARA ESTUDIANTES DE SEXTO Y SÉPTIMO NIVEL DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.

Mucho agradeceré a Usted, se digne responder con la verdad las siguientes interrogantes. Su información será muy valiosa para el desarrollo del proyecto de investigación: "Elaboración de guías y procedimientos para la realización de prácticas de laboratorio de Sistemas Eléctricos de Potencia I, utilizando el simulador PowerWorld para la Universidad Técnica de Cotopaxi"

Desde luego la información es confidencial. Por favor, sírvase contestar el siguiente cuestionario, de acuerdo a su criterio y conocimiento:

1. ¿Cómo calificaría Usted, la enseñanza de Sistemas Eléctricos de Potencia I, en la Carrera de Ingeniería Eléctrica?

Excelente	Muy Buena	Buena	Regular	Insuficiente	
-----------	-----------	-------	---------	--------------	--

2. ¿Cuántas horas académicas, Usted recibe de Sistemas Eléctricos de Potencia I, en la Carrera de Ingeniería Eléctrica?

Teoría:	Horas/semana.
Laboratorio:	Horas/semana.

3. ¿Considera Usted, que la carga horaria descrita en el numeral 2 es?

Excelente	Muy Buena	Buena	Regular	Insuficiente	
-----------	-----------	-------	---------	--------------	--

4. ¿Cuáles de los siguientes programas, Usted conoce, maneja o ha escuchado?

Power Factory de DigSilent	
PowerWorld	
Neplan	
Etap	
Cyme	

EasyPower	
PSAT	

Otro: _____

5. ¿Considera Usted, que de acuerdo a lo descrito en el numeral 4, su conocimiento o manejo del programa es?

Excelente	Muy Bueno	Bueno	Regular	Insuficiente	
-----------	-----------	-------	---------	--------------	--

6. ¿Cuáles de los programas citados se usan para la enseñanza de Sistemas Eléctricos de Potencia I, en la Carrera de Ingeniería Eléctrica?

Power Factory de DigSilent	
PowerWorld	
Neplan	
Etap	
Cyme	
EasyPower	
PSAT	

Otro: _____

7. ¿Para el uso del programa en la enseñanza de Sistemas Eléctricos de Potencia I, conoce Usted el empleo de guías o procedimientos de laboratorio?

Si	
No	
No sabe	

8. ¿Conoce Usted, de las bondades, capacidades y características del programa PowerWorld aplicado en los grandes Sistemas Eléctricos de Potencia?

Si	
No	

9. ¿Considera Usted, que sería una buena opción el uso del programa PowerWorld en la enseñanza de Sistemas Eléctricos de Potencia I, en la Carrera de Ingeniería Eléctrica?

Si	
No	

10. ¿Considera Usted, que le sería de gran utilidad una guía de laboratorio en base al Sistema Eléctrico Nacional, que sea aplicable en la enseñanza de Sistemas Eléctricos de Potencia I, en la Carrera de Ingeniería Eléctrica?

Si	
No	

11. ¿Conoce Usted, las siguientes entidades ligadas al sector eléctrico, cuál programa usan para análisis, planificación y operación de Sistemas Eléctricos de Potencia?

MEER:	
CONELEC:	
CENACE:	
CELEC - TRANSELECTRIC:	
E. E. DISTRIBUIDORAS:	

Otra: _____

Muchas Gracias por su colaboración.

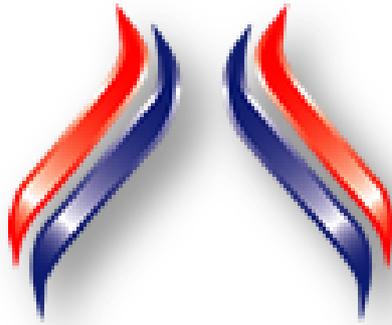
3. ENTREVISTA TÉCNICA LLEVADA A CABO AL COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, PERMITE OBTENER INFORMACIÓN DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA COORDINACIÓN, PARA LO QUE SE PLANTEAN 10 INTERROGANTES.

Ficha de entrevista

1. ¿Cuáles son sus funciones principales en la Coordinación de la Carrera de Ingeniería Eléctrica?
2. ¿Está de acuerdo con la implementación de guías de prácticas de laboratorio para la enseñanza de Sistemas Eléctricos de Potencia I?
3. ¿Usted, tiene el apoyo y visto bueno de parte de la Dirección Académica para la mejora continua de la enseñanza de Sistemas Eléctricos de Potencia I?
4. ¿En la Carrera de Ingeniería Eléctrica, se cuenta con personal docente especializado y capacitado permanentemente en el manejo de nuevas tecnologías y metodologías aplicadas en la enseñanza?
5. ¿Qué tiempo le tomaría a la Carrera de Ingeniería Eléctrica implementar un laboratorio totalmente equipado para Sistemas Eléctricos de Potencia?
6. ¿Se controla guías o procedimientos de laboratorio, al personal docente de la Carrera de Ingeniería Eléctrica?
7. ¿El personal docente bajo su coordinación, está consciente de los objetivos de la Carrera encaminados en el Sistema Calidad de la enseñanza?
8. ¿Cómo afectan a los procedimientos de la Carrera de Ingeniería Eléctrica el Sistema de Calidad de la enseñanza?
9. ¿Considera Usted, que se justifica económica y técnicamente la implementación de laboratorios o alguna mejora para la Carrera de Ingeniería Eléctrica?
10. ¿Cómo se ha manejado las relaciones interinstitucionales específicamente con las empresas y entidades del sector eléctrico, en busca de establecer vínculos que permitan que los estudiantes de la Carrera de Ingeniería Eléctrica sean aceptados para elaborar trabajos investigativos y pasantías?

ANEXO 2

**GUÍAS PARA PRÁCTICAS DE
LABORATORIO DE SISTEMAS
ELÉCTRICOS DE POTENCIA I**



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE
COTOPAXI**

**CARRERA DE INGENIERÍA
ELÉCTRICA**

**HOJAS GUÍAS DE LAS PRÁCTICAS
DE LABORATORIO DE SISTEMAS
ELÉCTRICOS DE POTENCIA I**

GUILLERMO CASA

PRÁCTICA NO. 1

1. TÓPICO:

Introducción al Simulador POWERWORLD.

2. OBJETIVO:

Proporcionar habilidades necesarias para empezar a usar PowerWorld para el aprendizaje interactivo de los Sistemas Eléctricos de Potencia.

3. DESARROLLO:

Después de instalar PowerWorld, inicie el programa dando doble clic en el ícono PW. Para el análisis de sistemas de potencia se requiere que el usuario provea al programa con un modelo del sistema de potencia. Con PowerWorld se puede construir un nuevo caso (modelo) desde cero o desde un caso existente. PowerWorld usa una cinta de comandos para interface con el usuario, aquí se encuentran los comandos más comunes, por ejemplo: abrir o guardar un caso, que también están habilitados en el menú que aparece al dar clic sobre el ícono PowerWorld ubicado en la esquina superior izquierda de la pantalla. Para abrir un caso haga clic sobre este ícono y seleccione Open Case (abrir caso). Esto muestra la ventana de dialogo para abrir un caso, seleccione y abra Ejemplo 1-1 en el directorio, la ventana debe parecerse a la Figura 1.1.

El sistema se ha dibujado en la forma de diagrama unifilar. PowerWorld está concebido para sistemas interconectados, en alto voltaje y con grandes potencias. Casi sin excepción estos sistemas operan usando potencias trifásicas ya sea a 50 o 60 Hz. Un análisis completo de un sistema trifásico arbitrario requiere la consideración de cada una de las tres fases; dibujar los sistemas en la forma esquemática fácilmente se vuelve excesivamente

complicado. Afortunadamente, durante la operación normal los sistemas trifásicos generalmente se comportan de forma balanceada, esto permite que el sistema sea modelado eficientemente como un sistema monofásico equivalente. La mayoría de paquetes de análisis de sistemas de potencia, incluido PowerWorld usa esta aproximación. Entonces las conexiones entre dispositivos están dibujadas con una línea de ahí el término de diagrama unifilar. Sin embargo hay que mantener en mente que el sistema actual es trifásico.

La Figura 1.1 presenta como los componentes principales de un sistema de potencia se representan en PowerWorld. Los generadores se muestran como un círculo con un rotor de forma de hueso, flechas grandes representan cargas, y, las líneas de transmisión son dibujadas simplemente como líneas. En la terminología de sistemas de potencia, los nodos en los cuales dos o más dispositivos se unen, se conocen como barras. En PowerWorld líneas más gruesas representan las barras; los voltajes de barra se muestran en kilovoltios (kV) en los campos ubicados a la derecha de las barras. Además de los voltajes, los ingenieros de potencia están interesados en como la potencia fluye a través del sistema. En PowerWorld el flujo de potencia puede ser visualizado con flechas sobre puestas en generadores, cargas y líneas de transmisión; el tamaño y velocidad de las flechas indica la intensidad y dirección del flujo; uno de los aspectos únicos de PowerWorld es su habilidad para animar los sistemas de potencia.

Para iniciar la animación seleccione la pestaña Tools (herramientas) en la cinta de comandos, haga clic en el botón flecha verde y negra, por encima de Solve. El unifilar cobrará vida, mientras está siendo animado se puede interactuar con el sistema. La Figura 1.1 representa un sistema de potencia básico en el cual, un generador suministra potencia a la carga a través de un alimentador de un sistema de distribución. Los bloques rojos sólidos sobre la línea y la carga representan interruptores de circuitos

(disyuntores); para abrir un interruptor de circuito simplemente haga clic sobre este. Como la carga esta en serie conectada al generador, haciendo clic en cualquier interruptor de circuito aísla la carga del generador, resultando en un colapso del sistema. Para restaurar el sistema haga clic sobre el interruptor del circuito para cerrarlo y seleccione el botón que se encuentra en la cinta de Tools (herramientas) para reiniciar la simulación.

Información adicional de la mayoría de elementos puede visualizarse haciendo clic derecho sobre ellos. Por ejemplo, haciendo clic derecho sobre el símbolo del generador muestra un menú local de información adicional sobre el generador, de forma similar para la línea de transmisión; Para modificar la ventana de visualización haga clic derecho sobre un área en blanco del unifilar, aparece un menú local, seleccione Online Display Options, esto mostrará un cuadro de dialogo con opciones que permite personalizar las características de visualización; por ejemplo, cambiar color en las flechas animadas del flujo (Animated Flows).

Hay varias técnicas para desplazar y/o acercar-alejar el unifilar. Un método para desplazar es primero clic en un espacio vacío de la ventana y luego presionar las teclas de dirección en el teclado en el sentido que desee mover. Para acercar-alejar sólo mantenga presionada la tecla Ctrl mientras presiona las teclas de dirección hacia arriba o hacia abajo para acercar y alejar, respectivamente. Alternativamente, se puede arrastrar el unifilar dando clic izquierdo y manteniéndolo presionado para luego mover el mouse hacia donde se desee ubicar el unifilar; Para ir a una vista favorita desde el menú local del unifilar seleccione Go To View para ver un listado de vistas guardadas.

Para mantener los cambios efectuados después de salir de PowerWorld se debe guardar los resultados, para hacer esto, seleccione del ícono PowerWorld la opción Save Case As, ingrese un nombre de archivo diferente para no sobre escribir el caso inicial. PowerWorld actualmente

guarda la información asociada con el modelo del sistema en un archivo diferente de la información asociada con el unifilar. El modelo del sistema de potencia se almacena en archivos con extensión *.pwb (PowerWorld binary file); mientras que la información mostrada en el unifilar se almacena en archivos con extensión *.pwd (PowerWorld display file). Los nombres de ambos archivos deben ser los mismos a excepción de las extensiones, la razón para el sistema de archivos dobles es para proveer flexibilidad, con modelos de grandes sistemas, es común que un sistema sea mostrado usando múltiples diagramas unifilares. Adicionalmente, un único diagrama unifilar podría ser usado diferentes veces para mostrar información en diferentes casos.

Modo Edición:

PowerWorld tiene dos modos principales de operación. El Run Mode, el cual fue presentado, se usa para iniciar las simulaciones y ejecutar el análisis. El Edit Mode, el cual se usa para modificar casos existentes y construir nuevos casos; para cambiar al Edit Mode haga clic sobre este botón, se añadirán una barra, una carga y dos líneas al sistema del Ejemplo 1-1.

