

**PRÁCTICAS COMPUTACIONALES SOBRE FLUJOS DE CARGA Y ANÁLISIS  
DE CORTO CIRCUITO EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA  
UTILIZANDO LOS PROGRAMAS ETAP POWERSTATION 3.02 Y  
POWERWORLD SIMULATOR 7.0**

**OSCAR EMILIO DÍAZ VANEGAS COD. 296513  
JORGE ALEXIS RODRIGUEZ MEZA COD. 296537**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
INGENIERÍA ELÉCTRICA  
MANIZALES  
Noviembre de 2001**

**PRÁCTICAS COMPUTACIONALES SOBRE FLUJOS DE CARGA Y ANÁLISIS  
DE CORTO CIRCUITO EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA  
UTILIZANDO LOS PROGRAMAS ETAP POWERSTATION 3.02 Y  
POWERWORLD SIMULATOR 7.0**

**OSCAR EMILIO DÍAZ VANEGAS COD. 296513  
JORGE ALEXIS RODRIGUEZ MEZA COD. 296537**

**Trabajo presentado para optar por el título de Ingenieros Electricistas**

**Director  
FRANCISCO ABEL ROLDÁN HOYOS  
D.E.A. Génie Électrique**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
INGENIERÍA ELÉCTRICA  
MANIZALES  
Noviembre de 2001**

## **DEDICATORIA**

A mis Padres Stella y Jorge por su apoyo incondicional, su sacrificio y paciencia durante este tiempo, a mis Hermanos Lina y César porque son la motivación para la terminación de este trabajo.

**Jorge Alexis Rodríguez Meza**

A mis Padres y a mi Familia porque gracias a ellos he podido realizar este trabajo y porque han inculcado en mí el interés hacia el aprendizaje.

**Oscar Emilio Díaz Vanegas**

## **AGRADECIMIENTOS**

La ejecución de este proyecto ha sido posible gracias a la permanente y continua colaboración de cada una de las siguientes personas a quienes les reservamos nuestros reconocimientos.

Al Ing. Francisco Roldán, Profesor Asistente del programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, Director del proyecto, por sus aportes bibliográficos y su dedicación en la revisión, análisis y corrección de este trabajo con el objeto de lograr los mejores resultados.

Al Ing. César Delgado, del Departamento de Planeación de la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC), por su colaboración, tiempo e información brindada.

Al MSc. Jorge Fernando Gutiérrez, Instructor Asistente del programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales, por su atención y colaboración en el desarrollo del trabajo.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>LISTADO DE FIGURAS.....</b>	<b>1</b>
<b>LISTADO DE TABLAS .....</b>	<b>2</b>
<b>LISTADO DE ANEXOS.....</b>	<b>3</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>4</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>5</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>6</b>
<b>1. OPERACIÓN DE LOS PROGRAMAS ETAP POWERSTATION 3.02 Y POWERWORLD SIMULATOR 7.0 .....</b>	<b>8</b>
1.1 ETAP POWERSTATION 3.02.....	8
1.1.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROGRAMA .....	8
1.1.2 TIPOS DE ANÁLISIS PERMITIDOS .....	9
1.1.3 DIAGRAMAS UNIFILARES .....	11
1.1.4 LICENCIA DE ETAP POWERSTATION DISPONIBLE.....	11
1.1.5 OBSERVACIONES DEL PROGRAMA ENCONTRADAS DURANTE LA SOLUCIÓN DE FLUJOS DE CARGA Y ANÁLISIS DE CORTO CIRCUITO .....	12
1.2 POWERWORLD SIMULATOR 7.0 .....	13
1.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROGRAMA .....	13
1.2.2 TIPOS DE ANÁLISIS PERMITIDOS .....	14
1.2.3 CONSTRUCCIÓN DE DIAGRAMAS UNIFILARES .....	15
1.2.4 VERSIÓN DE POWERWORLD SIMULATOR PARA USO UNIVERSITARIO .....	15
1.2.5 OBSERVACIONES DEL PROGRAMA ENCONTRADAS DURANTE LA SOLUCIÓN DE FLUJOS DE CARGA Y ANÁLISIS DE CORTO CIRCUITO .....	17

1.3 SIMULACIÓN DE LOS CASOS DE PRUEBA DE 9 Y DE 14 BARRAS DEL IEEE .....	19
1.3.1 CASO DE PRUEBA DE 9 BARRAS SIMULADO CON POWERWORLD SIMULATOR 7.0 .....	19
1.3.2 CASO DE PRUEBA DE 14 BARRAS SIMULADO CON ETAP POWERSTATION 3.02 ..	21
1.4 SIMULACIÓN DE LA RED A 115 kV DEL SISTEMA CHEC CON ETAP POWERSTATION 3.02 .....	24
1.4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA .....	24
1.4.2 OBSERVACIONES PREVIAS A LA SIMULACIÓN.....	25
1.4.3 ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN DE FLUJOS DE CARGA.....	26
1.4.4 ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN DE CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO .....	28
1.5 OTROS PROGRAMAS DE SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE POTENCIA.	28
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>29</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>31</b>
<b>PERSPECTIVAS .....</b>	<b>32</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>33</b>

## LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.1.</b> Diagrama unifilar en <b>PowerWorld Simulator</b> del sistema de 9 barras - IEEE.	20
<b>Figura 1.2.</b> Diagrama unifilar en <b>ETAP PowerStation</b> del sistema de 14 barras - IEEE.	22

## LISTADO DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.1.</b> Voltajes de barra para el caso de prueba de 9 barras: datos IEEE y datos resultantes en PowerWorld Simulator.	21
<b>Tabla 1.2.</b> Voltajes de barra para el caso de prueba de 14 barras: datos IEEE y datos resultantes en ETAP PowerStation.	23

## LISTADO DE ANEXOS

**ANEXO I.** Análisis de Flujos de Carga.

**ANEXO II.** Análisis de Corto circuito.

**ANEXO III.** Guías de prácticas de simulación de Flujos de Carga y Corrientes de Corto Circuito con **ETAP PowerStation 3.02.**

**ANEXO IV.** Guías de prácticas de simulación de Flujos de Carga y Corrientes de Corto Circuito con **PowerWorld Simulator 7.0.**

**ANEXO V.** Resultados de la simulación de estudios de flujos de carga y corto circuito en la red a 115 kV del sistema CHEC.

**ANEXO VI.** Listado de programas para la simulación de sistemas de potencia.

## RESUMEN

El presente trabajo desarrolla un conjunto de guías de prácticas de simulación por computador, para el estudio de los temas de flujo de carga y análisis de corto circuito, llevadas a cabo con los programas **ETAP PowerStation 3.02** y **PowerWorld Simulator 7.0**, con el objeto de dar un soporte computacional al curso de Sistemas de Potencia II del programa de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. El documento se fundamenta en los conceptos teóricos sobre estos dos temas, revisados y presentados al igual que las prácticas en los anexos del mismo.

Como parte fundamental del trabajo se identifican potencialidades y limitaciones de las dos herramientas computacionales empleadas y se presenta una comparación de los resultados arrojados por las mismas en relación con los casos de prueba de 9 y 14 barras del IEEE.

De igual manera, presenta una aproximación a los estudios de flujo de carga y cortocircuito en un sistema de potencia real, efectuados a partir de la información de la red a 115kV y 220kV de la empresa local de electricidad CHEC.

**Palabras clave:** Prácticas de simulación, Sistemas Eléctricos de Potencia, Flujos de carga, Estudios de corto circuito, ETAP PowerStation, PowerWorld Simulator.

## ABSTRACT

This work develops a set of guides for computer simulation, for the study of load flow and short circuit analysis, carried out with **ETAP PowerStation 3.02** and **PowerWorld Simulator 7.0** programs. The purpose of this work is to provide a computer support to the subject of Power Systems II in the program of Electrical Engineering at Universidad Nacional de Colombia in Manizales. The document also presents the basic concepts on these topics.

Potentialities and limitations of these tools are identified as essential parts of the work and they are used as a comparison to the final results in relation with the test cases of 9 and 14 buses from IEEE.

This document also presents an approximation to the real load flow and short circuit studies based on the 115 kV and 220 kV grid of the local power utility Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC).

## INTRODUCCIÓN

El uso extendido de los computadores, acompañado del creciente número de herramientas de software empleadas en el medio industrial para ayudar a la solución de problemas de ingeniería, ha impuesto desde las últimas dos décadas el reto de concebir, apropiar y/o aplicar estas herramientas para el uso educativo, familiarizando al futuro profesional con los medios usuales de solución de problemas en el ejercicio profesional [1], [2].

La anterior consideración puso de manifiesto la necesidad de introducir de una manera sistemática y ordenada a los estudiantes del curso de sistemas de potencia II, de la Universidad Nacional sede Manizales, por medio de guías de prácticas de laboratorio en el estudio de problemas de flujo de carga y corto circuito a través del uso de las herramientas computacionales comerciales disponibles.

Estimulados por algunos ejemplos encontrados en la web [3], [4], [5], [6], las guías de prácticas propuestas han sido pensadas de forma tal que introduzcan gradualmente los componentes de un sistema de potencia, haciendo a cada uno de estos, objeto de un análisis de sensibilidad bajo la premisa “que pasa si” y en consideración de las posibilidades de manejo y análisis disponibles para cada elemento en cada uno de los programas empleados.

Luego, para llegar a las guías planteadas ha sido necesario, iniciar la conceptualización de las mismas a la luz de los fundamentos teóricos de los problemas a estudiar tanto para flujo de carga como de corto circuito. A continuación se ha requerido la familiarización con las herramientas computacionales a emplear, examinando en detalle las potencialidades de cada

una de ellas, en relación con los elementos de un sistema de potencia y con los dos tipos de estudios o análisis a efectuar. Finalmente en adición a las consideraciones anteriores, se ha tenido en cuenta el nivel de complejidad de los dos temas a tratar, para la orientación de las prácticas hacia la población objeto de aplicación. Así, estas se presentan al inicio de dichos temas, con un carácter tutorial, el cual se pierde gradualmente en el avance de las guías a través de los mismos.

De otra parte, a modo de retroalimentación y con el objeto de sondear la contribución del presente trabajo a la formación en sistemas de potencia de los futuros profesionales, en su etapa final, se ha efectuado un sondeo telefónico sobre la existencia de guías de prácticas computacionales (en los temas objetos de este estudio) a la mayoría de los programas de Ingeniería Eléctrica oficialmente reconocidos en el país (15); considerándose sin excepción a los de mayor trayectoria, habiéndose encontrado que solamente uno (Universidad Pontificia Bolivariana) y en tiempo reciente (un año), emplea esta estrategia con herramientas de concepción no comercial como medio de aprendizaje.

La anterior observación no pretende ser, ni es en si, un juicio de valores; solo da cuenta de la forma en que se imparte la instrucción en la aplicación de las herramientas computacionales a los estudios de flujo de carga y fallos. De hecho, la forma en que se aplican las herramientas computacionales en otros programas de Ingeniería Eléctrica es semejante a la llevada a cabo actualmente por el nuestro.

Ella consiste en dejar al estudiante en libertad de desarrollar un estudio predeterminado (correr un flujo de carga o fallo) en un sistema de potencia dado, enfrentándose el alumno por sus propios medios (y limitaciones) a la comprensión tanto del programa computacional, herramienta base para la simulación, como al entendimiento del problema objeto de su trabajo, lo cual de nuestra experiencia no siempre conduce a los mejores resultados.

# 1. OPERACIÓN DE LOS PROGRAMAS ETAP POWERSTATION 3.02 Y POWERWORLD SIMULATOR 7.0

## 1.1 ETAP POWERSTATION 3.02

### 1.1.1 Descripción general del programa

Es un programa completamente gráfico para el análisis de transitorios eléctricos (**Electrical Transient Analyzer Program**) que corre bajo Windows (95, 98, NT y 2000) y permite realizar simulaciones de sistemas eléctricos de potencia tanto comerciales como industriales. Tiene una interfaz gráfica bastante amigable, que permite elaborar rápidamente los diagramas unifilares de los sistemas a analizar y también elaborar sistemas de canalización subterránea. Permite realizar diferentes tareas comunes a los programas para simulación de sistemas de potencia básicos (flujos de carga y fallos por cortocircuito) y además tareas comunes a los programas de simulación intermedios (estabilidad transitoria, análisis de armónicos, flujo de potencia óptimo, arranque de motores, flujos de carga en sistemas DC, fallos por corto circuito en sistemas DC); la disponibilidad de los diferentes módulos de análisis depende de la selección que se haga en el momento de compra. El programa está diseñado de acuerdo a tres conceptos claves:

- Operación con realidad virtual: la operación del programa es lo más parecido posible al sistema de potencia real.
- Integración total de datos: PowerStation combina los atributos eléctricos, lógicos, mecánicos y físicos de los elementos del sistema en la misma base de datos.

- Simplicidad en la entrada de datos: los editores de datos de **PowerStation** permiten una mayor velocidad en el ingreso de los datos mínimos requeridos para un estudio en particular.

**ETAP PowerStation** tiene características para la personalización del sistema a analizar, esto permite que de un solo sistema se tengan diferentes configuraciones cada una con datos diferentes, lo que significa que se pueden tener distintos escenarios para la simulación de un mismo sistema de potencia [7].