Al cambiar al modo de edición notará que la cinta de comandos cambia ligeramente, con varios de los botones existentes e íconos desactivados y otros activados, el unifilar ahora presenta una rejilla súper puesta para ayudar en la alineación de elementos. En el modo edición, primero añadimos una nueva barra al sistema, se puede hacer gráficamente seleccionando la pestaña Draw, haciendo clic en el botón Network y seleccionando Bus; una vez hecho esto, mueva el mouse a la ubicación deseada en el unifilar y de clic. El dialogo Bus Options aparece, sirve para ajustar los parámetros de barra; por ahora deje todos los campos de barra por defecto, a excepción del campo Bus Name, ingrese "Barra 3" y ajuste el voltaje nominal a 69; notará que el número de esta nueva barra se ajusta

automáticamente al número mayor al existente en el caso; el unifilar terminado debería ser similar a la Figura 1.2, se puede guardar los cambios ahora para evitar perderlos.

Por defecto, cuando una nueva barra se inserta, un campo de barra (Bus Field) también, el campo de barra se usa para mostrar información sobre las barras en el unifilar, en este caso muestra el nombre de la barra; seleccionando Field pueden añadirse más campos de información que se desee visualizar, por ejemplo: magnitud de voltaje de barra, ángulo de fase, etc., para modificar el tamaño y tipo de letra, seleccione el botón Format y ajuste el cuadro de dialogo que aparece.

Para insertar alguna carga en la barra 3, puede hacerse gráficamente seleccionando Network, Load y dando clic en la barra 3; el dialogo de opciones de carga aparecerá, permitiendo ajustar los parámetros deseados; deje todos los campos por defecto a excepción del valor de potencia constante que será de 10 MW y de la orientación hacia abajo; generalmente se ingresan datos de carga como modelos de potencia constante, que se trata como independiente del voltaje de barra. Automáticamente aparecen dos campos con la carga para los MW y MVAR.

Ahora se requiere unir la carga de la barra 3 al sistema, esto se obtiene añadiendo una línea desde la barra 2 hacia la barra 3, seleccionando Network, Transmission Line y haciendo clic en la barra 2, con esto se inicia la línea, se puede insertar segmentos de línea cada vez que se hace clic, para finalizar se hace doble clic sobre la barra 3, seguido aparece el dialogo de opciones para ajustar los parámetros de línea, la resistencia serie de la línea será de 0,3, la reactancia serie de 0,6 y el límite de 20 MVA; al seleccionar OK se insertan automáticamente dos interruptores de circuito y un Pie Chart, que es usado para mostrar el porcentaje de carga de la línea.

Modo Simulación:

El siguiente paso es cambiar a Run Mode para animar el nuevo sistema desarrollado; clic en el botón Run Mode, seleccione Tools y haga clic sobre el botón verde y negro que se encuentra encima de Solve. Se apreciarán las flechas animadas; hasta ahora el nuevo sistema tiene un generador y dos cargas, aún es radial, significa que cualquier apertura entre la barra 1 y la barra 2 resultaría en un colapso de las cargas; los sistemas de potencia radiales son bastante comunes en las redes de distribución de bajo voltaje; a niveles más altos de voltaje, los sistemas enlazados son usados, es decir cada carga tiene al menos dos posibles fuentes de potencia. Ahora se puede convertir en un sistema enlazado añadiendo una línea desde la barra 1 hacia la barra 3; para hacer esto cambiamos al modo de edición y repetimos los pasos para insertar una línea de transmisión, considere los mismos parámetros de la línea entre las barras 2 y 3; ahora el sistema debe ser similar al mostrado en la Figura 1.3.

Para variar la carga haga clic sobre las flechas arriba – abajo entre el valor de la carga y el campo de MW. Notará que a causa de la impedancia de la línea, el voltaje en la carga cae como su valor se incrementa.

4. INFORME:

- Del Ejemplo 1.1 en el modo simulación, seleccione Tools de la cinta de comandos, de clic en el botón Model Explorer, aparecerá una ventana con detalles del modelo, por defecto aparece información de las barras con los resultados de la simulación, compare los resultados obtenidos con los del libro.
- En la ventana de Model Explorer, en el lado izquierdo visualizará 10 carpetas que despliegan información adicional, seleccione Solution Details, escoja YBus, analice el resultado mostrado, verificando el unifilar mostrado en la página 326.

- Simule el Ejemplo 1-2, registre los valores de generación y de carga total, evalúe estos valores, analice los voltajes en cada barra, desconecte la carga de la barra 3, luego conéctela y varíe los MW.
- Analice el comportamiento del sistema, abriendo la línea 1-3, luego, cerrando la línea 1-3 y abriendo la línea 2-3, finalmente, abra las líneas 1-3 y 1-2.

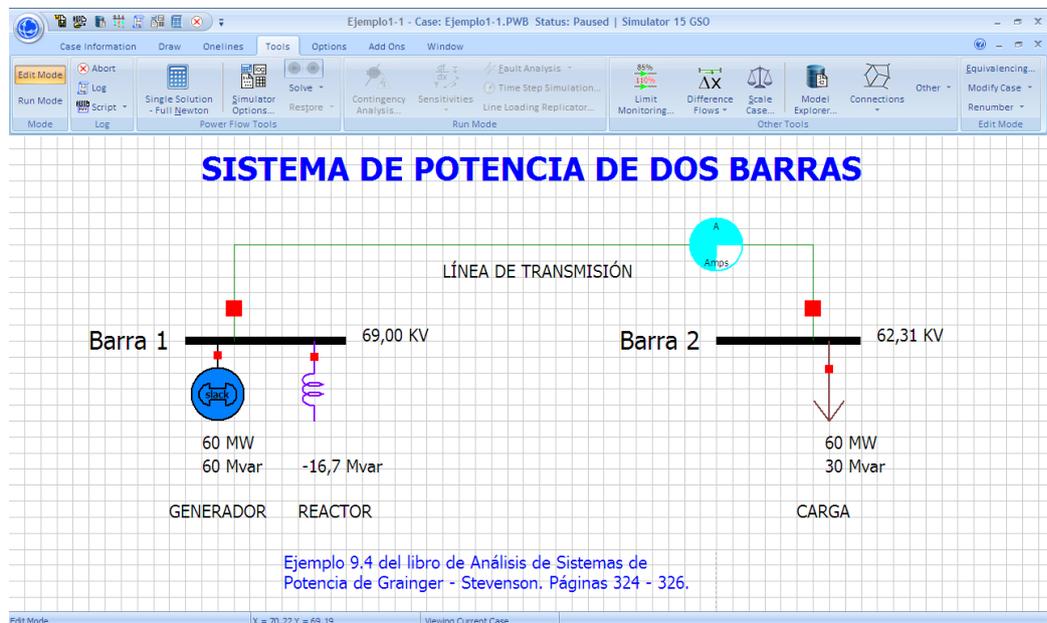
5. BIBLIOGRAFÍA:

- Análisis de Sistemas de Potencia, Grainger – Stevenson, páginas 324 – 326.
- Ayuda del simulador PowerWorld, tutoriales.

6. ANEXOS:

Figura 1.1

Sistema de Potencia Ejemplo 9.4 – libro Análisis de Sistemas de Potencia, Grainger – Stevenson, páginas 324 – 326.



Cuadro 1.1

Resultados de simulación para el Ejemplo 1.1.

Number	Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar	Switched Shunts Mvar
1	Barra 1	69	1	69	0			60	60,46	-16,67
2	Barra 2	69	0,90306	62,311	-9,56	60	30			

Figura 1.2

Sistema de Potencia de dos barras en modo de edición.

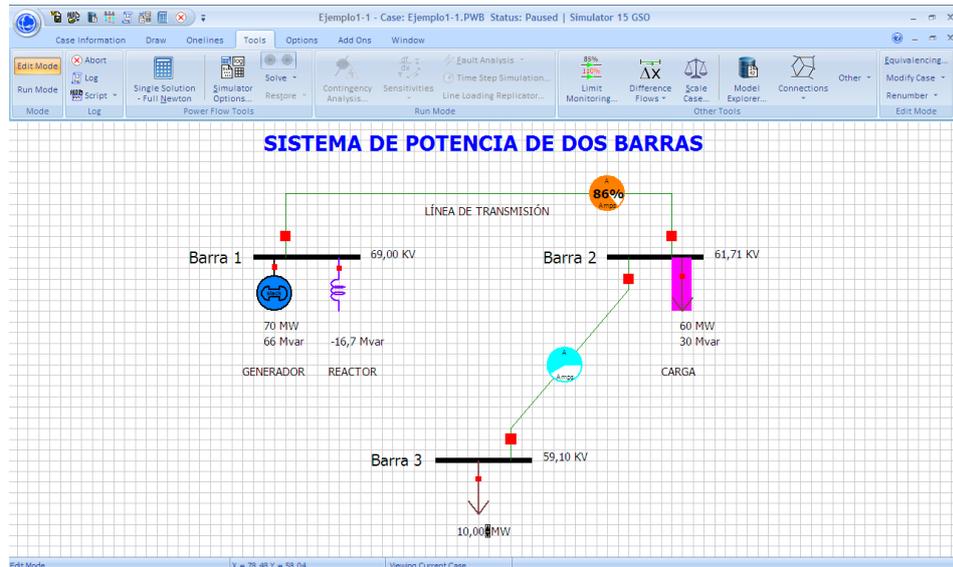
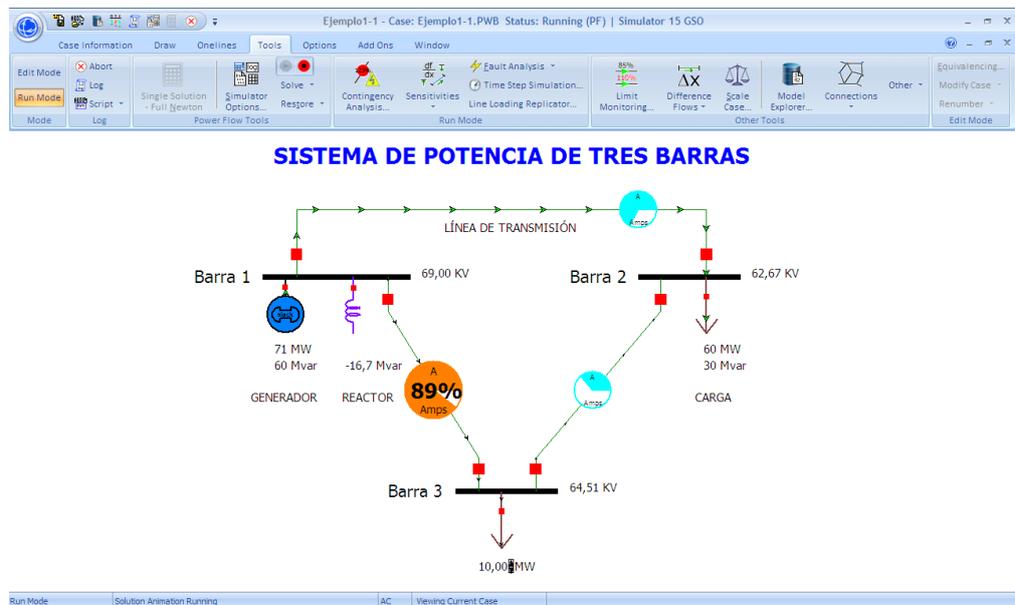


Figura 1.3

Sistema de Potencia de tres barras en modo de simulación.



PRÁCTICA NO. 2

1. TÓPICO:

Transformadores de Potencia con relación de espiras fuera del nominal (OFF-NOMINAL TURNS RATIOS).

Transformadores de Potencia regulantes de voltaje y de deslizamiento en el ángulo de fase (PHASE SHIFTING).

2. OBJETIVO:

- a) Establecer la red de secuencia positiva de los casos propuestos.
- b) Determinar las matrices de admitancias de barra.
- c) Usar el software PowerWorld para la simulación de los casos propuestos.

3. DESARROLLO:

Para el cálculo, se establece el siguiente enunciado: un generador trifásico acoplado a un transformador elevador, de potencia 134 MVA, 13,8 kV delta / 230 kV estrella a tierra, con impedancia equivalente de 0,149766 en por unidad; El bobinado de alto voltaje del transformador tiene taps +/- 10%. Las cantidades base del sistema son: potencia 100 MVA, en la barra del generador, voltaje línea-línea 13,8 kV y en la barra de la carga, voltaje línea-línea 230 kV. Determine el circuito equivalente en por unidad para las siguientes configuraciones de tap:

- a) Tap nominal.
- b) Tap a menos 10% (el voltaje en el bobinado de alto voltaje decrece un 10%).

Asuma operación de secuencia positiva balanceada, desprecie la resistencia de los bobinados del transformador, corriente de excitación y deslizamiento de ángulo de fase.

Ejecute el simulador PowerWorld y abra el Ejemplo 2-1; proceda a la simulación para una vista animada del transformador con LTC. Inicialmente el generador/transformador alimenta una carga de 115 MW y 20 MVAR; Como es típico en la práctica, los taps del transformador son ajustados en pasos discretos, cada paso cambia la relación de vueltas en 0.625% (un cambio de 10% requiere 16 pasos – Off-Nominal Tap Position). Dando clic en las flechas se ajusta manualmente el tap, nótese que directamente cambia el voltaje en la carga.

A causa de la variación en las caídas de voltaje debido a variaciones de la carga, los LTC son a menudo operados automáticamente para regular un voltaje de barra, esto particularmente se aplica con transformadores reductores; Para una simulación en modo automático cliquee en "Manual", ahora varíe los MVAR de la carga, nótese que el LTC cambia para mantener el voltaje de la carga dentro de la banda muerta especificada (0.995 y 1.005 en por unidad).

Hasta aquí se ha simulado la unidad generadora número 6 de Paute correspondiente a la fase C, generador, transformador y carga (con valores referenciales de MW y MVAR).

Para la segunda parte, se considera el siguiente enunciado: dos barras Totoras y Santa Rosa están conectadas por dos líneas paralelas L1 y L2 con reactancias serie de secuencia positiva 0,1 por unidad, cada una; Asuma que un transformador regulante está conectado en serie con cada línea en la barra Santa Rosa; Determine la matriz de admitancia de barra cuando el transformador regulante:

- a) se mantiene en tap nominal y ángulo de fase de cero grados.
- b) provee un incremento en 0.05 por unidad en la magnitud de voltaje hacia la barra Santa Rosa, se mantiene un ángulo de fase de cero grados.

- c) desplaza 3 grados en la fase hacia la barra Santa Rosa, y se mantiene en tap nominal.

Asuma que el transformador regulante es ideal; también, la resistencia serie y la admitancia de derivación de las líneas son despreciadas.

Ejecute el simulador PowerWorld y abra el Ejemplo 2-2; proceda a la simulación para una vista animada del caso propuesto, notará que variando el tap varía el flujo de potencia reactiva y cambiando el ángulo de fase principalmente cambia el flujo de potencia activa.

Los programas tradicionales de flujos de potencia, normalmente indican la dirección del flujo de potencia usando la convención que el flujo que ingresa a una línea de transmisión o transformador se asume como positivo. En PowerWorld esto puede verificarse ejecutando la siguiente secuencia: Onelines – Oneline Display Options – Display Options – desactive Use Absolute Values For MW Line Flow.

Note que un transformador regulante de magnitud de voltaje controla el flujo de potencia reactiva en el punto serie en el cual está instalado; mientras que, un transformador regulante de ángulo de fase controla el flujo de potencia activa.

4. INFORME:

- Presente los cálculos pertinentes y sus resultados, compárelos con los resultados del simulador.
- Consulte información adicional sobre modelos de transformadores de potencia en flujos de potencia.

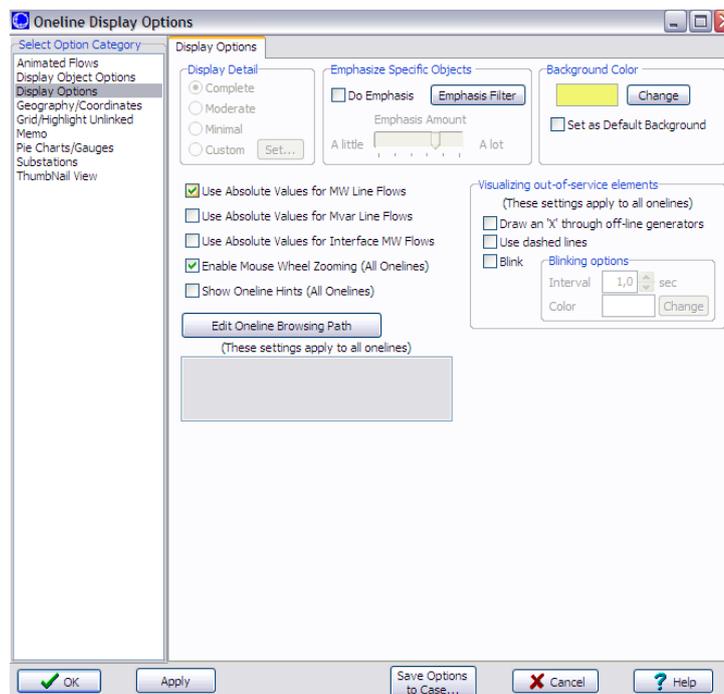
5. BIBLIOGRAFÍA:

- Análisis de Sistemas de Potencia, Grainger – Stevenson, páginas 70 – 75.
- Ayuda del simulador PowerWorld, tutoriales.

6. ANEXOS:

Figura 2.1

Visualización de flujos de potencia de acuerdo a la convención por el sentido del flujo.



PRÁCTICA NO. 3

1. TÓPICO:

Transformadores de Potencia de tres devanados.

2. OBJETIVO:

- a) Modelar transformadores de tres devanados.
- b) Determinar circuitos equivalentes mediante transformadores de dos devanados.
- c) Usar el software PowerWorld para la simulación del caso propuesto.

3. DESARROLLO:

El punto de partida es el diagrama unifilar del Sistema Nacional de Transmisión (SNT), correspondiente a la subestación Santa Rosa, bahía de 230 – 138 kV, Figura 3.1 (Fuente: Celec EP Transelectric); Analice los datos provistos en los Cuadros 3.1 a 3.3, información de autotransformadores, equipos de compensación de reactivos y carga equivalente conectada a la barra de 138 kV se considera en período de punta (Fuente: CENACE).

Ejecute PowerWorld, abra el Ejemplo 3-1, inicie la simulación, analice cómo se comporta el sistema al desconectar y conectar los reactores y capacitores, modifique el voltaje entregado por el generador equivalente, varíe la carga.

Nótese que a este ejemplo se insertó un GIS, es decir un Shape File del Ecuador, el unifilar mostrado se encuentra georeferenciado

En la versión 15 de PowerWorld no existe la implementación directa de un transformador de tres devanados, se lo debe ejecutar de la siguiente forma:

- a) En modo Edit, Inserte tres barras donde se asignarán los terminales de los devanados primario, secundario y terciario.
- b) En la pestaña Case Information, despliegue la opción Network y escoja Three-Winding Transformers, aparecerá la ventana Model Explorer: Three-Winding Transformers.
- c) En esta ventana, en la opción Records seleccione Insert, aparecerá otra ventana Three Winding Transformer Information, aquí deberá ingresar el número de barra a la cual estarán conectados el primario, el secundario y el terciario, en el Star Bus (Internal Node) no ingrese ningún valor, se ajusta por defecto; ingrese el voltaje para cada uno de los devanados (en kV), seguido registre el valor de las impedancias por devanado y los parámetros del transformador; Para completar el modelo en PowerWorld debe dar clic sobre el botón Set Two-Winding Equivalent Transformers, aparecerá la ventana Inserting Three Winding Transformer.
- d) En la ventana Inserting Three Winding Transformer, registre la potencia, el límite de tap, límite de voltaje, tipo de control y barra regulada, seleccione OK; con lo cual retorna a la ventana anterior, pero, aparecen tres registros que corresponden a los equivalentes matemáticos de transformadores de dos devanados, sitúe el clic sobre alguno de ellos y de clic derecho, seleccione Show Dialog, esto mostrará una ventana ya conocida cuando se inserta una línea de transmisión o transformador de dos devanados, puede analizar estos datos. Seleccione OK en la ventana Three Winding Transformer Information.
- e) Cierre la ventana Model Explorer.
- f) En la pestaña Draw, opción Network, seleccione Three Winding Transformer, de clic sobre alguna de las barras que insertó (de preferencia que sea la del primario); aparece la ventana Three Winding

Transformer, haga clic en Find, aparece la ventana Choose a 3W Transformer, haga clic sobre el renglón amarillo y seleccione OK.

- g) De regreso en la ventana Three Winding Transformer, pero con datos de los devanados, ahora puede modificar el tamaño, la orientación de los devanados considerando como se ubicó las barras en el caso, adicionalmente puede cambiar los colores de visualización de los devanados, seguido seleccione OK.
- h) El objeto insertado puede modificarse y reubicarse para que coincida con las barras asignadas a los devanados, sí se pregunta por qué no hay conexión física directamente con las barras, se debe a que es un modelo matemático como lo simula PowerWorld.

4. INFORME:

- Presente los cálculos pertinentes y sus resultados, de los transformadores equivalentes de dos devanados; referencia Figura 3.2b;
- Presente la matriz de admitancia de barra al estar conectados y desconectados los reactores y capacitores.
- Al ajustar el voltaje en la barra de 230 kV a 1.025 en por unidad, como varían los voltajes en las barras de 138 kV y 13.8 kV considere que estas últimas deben mantener este voltaje; que sucede al desconectar los reactores y capacitores. (Nota, Transelectric considera fuera de rango: voltajes superiores al 7% 230 kV, 5% 138 kV, 3% 69-46-34.5 kV; voltajes inferiores al 5% 230 kV, 7% 138 kV, 3% 69-46-34.5% del límite operativo)
- Al ajustar el voltaje en la barra de 230 kV a 0.986 en por unidad, como varían los voltajes en las barras de 138 kV y 13.8 kV considere que estas últimas deben mantener este voltaje; que sucede al desconectar los reactores y capacitores.
- Consulte sobre la funcionalidad de los terciarios y como afectan en el flujo de potencia.

5. BIBLIOGRAFÍA:

- Análisis de Sistemas de Potencia, Grainger – Stevenson, páginas 67 – 70.
- Ayuda del simulador PowerWorld, tutoriales.
- Advanced Transformer Control Modeling in an Optimal Power Flow Using Newton's Method; E. Acha, Hugo Ambriz-Pérez, and C. R. Fuerte-Esquivel. Puede adquirirlo en IEEE Explorer.

6. ANEXOS:

Cuadro 3.1

Datos de autotransformadores de la subestación Santa Rosa 230 -138 kV.

Nombre	Pot.Nom. HV	Pot.Nom. MV	Pot.Nom. LV	Volt.Nom HV	Volt.Nom MV	Volt.Nom LV	Grp.Vec HV	Grp.Vec MV	Grp.Vec LV
	MVA	MVA	MVA	kV	kV	kV			
ATT SANTA ROSA	375	375	125,1	230	138	13,8	YN	YN	D
ATU SANTA ROSA	375	375	100	230	138	13,8	YN	YN	D

Nombre	Vcc HV-MV	Vcc MV-LV	Vcc LV-HV	HV-MV Re(uk)	MV-LV Re(uk)	LV-HV Re(uk)
	%	%	%	%	%	%
ATT SANTA ROSA	7,15	10,18	12,9	0,03880534	0,1894644	0,1873941
ATU SANTA ROSA	7,39	10,13	12,93	0,05365333	0,1183	0,1166

Cuadro 3.2

Datos de equipos de compensación de reactivos, subestación Santa Rosa 230 – 138 kV.

Name	Terminal Busbar	Nom.Volt. kV	Max.Step	Qmax Mvar
X_L_ROS	SRosa 13.8_ATU	13,8	2	20
X_C_ROS	SRosa 138	138	3	81

Cuadro 3.3

Datos de carga equivalente conectada a la barra de 138 kV de la subestación Santa Rosa.

Figura 3.2

Modelamiento de un transformador de tres devanados.