### 1.1.2 Tipos de análisis permitidos

El programa **ETAP PowerStation 3.02** permite la realización de diferentes estudios partiendo de la información suministrada de cada uno de los elementos del diagrama unifilar. Cada estudio tiene diferentes características que permiten lograr diversos resultados y formatos de muestra de los mismos. Para los estudios de flujos de carga se cuenta con tres métodos que permiten lograr la solución de redes que exigen características de convergencia especiales, estos son: Newton Raphson, Newton Raphson Desacoplado Rápido y Gauss-Seidel Acelerado. Con cada uno de los métodos anteriores se tiene la opción de seleccionar el número de iteraciones y la precisión deseada, teniendo un máximo de 99 y 1E-4 MW respectivamente para los métodos de Newton Raphson y Newton Raphson Desacoplado Rápido y de 9999 y 1E-6 en la diferencia de voltajes para el método de Gauss-Seidel Acelerado; este último necesita además el ingreso del factor de aceleración seleccionado. Otra opción importante que presenta el programa es la capacidad de simular variaciones en la carga durante la simulación, ya que permite tener diferentes **categorías de carga** definidas por el usuario, que corresponden a un porcentaje de la carga nominal o de diseño. La variación de la carga también puede ser realizada por medio de diferentes factores de diversidad (mínimo, máximo y global). En estudios de flujos de carga es posible trabajar con cargas concentradas (mixtas) o estáticas y además la derivación (tap) es

automáticamente actualizada en los transformadores con cambio de derivaciones bajo carga (LTC transformer).

**ETAP PowerStation 3.02** permite el cálculo de corrientes de corto circuito (trifásicas, línea a tierra, doble línea y doble línea a tierra) por medio de la aplicación de las normas ANSI / IEEE e IEC correspondientes a este tipo de estudios. Entre las características importantes que presenta el programa se encuentra la opción de poder seleccionar en que barras se va a calcular el fallo, pudiéndose seleccionar una, varias o todas. Además, permite establecer bajo que condición se realiza la contribución de los motores a la corriente de falla (estado del motor o categoría de carga) y calcular la corriente del fallo línea a tierra teniendo en cuenta una impedancia de falla; esto se hace introduciendo el valor de esta en ohmios o en p.u. Elementos como motores, transformadores y generadores proporcionan una completa selección del tipo de conexión y puesta a tierra de los mismos, que es importante en el estudio de las corrientes de falla monofásicas. Las corrientes de corto circuito calculadas en **ETAP PowerStation 3.02** pueden ser guardadas y utilizadas para estudios de coordinación de protecciones utilizando el programa **PowerPlot**.

Otros análisis permitidos en **ETAP PowerStation 3.02 [7]** son: arranque de motores, para observar el efecto del arranque de estos sobre otras cargas; coordinación de protecciones, haciendo uso del programa **PowerPlot** y de las corrientes halladas en el estudio de corto circuito; estabilidad transitoria, para calcular el límite de estabilidad del sistema de potencia antes, durante y después de cambios o disturbios en el sistema; armónicos, utilizando los métodos de flujo de carga armónico y escaneo de frecuencias armónicas; flujo de carga óptimo, basado en el flujo de carga normal y teniendo en cuenta que no se violen las restricciones impuestas; flujos de carga y corrientes de corto circuito en sistemas DC.

### 1.1.3 Diagramas unifilares

La construcción del diagrama unifilar es un proceso sencillo dadas las características gráficas del programa y su organización general en diferentes modos de trabajo. El proceso de edición y construcción se realiza cuando el programa está en **modo de edición [7]**. La visualización de los resultados obtenidos de los diferentes estudios es mostrada sobre el diagrama unifilar, así como las principales propiedades de los elementos. La selección de la información que se va a mostrar en el diagrama unifilar se realiza en el **editor de opciones de visualización** disponible en las barras de los diferentes modos de funcionamiento. Además de los diagramas unifilares normales **ETAP PowerStation** permite realizar diagramas de sistemas de canalizaciones subterráneas con los cuales se pueden realizar otros estudios.

### 1.1.4 Licencia de Etap PowerStation disponible

La licencia disponible en la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales para el uso de ETAP PowerStation, permite realizar estudios de flujos de carga, corrientes de corto circuito, estabilidad transitoria, análisis de armónicos y arranque de motores. Además permite trabajar con más de 2000 barras (el valor exacto no fue proporcionado por el proveedor), con lo que se pueden simular sistemas de tamaños importantes. Su gran limitante consiste en que aún cuando se dispone de licencia para operación en red sólo permite un único usuario a la vez.

Los requerimientos mínimos de hardware son:

- Procesador Intel Pentium 133 MHz.
- 64 MB de memoria RAM.
- 500 MB de espacio disponible en el disco duro.
- Monitor SVGA / Tarjeta de video de (1024 x 768) píxeles.

- Puerto paralelo.
- Llave de seguridad (OTI Part # 1410/1425PS).

El hardware recomendado para grandes proyectos es:

- Procesador Intel Pentium III.
- 256 MB de memoria RAM.
- 2 GB de espacio disponible en el disco duro.
- Monitor de 21" SVGA.

### **1.1.5 Observaciones del programa encontradas durante la solución de flujos de carga y análisis de corto circuito**

- Los reactores sólo se utilizan como dispositivos de limitación de corriente (usualmente en serie con las fases de los generadores), no permiten ser utilizados para compensación de líneas, ni barras (conexión en derivación). (Anexo III, guía de práctica No 5 de flujos de carga).
- Los condensadores sólo se pueden utilizar para compensación paralela (en barras de carga), no permiten ser utilizados para compensación serie de líneas. (Anexo III, guía de práctica No. 5 de flujos de carga).
- Aunque las cargas permiten seleccionar entre que fases se encuentran conectadas, el programa no permite calcular flujos de carga desbalanceados, es decir, no se observa la influencia de dichas conexiones en los resultados.
- De manera análoga al caso anterior los estudios de corto circuito no consideran las cargas. Dichos estudios son realizados en este programa bajo dos tipos de normas. Para normas ANSI / IEEE se consideran estudios de corto circuito a  $\frac{1}{2}$  ciclo, 1.5-4 ciclos, 30 ciclos, Trifásico (Duty) y trifásico después de 30 ciclos. Para normas IEC se consideran cálculos de corto circuito

en las opciones: Trifásico (Duty) y según las normas IEC 909 e IEC 363. (Anexo III, guía de practica No. 1 de corto circuito).

- Durante la simulación del sistema de 14 barras del IEEE se presentó un problema en el ingreso de las impedancias de los transformadores de este, puesto que no es posible en **ETAP PowerStation 3.02** tener resistencias de transformadores nulas, ya que los parámetros de entrada de estos son Z en porcentaje y la relación X/R. (Anexo III, guía de práctica No. 6 de flujo de carga).
- Los reportes de salida de los resultados tanto de estudios de flujos de carga como de corrientes de corto circuito son bastante completos. Cuenta con la siguientes información: datos de entrada de los elementos, flujos de carga entre las barras, pérdidas en cada una de las ramas, reporte de elementos sobrecargados, entre otros, para flujos de carga. Para estudios de corrientes de corto circuito se muestran: datos de entrada de los elementos, el resumen de las magnitudes de las corrientes de fallo (trifásica, línea a tierra, doble línea y doble línea a tierra), la contribución de corrientes en las barras seleccionadas como falladas, entre otros. (Anexo III, guías de prácticas de flujos de carga y corto circuito).

## 1.2 POWERWORLD SIMULATOR 7.0

### 1.2.1 Descripción general del programa

Este programa de simulación por computador de sistemas eléctricos de potencia permite realizar análisis de sistemas, como es el caso de flujos de carga, flujo de potencia óptimo, fallos por cortocircuito, estabilidad, despacho económico, entre otros. El trabaja en un ambiente gráfico e interactivo con el usuario y está orientado para personal técnico, de ingeniería y para fines educativos en el análisis de sistemas de potencia. Esta herramienta está centrada principalmente

en la simulación de sistemas de potencia interconectados, ya que permite trabajar los modelos por áreas y zonas, permitiendo realizar las tareas comunes a los programas para simulación de sistemas de potencia básicos (flujos de carga y fallos por cortocircuito) y además tareas comunes a los programas de simulación intermedios (estabilidad, despacho económico, flujo óptimo, análisis de contingencia).

### 1.2.2 Tipos de análisis permitidos

La fortaleza de **PowerWorld Simulator 7.0** se encuentra en su capacidad de solucionar flujos de carga (en su versión completa puede solucionar hasta 60000 barras) utilizando diagramas unifilares animados. Además de proporcionar una solución para flujos de carga, el programa puede simular la evolución del sistema de potencia sobre un intervalo de tiempo determinado por el usuario, que puede ir desde unas cuantas horas hasta una semana; durante el tiempo de simulación el programa ejecuta la solución de los flujos y muestra la animación de los mismos. Los métodos de solución de los flujos de carga disponibles en el programa son: el método de Newton Raphson Completo y el OPF (Flujo de potencia óptimo). Otras opciones importantes que presenta el programa son la capacidad de simular variaciones en la carga durante la simulación, ya que permite introducir curvas de carga diaria, semanal y de fin de semana. Además integra el despacho económico y permite que los generadores trabajen con curvas de costo definidas por el usuario, calcula el **PTDF** (Factor de Distribución de Transferencia de Potencia) útil para realizar análisis de intercambio de potencia entre determinadas áreas, calcula cortocircuitos y permite realizar análisis de contingencia. Además tiene la opción de crear archivos **Script** que sirven para automatizar las acciones durante la simulación de un caso; por medio de estos archivos se pueden programar eventos para todos los tipos de elementos, eventos de simulación, eventos del diagrama unifilar, entre otros. También permite crear archivos de proyecto, los cuales reúnen todos los archivos relacionados con el caso de simulación para llevarlos en un sólo archivo a cualquier lugar. Incluye controles automáticos para elementos como

generadores, transformadores y elementos de compensación en paralelo con las barras de un sistema. Para generadores, dispone de opciones de control como el **AGC** (Automatic Generation Control) control automático de generación, el **AVR** (Automatic Voltage Regulation) regulación de voltaje automática, tanto para generadores como para transformadores de cambio de derivación y transformadores de desfaseamiento. Presenta dos herramientas muy importantes que son el análisis **ATC** (Available Transfer Capability), análisis de capacidad de transferencia disponible, para determinar la potencia máxima que se puede transferir entre dos partes de un sistema de potencia y el **VAST** (Voltage Adequacy and Stability Tools) para realizar estudios de estabilidad del sistema y generar curvas PV y curvas QV para cualquier barra del sistema.

### 1.2.3 Construcción de diagramas unifilares

En cuanto a la construcción de los diagramas unifilares, la forma de trabajo del **PowerWorld Simulator 7.0** es muy similar a la del **ETAP PowerStation 3.02**, ya que presenta un modo de trabajo para edición de los diagramas y otro modo para la simulación de los casos. Una característica particular de este programa es que algunas veces lo que se visualiza en el diagrama no es necesariamente lo que existe en el modelo. Su forma de trabajo distingue entre objetos y elementos del modelo; lo que se visualiza en el diagrama son los objetos del modelo que están relacionados con un elemento del modelo, es decir, con un registro de datos. Pero no necesariamente un elemento debe tener asociado un objeto; se puede tener entonces una barra en un extremo del diagrama y un generador en el otro extremo y estar conectados aunque no se vea físicamente así.

### 1.2.4 Versión de PowerWorld Simulator para uso universitario

No se debe olvidar que el núcleo central de **PowerWorld Simulator** es la solución de flujos de carga, incluyendo información económica de costos de generación junto con información de operaciones de intercambio de potencia. De hecho, las

versiones anteriores de este programa no incluían la posibilidad de realizar estudios de fallos como si lo permite la actual y centraban su capacidad en los estudios de flujo de carga. Se ha escogido este programa en su versión Demo que es para uso educativo únicamente y de distribución gratuita en la WEB, porque con ella se pueden realizar todos los estudios disponibles con la versión original pero en sistemas hasta de 12 barras. Esto resulta suficiente para fines de aprendizaje y de comprensión en la simulación de sistemas de potencia para el caso de estudios de flujos de carga, fallos por cortocircuito y demás estudios afines. Incluso permite visualizar el intercambio de potencia entre dos áreas de un sistema interconectado.

La versión del programa utilizada para la realización de las prácticas es **PowerWorld Simulator 7.0** versión para uso educativo. Esta versión puede ser obtenida en la dirección URL de **PowerWorld Corporation** (<http://www.powerworld.com>) y es soportada por los sistemas Windows 95/98/2000 y NT 3.5 o superior.

Aunque se desconocen los requerimientos de hardware ideales para la operación eficiente del programa, este se ha probado satisfactoriamente con fines educativos (Anexo IV, estudios de flujo de carga y corto circuito hasta de 9 barras) en equipos con las siguientes especificaciones:

- Procesador AMD 100 MHz.
- 32 MB de memoria RAM.
- Disco duro de 2.1 GB.
- Monitor SVGA / Tarjeta de video (800 x 600).