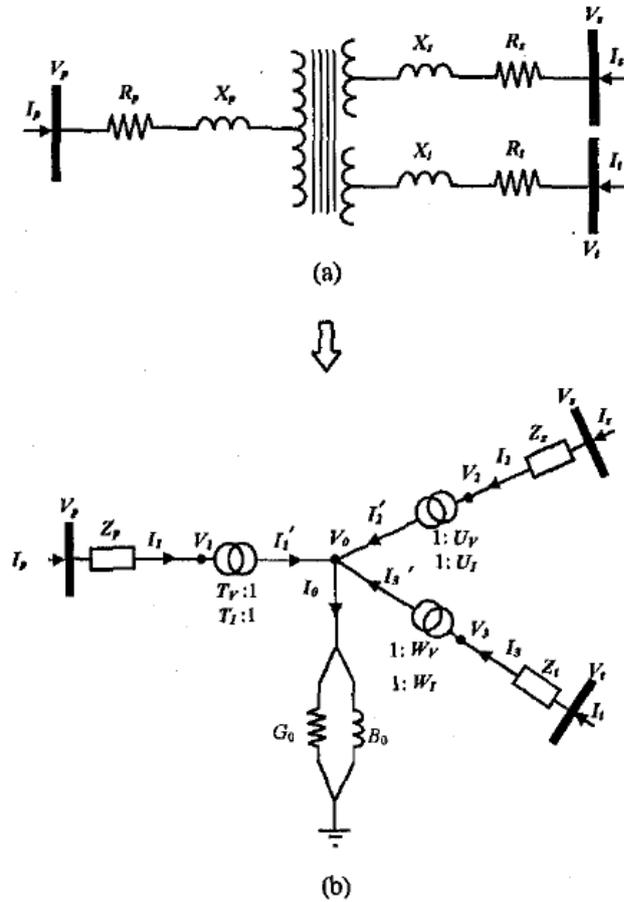


Fig. 1 Schematic representation and equivalent circuit of a three-winding transformer.

Figura 3.3

Insertando un transformador de tres devanados.

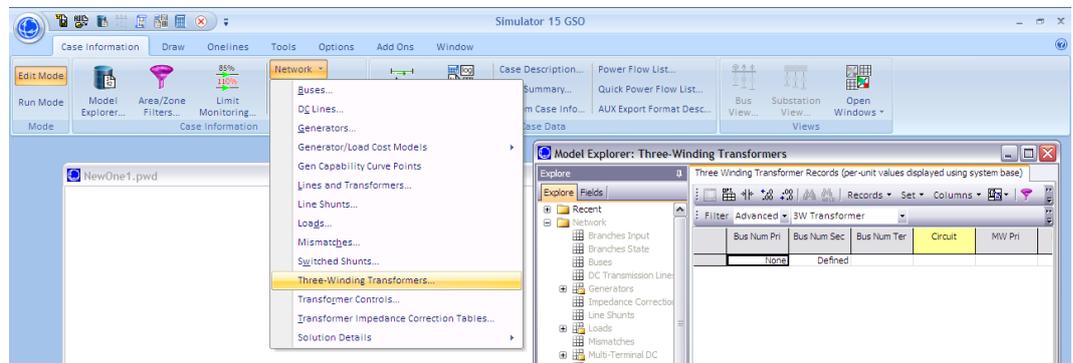


Figura 3.4

Ventana del Model Explorer.

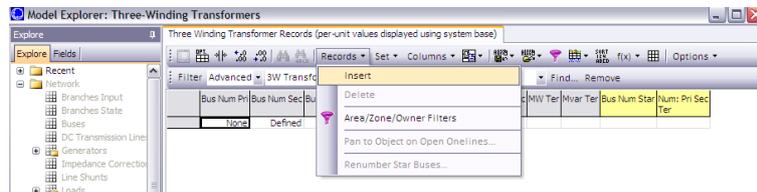


Figura 3.5

Ventanas de información e inserción de un transformador de tres devanados.

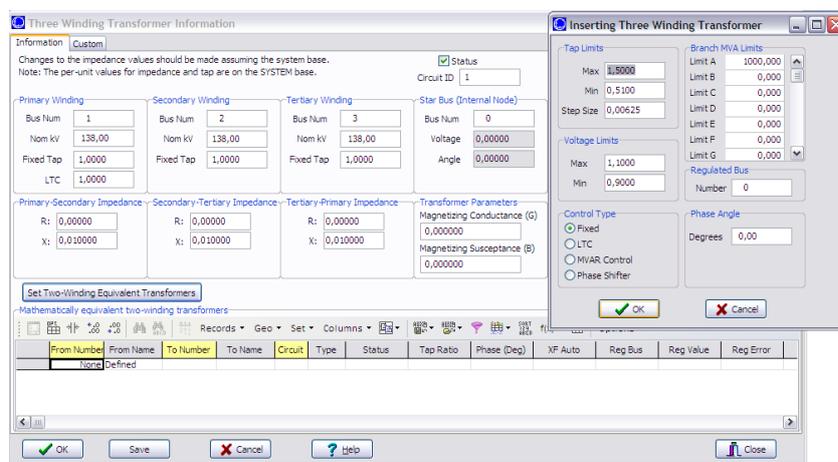
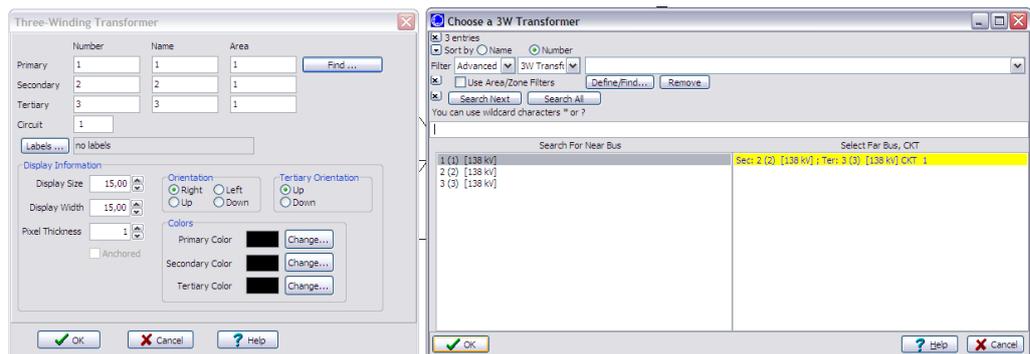


Figura 3.6

Ventana de selección de modelo existente de transformador de tres devanados.



PRÁCTICA NO. 4

1. TÓPICO:

Operación de Líneas de Transmisión en Estado Estable.

2. OBJETIVO:

- a) Modelar una línea de transmisión de longitud larga.
- b) Determinar el SIL, considerando una línea sin pérdidas resistivas.
- c) Determinar el límite teórico de estabilidad de estado estable de una línea de transmisión.
- d) Determinar el número de líneas de transmisión necesarias para transferir potencia considerando el nivel de voltaje de transmisión.
- e) Analizar el efecto de establecer subestaciones intermedias sobre un número requerido de líneas de transmisión para transferir potencia.
- f) Analizar la compensación serie capacitiva para incrementar la cargabilidad de la línea de transmisión.

3. DESARROLLO:

El punto de partida es el Sistema Nacional de Transmisión (SNT), a 500 kV, contemplado en el Plan de Expansión de Transmisión (Fuente: Celec EP Transelectric); la Línea de Transmisión aérea Pifo (Quito) – Yaguachi (Guayaquil) a 500 kV, 300 km, un circuito, 60 Hz, conductor Aluminum Conductor Alloy Reinforced ACAR 4x750 kcmil, 30/7, radio de 2,532 cm, GMR de 0,972 cm, resistencia DC de 0,0796 ohmios/km, en haz por fase, con 45,7 cm entre conductores dentro del haz (Bundle Spacing). La línea tiene disposición horizontal con 12 m entre fases adyacentes y 23 m de altura media del suelo como se muestra en la figura 4.1; La línea tiene dos cables de tierra Aluminum-Clad Steel conductor (Alumoweld) 7, No. 8, radio de 0,489 cm, GMR de 0,0636 cm, resistencia DC de 1,52

ohmios/km, localizados a 9 m por encima y 9 m en la horizontal en referencia a la fase central. La resistividad del suelo es 100 ohmios metro y el ancho de la franja de servidumbre de 100 m.

En la primera parte se considera:

$$z = 0,024 + 0,328j \frac{\Omega}{\text{km}}$$
$$y = 0 + 0,000003218j \frac{\text{S}}{\text{km}}$$

Valores obtenidos al modelar de acuerdo a la geometría de la torre y la disposición de los conductores (Figura 4.1). Posterior al cálculo de los parámetros exactos ABCD y del circuito π equivalente para líneas largas se determina:

$$Z_{pu} = 0,00279 + 0,038743j$$

$$Y_{pu} = 0,001428 + 2,43279j$$

$$SIL = 783,01 \text{ MW}$$

$$P_{max} = 2124,33 \text{ MW}$$

Para la simulación en PowerWorld, se desprecia las pérdidas resistivas de la línea, se considera una impedancia característica de 319,25 ohmios, una longitud de onda de 5000 km, y que el voltaje en ambas barras sea de 500 kV. Abra el Ejemplo 4-1, y ejecute en modo simulación; cuando la carga en una línea es igual al SIL, el perfil de voltaje a través de la línea es plano y las pérdidas de potencia reactiva de la línea son cero; para cargas mayores al SIL, la línea consume potencia reactiva y la magnitud de voltaje en la carga es inferior al valor del terminal emisor o fuente; Opuestamente, para cargas por debajo del SIL, la línea genera potencia reactiva y la magnitud de voltaje en la carga es mayor al valor del terminal emisor o fuente (Cuadro 4.2); Use las flechas en la carga para variar este valor y observar los cambios en el voltaje del terminal de carga y el

consumo de potencia reactiva en la línea. La potencia y voltaje base del sistema son 100 MVA y 500 kV, respectivamente.

En una segunda parte, con los datos de la línea de transmisión Molino – Totoras – Santa Rosa – Santo Domingo a 230 Kv se emula una línea de una longitud única de 400 km, para fines didácticos se asume una carga equivalente conectada a la barra de Santo Domingo, la generación de Pauta de aproximadamente 1100 MW deben ser transmitidos hacia la carga, para el conductor ACSR BLUEJAY, 1113 kcmil, 442 MVA¹⁹, impedancia característica de 379.48 ohmios, un $\delta = 35^\circ$, reactancia de 0,490707j ohm/km, susceptancia de 3,407618 $\mu\text{S}/\text{km}$ y despreciando las pérdidas, basado en el criterio de cargabilidad práctica de la línea se determinó:

$$\mathbf{SIL = 139,4 MW}$$

$$\mathbf{P = 157,67 \frac{MW}{Línea}}$$

$$\mathbf{Número de líneas a 230 kV = 6,98 + 1 \approx 8 líneas}$$

Abra el Ejemplo 4-2, en modo simulación notará que para transmitir los 1100 MW hacia la carga se requieren ocho líneas de transmisión de similares características técnicas, además sujetas a que el voltaje en la carga no sea inferior a 0,95 en por unidad y no se tenga una diferencia angular mayor a 35 grados, si se desconecta una de las líneas ya no se cumplen las mencionadas condiciones, puede variar la carga para observar el comportamiento de las líneas de transmisión.

Complementariamente a lo que precede, ahora se dividen en tres partes a las ocho líneas, los segmentos son iguales en longitud y aspectos técnicos; la intención de hacerlo es para que se note el efecto de incluir

¹⁹ Capacidad máxima por circuito por el lapso de 20 minutos, bajo emergencia, Fuente: Transelectric.

subestaciones intermedias sobre el número de líneas requeridas para transferir potencia, por tanto, se determinó:

Longitud de segmentos = 133,33 km

Reactancia serie por línea = 182,82 ohmios.

Reactancia equivalente total = 25,03 ohmios

Con la reactancia equivalente de las reactancias serie y paralelo, se determina la potencia que se sujeta a las condiciones establecidas para el Ejemplo 4-2; nótese que aumenta la capacidad de transferencia de potencia.

$$\mathbf{P = 1151,71 MW}$$

Abra el Ejemplo 4-3, ejecute la simulación, al desconectar dos segmentos de línea cualesquiera, visualizará que se transfieren los 1100 MW con el voltaje en la carga mayor a 0,95 en por unidad y una diferencia angular menos a 35 grados, ahora puede combinar pares de segmentos desconectados y verificar los cambios en el voltaje y en el ángulo en las barras del sistema modelado, analice las variaciones.

En una cuarta parte, se abarca una forma de incrementar la cargabilidad de la línea de transmisión mediante la compensación serie capacitiva, para lo cual se instalan capacitores serie idénticos en cada fase en ambos terminales de la línea del Ejemplo 4-1, obteniéndose un 30% de compensación, y se determina la potencia máxima teórica que esta línea compensada puede entregar, esto permitirá comparar con la calculada para la línea no compensada del ejemplo citado.

La reactancia serie sin compensación es:

$$\mathbf{X' = 97,1084 * \sin(85,8818) = 96,8577 \text{ ohmios}}$$

Con el objetivo de 30% de compensación serie, es decir la mitad a cada extremo de la línea, la impedancia de cada capacitor serie es:

$$\begin{aligned} Z_{\text{capacitor}} &= -jX_{\text{capacitor}} = -j\frac{1}{2} * 0,3 * 96,8577 \\ &= -j14,5287 \text{ ohmios} \end{aligned}$$

Que en por unidad es: $X_{\text{pu}} = -\frac{j14,5287}{2500} = -j0,00581148$, valor que se modela en PowerWorld y matricialmente en términos de constantes ABCD:

$$\begin{bmatrix} 1 & -j14,5287 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Del sistema de potencia del Ejemplo 4-1, las constantes ABCD de la línea son:

$$\begin{bmatrix} 0,952881\angle 0,20569 & 97,1084\angle 85,8818 \\ 0,00095\angle 90,0667 & 0,952881\angle 0,20569 \end{bmatrix}$$

La matriz ABCD equivalente se obtiene multiplicando las tres matrices ABCD de: capacitor serie en la barra PIFO, la línea y el capacitor serie en la barra YAGUACHI, el resultado es la matriz ABCD de la línea compensada:

$$\begin{bmatrix} 1 & -j14,5287 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0,952881\angle 0,20569 & 97,1084\angle 85,8818 \\ 0,00095\angle 90,0667 & 0,952881\angle 0,20569 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -j14,5287 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 0,966683\angle 0,203706 & 69,3308\angle 84,1443 \\ 0,00095\angle 90,0667 & 0,966683\angle 0,203706 \end{bmatrix}$$

Considerando que el voltaje en ambos terminales emisor – receptor se mantiene en 1 por unidad, la potencia máxima teórica que esta línea compensada pueda entregar es:

$$P_{\text{max}} = \frac{500^2}{69,3308} - \frac{0,966683 * 500^2}{69,3308} \cos(84,1443 - 0,2037) = 3237,95 \text{ MW}$$

Comparada con la obtenida en el Ejemplo 4-1:

$$P_{\max} = 2124,33 \text{ MW}$$

Por tanto, la línea compensada incrementa su capacidad teórica en un 52%.

Abra el Ejemplo 4-4, en modo simulación, notará que se encuentran conectados a ambos extremos de la línea los capacitores serie, puede desconectarlos haciendo clic sobre el texto In Service, esto cambia el estado a Bypassed, estado que es modelado como un corto circuito; el estado de conectados los capacitores disminuye el ángulo a través de la línea, resultando en más potencia a transferir, esto puede visualizarlo al disminuir o aumentar la carga.

4. INFORME:

- Presente los cálculos pertinentes y sus resultados, del Ejemplo 4-1.
- Varíe en +/- 10 pasos los MW conectados y grafique el perfil de voltaje obtenido en la barra de la carga.
- Como parte complementaria, utilice los siguientes datos:

$$z = 0,024 + 0,328j \frac{\Omega}{\text{km}}$$

$$y = 0 + 0,000005149j \frac{\text{S}}{\text{km}}$$

Ejecute el cálculo descrito en el numeral 3, hasta obtener los valores en por unidad, el SIL y la potencia máxima, con esos datos simule el unifilar, parecido al Ejemplo 4-1; se recomienda analizar el documento de descripción del sistema de 500 kV de CELEC EP Transelectric. Obtenga el perfil de voltaje de similar manera al Ejemplo 4-1.

- Como referencia el Ejemplo 4-2, obtenga el número de líneas requeridas para transferir la misma potencia a un nivel de voltaje de 500 kV, empleando el mismo tipo de conductor.
- Como referencia el Ejemplo 4-3, determine si con $[(\text{número de líneas a } 500 \text{ kV}) - 1]$ es posible transferir los 1100 MW hacia la carga, además indique cuantos segmentos de línea pueden ser desconectados.
- De acuerdo a su criterio explique ¿cómo afecta la diferencia angular y la magnitud de voltaje en la estabilidad de un sistema de potencia?
- Como referencia el Ejemplo 4-4, aumente la carga hasta que el voltaje en la barra YAGUACHI sea mayor o igual a 0,95 en por unidad, analice este resultado comparándolo con los obtenidos del Ejemplo 4-1.
- Ahora disminuya la carga hasta que el voltaje en la barra PIFO sea menor o igual a 1,05 en por unidad, analice este resultado con el obtenido en el Ejemplo 4-1.
- Obtenga los voltajes y las potencias transferidas al tener conectado el capacitor al lado de la fuente y desconectado el capacitor al lado de la carga, luego invierta esta condición, desconectando el capacitor al lado de la fuente y conectando el capacitor al lado de la carga, considere que el voltaje en la barra YAGUACHI esté dentro del rango 0,95 – 1,05 en por unidad; presente una gráfica con los valores obtenidos voltaje versus potencia transferida.
- Determine el circuito equivalente de esta línea de transmisión compensada.
- Explique la razón por la que varía la diferencia angular.
- Investigue sobre otros métodos de compensación reactiva e incremento de capacidad de transferencia de potencia en líneas de transmisión.

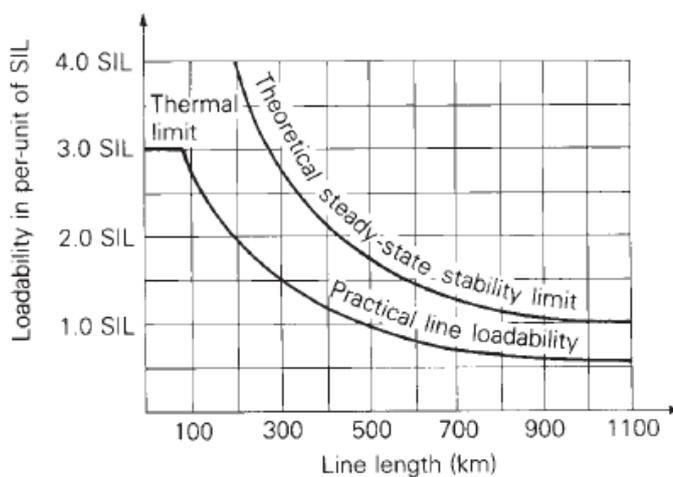
5. BIBLIOGRAFÍA:

- Análisis de Sistemas de Potencia, Grainger – Stevenson.
- Ayuda del simulador PowerWorld, tutoriales.

6. ANEXOS:

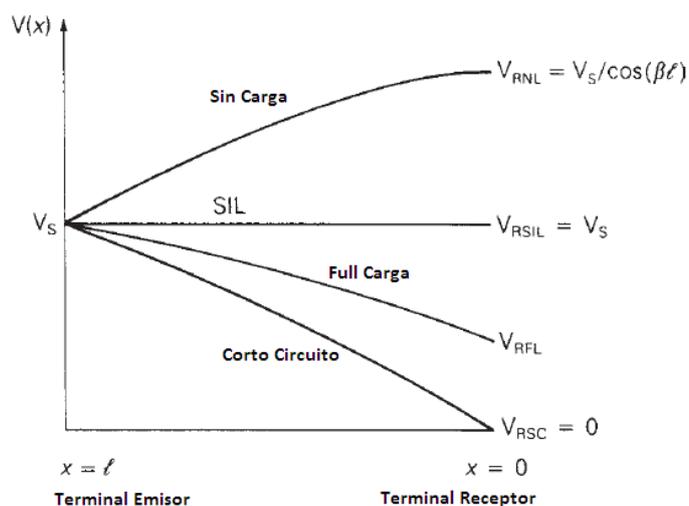
Cuadro 4.1

Curva de cargabilidad de una línea de transmisión, para líneas aéreas, 60 Hz, sin compensación serie o derivación.



Cuadro 4.2

Perfiles de voltaje para una línea sin pérdidas y sin compensación serie o derivación.



Cuadro 4.3

Valores obtenidos mediante el simulador Power Factory usando la geometría de la torre.

```
DigSI/info - Matriz de las impedancias naturales (R+jX) [ohm/km]
1.580 1.068 0.055 0.296 0.055 0.343 0.055 0.321 0.055 0.277
0.055 0.296 1.580 1.068 0.055 0.277 0.055 0.321 0.055 0.343
0.055 0.343 0.055 0.277 0.080 0.635 0.056 0.325 0.056 0.273
0.055 0.321 0.055 0.321 0.056 0.325 0.080 0.635 0.056 0.325
0.055 0.277 0.055 0.343 0.056 0.273 0.056 0.325 0.080 0.635

DigSI/info - Matriz reducida de impedancias (R+jX) [ohm/km]
0.128 0.554 0.105 0.242 0.101 0.192
0.105 0.242 0.131 0.549 0.105 0.242
0.101 0.192 0.105 0.242 0.128 0.554

DigSI/info - Matriz de impedancias simétricas (R+jX) [ohm/km]
0.336 1.003 0.012 -0.009 -0.014 -0.006
-0.014 -0.006 0.026 0.327 -0.029 0.018
0.012 -0.009 0.030 0.016 0.026 0.327

DigSI/info - Matriz reducida de admitancias (G+jB) [uS/km]
0.000 4.515 0.000 -0.885 0.000 -0.255
0.000 -0.885 0.000 4.697 0.000 -0.885
0.000 -0.255 0.000 -0.885 0.000 4.515

DigSI/info - Matriz de admitancias simétricas
0.000 3.226 -0.129 0.075 0.129 0.075
0.129 0.075 0.000 5.251 0.416 -0.240
-0.129 0.075 -0.416 -0.240 -0.000 5.251
```

```
DigSI/info - Matriz de las impedancias naturales (R+jX) [ohm/km]
1.580 1.068 0.055 0.296 0.055 0.343 0.055 0.321 0.055 0.277
0.055 0.296 1.580 1.068 0.055 0.277 0.055 0.321 0.055 0.343
0.055 0.343 0.055 0.277 0.080 0.635 0.056 0.325 0.056 0.273
0.055 0.321 0.055 0.321 0.056 0.325 0.080 0.635 0.056 0.325
0.055 0.277 0.055 0.343 0.056 0.273 0.056 0.325 0.080 0.635

DigSI/info - Matriz reducida de impedancias (R+jX) [ohm/km]
0.128 0.553 0.104 0.225 0.104 0.225
0.104 0.225 0.128 0.553 0.104 0.225
0.104 0.225 0.104 0.225 0.128 0.553

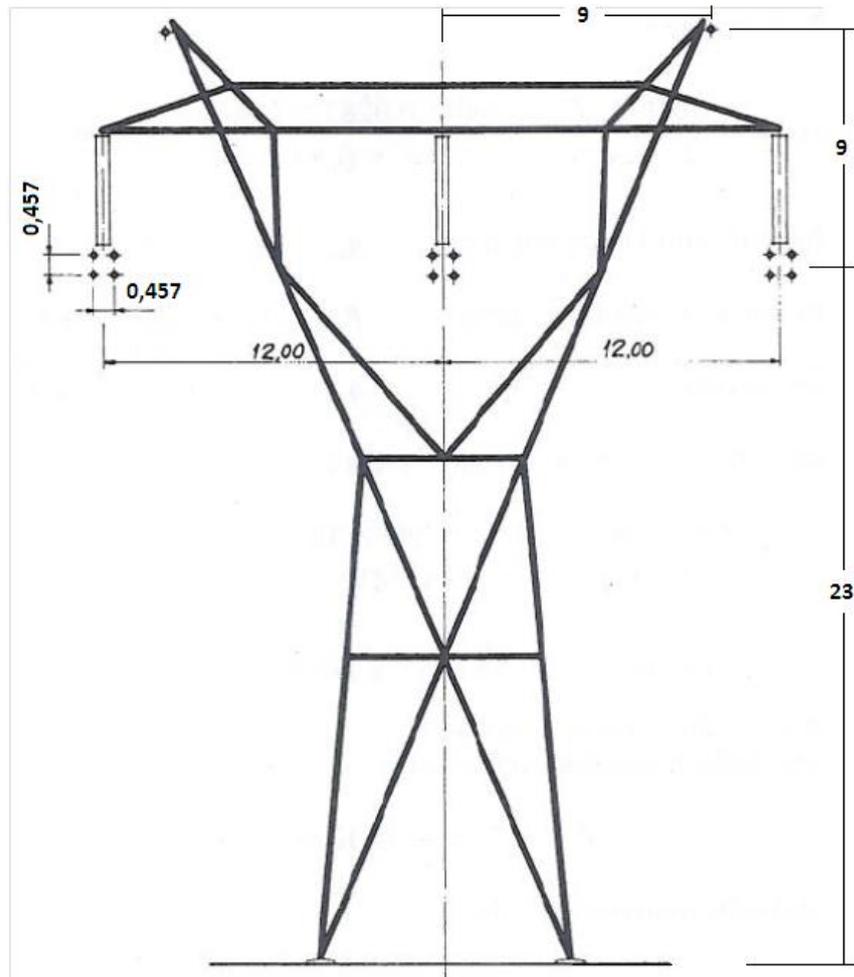
DigSI/info - Matriz de impedancias simétricas (R+jX) [ohm/km]
0.336 1.003 0.000 0.000 0.000 0.000
0.000 0.000 0.024 0.328 0.000 0.000
0.000 -0.000 0.000 0.000 0.024 0.328

DigSI/info - Matriz reducida de admitancias (G+jB) [uS/km]
0.000 4.505 0.000 -0.643 0.000 -0.643
0.000 -0.643 0.000 4.505 0.000 -0.643
0.000 -0.643 0.000 -0.643 0.000 4.505

DigSI/info - Matriz de admitancias simétricas
0.000 3.218 0.000 0.000 0.000 0.000
0.000 0.000 0.000 5.149 0.000 0.000
0.000 0.000 0.000 0.000 -0.000 5.149
```