Es de anotar que aunque el disco duro del computador es el indicado, el tamaño de los archivos generados para las prácticas (Anexo IV) es de 5 kB en promedio, haciéndolas fácilmente transportables.

### 1.2.5 Observaciones del programa encontradas durante la solución de flujos de carga y análisis de corto circuito

- Presenta la opción de permitir múltiples islas durante la simulación; esto quiere decir que si una o varias partes del sistema quedan aisladas del mismo, el programa permite simular los flujos de carga en estas ya que asigna en cada una de ellas una barra de referencia (Anexo IV, guía de práctica No. 6 de flujos de carga).
- Cuando se utiliza la opción de simulación en el tiempo se tiene la posibilidad de simular eventos inesperados sobre el sistema; el programa permite decidir con que frecuencia se quieren simular eventos como una descarga atmosférica sobre una línea, un tornado, entre otros. Esto ocasionará la apertura de una línea (o de una parte del sistema).
- Para los generadores y las cargas no se dispone de una opción específica para definir el tipo de conexión de los elementos, es decir, no se puede decir si el elemento está conectado en Y o en  $\Delta$ .

Como solución a esta limitación, en el caso de los generadores, la conexión a tierra de estos elementos se puede manipular modificando el valor de la impedancia neutro - tierra ( $Z_n$ ). Para el caso de las cargas los valores que deben modificarse dependiendo de la puesta a tierra de las mismas, son los de admitancia de secuencia cero que se ingresan en los registros de las barras a las cuales se conectan. (Anexo IV, guía de práctica No. 2 y No. 3 de corto circuito).

- Para definir los límites de reactivos de generadores se dispone de una opción que permite ingresar la curva de capacidad reactiva, definiendo para una salida específica de MW, los valores mínimo y máximo de potencia reactiva (Anexo IV, guía de práctica No. 2 de flujos de carga).

- Permite efectuar control de generación en un área específica por varios métodos: Control de participación de los generadores del área, el cual presenta varias opciones para definir la contribución de cada generador por medio de factores de participación (Anexo IV, guía de práctica No. 7 de flujos de carga); Control por despacho económico, Control por flujo óptimo de potencia y Control por la barra slack del sistema.
- Una de las limitaciones presentadas por el programa es que para el modelado de motores, no existe un elemento que permita definirlos específicamente. La alternativa disponible para motores síncronos es tomarlos como si fueran generadores, teniendo claro que la salida de potencia tanto activa como reactiva debe ser especificada como un valor negativo (Anexo IV, guía de práctica No. 4 de corto circuito).
- Para cálculos de fallos el **PowerWorld Simulator** permite visualizar únicamente las corrientes de fallo en una sola barra a la vez, es decir, no hay posibilidad de encontrar las corrientes de fallo sobre cada barra del sistema en una sola simulación (Anexo IV, guías de prácticas de corto circuito).
- La presentación de los resultados de los cálculos de fallos, difiere de la efectuada por el programa para los cálculos de flujo de carga. En el último caso, los resultados se presentan compendiados para todos los elementos en un sólo listado, mientras que en el primer caso, los resultados se presentan como tablas para cada elemento por separado. Lo anterior limita la visualización global de los resultados y dificulta la portabilidad de los mismos, haciendo necesario para efectos de ensamblar un sólo reporte, copiar y pegar reiteradamente los resultados de cada elemento del sistema (Anexo IV, guías de prácticas de corto circuito).
- En el análisis de fallos, el programa **PowerWorld Simulator** tiene en cuenta los parámetros de las cargas en los cálculos de la corriente de fallo, a

diferencia de lo encontrado usualmente en la bibliografía y en otros programas. Estos parámetros son tomados por el programa en los estudios de fallos como admitancias de secuencia en paralelo con las barras de carga. De otra parte, aunque no se permite definir explícitamente la conexión a tierra de la carga, esta se puede tener en cuenta en los datos de admitancia de secuencia cero (Anexo IV, guía de práctica No. 2 de corto circuito).

- Se puede realizar el análisis de fallos sobre cualquier parte de una línea de transmisión; en el fondo lo que el programa realiza es un fallo sobre una nueva barra ingresada al sistema y ubicada en el lugar especificado para el fallo sobre la línea (Anexo IV, guía de práctica No. 3 de corto circuito).
- Una de las debilidades de este programa y de la mayoría de programas comerciales disponibles para la simulación de sistemas de potencia es que no permiten la simulación de cargas desbalanceadas.

### **1.3 SIMULACIÓN DE LOS CASOS DE PRUEBA DE 9 Y DE 14 BARRAS DEL IEEE**

#### **1.3.1 Caso de prueba de 9 barras simulado con PowerWorld Simulator 7.0**

El diagrama unifilar correspondiente al sistema de 9 barras del IEEE se muestra en la Figura 1.1 [8]. Los datos de las magnitudes y ángulos de los voltajes de barra proporcionados por el IEEE se muestran en la Tabla 1.1. En esta tabla se presentan también los datos de los voltajes de barra resultantes de la simulación del sistema de 9 barras en **PowerWorld Simulator**, utilizando una precisión de 0,1 MVA con el método de Newton Raphson completo.

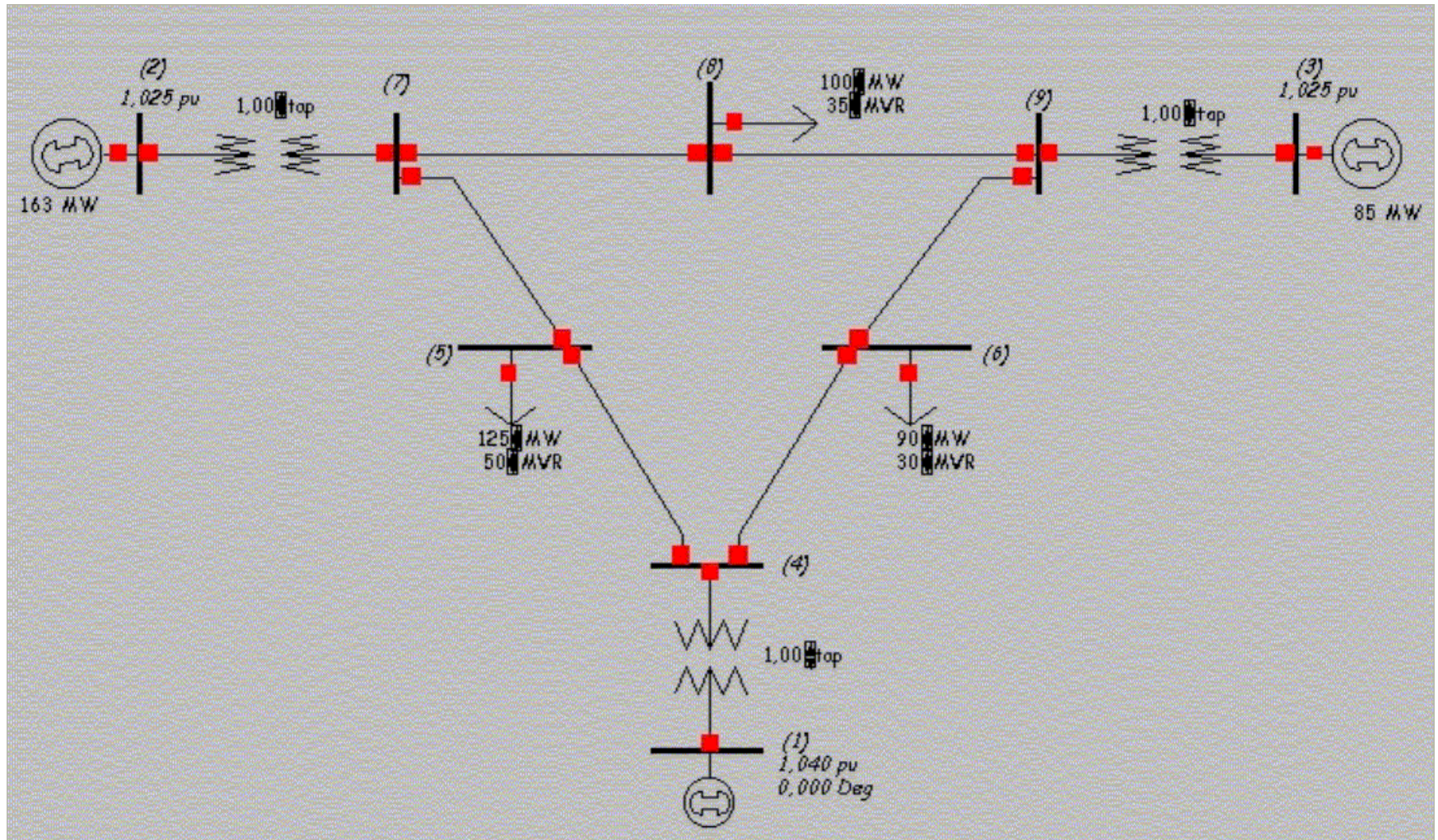


Figura 1.1. Diagrama unifilar en PowerWorld Simulator del sistema de 9 barras – IEEE.

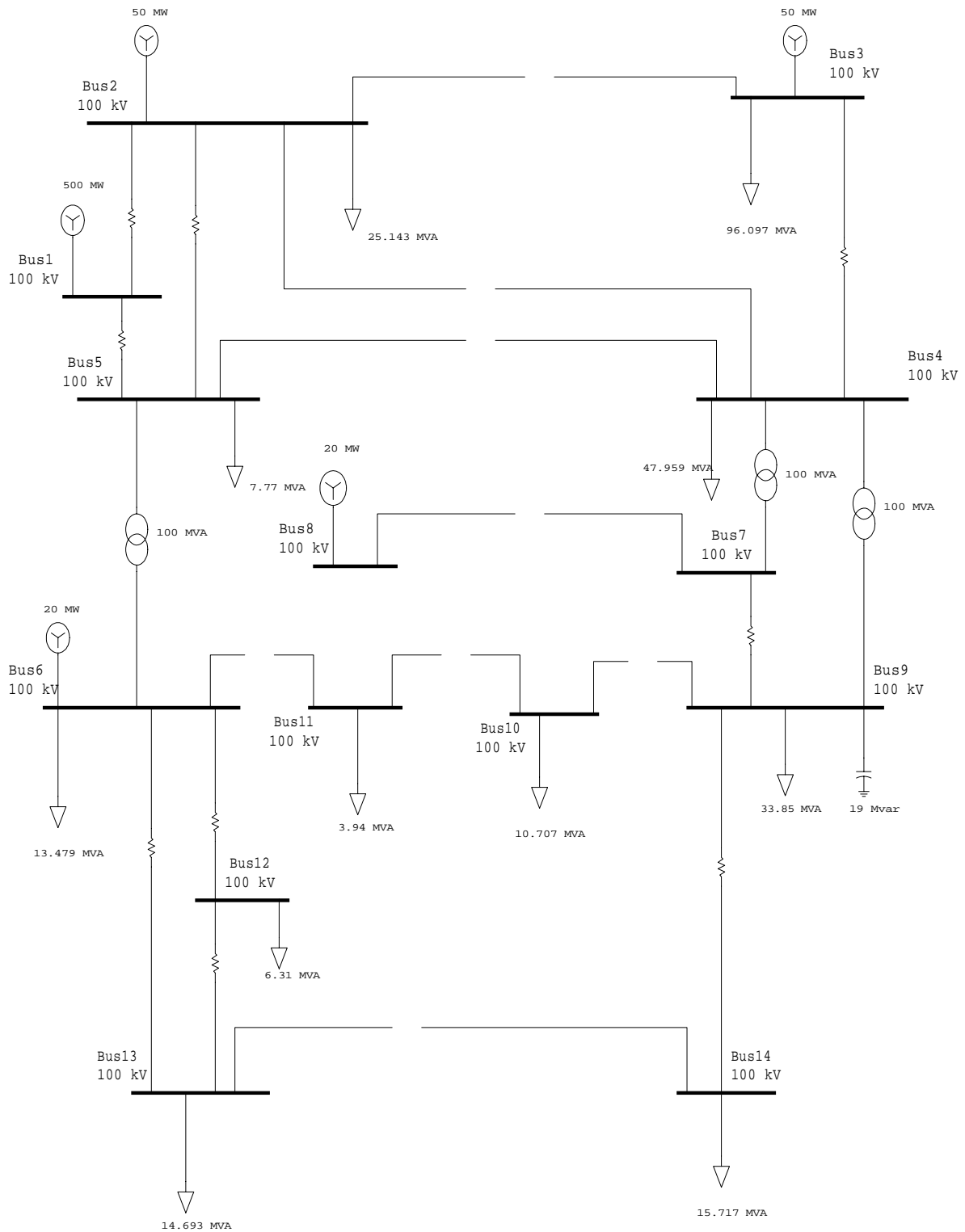
**Tabla 1.1. Voltajes de barra para el caso de prueba de 9 barras: datos IEEE [8] [9] y datos resultantes en PowerWorld Simulator.**

Barra	Datos IEEE		Datos resultantes en PowerWorld Simulator	
	V  (p.u.)	$\delta$	V  (p.u.)	$\delta$
1	1,0400	0,0000	1,0400	0,0000
2	1,0250	9,2800	1,0250	9,2802
3	1,0250	4,6647	1,0250	4,6649
4	1,0250	-2,2160	1,0260	-2,2166
5	0,9950	-3,9880	0,9960	-3,9887
6	1,0120	-3,6870	1,0130	-3,6870
7	1,0250	3,7197	1,0260	3,7200
8	1,0150	0,7275	1,0160	0,7280
9	1,0320	1,9667	1,0320	1,9670

La comparación de los resultados de la Tabla 1.1 muestra que la diferencia en las magnitudes y ángulos de los voltajes de barra es muy pequeña. El máximo error que se presenta para las magnitudes del voltaje de barra es de 0,1005 % y corresponde al voltaje de la barra 5. El máximo error para los ángulos de los voltajes de barra se presenta sobre la barra 8 y es de 0,0687 %. Tanto para magnitudes como para ángulos, los valores obtenidos con el programa son iguales o ligeramente superiores a los dados por el IEEE. Asumiendo los errores totales en cada barra como la suma del error de magnitud y del error de ángulo, el máximo porcentaje de error que se presenta es de 0,1673 % sobre la barra 8. Los valores anteriores demuestran la eficiencia del programa **PowerWorld Simulator** en la solución de flujos de carga.