Figura 4.1

Geometría de la estructura.



de cuatro barras, dos generadores, cuatro cargas y cuatro líneas de transmisión, los datos de líneas de transmisión, barras, cargas y generadores se encuentran en los Cuadros 5.1 y 5.2.

Este sistema de potencia es modelado en PowerWorld, Ejemplo 5-1. Para visualizar los datos de entrada, haga clic en el botón Edit Mode (el modo edición se usa para modificar los parámetros del sistema); seguido seleccione la pestaña Case Information, podrá observar de forma tabular que se muestran varios parámetros del sistema, por ejemplo, use Network y Buses para visualizar los parámetros de cada barra; Network y Lines and Transformers para visualizar los parámetros para líneas de transmisión y transformadores. Los campos que se muestran en color azul pueden ser directamente cambiados, basta con escribir sobre ellos, y aquellos que se muestran en color verde pueden ser cambiados de opción dando clic sobre ellos. Nótese que los valores mostrados en estas pantallas coinciden con los valores de los cuadros 5.1 y 5.2 que se encuentran en los anexos.

Los elementos de la Y de barra puede ser visualizada al seleccionar Solution Details, Ybus. Como la Y de barra se obtiene de otros parámetros del sistema, estos no pueden ser cambiados directamente; notará que hay varios campos en blanco, esto indica que no hay conexión de línea directamente a esas dos barras (un campo en blanco equivale a cero). Para redes más grandes la mayoría de los elementos de la Y de barra son cero, debido a que cualquier barra únicamente tiene pocas líneas incidentes de ahí parte un término importante de matrices esparcidas. Los elementos de la Y de barra pueden guardarse en un formato compatible con Matlab, dando clic derecho dentro de la matriz de la Y de barra, con esto aparece un menú local, seleccione Save Ybus in Matlab Format.

Para finalizar esta primera parte, notará que no se muestran flujos en el unifilar, esto se debe a que las ecuaciones no lineales del flujos de potencia

todavía no han sido resueltos, en las siguientes partes se cubre la solución de estas ecuaciones.

Para el sistema de potencia del Ejemplo 5-1, se usará el método de Gauss-Seidel para calcular el valor de V_2 para la primera iteración suponiendo que los cálculos iterativos comienzan en la barra 2, para esto, use los datos de entrada y los valores de admitancia de barra obtenidos previamente.

$$\begin{aligned} V_2(1) &= \frac{1}{Y_{22}} \left\{ \frac{P_2 - jQ_2}{V_2^*(0)} - [Y_{21}V_1(1) + Y_{23}V_3(0) + Y_{24}V_4(0)] \right\} \\ &= \mathbf{0.984095 \angle -1.88185} \end{aligned}$$

Este valor, es el calculado en la página 319 del libro bajo estudio, el siguiente valor es el mostrado por el simulador al ejecutar una sola iteración:

$$V_2(1) = \mathbf{0.982547 \angle -1.8557}$$

De forma similar se calcula para las barras 3 y 4 para completar la primera iteración.

Para ver la convergencia completa de este caso, ejecute el simulador y abra el Ejemplo 5-2; por defecto PowerWorld usa el método de Newton Raphson, sin embargo, el caso puede ser resuelto por el método de Gauss Seidel seleccionando Tools, Solve, Gauss-Seidel Power Flow. Para evitar que las iteraciones caigan en un lazo infinito si un caso no converge, PowerWorld permite indicar un límite sobre el máximo número de iteraciones. Usualmente para el procedimiento de Gauss Seidel este número es bastante alto, quizá igual a 100 iteraciones. Sin embargo, en este ejemplo para demostrar la característica de convergencia del método de Gauss Seidel se ha ajustado a una sola iteración, permitiendo que los

voltajes sean vistos después de cada iteración, para llegar a la solución una iteración a la vez, seleccione repetidamente Tools, Solve, Gauss-Seidel Power Flow.

Un criterio de parada común para Gauss Seidel es usar una diferencia escalada en el voltaje de una iteración a la siguiente; cuando esta diferencia es inferior a una tolerancia (ϵ) de convergencia especificada para cada barra, el problema se considera resuelto. Una alternativa implementada en PowerWorld es examinar el mismatch (error) en las ecuaciones de potencia activa y reactiva, el simulador continua iterando hasta que todos los errores en las barras están por debajo de cierto MVA o kVA de tolerancia. Cuando la solución se alcanza a través de un paso a la vez, los mismatches de las barras pueden ser vistos después de cada iteración en Case Information, pantalla Mismatches. La tolerancia de mismatch para la solución puede cambiarse en la ventana de Power Flow Solution del Options Dialog del simulador (seleccione Tools, Simulator Options, luego seleccione la categoría Power Flow Solution para ver este dialogo), el número máximo de iteraciones puede ser cambiado desde esta pantalla. Una tolerancia típica de convergencia es alrededor de 0,5 MVA.

El procedimiento para la simulación de iteración a iteración es la siguiente:

- Abrir el Ejemplo 5-2, seleccione Run Mode.
- Seleccione la pestaña Tools, Model Explorer al abrirse esta pantalla visualizará Bus Records, ponga atención a la fila de la barra 2.
- Seleccione Simulator Options, Power Flow Solution, Common Options y modifique el campo de Maximun Number of Iterations a 1 y seleccione Do Only One Iteration, de clic sobre Ok.
- Notará que los valores de la ventana Bus Records varió.

- Seleccione la pestaña Solve, Reset To Flat Start, esto hace que los valores de condiciones iniciales vuelvan a un estado antes de la simulación, primera iteración.
- Nuevamente seleccione la pestaña Solve, Gauss-Seidel Power Flow, al ejecutar esto se calcula la primera iteración en todas las barras, Figura 5.1, ahora puede comparar la magnitud y ángulo de fase del voltaje en la barra 2, entre lo simulado y calculado.
- Repita el paso anterior, aproximadamente en unas 11 iteraciones converge la solución.

Para la tercera parte, se determinará la dimensión de la matriz jacobiana para el sistema de potencia del Ejemplo 9.2 de Grainger-Stevenson, se asume un inicio plano excepto con las barras de voltaje controlado.

Como N es igual a 4 barras, entonces se constituyen $2(N - 1) = 6$ ecuaciones, con lo cual la matriz jacobiana tiene una dimensión de 6×6 . Sin embargo, hay una barra de voltaje controlado, barra 4. Por lo tanto, V_4 y la ecuación para $Q_4(x)$ podría ser eliminada, reduciendo el jacobiano a una matriz 5×5 .

Para ver la convergencia completa de este caso, ejecute el simulador PowerWorld, Ejemplo 5-3; seleccione Case Information, Network, Mismatches para ver los valores iniciales, y, Case Information, Solution Details, Power Flow Jacobian para ver la matriz jacobiana inicial, Figura 5.2, recuerde primero seleccionar Reset to Flat Start.

Como es común en los flujos de potencia comerciales, PowerWorld actualmente incluye filas en el jacobiano para las barras de voltaje controlado. Cuando un generador esta regulando su voltaje terminal, esta fila corresponde a la ecuación que ajusta la magnitud de voltaje de barra igual al set-point de voltaje en el generador. Sin embargo, sí el generador

supera un límite de potencia reactiva, cambia el tipo de barra, por tanto, se vuelve una barra de carga.

Para alcanzar la solución Newton Raphson iteración por iteración, de la cinta Tools seleccione Solve, Polar NR Power Flow, ya que en el libro bajo estudio emplea la forma polar de este método. Por defecto, la solución se ejecuta a través de Single Solution Full Newton, que se detiene únicamente cuando todos los mismatches son menores que la tolerancia deseada. Repita el procedimiento descrito en el método de Gauss Seidel, la solución converge en dos iteraciones. En el Cuadro 5.4 se presentan los datos de voltajes obtenidos después de la primera iteración, calculados en el libro de Grainger-Stevenson.

Complementariamente, se ha añadido unas flechas en la potencia del generador de la barra 4, esto es para que modifique la potencia entregada para que los flujos de potencia por las líneas sean menores o iguales al 100% de su MVA límite

4. INFORME:

- Del Ejemplo 9.2, determine cuáles de las variables: voltaje, ángulo, potencia activa y potencia reactiva son datos de entrada y cuales son datos desconocidos; Presente los cálculos de los elementos de la Y de barra y compárelos con los obtenidos en el Cuadro 5-3.
- Presente los cálculos y resultados del Ejemplo 5.2, solución de flujos de potencia mediante el método de Gauss Seidel.
- Presente los cálculos y resultados del Ejemplo 5.3, solución de flujos de potencia mediante el método de Newton Raphson forma polar, compárelos con los valores del Cuadro 5.5.

5. BIBLIOGRAFÍA:

- Análisis de Sistemas de Potencia, Grainger – Stevenson, páginas 317 - 334.

6. ANEXOS:

Cuadro 5.1

Datos de líneas para el ejemplo 9.2

Línea De barra a barra	Z Serie		Y Serie		Y en paralelo	
	R en p.u.	X en p.u.	G en p.u.	B en p.u.	MVAR totales de carga	Y/2 en p.u.
1-2	0,01008	0,0504	3,815629	-19,078144	10,25	0,05125
1-3	0,00744	0,0372	5,169561	-25,847809	7,75	0,03875
2-4	0,00744	0,0372	5,169561	-25,847809	7,75	0,03875
3-4	0,01272	0,0636	3,023705	-15,118528	12,75	0,06375

Base 100 MVA, 230 kV.

Cuadro 5.2

Datos de barras para el ejemplo 9.2

Barra	Generación		Carga		V en p.u.	Grados	Observaciones
	P, MW	Q, MVAR	P, MW	Q, MVAR			
1			50	30,99	1,00	0	Barra de compensación
2	0	0	170	105,35	1,00	0	Barra de carga (inductiva)
3	0	0	200	123,94	1,00	0	Barra de carga (inductiva)
4	318		80	49,58	1,02	0	Voltaje controlado

Los valores Q de la carga se calculan de los correspondientes valores de P suponiendo un factor de potencia de 0.85.

Cuadro 5.3

Matriz de admitancias de barra para el ejemplo 9.2

No. de barra	1	2	3	4
1	8,98519 -j44.835953	-3,815629 +j19.078144	-5,169561 +j25.847809	0
2	-3,815629 +j19.078144	8,98519 -j44.835953	0	-5,169561 +j25.847809
3	-5,169561 +j25.847809	0	8,193267 -j40.863838	-3,023705 +j15.118528
4	0	-5,169561 +j25.847809	-3,023705 +j15.118528	8,193267 -j40.863838

Valores en por unidad redondeados a seis lugares decimales.