### 1.3.2 Caso de prueba de 14 barras simulado con Etap PowerStation 3.02

El diagrama unifilar correspondiente al sistema de 14 barras del IEEE se muestra en la Figura 1.2 [9].



**Figura 1.2. Diagrama unifilar en ETAP PowerStation del sistema de 14 barras – IEEE.**

Los datos de las magnitudes y ángulos de los voltajes de barra proporcionados por el IEEE se muestran en la Tabla 1.2. En esta tabla se presentan también los datos de los voltajes de barra resultantes de la simulación del sistema de 14 barras en **ETAP PowerStation**, los cuales resultaron idénticos tanto con los métodos Newton Raphson y Newton Raphson Desacoplado Rápido con una precisión de  $1E-4$  MW y de Gauss Seidel Acelerado ( $\alpha = 1,5$ ) con una precisión de  $1E-6$  en la diferencia del voltaje. El diagrama unifilar correspondiente al sistema de 14 barras del IEEE se muestra en la Figura 1.2 [9].

**Tabla 1.2. Voltajes de barra para el caso de prueba de 14 barras: datos IEEE [9] y datos resultantes en ETAP PowerStation.**

Barra	Datos IEEE		Datos resultantes en ETAP PowerStation	
	V  (p.u.)	$\delta$	V  (p.u.)	$\delta$
1	1,0600	0,0000	1,0600	0,0000
2	1,0450	-4,9800	1,0450	-5,4000
3	1,0100	-12,7100	1,0100	-13,4000
4	1,0180	-10,3200	1,0163	-11,0000
5	1,0200	-8,7820	1,0181	-9,4000
6	1,0700	-14,2200	1,0700	-15,4000
7	1,0620	-13,3600	1,0593	-14,4000
8	1,0900	-13,3600	1,0900	-14,4000
9	1,0560	-14,9400	1,0522	-16,1000
10	1,0510	-15,1000	1,0471	-16,3000
11	1,0570	-14,7900	1,0546	-16,0000
12	1,0550	-15,0700	1,0535	-16,4000
13	1,0500	-15,1500	1,0482	-16,4000
14	1,0350	-16,0300	1,0312	-17,3000

La comparación de los resultados de la Tabla 1.2 muestra que la diferencia en las magnitudes y ángulos de los voltajes de barra es muy pequeña. Los resultados por medio de los tres métodos (Newton Raphson, Newton Raphson Desacoplado Rápido, Gauss Seidel Acelerado) fueron exactamente iguales. El máximo error que se presenta en las magnitudes de los voltajes de las barras es de 0,3711 % y corresponde al voltaje de la barra 10; el máximo error para los ángulos de los voltajes de las barras se presenta sobre la barra 12 y es de 8,8255 %. Para las magnitudes, los valores obtenidos con el programa son iguales o ligeramente inferiores a los dados por el IEEE, lo contrario sucede con los ángulos que son superiores a los dados por el IEEE. Si se asume el error total en cada barra como la suma de los errores de magnitud y de ángulo, el mayor error es de 8,6738 % y se presenta en la barra 12. Se observa que hay un error considerable en los ángulos que puede ser a causa de los transformadores, por la razón dada en el numeral (1.1.5).

## **1.4 SIMULACIÓN DE LA RED A 115 kV DEL SISTEMA CHEC CON ETAP POWERSTATION 3.02**

### **1.4.1 Descripción general del sistema**

La red a 115 kV del sistema CHEC consta de 29 nodos entre los cuales se encuentran las barras de transferencia o intercambio con otras empresas de energía. Estas barras son: Subestación San Felipe a 220 kV (electrolima), Subestación Cartago a 115 kV (EPSA), Subestación la Esmeralda-ISA a 220 kV (ISA), Subestación La Virginia a 220 kV (ISA). Este sistema cuenta con una generación propia de 190,4 MW distribuidos entre las siguientes centrales eléctricas así: San Francisco con tres generadores con un total de 135 MW (funciona sólo en horas pico), Ínsula con tres generadores con un total de 15 MW, Plantas menores (Municipal, Intermedia, Sancancio) con un total de 3,8 MW, Esmeralda con dos generadores con un total de 30 MW, Rionegro con dos generadores con un total de 6,6 MW. Existe otra central generadora

(Termodorada) con un generador de 47,7 MW que normalmente se encuentra fuera de servicio.

En cuanto a líneas de transmisión se tiene un total de 497 kilómetros de longitud. La carga total alimentada por el sistema CHEC es de aproximadamente 510,653 MW + j 165,747 MVar. El diagrama unifilar se muestra en el Anexo V.

#### **1.4.2 Observaciones previas a la simulación**

- La información fue suministrada por el Departamento de Planeación de la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC). Dentro de la información suministrada no se cuenta con todos los parámetros de impedancias de transformadores, ni con los parámetros:  $X/R$ ,  $Td0'$ , conexión y puesta a tierra de los generadores. Por lo que se consideró asumir los parámetros típicos contenidos en el programa y seleccionar la conexión en Y aterrizada en todos los generadores.
- Aunque la mayoría de los transformadores del sistema CHEC son tridevanados, por simplicidad en esta simulación se modelaron como bidevanados. De otra parte, en los casos en los que en el sistema se tienen varios transformadores en paralelo, estos se simularon como un sólo transformador equivalente con potencia igual a la suma de los transformadores en paralelo y con una impedancia equivalente al paralelo de sus impedancias. De igual forma se procedió con los generadores en paralelo, simulándose estos como un generador equivalente con potencia igual a la suma de las potencias de los generadores en paralelo y una impedancia equivalente al paralelo de sus impedancias.
- Por simplicidad todas las cargas se asumieron estáticas.

- Dada la cantidad de elementos involucrados, se presentó un volumen de información considerable que fue ingresado de manera ordenada, comenzando con los datos de las barras, luego los de las líneas de transmisión y por último los de los generadores y cargas respectivamente.
- El proceso de selección del método de simulación de flujos de carga para los distintos escenarios de carga fue el siguiente: primero se prueba con Newton Raphson; si este no converge se selecciona el de Newton Raphson Desacoplado Rápido y si este no converge se elige el Gauss-Seidel Acelerado con un factor de aceleración de 1.5. Es de anotar que con cualquiera de los métodos siempre se elige su máxima precisión.

#### 1.4.3 Análisis de la simulación de flujos de carga

La simulación de flujos de carga fue realizada en cuatro diferentes escenarios de carga: alta, media y baja, tomados de acuerdo a la definición de la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG). De la información disponible se estableció la carga nominal como el valor máximo de carga (7 p.m.); la carga alta, media y baja tomada como el 70%, 55% y 30% respectivamente del valor máximo de carga. Los resultados completos de la simulación se encuentran en el Anexo V.

- **Simulación con la carga nominal:** la simulación fue realizada utilizando el método de Gauss-Seidel Acelerado, el total de iteraciones fue de 1823 (partiendo de un inicio plano). De la simulación se puede observar que todas la barras tienen un perfil de voltaje dentro del 10% por encima y por debajo establecido en Colombia para el funcionamiento de sistemas eléctricos con niveles de tensión iguales o inferiores a 230 kV.

Si se compara con los perfiles de voltaje establecidos por el IEEE de  $\pm 5\%$  se encuentra que las barras de La Tebaida, Armenia y Regivit están por fuera de ese límite.

- **Simulación con el 70% de la carga:** la simulación fue realizada utilizando el método Desacoplado Rápido, el total de iteraciones fue de 38 (teniendo como aproximación inicial para los voltajes de barra el resultado de la simulación con la carga de diseño). De la simulación se puede observar que todas las barras mejoran su perfil de voltaje, resultado que es de esperarse.
- **Simulación con el 55% de la carga:** esta simulación se hizo sin tener en cuenta la generación de San Francisco puesto que esta sólo funciona en horas pico. La simulación fue realizada utilizando el método Desacoplado Rápido, el total de iteraciones fue de 27 (teniendo como aproximación inicial para los voltajes de barra el resultado de la simulación con el 70% de la carga). De la simulación se puede observar que todas la barras conservan su perfil de voltaje dentro de los límites permitidos.
- **Simulación con el 30% de la carga:** al igual que el paso anterior no se tiene en cuenta la generación de San Francisco. La simulación fue realizada utilizando el método de Gauss-Seidel Acelerado, el total de iteraciones fue de 2426 (teniendo como aproximación inicial para los voltajes de barra el resultado de la simulación con el 55% de la carga). De la simulación se puede observar que todas la barras conservan su perfil de voltaje dentro de los límites establecidos.

De las cuatro condiciones de carga simuladas se observa que el sistema CHEC a 115 kV presenta buenos niveles de tensión. Debe observarse además, que dada su escasa capacidad de generación y el volumen de la carga conectada, el sistema debe comprar energía aún en condiciones de carga baja.

Finalmente se encuentra que las líneas del sistema no presentan sobrecarga, más bien, podría decirse que se encuentran subutilizadas.

#### **1.4.4 Análisis de la simulación de corrientes de corto circuito**

Con el objeto de calcular las mayores corrientes de corto circuito se optó por efectuar una simulación a  $\frac{1}{2}$  ciclo basada en las normas ANSI / IEEE. Como era de esperarse las corrientes de falla más grandes se presentaron en las barras de generación, siendo la mayor la presentada en la barra del generador de San Francisco, dada la pequeña impedancia equivalente vista desde este punto. Las corrientes de falla halladas en esta barra son:

- Fallo trifásico: 97,291 kA.
- Fallo línea a tierra: 93,332 kA.
- Fallo doble línea: 84,256 kA.
- Fallo doble línea a tierra: 95,580 kA.

El resumen de las corrientes de falla en todas las barras se encuentra en el Anexo V.

#### **1.5 OTROS PROGRAMAS DE SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE POTENCIA**

Esta es una invitación a explorar el mundo de los programas comerciales, sabiendo desde ya que su costo difícilmente está al alcance de estudiantes e instituciones. Dichos programas en algunos casos proponen ejemplos desarrollados que pueden ser de gran utilidad en la comprensión de la solución de distintos problemas, de los datos empleados en la misma y de los resultados que deben obtenerse y cómo estos se presentan. Un listado de algunos de estos programas se encuentra en el Anexo VI.

## CONCLUSIONES

Además de las observaciones efectuadas en los apartados (1.1.5), (1.2.5), (1.3.1), (1.3.2), (1.4.3) y (1.4.4), muchas de las cuales pueden considerarse como conclusiones específicas, pueden mencionarse las siguientes conclusiones generales:

- El desarrollo de prácticas de simulación, constituye un elemento primordial en la educación de Ingeniería Eléctrica a nivel universal, ya que no sólo proporciona al estudiante una forma cercana de observar los fenómenos físicos analizados en las clases teóricas sino que también brinda una oportunidad para que el aprendizaje de los conceptos fundamentales se realice de una manera dinámica.
- En el área particular de sistemas de potencia, el uso de prácticas de simulación para realizar estudios de flujos de carga, de corto circuito y demás estudios afines, se constituye en una herramienta complementaria a las clases teóricas y en la forma más cercana de interactuar con un sistema de potencia real.

La limitación en el uso de estas prácticas para simular sistemas reales con fines didácticos viene dada por el acceso a la información de los mismos, la capacidad que tienen los programas de simulación y el acceso a estos por parte de los estudiantes.

- Para la realización de las prácticas de simulación (tanto de flujos de carga como de corto circuito) se requiere de un completo entendimiento del soporte teórico. Este se constituye en la base para la formulación de las mismas, así

como para el usuario, en el fundamento de una correcta interpretación y análisis de resultados.

- Con la simulación de la red a 115 kV del sistema CHEC se logró obtener un acercamiento a estudios de flujo de carga y corto circuito de un sistema de potencia real. Además, se observó que pese a algunas limitaciones en la información, los resultados de los cálculos de flujo de carga (voltajes de barra) y de corto circuito son similares a los empleados por la empresa.
- De la simulación de los casos de prueba del IEEE se observa que este tipo de herramientas computacionales presentan un funcionamiento general bastante bueno y proporcionan unos resultados de simulación de una precisión considerable.

## RECOMENDACIONES

- Sería deseable considerar en la asignatura de Sistemas de Potencia II de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales incluir en los temas de flujo de carga y despacho económico, conceptos de programación de intercambio de potencia activa entre áreas, lo que puede ser simulado en **PowerWorld Simulator 7.0**. De manera análoga introducir la aplicación de las normas ANSI / IEEE e IEC en el cálculo de las corrientes de fallo, lo cual puede ser simulado en **ETAP PowerStation 3.02**.
- Hacer uso de los otros módulos disponibles tanto en el programa **ETAP PowerStation 3.02** (arranque de motores, estudios de estabilidad transitoria, estudios de armónicos, coordinación de protecciones), como en el programa **PowerWorld Simulator 7.0** (flujo de potencia óptimo, despacho económico, capacidad de transferencia disponible, estabilidad, contingencias) en aplicaciones didácticas como las aquí presentadas.

## **PERSPECTIVAS**

- De las recomendaciones efectuadas realizar trabajos como el presente en los siguientes temas: arranque de motores, estabilidad, armónicos, coordinación de protecciones, flujo de potencia óptimo, flujo de potencia en condiciones desbalanceadas, despacho económico, capacidad de transferencia disponible, contingencias; acopiando la información teórica necesaria para los mismos y desarrollando herramientas computacionales o haciendo uso de las ya existentes.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] IEEE Std 399-1990, Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis.
- [2] IEEE POWER ENGINEERING SOCIETY, PEEC. “Electrical Engineering Curricula content in the 21<sup>st</sup> century”. IEEE Transactions on Power Systems Vol. 9 No. 3, Agosto 1.994.
- [3] DOULAI, P. “Computer assisted teaching/learning method for power systems education”, Conference paper presented at IPEC'95 (Singapore), postscript version en <http://www.uow.edu.au/pwrsysed/papers/ipe95a.ps>.
- [4] DOULAI, P. “Power Systems Simulation Laboratory – Symmetrical short circuit”, “Power Systems Simulation Laboratory – short circuit”, Computer Simulation Tasks, 1993/1994. [http://www.uow.edu.au/pwrsysed/proj\\_gif/](http://www.uow.edu.au/pwrsysed/proj_gif/)
- [5] CAÑIZARES, C. “Computer Simulation of Power Systems – Power Flow”, E&CE 465, Selected Papers On-line, febrero 2001. <http://www.power.uwaterloo.ca/~claudio/courses/ece465/summary3.pdf>
- [6] Universidad de Alberta (Canadá). “Power System Design and Simulation Lab. Manual”. <http://www.ee.ualberta.ca/~wxu/teach/lab.zip>.
- [7] Operation Technology Inc. ETAP PowerStation User Guide Release 3.01.
- [8] ANDERSON, P. M, FOUAD, A. A. *Power System Control and Stability*. NewYork: IEEE Press, 1.997.

- [9] ZHANG Yiwei. <ftp://166.111.60.30/ywzhang/datazip/>.
- [10] PowerWorld Corporation. PowerWorld Simulator Version 7.0 User's Guide.
- [11] LAI, L. L. "Computer Assisted Learning In Power System Relaying", IEEE Transactions on Education, Vol. 38, No. 3, pp. 217-222, Agosto 1995.
- [12] WEEDY, B. M. *Sistemas Eléctricos de Gran Potencia*, España: Editorial Reverté, 1978 .
- [13] SASSON, A. M, JAIMES, F. J. "Digital Methods Applied to Power Flow Studies", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-86, No. 7, pp. 860-867, Julio 1967.
- [14] HATZIARGYRIOU, N. D. "The educational role of personal computers in power system laboratories", IEEE Transaction on Education, vol. 32, No. 2, Mayo 1989.

## **ANEXO I**

### **ANÁLISIS DE FLUJOS DE CARGA**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>LISTADO DE FIGURAS.....</b>	<b>1</b>
<b>1. ANÁLISIS DE FLUJO DE CARGA .....</b>	<b>2</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	2
1.2 EL PROBLEMA DE FLUJO DE CARGA.....	4
1.3 MÉTODOS DE SOLUCIÓN DE FLUJOS DE CARGA.....	9
1.3.1 ALGORITMOS DE SOLUCIÓN ITERATIVOS.....	12
1.3.1.1 MÉTODO DE GAUSS-SEIDEL USANDO Y-BARRA.....	12
1.3.1.2 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON.....	14
1.3.1.3 MÉTODO DESACOPLADO RÁPIDO .....	17
1.3.2 OTROS MÉTODOS DE SOLUCIÓN .....	19
1.4 TRANSFORMADORES REGULANTES .....	20
1.5 CORRIENTES Y FLUJOS DE POTENCIA A TRAVÉS DE LÍNEAS Y CABLES DE TRANSMISIÓN.....	25
1.6 CORRIENTES Y FLUJO DE POTENCIA A TRAVÉS DE TRANSFORMADORES .....	27
1.7 CONTROL .....	28
1.8 DESPACHO ECONÓMICO .....	29
1.9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30

**LISTADO DE FIGURAS**

	Pág.
<b>Figura 1.1.</b> Diagrama detallado de reactancias en por unidad para un transformador regulante con relación $1/t$ conectado entre las barras $i$ y $j$ .	21
<b>Figura 1.2.</b> Circuito equivalente $\pi$ del transformador de la Figura 1.1 en términos de su admitancia nominal y de la relación de transformación.	22
<b>Figura 1.3.</b> Representación del transformador con su admitancia en el lado opuesto al de las derivaciones y relación de transformación $1:a$ .	23
<b>Figura 1.4.</b> Circuito equivalente del transformador cuando $a$ es real.	24
<b>Figura 1.5.</b> Datos de línea utilizados en el cálculo de flujos de carga.	26
<b>Figura 1.6.</b> Datos del transformador usados en el flujo de carga.	27

## 1. ANÁLISIS DE FLUJO DE CARGA

### 1.1 INTRODUCCIÓN

El continuo crecimiento de la demanda de energía eléctrica debido al aumento de industrias, centros comerciales, y áreas residenciales, hace que nunca se termine de adicionar componentes a los sistemas de potencia. El ingeniero de diseño debe decidir que componentes debe adicionar al sistema muchos años antes de que estos sean puestos en operación y esto lo hace por medio de estudios de flujo de carga.

El flujo de carga o flujo de potencia es la herramienta básica para determinar las condiciones de operación en estado estable de un sistema de potencia. En general, el flujo de carga se realiza para la planificación, diseño y funcionamiento de sistemas de potencia bajo varias condiciones de operación y para estudiar los efectos de cambios en configuraciones de los equipos, además de análisis de contingencias, despacho optimo, estabilidad, entre otros estudios.

Las dificultades y la importancia del problema de flujo de potencia han fascinado a matemáticos e ingenieros en todo el mundo por muchos años [1]. Muchas personas han dedicado una gran parte de su vida profesional a la solución de este problema. Este ha recibido más atención que la combinación de todos los otros problemas de sistemas de potencia. La cantidad de esfuerzo dedicado al problema se ha convertido en una gran cantidad de publicaciones técnicas al respecto. La naturaleza del problema hace que no exista un procedimiento perfecto para su solución. Por consiguiente, es probable que los métodos de solución mejoren a lo largo del tiempo.

Analizar la solución de este problema para numerosas condiciones, ayuda a asegurar que el sistema de potencia se diseña para satisfacer un criterio de funcionamiento mientras se incurre en los más favorables costos de inversión y operación.

Algunos ejemplos de los usos de los estudios de flujo de carga son determinar:

- Componentes o cargas del circuito.
- Voltajes de barra de estado estable.
- Flujos de potencia reactivos.
- Puesta de taps de transformadores.
- Pérdidas del sistema.
- Fijar puntos del excitador / regulador de voltaje del generador.
- Funcionamiento bajo condiciones de emergencia.

Los programas de computadora para resolver flujos de carga están divididos en dos tipos - estáticos (fuera de línea) y dinámicos (tiempo real). La mayoría de los estudios de flujo de carga para el análisis del sistema son basados en modelos de red estática. Los flujos de carga en tiempo real que incorporan datos de entrada de la red actual son típicamente usados por empresas de servicio en sistemas automáticos de control supervisor y adquisición de datos (SCADA). Tales sistemas son usados principalmente como herramientas de operación para optimización de generación, control de reactivos, despacho, pérdidas, y control de las líneas de enlace. En este trabajo sólo se tienen en cuenta los modelos de redes estáticas y su análisis.

Un cálculo de flujo de carga determina el estado del sistema de potencia para una carga y distribución de generación dada. Esto representa una condición de estado estable como si esa condición tuviera que ser mantenida fija por algún tiempo. En realidad, los flujos de las líneas y los voltajes de barra fluctúan constantemente en pequeñas cantidades debido a la frecuente conexión y desconexión de cargas

como iluminación, motores y otras cargas que se encienden y se apagan. Sin embargo, estas pequeñas fluctuaciones pueden ignorarse calculando los efectos de estado estable en los equipos del sistema.

Como la distribución de carga y posiblemente la red, variará considerablemente durante periodos de tiempo diferentes, puede ser necesario obtener soluciones de flujo que representen diferentes condiciones del sistema como carga pico, carga promedio o carga ligera. Estas soluciones se usarán para determinar el modo de operación óptimo bajo dichas condiciones, así como la puesta a punto de los dispositivos de control de voltaje o cómo el sistema responderá a condiciones anormales, tal como salidas de líneas o transformadores. Los flujos de carga permiten inferir sobre nuevas adiciones de equipo y sobre la efectividad de nuevas alternativas para resolver deficiencias o requisitos presentes y/o futuros.

Los análisis de flujos de carga también son básicos para otros tipos de estudios como corto-circuito, estabilidad, arranque de motores y estudios de armónicos.

## **1.2 EL PROBLEMA DE FLUJO DE CARGA**

El problema de flujo de carga puede ser definido como el cálculo de las potencias activa y reactiva que fluye en cada rama y la magnitud y ángulo de fase de los voltajes de cada barra de un sistema de potencia para condiciones de carga y generación dadas. El término sistema de potencia incluye el juego de plantas de generación de energía, líneas de transmisión, subestaciones y la distribución física de la demanda de energía. La información obtenida del estudio de flujo de carga, puede ser usada para probar la capacidad del sistema para transmitir energía del punto de generación a la carga sin sobrecargar las líneas y determinar la adecuación de la regulación de voltaje, por medio de capacitores en paralelo, reactores en paralelo, transformadores con cambiadores de tomas (taps) y compensación de reactivos por medio de máquinas rotativas.

Es posible definir la potencia de una barra en términos de la potencia generada, la potencia de la carga y la potencia inyectada al sistema (transmitida) desde dicha barra. Por ejemplo, la potencia de la barra *i*ésima de un sistema de potencia de *n* barras puede ser expresada como:

$$S_i = P_i + jQ_i = (P_{Gi} - P_{Li} - P_{Ti}) + j(Q_{Gi} - Q_{Li} - Q_{Ti}) \quad (1.1)$$

Donde,

$S_i$  = Potencia trifásica compleja en la *i*ésima barra

$P_i$  = Potencia trifásica real en la *i*ésima barra

$Q_i$  = Potencia trifásica reactiva en la *i*ésima barra

$P_{Gi}$  = Potencia trifásica real generada en la *i*ésima barra

$P_{Li}$  = Potencia trifásica real de la carga en la *i*ésima barra

$P_{Ti}$  = Potencia trifásica real inyectada al sistema en la *i*ésima barra

$Q_{Gi}$  = Potencia trifásica reactiva generada en la *i*ésima barra

$Q_{Li}$  = Potencia trifásica reactiva de la carga en la *i*ésima barra

$Q_{Ti}$  = Potencia trifásica reactiva inyectada al sistema en la *i*ésima barra

En estudios de flujos de carga la suposición básica es que el sistema de potencia es un sistema trifásico balanceado que opera en condiciones de estado estable con una frecuencia constante de 60 Hz. Por consiguiente, el sistema puede ser representado por su red de secuencia positiva con impedancias concentradas en serie y ramas en paralelo. El problema de flujo de carga puede ser resuelto usando la representación del sistema por medio de la matriz de admitancia ( $Y_{barra}$ ) o usando la matriz de impedancia ( $Z_{barra}$ ). Por lo tanto si los voltajes de las barras son conocidos, las corrientes de las barras pueden ser expresadas como:

$$[I_{barra}] = [Y_{barra}] [V_{barra}] \quad (1.2)$$

O en su forma inversa

$$[V_{barra}] = [Y_{barra}]^{-1} [I_{barra}]$$

$$[V_{barra}] = [Z_{barra}] [I_{barra}] \quad (1.3)$$

Para cada línea de interconexión es necesario conocer los valores numéricos de la impedancia serie “z” y de la admitancia total de carga de la línea “y”, esta última expresada generalmente en términos de sus MVAR de carga a voltaje nominal de forma que la computadora pueda determinar los elementos de la matriz de admitancias de barra de la que un elemento típico de  $Y_{ij}$  tiene la forma:

$$Y_{ij} = |Y_{ij}| \angle \theta_{ij} = |Y_{ij}| \cos \theta_{ij} + j |Y_{ij}| \text{sen} \theta_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \quad (1.4)$$

El voltaje en una barra típica  $i$  del sistema está dado en coordenadas polares por:

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i = |V_i| (\cos \delta_i + j \text{sen} \delta_i) \quad (1.5)$$

La corriente total que se inyecta en la red a través de la barra  $i$  en términos de los elementos  $Y_{in}$  de  $Y_{barra}$  esta dada por:

$$I_i = \sum_{n=1}^N Y_{in} V_n \quad (1.6)$$

El complejo conjugado de la potencia que se inyecta a la barra  $i$ ésima:

$$P_i - jQ_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \angle (\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (1.7)$$

Al expandir esta ecuación e igualar partes real y reactiva, se obtiene:

$$P_i = \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \cos(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (1.8)$$

$$Q_i = - \sum_{n=1}^N |Y_{in} V_i V_n| \operatorname{sen}(\theta_{in} + \delta_n - \delta_i) \quad (1.9)$$

Las ecuaciones (1.8) y (1.9) constituyen la forma polar de las ecuaciones de flujo de potencia.