Figura 5.1

Resultados obtenidos mediante el método de Gauss-Seidel para la primera iteración Ejemplo 5-2.

The screenshot shows the 'Bus Records' table in the PowerWorld Simulator. The table lists the following data:

Number	Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Volt (kV)	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar	St
1	1 Abedul	Análisis Sistemas de Potencia	230,00	1,00000000	230,000	0,00000100	50,00	30,99	240,25	104,73	
2	2 Olmo	Análisis Sistemas de Potencia	230,00	0,98254746	225,986	-1,85569477	170,00	105,35			
3	3 Pino	Análisis Sistemas de Potencia	230,00	0,96920314	222,917	-2,43235302	200,00	123,94			
4	4 Arce	Análisis Sistemas de Potencia	230,00	1,01999998	234,600	0,70725811	80,00	49,58	318,00	181,29	

Cuadro 5.4

Newton Raphson primera iteración Ejemplo 9.2

No. de barra:	1	2	3	4
Grados	0,00	-0,93094	-1,7879	-1,54383
V en p.u.	1,00	0,98335	0,97095	1,02

Figura 5.2

Valores iniciales del Jacobiano para el Ejemplo 9.2

The screenshot shows the 'Power Flow Jacobian' table in the PowerWorld Simulator. The table lists the following data:

Number	Name	Jacobian Equation	Angle Bus 2	Angle Bus 3	Angle Bus 4	Volt Mag Bus 2	Volt Mag Bus 3	Volt Mag Bus 4
1	2 Olmo	Real Power	45,44291		-26,36477	8,88180		-5,16956
2	3 Pino	Real Power	41,26871	-15,42090			8,13379	-3,02371
3	4 Arce	Real Power	-26,36477	-15,42090	41,78566	-5,27295	-3,08418	8,52100
4	2 Olmo	Reactive Power	-9,08858		5,27295	44,22900		-25,84781
5	3 Pino	Reactive Power		-8,25374	3,08418		40,45897	-15,11853
6	4 Arce	Voltage Magnitude						1,00000

Cuadro 5.5

Solución de flujos de potencia por Newton-Raphson para el sistema del ejemplo 9.2

Información de barras									Flujo de líneas			
No. de barra	Nombre	V en p.u.	Ángulo en °	Generación		Carga		Tipo de barra	A la barra		Flujo de líneas	
				MW	MVAR	MW	MVAR		Número	Nombre	MW	MVAR
1	Abedul	1,000	0	186,81	114,5	50	30,99	Compensación	2	olmo	38,69	22,30
									3	Pino	98,12	61,21
2	Olmo	0,982	-0,976	0	0	170	105,35	PQ	1	Abedul	-38,46	-31,24
									4	Arce	-131,54	-74,11
3	Pino	0,969	-1,872	0	0	200	123,94	PQ	1	Abedul	-97,09	-63,57
									4	Arce	-102,91	-60,37
4	Arce	1,020	1,523	318	181,43	80	49,58	PV	2	Olmo	133,25	74,92
									3	Pino	104,75	56,93
Totales del Área				504,81	295,93	500	309,86					

PRÁCTICA NO. 6

1. TÓPICO:

Flujos de Potencia en barras principales del Sistema Nacional de Transmisión de Energía Eléctrica de Ecuador.

2. OBJETIVO:

- a) Familiarizarse con los datos de entrada para flujos de potencia y la Y de barra del Sistema Nacional Interconectado Ecuatoriano.
- b) Obtener la solución de flujos de potencia mediante el método de Newton-Raphson utilizando el simulador PowerWorld.
- c) Analizar los resultados obtenidos.

3. DESARROLLO:

En esta práctica se visualiza el sistema eléctrico a 230 kV, ampliando únicamente en barras importantes hasta 138 kV, la generación se ha considerado la que está directamente conectada a los sistemas mencionados, la carga ha sido concentrada para las barras representativas asumiendo el período de máxima demanda, el sistema presentado alcanza hasta 41 barras debido a la limitación del simulador en la versión académica.

Ejecute el simulador PowerWorld, abra el Ejemplo 6-1, proceda a la simulación, amplíe la zona de interés, observará valores de potencia ingresando y saliendo de una determinada barra, puede modificar valores de carga, conectar y desconectar reactores o capacitores, líneas; posteriormente abra la ventana de Model Explorer, analice los datos correspondientes a Barras, verifique niveles de voltaje, flujo de potencia.

Desde la ventana del Model Explorer, tiene la opción de enviar los resultados a una hoja de cálculo de excel, los cuadros 6.1 hasta el 6.3 fueron obtenidos de esta manera, para mayor información visite www.powerworld.com

4. INFORME:

- Determine y analice la Y de barra del sistema.
- Determine las barras con voltajes más altos y más bajos del sistema, en el modo simulación ejecute la opción Contouring, especifique por barra y nivel de voltaje.
- Determine las pérdidas de potencia activa en las líneas de transmisión.
- Analice el comportamiento de los generadores, capacidad de generación.
- Simule el sistema modificando las cargas a un 60% de los valores ingresados, esto representará el período de demanda media, repita las tareas indicadas para el período de demanda máxima.

5. BIBLIOGRAFÍA:

- Análisis de Sistemas de Potencia, Grainger – Stevenson.
- Diagrama Unifilar del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador, visite www.cenace.org
- Reporte Post-operativo Diario del 12 de noviembre de 2012, límites operativos de líneas de transmisión y transformadores, unifilar del Sistema Nacional de Transmisión, visite www.transelectric.com.ec

6. ANEXOS:

Cuadro 6.1

Datos de Barras para el Ejemplo 6-1.

Bus Records

Number	Name	Area Name	Nom kV	PU Volt	Angle (Deg)	Load MW	Load Mvar	Gen MW	Gen Mvar	Switched Shunts Mvar
1	MOLINO_230kV	ECUADOR	230	1,05	0			575	0	
2	RIOBAMBA_230kV	ECUADOR	230	1	0	47,16	15,38			
3	TOTORAS_230kV	ECUADOR	230	1	0					
4	SAN_FRANCISCO_230kV	ECUADOR	230	1,05	0			226	0	
5	SANTA_ROSA_230kV	ECUADOR	230	1	0					
6	SANTO_DOMINGO_230kV	ECUADOR	230	1	0					
7	QUEVEDO_230kV	ECUADOR	230	1,05	0	91,89	39,15	25	0	
8	SAN_GREGORIO_230kV	ECUADOR	230	1	0	32,67	13,92			
9	PASCUALES_230kV	ECUADOR	230	1	0					
10	DOS_CERRITOS_230kV	ECUADOR	230	1	0	88	29			
11	MILAGRO_230kV	ECUADOR	230	1	0	135,24	44,1			
12	ZHORAY_230kV	ECUADOR	230	1,05	0			200	0	
13	TRINITARIA_230kV	ECUADOR	230	1,05	0	117,33	49,98	283	0	
14	ESCLUSAS_230kV	ECUADOR	230	1,05	0	74,67	31,81	150	0	
15	N_PROSPERINA_230kV	ECUADOR	230	1	0	98,59	42			
16	SININCAY_230kV	ECUADOR	230	1	0	23	7,5			
17	MACHALA_230kV	ECUADOR	230	1	0	177	57,7			
18	ZORRITOS_220kV	PERU	220	1,05	0			100	0	
19	POMASQUI_230kV	ECUADOR	230	1	0	175,13	74			0
20	JAMONDINO_220kV	COLOMBIA	220	1,05	0			300	0	
21	MOLINO_138kV	ECUADOR	138	1	0	436	142	525	0	
22	MOLINO_AT2	ECUADOR	13,8	1	0					-10
23	MOLINO_AT1	ECUADOR	13,8	1	0					-10
24	MOLINSTR	ECUADOR	1	1	0					
25	MOLINSTR	ECUADOR	1	1	0					
26	SANTA_ROSA_138kV	ECUADOR	138	1,05	0	486	207	54	0	89,3
27	SROSA_ATU	ECUADOR	13,8	1	0					0
28	SROSA_ATT	ECUADOR	13,8	1	0					
29	SROSASTR	ECUADOR	1	1	0					
30	SROSASTR	ECUADOR	1	1	0					
31	PASCUALES_138kV	ECUADOR	138	1,05	0	555,25	181,1	97,6	0	66,15
32	PASC_ATT	ECUADOR	13,8	1	0					
33	PASC_ATU	ECUADOR	13,8	1	0					0
34	PASC_STR	ECUADOR	1	1	0					
35	PASC_STR	ECUADOR	1	1	0					
36	TOTORAS_138kV	ECUADOR	138	1	0	116	38			
37	TOTORAS_13,8kV	ECUADOR	13,8	1	0					0
38	TOTORSTR	ECUADOR	1	1	0					
39	BAÑOS_138kV	ECUADOR	138	1,05	0	7,6	2,46	160	0	
40	SANTO_DOMINGO_138kV	ECUADOR	138	1	0	115,69	49,28			
41	ESMERALDAS_138kV	ECUADOR	138	1,05	0	68,54	29,19	132,5	0	

Cuadro 6.2

Datos de Líneas de Transmisión para el Ejemplo 6-1.