Cuatro cantidades potencialmente desconocidas que se asocian con cada barra  $i$  son:  $P_i$ ,  $Q_i$ , el ángulo de voltaje  $\delta_i$  y la magnitud del voltaje  $|V_i|$ . Las magnitudes y ángulos de los voltajes de barra que no se programan en los datos de entrada de los flujos de potencia se llaman variables de estado, porque sus valores (que describen el estado del sistema) dependen de las cantidades especificadas en todas las barras. Dos de las cuatro pueden ser variables independientes y son especificadas y las otras dos deben ser determinadas. Las cantidades especificadas se seleccionan de acuerdo con el siguiente análisis:

1. Barras de carga. Son barras que no tienen generación, por lo tanto se trabajan con valores de generación iguales a cero, cuando se encuentran cargas conectadas a estas, las potencias de las cargas se toman como entradas negativas al sistema. Estas barras también pueden ser solo puntos de interconexión donde tanto la generación como la carga son iguales a cero. Los datos de las cargas se conocen de los registros históricos, de la planeación de cargas o de mediciones. Con frecuencia, en la práctica solo se conoce la potencia real; la potencia reactiva se basa en un factor de potencia supuesto tal como 0,85 o mayor. Las dos cantidades desconocidas que van a ser determinadas para la barra son  $\delta_i$  y  $|V_i|$ . Estas barras son conocidas como barras P-Q.

2. Barras de voltaje controlado. Son barras del sistema en las que se mantiene constante la magnitud del voltaje. En las barras en las que hay un generador conectado se puede controlar la generación en MW por medio del ajuste de la fuente de energía mecánica y la magnitud del voltaje puede ser controlada al ajustar la excitación de corriente continua del generador. En una barra de voltaje controlado el ángulo del voltaje  $\delta_i$  es la cantidad desconocida a ser calculada y después de que se ha resuelto el problema de flujo de potencia se puede calcular  $Q_i$  por medio de la ecuación (1.9). Ciertas barras sin generadores pueden tener la capacidad de controlar el voltaje; a tales barras también se les llama barras de voltaje controlado y la potencia real que generan es simplemente cero. Son llamadas también barras P-V.
  
3. Barra de compensación. El ángulo del voltaje de la barra de compensación sirve como referencia para los ángulos de todos los demás voltajes de barra. El ángulo que se le asigne al voltaje de la barra de compensación no es de importancia puesto que son las diferencias de ángulo entre las barras las que determinan los valores calculados de  $P_i$  y  $Q_i$  en las ecuaciones (1.8) y (1.9). Generalmente se selecciona  $\delta = 0^\circ$ . La magnitud del voltaje de esta barra se especifica como la otra cantidad conocida y generalmente se toma como 1.0 p.u. Esta barra es de libre ajuste con el objeto de cubrir las pérdidas de transmisión del sistema.

Es posible que algunas barras de carga tengan transformadores dotados de cambiadores de taps y deslizadores de fase. Este tipo de barra de carga es conocida como **barra de carga de voltaje controlado**. En una barra de carga de voltaje controlado, las cantidades conocidas son la magnitud del voltaje y la potencia real y reactiva y las cantidades desconocidas son el ángulo de fase del voltaje y la relación de transformación.

La especificación de la barra es la herramienta con que el ingeniero manipula la solución del flujo de carga para obtener la información deseada.

La especificación del generador de sostener el voltaje constante y calcular la potencia reactiva de salida, será anulada en la solución del flujo de carga si la salida de reactivos del generador sobrepasa sus límites máximo o mínimo. En este caso la potencia reactiva del generador será mantenida en el valor límite sobrepasado y se permitirá que el voltaje de la barra varíe, es decir, que durante este proceso de cálculo, la barra de voltaje controlado será considerada como una barra de carga.

### 1.3 MÉTODOS DE SOLUCIÓN DE FLUJOS DE CARGA

Antes de 1929 todos los flujos de potencia fueron calculados a mano. En 1929, calculadores de redes (de Westinghouse) o analizadores de redes (de General Electric) se utilizaron para realizar cálculos de flujo de carga. El primer documento que describe el primer método digital para resolver el problema de flujo de carga fue publicado en 1954 [1]. Sin embargo, el primer método digital exitoso fue desarrollado por Ward and Hale en 1956 [1].

La mayoría de los primeros métodos iterativos están basados en la matriz  $Y_{\text{barra}}$  del método de Gauss-Seidel. Este requiere cantidades mínimas de almacenamiento computacional y necesita un reducido número de iteraciones para redes pequeñas. Desafortunadamente a medida que el tamaño de las redes aumenta, el número de iteraciones aumenta dramáticamente. En algunos caso el método no llega a la solución.

La lenta convergencia del método de Gauss-Seidel y su frecuente falla bajo ciertas condiciones, produjo el desarrollo de los métodos con la matriz Z-barra. Aunque estos métodos tengan características de convergencia mejores, tienen la desventaja de necesitar gran cantidad de memoria de almacenamiento

computacional, debido a que la matriz Z-barra a diferencia de la matriz Y-barra nunca está esparcida y solo contiene ceros cuando se considera que el sistema esta subdividido en partes independientes a través de circuitos abiertos.

Estas dificultades encontradas en estudios de flujo de carga llevaron al desarrollo del método de Newton-Raphson. El método fue originalmente desarrollado por Van Ness y Griffin y modificado después por otros. El método está basado en el algoritmo de Newton-Raphson para resolver ecuaciones cuadráticas simultáneas en las redes de potencia. Contrario al algoritmo de Gauss-Seidel, este necesita mayor tiempo por cada iteración, pero un menor número de las mismas y es bastante independiente del tamaño de la red. Por consiguiente, la mayoría de los problemas de flujo de carga que no pueden ser resueltos por el método de Gauss-Seidel (por ejemplo sistemas con impedancias negativas) son resueltos sin dificultad por este método. Pero computacionalmente este no es competitivo en grandes sistemas por el aumento del tiempo y de la capacidad de almacenamiento del computador.

El desarrollo de técnicas de eliminación por dispersión programada para resolver ecuaciones simultáneas [1], ha mejorado la eficiencia del método de Newton-Raphson en términos de requerimientos de velocidad y almacenamiento, con lo que este método se ha convertido en uno de los más ampliamente usados. El método ha sido mejorado por la adición de controles y ajustes automáticos (por ejemplo, controles programados en la fase de cambiadores de taps, reguladores de ángulo de fase y control de áreas de intercambio) [1].

Otro método en el que se han realizado muchos esfuerzos de investigación es el método de Newton-Raphson desacoplado. Este método se basa en que durante la operación de redes de transmisión de potencia en estado estable, los acoples entre  $P$ - $V$  (potencias activas y magnitudes de los voltajes de barras) y  $Q$ - $\delta$  (potencias reactivas y ángulos de los voltajes de barra) son relativamente débiles, contrario al fuerte acople entre  $P$  y  $\delta$  y entre  $Q$  y  $V$ . Por consiguiente, este método

resuelve el problema de flujo de carga “*desacoplando*” (es decir resolviendo separadamente) los problemas  $P-\delta$  y  $Q-V$ . Así, la solución es obtenida aplicando una aproximación del método de Newton-Raphson. Este tiene una adecuada precisión y rápida velocidad, por lo que puede ser usado en aplicaciones en línea y evaluación de la seguridad en contingencias.

Cualquier algoritmo empleado para flujos de carga debe ser fiable y debe proporcionar una rápida convergencia. Sin embargo, no todos los métodos son lo suficientemente rápidos y fiables para proporcionar una solución factible en muchos casos de estudio. Por lo que los esfuerzos de los investigadores se han volcado en el desarrollo de métodos numéricos y técnicas de programación que puedan ser usados para resolver problemas de flujo de carga de una manera óptima.

Adicionalmente, los sistemas de potencia y por consiguiente el tamaño de los problemas a resolver está en continuo crecimiento a una tasa tan rápida como el desarrollo de computadores de gran capacidad. Así, la teoría de división de redes, o diakoptics, propuesta por Gabriel Kron y después desarrollada por Happ y otros para flujos de carga, ha recibido una importante atención. De acuerdo a esta teoría, un gran sistema de redes puede ser dividido en piezas por una técnica conocida como “*rompimiento*”, así cada pieza puede ser tomada independientemente y la solución obtenida será sujeta a una transformación para proporcionar la solución del problema original [1].

Los sistemas inteligentes también tienen aplicación en el estudio de sistemas de potencia; por medio de redes neuronales artificiales (RNA) es posible solucionar el problema de flujo de carga. Entre los objetivos de la solución del problema de flujo de carga basado en RNA, se destaca su potencial aplicación para resolver problemas que exigen un gran esfuerzo computacional tales como el análisis de seguridad estática on-line y el análisis de contingencias.

Otro desarrollo interesante en el problema de flujo de carga ha sido el del flujo de carga probabilístico en que las entradas y salidas de una red son tomadas como variables aleatorias. Esto es, a causa de que el problema de flujo de carga es de naturaleza estocástica, puesto que algunos de sus datos de entrada son desconocidos, sus datos de salida (flujos a través de las ramas) pueden ser expresados como un juego de posibles valores que corresponden a la frecuencia de ocurrencia o en función de la distribución de probabilidad. Lo desconocido, asociado con los datos de entrada, es debido a: (1) incierta previsión de la demanda causada por aspectos económicos, etc.; (2) variación de la carga debido a condiciones del clima y prácticas de manejo de cargas; (3) no-disponibilidad (por ejemplo, debido a las salidas forzadas o a mantenimiento) de generadores y las instalaciones de transmisión; (4) retardo en la instalación de nueva generación e instalaciones de transmisión; (5) cambios súbitos en precios y disponibilidad de combustibles y (6) nuevas técnicas en generación y transmisión de energía.

Es deseable que los programas de flujos de carga proporcionen capacidades interactivas y rápidos algoritmos que permitan minimizar las dificultades encontradas para llegar a la solución dentro de límites apropiados de tiempo y esfuerzo.

### **1.3.1 Algoritmos de solución iterativos**

A continuación se ilustran los fundamentos teóricos de algunos de los principales métodos, con lo que se espera dar al lector un entendimiento global de los trabajos hechos en este campo. No se intenta mostrar en detalle los métodos ya que estos se encuentran bastante bien explicados en la bibliografía.

#### **1.3.1.1 Metodo de gauss-seidel usando y-barra**

El método de Gauss-Seidel [1], [2], [3], [4] es una primera aproximación a la solución del problema de flujo de carga, este requiere poca memoria y es fácil de

programar. No obstante, es mas lento que los otros métodos. Este se basa en la idea de la expansión de la forma compleja de las ecuaciones de flujo de potencia como sigue:

$$P_{i,prog} + jQ_{i,prog} = V_i I_i^* = V_i \left[ \sum_{j=1}^N Y_{ij} V_j \right]^* = V_i \left[ Y_{ij} V_i + \sum_{j=1, j \neq i}^N Y_{ij} V_j \right]^* \quad (1.10)$$

O,

$$P_{i,prog} - jQ_{i,prog} = V_i^* Y_{ii} V_i + V_i^* \sum_{j=1, j \neq i}^N Y_{ij} V_j \quad (1.11)$$

Así que,

$$V_i = \frac{1}{Y_{ii}} \left[ \frac{P_{i,prog} - jQ_{i,prog}}{V_i^*} - \sum_{j=1, j \neq i}^N Y_{ij} V_j \right] \quad (1.12)$$

Donde  $i$  es el índice de la barra donde se calcula el voltaje,  $P_{i,prog}$  y  $Q_{i,prog}$  son respectivamente la potencia activa y reactiva programadas o especificadas de la barra  $i$  y  $j$  es el índice que recorre todas las barras.

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

1. Inicialización de los voltajes de barras. Para barras de carga generalmente se utiliza el inicio plano es decir  $V = 1+j0$ . Para barras de generación (incluyendo la barra de compensación) se utiliza  $V = V_{prog}+j0$ .
2. Uno a uno se actualizan los voltajes de las barras usando la ecuación (1.12). El voltaje en la barra de compensación no debe ser calculado; en las barras de voltaje controlado se debe calcular en cada iteración el valor de la potencia reactiva como sigue:

$$Q_{i,cal} = -\text{Im} \left\langle V_i^* \sum_{j=1}^N Y_{ij} V_j \right\rangle \quad (1.13)$$

Sustituyendo para esta barra el valor de  $Q_{i,prog}$  de la ecuación (1.12) por el de  $Q_{i,cal}$ . Si el valor de  $Q_{i,cal}$  supera los límites mínimo o máximo impuestos en la salida de potencia reactiva del generador, se hace  $Q_{i,cal}$  igual al valor del límite que se violó y se trata como si fuera una barra de carga. La magnitud del voltaje de la barra PV se debe mantener mientras se actualiza el ángulo.

3. Se verifica que la diferencia de los voltajes de barra esté dentro de los límites establecidos, es decir:

$$\left| e^k - e^{k-1} \right| \leq \text{tolerancia} \quad (1.14)$$

$$\left| f^k - f^{k-1} \right| \leq \text{tolerancia} \quad (1.15)$$

Donde  $k$  es el índice de la iteración,  $e$  es la componente real del voltaje y  $f$  es la componente imaginaria del voltaje. Si todas las barras cumplen con las ecuaciones (1.14) y (1.15) en una misma iteración el problema está resuelto, de lo contrario se debe devolver a (2). Un valor típico de tolerancia es de  $10^{-6}$ .

La convergencia es más rápida si se utiliza un factor de aceleración, esto se hace por medio de la siguiente ecuación:

$$V_{i,acel}^k = V_{i,acel}^{k-1} + \alpha (V_i^k - V_{i,acel}^{k-1}) \quad (1.16)$$

Donde  $k$  es el índice de la iteración y un valor práctico de  $\alpha$  se elige entre 1.2 y 1.6.

### 1.3.1.2 Método de newton-raphson

El método de Newton-Raphson [1], [2], [3], [4] es muy confiable y de rápida convergencia. Este no es sensible a factores que hagan que la convergencia sea difícil o que no haya convergencia como en otros métodos de flujo de carga (por

ejemplo, la elección de la barra de compensación, capacitores en serie o resistencias negativas). La tasa de convergencia es relativamente independiente del tamaño del sistema. Se puede trabajar con las ecuaciones de potencia en coordenadas polares o rectangulares; aquí se describirá el método utilizando coordenadas polares.

La solución del método de Newton-Raphson exige el uso de la siguiente ecuación en forma de matricial:

$$\begin{bmatrix} J_1 = \frac{\partial P}{\partial \delta} & J_2 = \frac{\partial P}{\partial |V|} \\ J_3 = \frac{\partial Q}{\partial \delta} & J_4 = \frac{\partial Q}{\partial |V|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \dots \\ \Delta \delta_N \\ \Delta |V_2| \\ \Delta |V_3| \\ \dots \\ \Delta |V_N| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \dots \\ \Delta P_N \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \\ \dots \\ \Delta Q_N \end{bmatrix} \quad (1.17)$$

o en forma abreviada,

$$\begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (1.18)$$

En la ecuación (1.17) se supone que la barra de compensación es la barra 1, por lo que no se pueden incluir los errores  $\Delta P_1$  y  $\Delta Q_1$  ya que  $P_1$  y  $Q_1$  son indefinidos. También se omiten todos los términos en que intervienen  $\Delta \delta_1$  y  $\Delta |V_1|$  porque ambas correcciones son cero en la barra de compensación.

Los errores en una barra típica de carga  $i$  están dados por:

$$\Delta P_i = P_{i,prog} - P_{i,calc} \quad (1.19)$$

$$\Delta Q_i = Q_{i,prog} - Q_{i,calc} \quad (1.20)$$

En el caso general en que hay  $N_g$  barras de voltaje controlado además de la barra de compensación, se omite una fila y una columna (una ecuación) para cada de estas barras en jacobiana del sistema (matriz J). Esta última tendrá una dimensión de  $(2N-N_g-2) \times (2N-N_g-2)$ .

La formulación de la matriz jacobiana es frecuentemente modificada tomando ventaja de la simetría en las derivadas parciales. Esta modificación es:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta} & |V| \frac{\partial P}{\partial |V|} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta} & |V| \frac{\partial Q}{\partial |V|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta |V|}{|V|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

La solución de la ecuación (1.21) se hace por iteración de la siguiente manera:

1. Estimar los valores de  $\delta_i^0$  y  $V_i^0$ .
2. Usar los valores estimados para calcular:
  - $P_{i,calc}^0$  y  $Q_{i,calc}^0$  de las ecuaciones (1.8) y (1.9).
  - Los errores  $\Delta P_i^0$  y  $\Delta Q_i^0$  de las ecuaciones (1.19) y (1.20).
  - Los elementos de las derivadas parciales de la jacobiana.
3. Resolver la ecuación (1.21) para las correcciones iniciales  $\Delta \delta_i^0$  y  $\frac{\Delta |V_i^0|}{|V_i^0|}$ .
4. Sumar las correcciones encontradas a los estimados iniciales para obtener:

$$\delta_i^1 = \delta_i^0 + \Delta \delta_i^0 \quad (1.22)$$

$$|V_i^1| = |V_i^0| + \Delta |V_i^0| \quad (1.23)$$

5. Usar los nuevos valores  $\delta_i^1$  y  $|V_i|^1$  como los valores iniciales de la segunda iteración y continuar el proceso.

En términos generales, las ecuaciones actualizadas para los valores iniciales de las variables de estado son:

$$\delta_i^{(k+1)} = \delta_i^{(k)} + \Delta\delta_i^{(k)} \quad (1.24)$$

$$|V_i|^{(k+1)} = |V_i|^{(k)} + \Delta|V_i|^{(k)} \quad (1.25)$$

Donde k es el índice de la iteración.

La forma de calcular los términos de la jacobiana de la ecuación (1.17) o (1.21) se encuentra en [2], [5].

El proceso iterativo continúa hasta que los errores  $\Delta P_i$  y  $\Delta Q_i$  se hacen menores a sus valores permitidos estipulados, o de manera alterna hasta que todos los  $\Delta\delta_i$  y  $\Delta|V_i|$  sean menores que el índice de precisión seleccionado. Como en el método de Gauss-Seidel, las barras de voltaje controlado no deben violar los límites de reactivos del generador; en caso de que estos se violen, se procede igual que en dicho método y la ecuación (1.17) o (1.21) cambia para la barra en que se violó el límite, ya que se puede definir el error  $\Delta Q$  en esa barra. Una consideración que debe realizarse al programar este algoritmo es que los resultados de los ángulos que arroja el computador están en radianes y deben ser convertidos a grados al comienzo de cada nueva iteración.

### 1.3.1.3 Método desacoplado rápido

Es derivado del método de Newton-Raphson. Este asume que un pequeño cambio en la magnitud de los voltajes de barra no hace variar apreciadamente la potencia

activa de la barra, e igualmente, un pequeño cambio en el ángulo de fase de los voltajes de barra no cambia apreciablemente la potencia reactiva de la barra. Así las ecuaciones de flujo de potencia del método de Newton-Raphson pueden ser simplificadas en dos juegos de ecuaciones separadas o desacopladas que pueden ser resueltas iterativamente, estas son:

$$[J_1][\Delta\delta] = [\Delta P] \quad (1.26)$$

$$[J_4][\Delta V] = [\Delta Q] \quad (1.27)$$

Este esquema todavía requeriría la evaluación y factorización de las dos matrices de coeficientes en cada iteración. Para evitar estos cálculos, se introducen simplificaciones que se justifican a través de la física de los flujos de potencia en líneas de transmisión, como son:

- Las diferencias angulares  $(\delta_i - \delta_j)$  entre dos barras típicas del sistema son, por lo general, tan pequeñas que:

$$\cos(\delta_i - \delta_j) = 1 \quad ; \quad \text{sen}(\delta_i - \delta_j) \approx (\delta_i - \delta_j) \quad (1.28)$$

- Las susceptancias de las líneas  $B_{ij}$  son mucho más grandes que sus conductancias  $G_{ij}$ , así que:

$$G_{ij} \text{sen}(\delta_i - \delta_j) \ll B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (1.29)$$

- La potencia reactiva  $Q_i$  que se inyecta a cualquier barra  $i$  del sistema durante la operación normal es mucho menor que la potencia reactiva que fluiría si todas las líneas de la barra estuvieran en corto circuito con la referencia. Esto es,

$$Q_i \ll |V_i|^2 B_{ii} \tag{1.30}$$

Estas aproximaciones se pueden usar para simplificar y calcular los elementos de la jacobiana [2].

El método desacoplado rápido reduce la cantidad de almacenamiento de memoria aproximadamente a la mitad, comparado con el método de Newton-Raphson. Dado que los elementos de la jacobiana son constantes, el tiempo que se requiere para la solución del flujo de carga también es menor.

Como en el método de Newton-Raphson, el criterio de convergencia del método desacoplado rápido es basado en la diferencia de la potencia real y reactiva, que es típicamente puesta como 0,001 en MW y MVAR [13]. A pesar de que este no es tan preciso como el método de Newton-Raphson, los ahorros en tiempo computacional y un criterio de convergencia más favorable hace que tenga un buen rendimiento general.

En general, el método desacoplado rápido puede ser usado como una alternativa al método de Newton-Raphson y este debe ser definitivamente la opción a tomar cuando el método de Newton-Raphson falla en grandes redes radiales o sistemas que tienen líneas o cables bastante largos [13].

### 1.3.2 Otros métodos de solución

Los métodos antes descritos son los métodos más conocidos y que generalmente se utilizan en los programas de flujo de carga más comunes. Pero, como se dijo anteriormente el problema de flujo de carga ha sido tratado por muchos investigadores e ingenieros que desarrollan nuevos métodos o que realizan modificaciones a los métodos más conocidos con el fin de lograr mayor precisión o poder resolver problemas particulares. Dada la cantidad de métodos y sus modificaciones sería imposible nombrarlos a todos, por lo que sólo se

mencionarán algunos que también son conocidos y las referencias bibliográficas donde se puede encontrar mayor información sobre estos.

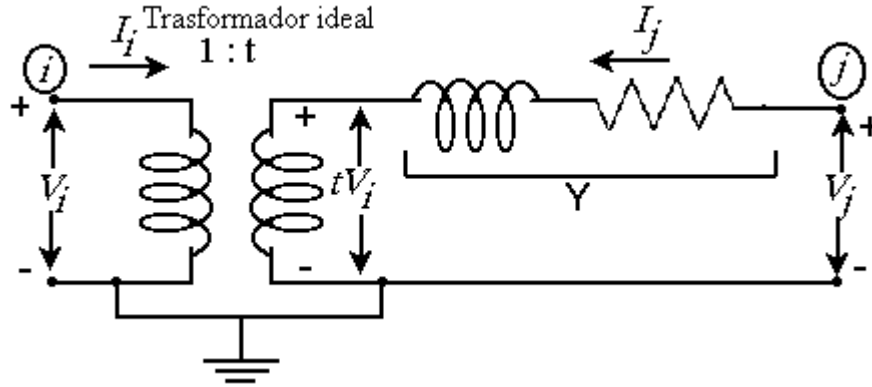
- Método de Gauss-Seidel usando Z-barra [1].
- Método de Newton-Raphson en coordenadas rectangulares [1], [2].
- Método del flujo de carga desacoplado [1], [2].
- Método del flujo DC [1], [2].
- Modificación del método de Newton-Raphson a través de ecuaciones más generales [6].
- Modificación del método de Newton-Raphson para reducir la cantidad de almacenamiento [7].
- Modificación del método de Newton-Raphson para mayor rapidez y confiabilidad [8].
- Ajuste automático de derivaciones de transformadores y deslizadores de fase en el método de Newton-Raphson [9].

#### 1.4 TRANSFORMADORES REGULANTES

Los transformadores regulantes se utilizan tanto para controlar flujos de potencia activa (transformador regulador de fase) como de potencia reactiva (transformador regulador de tensión) en un circuito. Un transformador provisto de derivaciones en uno de sus lados para permitir pequeños ajustes ( $\pm 10\%$ ) en la magnitud del voltaje se representa mediante su impedancia (o admitancia) nominal en serie con un autotransformador (o transformador) ideal, como se muestra en la Figura 1.1. Nótese que en este caso la admitancia en por unidad se ha colocado en el lado del cambio de derivaciones y que la relación de transformación se expresa como 1:t.