Line Records

From Number	From Name	To Number	To Name	Circuit	Status	Branch Device Type	Xfrmr	R	X	B	Lim A MVA	Lim B MVA
1	MOLINO_230kV	2	RIOBAMBA_230kV	1	Closed	Line	NO	0,01766	0,14591	0,28355	342	442
3	TOTORAS_230kV	1	MOLINO_230kV	1	Closed	Line	NO	0,02247	0,18571	0,36089	342	442
9	PASCUALES_230kV	1	MOLINO_230kV	1	Closed	Line	NO	0,02105	0,16836	0,35186	342	442
9	PASCUALES_230kV	1	MOLINO_230kV	2	Closed	Line	NO	0,02105	0,16836	0,35186	342	442
12	ZHORAY_230kV	1	MOLINO_230kV	1	Closed	Line	NO	0,00164	0,01317	0,02845	353	442
12	ZHORAY_230kV	1	MOLINO_230kV	2	Closed	Line	NO	0,00164	0,01317	0,02845	353	442
1	MOLINO_230kV	24	MOLINSTR	1	Closed	Transformer	YES	0,00026	0,05075	0	375	0
1	MOLINO_230kV	25	MOLINSTR	1	Closed	Transformer	YES	0,00026	0,05075	0	375	0
2	RIOBAMBA_230kV	3	TOTORAS_230kV	1	Closed	Line	NO	0,00481	0,03978	0,0773	342	442
3	TOTORAS_230kV	4	SAN_FRANCISCO_230kV	1	Closed	Line	NO	0,0057	0,04043	0,09556	366	442
4	SAN_FRANCISCO_230kV	3	TOTORAS_230kV	2	Closed	Line	NO	0,0057	0,04043	0,09556	366	442
3	TOTORAS_230kV	5	SANTA_ROSA_230kV	1	Closed	Line	NO	0,01236	0,10212	0,19845	342	442
3	TOTORAS_230kV	5	SANTA_ROSA_230kV	2	Closed	Line	NO	0,01236	0,10212	0,19845	342	442
3	TOTORAS_230kV	38	TOTORSTR	1	Closed	Transformer	YES	0,0002	0,06297	0	112	0
5	SANTA_ROSA_230kV	6	SANTO_DOMINGO_230kV	1	Closed	Line	NO	0,00879	0,07267	0,14122	342	442
5	SANTA_ROSA_230kV	6	SANTO_DOMINGO_230kV	2	Closed	Line	NO	0,00879	0,07267	0,14122	342	442
19	POMASQUI_230kV	5	SANTA_ROSA_230kV	1	Closed	Line	NO	0,00476	0,04319	0,08231	332	428
5	SANTA_ROSA_230kV	19	POMASQUI_230kV	2	Closed	Line	NO	0,00476	0,04319	0,08231	332	428
5	SANTA_ROSA_230kV	29	SROSASTR	1	Closed	Transformer	YES	0,00026	0,05095	0	375	0
5	SANTA_ROSA_230kV	30	SROSASTR	1	Closed	Transformer	YES	0,00018	0,04935	0	375	0
7	QUEVEDO_230kV	6	SANTO_DOMINGO_230kV	1	Closed	Line	NO	0,01162	0,09293	0,1942	353	442
6	SANTO_DOMINGO_230kV	7	QUEVEDO_230kV	2	Closed	Line	NO	0,01162	0,09293	0,1942	353	442
6	SANTO_DOMINGO_230kV	40	SANTO_DOMINGO_138kV	1	Closed	Transformer	YES	0,00026	0,05095	0	167	0
6	SANTO_DOMINGO_230kV	40	SANTO_DOMINGO_138kV	2	Closed	Transformer	YES	0,00026	0,05095	0	167	0
8	SAN_GREGORIO_230kV	7	QUEVEDO_230kV	1	Closed	Line	NO	0,01268	0,10147	0,21205	332	428
7	QUEVEDO_230kV	9	PASCUALES_230kV	1	Closed	Line	NO	0,01622	0,12978	0,27123	353	442
7	QUEVEDO_230kV	9	PASCUALES_230kV	2	Closed	Line	NO	0,01622	0,12978	0,27123	353	442
9	PASCUALES_230kV	10	DOS_CERRITOS_230kV	1	Closed	Line	NO	0,00112	0,00894	0,01867	353	442
11	MILAGRO_230kV	9	PASCUALES_230kV	1	Closed	Line	NO	0,00589	0,04709	0,09841	353	442
9	PASCUALES_230kV	13	TRINITARIA_230kV	1	Closed	Line	NO	0,00316	0,02527	0,05281	353	442
9	PASCUALES_230kV	15	N_PROSPERINA_230kV	1	Closed	Line	NO	0	0,2	0	0	0
9	PASCUALES_230kV	34	PASC_STR	1	Closed	Transformer	YES	0,00016	0,04805	0	375	0
9	PASCUALES_230kV	35	PASC_STR	1	Closed	Transformer	YES	0,00026	0,0503	0	375	0
10	DOS_CERRITOS_230kV	11	MILAGRO_230kV	1	Closed	Line	NO	0,00477	0,03815	0,07973	353	442
11	MILAGRO_230kV	12	ZHORAY_230kV	1	Closed	Line	NO	0,01324	0,10604	0,22904	342	442
11	MILAGRO_230kV	12	ZHORAY_230kV	2	Closed	Line	NO	0,01324	0,10604	0,22904	342	442
11	MILAGRO_230kV	17	MACHALA_230kV	1	Closed	Line	NO	0,01162	0,09293	0,31336	643	0
11	MILAGRO_230kV	17	MACHALA_230kV	2	Closed	Line	NO	0,01162	0,09293	0,31336	643	0
12	ZHORAY_230kV	16	SININCAI_230kV	1	Closed	Line	NO	0,00491	0,04866	0,09353	332	428
13	TRINITARIA_230kV	14	ESCLUSAS_230kV	1	Closed	Line	NO	0,0005	0,00405	0,01726	643	0
13	TRINITARIA_230kV	14	ESCLUSAS_230kV	2	Closed	Line	NO	0,0005	0,00405	0,01726	643	0
13	TRINITARIA_230kV	15	N_PROSPERINA_230kV	1	Closed	Line	NO	0,00316	0,02527	0,05281	353	442
17	MACHALA_230kV	18	ZORRITOS_220kV	1	Closed	Line	NO	0,0054	0,05059	0,09556	332	0
20	JAMONDINO_220kV	19	POMASQUI_230kV	1	Closed	Line	NO	0,02178	0,19453	0,36088	332	428
20	JAMONDINO_220kV	19	POMASQUI_230kV	2	Closed	Line	NO	0,02178	0,19453	0,36088	332	428
20	JAMONDINO_220kV	19	POMASQUI_230kV	3	Closed	Line	NO	0,02114	0,1974	0,36088	332	428
20	JAMONDINO_220kV	19	POMASQUI_230kV	4	Closed	Line	NO	0,02114	0,1974	0,36088	332	428
21	MOLINO_138kV	24	MOLINSTR	1	Closed	Transformer	YES	0,00026	0,02265	0	375	0
21	MOLINO_138kV	25	MOLINSTR	1	Closed	Transformer	YES	0,00026	0,02265	0	375	0
22	MOLINO_AT2	24	MOLINSTR	1	Closed	Transformer	YES	0,00094	0,07825	0	100	0
23	MOLINO_AT1	25	MOLINSTR	1	Closed	Transformer	YES	0,00094	0,07825	0	100	0
26	SANTA_ROSA_138kV	29	SROSASTR	1	Closed	Transformer	YES	0,00028	0,02295	0	375	0
26	SANTA_ROSA_138kV	30	SROSASTR	1	Closed	Transformer	YES	0,0002	0,02215	0	375	0
27	SROSA_ATU	29	SROSASTR	1	Closed	Transformer	YES	0,00091	0,07835	0	100	0
28	SROSA_ATT	30	SROSASTR	1	Closed	Transformer	YES	0,00169	0,07965	0	125	0
31	PASCUALES_138kV	34	PASC_STR	1	Closed	Transformer	YES	0,00017	0,02355	0	375	0
31	PASCUALES_138kV	35	PASC_STR	1	Closed	Transformer	YES	0,00027	0,0228	0	375	0
32	PASC_ATT	34	PASC_STR	1	Closed	Transformer	YES	0,00046	0,06565	0	100	0
33	PASC_ATU	35	PASC_STR	1	Closed	Transformer	YES	0,00092	0,0772	0	100	0
36	TOTORAS_138kV	38	TOTORSTR	1	Closed	Transformer	YES	0,00019	0,0225	0	112	0
39	BAÑOS_138kV	36	TOTORAS_138kV	1	Closed	Line	NO	0,00635	0,03032	0,06002	165	186
39	BAÑOS_138kV	36	TOTORAS_138kV	2	Closed	Line	NO	0,00635	0,03032	0,06002	165	186
37	TOTORAS_13,8kV	38	TOTORSTR	1	Closed	Transformer	YES	0,00048	0,07178	0	33	0
41	ESMERALDAS_138kV	40	SANTO_DOMINGO_138kV	1	Closed	Line	NO	0,04736	0,14509	0,27511	115	0
41	ESMERALDAS_138kV	40	SANTO_DOMINGO_138kV	2	Closed	Line	NO	0,04736	0,14509	0,27511	115	0

Cuadro 6.3

Datos de Generadores para el Ejemplo 6-1.

Gen Records

Number of Bus	Name of Bus	ID	Status	Gen MW	Gen Mvar	Set Volt	AGC	AVR	Min MW	Max MW	Min Mvar	Max Mvar
1	MOLINO_230kV	1	Closed	115	0	1,05	YES	YES	0	115	-60	60
1	MOLINO_230kV	2	Closed	115	0	1,05	YES	YES	0	115	-60	60
1	MOLINO_230kV	3	Closed	115	0	1,05	YES	YES	0	115	-60	60
1	MOLINO_230kV	4	Closed	115	0	1,05	YES	YES	0	115	-60	60
1	MOLINO_230kV	5	Closed	115	0	1,05	YES	YES	0	115	-60	60
4	SAN_FRANCISCO_230kV	1	Closed	113	0	1,05	YES	YES	0	113	-20,11	39,97
4	SAN_FRANCISCO_230kV	2	Closed	113	0	1,05	YES	YES	0	113	-20,11	39,97
7	QUEVEDO_230kV	1	Closed	25	0	1,05	YES	YES	0	25	-2,5	6
12	ZHORAY_230kV	1	Closed	100	0	1,05	YES	YES	0	100	-36,04	54,05
12	ZHORAY_230kV	2	Closed	100	0	1,05	YES	YES	0	100	-36,04	54,05
13	TRINITARIA_230kV	1	Closed	133	0	1,05	YES	YES	0	133	-20	80
13	TRINITARIA_230kV	2	Closed	150	0	1,05	YES	YES	0	150	-16,99	32
14	ESCLUSAS_230kV	1	Closed	150	0	1,05	YES	YES	0	150	-16,99	32
18	ZORRITOS_220kV	1	Closed	100	0	1,05	YES	YES	0	1000	-42,04	63,06
20	JAMONDINO_220kV	1	Closed	300	0	1,05	YES	YES	0	1000	-19,23	48,08
21	MOLINO_138kV	1	Closed	105	0	1	YES	YES	0	105	-42,04	63,06
21	MOLINO_138kV	2	Closed	105	0	1	YES	YES	0	105	-42,04	63,06
21	MOLINO_138kV	3	Closed	105	0	1	YES	YES	0	105	-42,04	63,06
21	MOLINO_138kV	4	Closed	105	0	1	YES	YES	0	105	-42,04	63,06
21	MOLINO_138kV	5	Closed	105	0	1	YES	YES	0	105	-42,04	63,06
26	SANTA_ROSA_138kV	1	Closed	18	0	1,05	YES	YES	0	18	-11	24
26	SANTA_ROSA_138kV	2	Closed	18	0	1,05	YES	YES	0	18	-11	24
26	SANTA_ROSA_138kV	3	Closed	18	0	1,05	YES	YES	0	18	-11	24
31	PASCUALES_138kV	1	Closed	48,8	0	1,05	YES	YES	0	48,8	-5,74	10,33
31	PASCUALES_138kV	2	Closed	48,8	0	1,05	YES	YES	0	48,8	-5,74	10,33
39	BAÑOS_138kV	1	Closed	80	0	1,05	YES	YES	0	80	-10	30
39	BAÑOS_138kV	2	Closed	80	0	1,05	YES	YES	0	80	-10	30
41	ESMERALDAS_138kV	1	Closed	132,5	0	1,05	YES	YES	0	132,5	-16,99	32

PRÁCTICA NO. 7

1. TÓPICO:

Fallas Simétricas y Asimétricas en barras principales del Sistema Nacional de Transmisión de Energía Eléctrica de Ecuador.

2. OBJETIVO:

- a) Usar el simulador PowerWorld para determinar la corriente y el voltaje de falla para fallas trifásicas en cada una de las barras.
- b) Usar el simulador PowerWorld para determinar la corriente y voltaje de falla para una falla monofásica a tierra sostenida en las barras 3, 5 y 8.
- c) Analizar los resultados obtenidos.

3. DESARROLLO:

En barras de generación el voltaje de pre-falla es de 1.05 en p.u., para las restantes es de 1.0 p.u., se considera el sistema eléctrico empleado en el Ejemplo 6-1 por tanto, los datos de entrada ya son conocidos, para verificar los datos específicos para este ejemplo, abra el Model explorer, en la pestaña Explore haga clic en Fault Analysis – Input (Branches, Bus, generators) puede exportar estos datos a una hoja de cálculo de excel.

Para una falla en una barra desde el unifilar, por supuesto en modo simulación, haga clic derecho sobre una barra específica, esto, mostrará un menú local, seleccione "Fault"; Esto muestra una ventana de diálogo para Fault (Figura 7.1). La barra que seleccionó automáticamente será seleccionada como la ubicación de la falla. Verifique que la ubicación de la falla se encuentre en "Bus Fault" y el tipo de falla sea "3 Phase Balanced". Luego seleccione "Calculate" ubicado en la esquina inferior

izquierda de este diálogo, para determinar las corrientes y voltajes de falla, para un nuevo cálculo seleccione "Clear"; Con una falla trifásica el sistema permanece balanceado, los valores de las magnitudes de las fases a, b y c son idénticos, debe notar las corrientes de falla determinadas son corrientes de falla sub-transitorias, debido a que el dato de entrada de reactancia de la máquina consiste de las reactancias sub-transitorias de eje directo.

Es importante tener en mente que un programa de cálculo de corto circuitos puede ser utilizado en el diseño de un sistema de potencia para seleccionar, ajustar y coordinar equipos de protección, tales como: interruptores de circuito, fusibles, relés y transformadores instrumento.

4. INFORME:

- Determine las corrientes y voltajes de falla simétricos y asimétricos en barras del sistema.
- Determine las corrientes más altas de falla en el sistema, en fallas simétricas y asimétricas.
- Desconecte líneas de transmisión adyacentes a la falla para verificar el comportamiento del sistema.

5. BIBLIOGRAFÍA:

- Análisis de Sistemas de Potencia, Grainger – Stevenson.
- Diagrama Unifilar del Sistema Nacional Interconectado del Ecuador, visite www.cenace.org
- Reporte Post-operativo Diario del 12 de noviembre de 2012, límites operativos de líneas de transmisión y transformadores,

unifilar del Sistema Nacional de Transmisión, visite www.transelectric.com.ec

6. ANEXOS:

Figura 7.1

Calculando una falla desde el unifilar.