A partir de este modelo se puede obtener un circuito  $\pi$  equivalente para representar el transformador en estudios de flujos de carga. Los parámetros se

obtienen igualando las corrientes terminales de ambas representaciones. Es decir, para el circuito de la Figura 1.1:



**Figura 1.1.** Diagrama detallado de reactancias en por unidad para un transformador regulante con relación  $1/t$  conectado entre las barras  $i$  y  $j$ .

$$V_i I_i^* = -t V_j I_j^* \quad (1.31)$$

$$I_j = Y(V_j - tV_i) \quad (1.32)$$

Combinado las ecuaciones (1.31) y (1.32) se obtiene:

$$I_i = -t^* I_j = -t^* (V_j - tV_i)Y \quad (1.33)$$

Para el circuito de la Figura 1.2(a) se obtiene:

$$\begin{aligned} I_i &= Y_B V_i + Y_A (V_i - V_j) \\ I_j &= Y_C V_j - Y_A (V_i - V_j) \end{aligned} \quad (1.34)$$

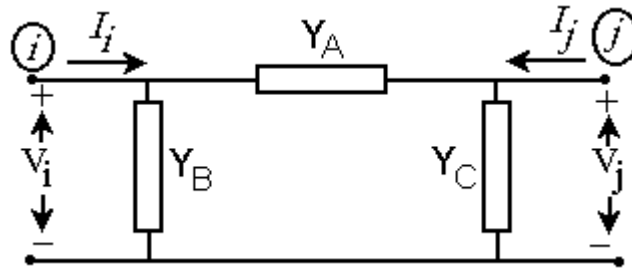
Para que las ecuaciones (1.32) y (1.33) conduzcan a idénticos resultados que (1.34) se debe cumplir:

$$\begin{aligned}
 tt^*Y &= Y_B + Y_A \\
 t^*Y &= Y_A \\
 Y &= Y_C + Y_A
 \end{aligned}
 \tag{1.35}$$

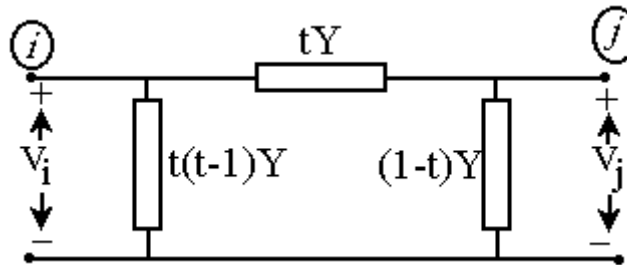
Resolviendo (1.35) se obtienen los siguientes valores:

$$\begin{aligned}
 Y_A &= t^*Y \\
 Y_B &= t^*(t-1)Y \\
 Y_C &= (1-t^*)Y
 \end{aligned}
 \tag{1.36}$$

Que corresponden con los del circuito equivalente de la Figura 1.2(b) para el caso particular en que  $t = t^*$ .



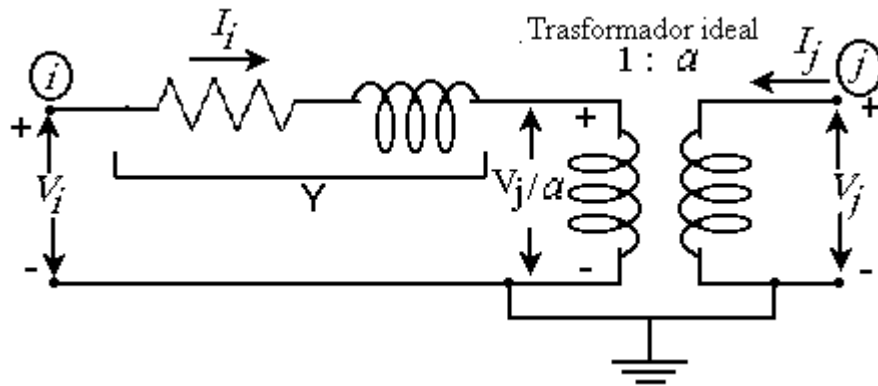
(a)



(b)

**Figura 1.2.** Circuito equivalente  $\pi$  del transformador de la Figura 1.1 en términos de su admitancia nominal y de la relación de transformación.

Algunos autores ubican la admitancia en el lado opuesto al cambio de derivaciones y la relación de transformación la denominan 1:a como se muestra en la Figura 1.3. En este caso se establecen las siguientes expresiones:



**Figura 1.3.** Representación del transformador con su admitancia en el lado opuesto al de las derivaciones y relación de transformación 1:a.

$$\frac{V_j}{a} I_i^* = -V_j I_j^* \quad (1.37)$$

$$I_i = \left( V_i - \frac{V_j}{a} \right) Y \quad (1.38)$$

Reemplazando (1.37) en (1.38) se obtiene:

$$I_j = -\frac{I_i}{a^*} = -\frac{1}{a^*} \left( V_i - \frac{V_j}{a} \right) Y \quad (1.39)$$

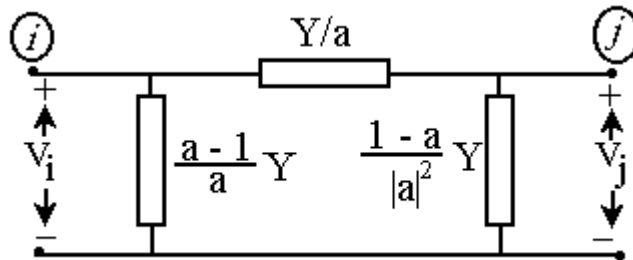
Para que las expresiones (1.38) y (1.39) sean equivalentes a (1.34) se debe cumplir que:

$$\begin{aligned}
 Y_B + Y_A &= Y \\
 Y_A &= \frac{Y}{a} \\
 Y_C + Y_A &= \frac{Y}{aa^*}
 \end{aligned}
 \tag{1.40}$$

Resolviendo (1.40) se obtiene:

$$\begin{aligned}
 Y_A &= \frac{Y}{a} \\
 Y_B &= \left(1 - \frac{1}{a}\right) Y \\
 Y_C &= \frac{1}{a} \left(\frac{1}{a^*} - 1\right) Y
 \end{aligned}
 \tag{1.41}$$

Que corresponde al circuito de la Figura 1.4.



**Figura 1.4. Circuito equivalente del transformador cuando  $a$  es real.**

Si una línea de transmisión en un sistema está llevando potencia activa demasiado pequeña o demasiado grande, un transformador regulante colocado en una de las terminales de la línea puede hacer que la línea transmita una potencia activa mayor o menor. También, cualquier caída de voltaje apreciable en el lado del primario de un transformador, ocasionada por un cambio de la carga, puede que haga deseable cambiar la selección de la derivación del transformador,

siempre que se tengan derivaciones ajustables con el fin de mantener el voltaje en la carga.

Cuando se incluye una derivación t esta puede considerarse como un parámetro independiente con un valor especificado antes de que empiece la solución de los flujos de potencia (transformadores con cambio de tomas en vacío) o se puede tomar como una variable de estado, cuyo valor se halla con la solución del flujo de potencia (transformadores LTC).

Mayor información teórica sobre los transformadores de regulación se puede encontrar en [2], [10] y sobre como incluir estos en la solución del flujo de carga por el método de Newton-Raphson en [9].

## 1.5 CORRIENTES Y FLUJOS DE POTENCIA A TRAVÉS DE LÍNEAS Y CABLES DE TRANSMISIÓN

Una vez todos los voltajes de barra son conocidos, el flujo de potencia en todas las líneas y cables de transmisión puede ser determinado para completar el estudio de flujo de carga. En la Figura 1.5, se asume que la corriente de línea  $I_{ij}$  puede ser expresada como:

$$I_{ij} = I_{serie} + I_{shunt} \quad (1.42)$$

$$I_{serie} = (V_i - V_j) y_{ij} \quad (1.43)$$

$$I_{shunt} = V_i \frac{y'_{ij}}{2} \quad (1.44)$$

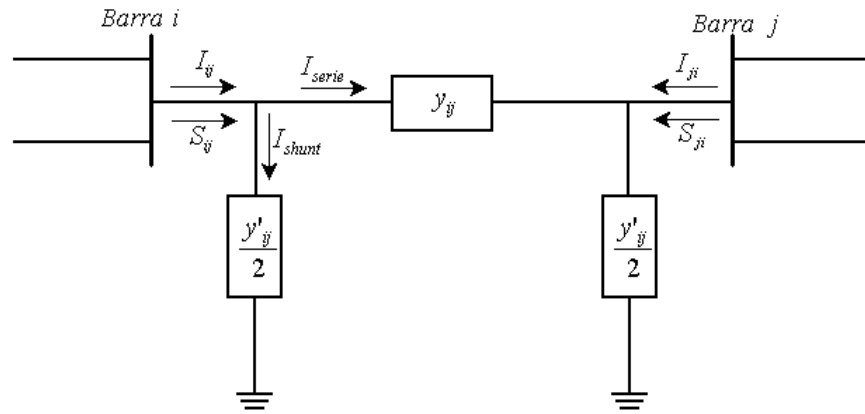
Por lo tanto,

$$I_{ij} = (V_i - V_j) y_{ij} + V_i \frac{y'_{ij}}{2} \quad (1.45)$$

Donde,

$y_{ij}$  = admitancia de la línea  $ij$ .

$y'_{ij}$  = admitancia total de carga de la línea.



**Figura 1.5.** Datos de línea utilizados en el cálculo de flujos de carga.

El flujo de potencia real y reactiva de la barra  $i$  a la barra  $j$  puede ser expresado como:

$$S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (1.46)$$

Sustituyendo la ecuación (1.45) en la ecuación (1.46),

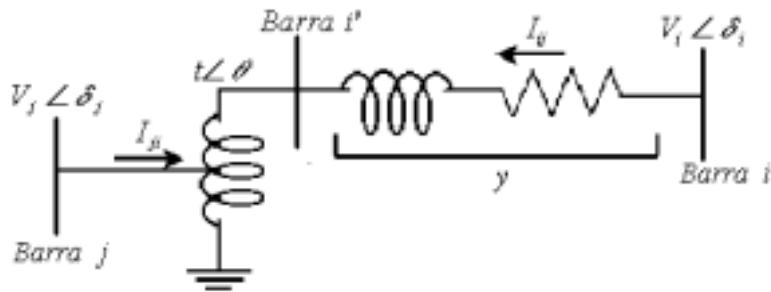
$$S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = V_i (V_i^* - V_j^*) y_{ij}^* + V_i V_i^* \left( \frac{y'_{ij}}{2} \right)^* \quad (1.47)$$

Análogamente, la potencia real y reactiva que fluye de la barra  $j$  a la barra  $i$  puede ser expresada como:

$$S_{ji} = P_{ji} + jQ_{ji} = V_j (V_j^* - V_i^*) y_{ij}^* + V_j V_j^* \left( \frac{y'_{ij}}{2} \right)^* \quad (1.48)$$

## 1.6 CORRIENTES Y FLUJO DE POTENCIA A TRAVÉS DE TRANSFORMADORES

En la Figura 1.6, se muestra el equivalente de un transformador y el sentido del flujo de carga a través de él.



**Figura 1.6.** Datos del transformador usados en el flujo de carga.

La corriente  $I_{ij}$  se expresa como:

$$I_{ij} = \left( |V_i| \angle \delta_i - \frac{|V_j| \angle \delta_j}{t \angle \theta} \right) y \quad (1.49)$$

La corriente  $I_{ji}$  se expresa como:

$$I_{ji} = - \frac{I_{ij}}{t \angle \theta} \quad (1.50)$$

Donde,

$y =$  admitancia del transformador.

$t \angle \theta =$  relación de transformación.

El flujo de carga correspondiente entre los extremos del transformador está dado por:

$$S_{ji} = V_{ji} I_{ji}^* \quad (1.51)$$

$$S_{ij} = V_{ij} I_{ij}^* \quad (1.52)$$

## 1.7 CONTROL

En el problema de flujo de carga existen diferentes dispositivos para el control del ángulo y la magnitud de voltaje de las barras y por lo tanto, del flujo de la potencia activa y reactiva entre las mismas. Su inclusión dentro de las ecuaciones y la solución de flujo de carga es bastante complicada y va más allá de lo que se pretende en este documento, por lo tanto, estos solo serán nombrados:

- El gobernador y el ajuste del AVR en las barras PV se utilizan directamente para el control de potencia activa y magnitud de voltaje.
- Los transformadores con cambiadores de tomas bajo carga (LTC Transformers) son utilizados para controlar directamente el voltaje de la barra, entonces la posición de la derivación se convierte en una variable a determinar en la solución del sistema.
- Los transformadores deslizadores de fase, son utilizados para controlar diferencias de ángulos y por lo tanto para el control del flujo de potencia activa.
- El control de potencia activa (ángulo) y reactiva (magnitud de voltaje) se realiza adicionalmente, con dispositivos de compensación serie y paralelo.
- Para el modelamiento de las áreas de intercambio de potencia, el flujo de potencia en las líneas de enlace de dichas áreas es controlado definiendo

una barra de compensación (**slack**) en cada área. Debe tenerse en cuenta que una de las barras es además la barra de referencia del sistema, para la cual se define previamente el valor del ángulo; las otras barras de compensación son barras PV donde la potencia reactiva cambia para mantener el flujo constante a través de las líneas de enlace [1].

## 1.8 DESPACHO ECONÓMICO

El costo de la potencia generada, particularmente en plantas térmicas, puede ser típicamente representado por la siguiente función cuadrática de costos:

$$C_i(P_{Gi}) = \alpha + \beta P_{Gi} + \gamma P_{Gi}^2 \quad (1.53)$$

$$P_{Gi,min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,max}. \quad (1.54)$$

Donde  $C_i$  representa los costos de combustible, mantenimiento, transporte, etc. y  $P_{Gi}$  la potencia generada en la barra  $i$ .

Así, el problema de flujo de potencia puede ser reformulado y llevado hacia la minimización de los costos de producción, mientras que la demanda es suplida con voltajes adecuados y dentro de los límites de los dispositivos. Esto es conocido como *flujo de potencia óptimo*, y puede ser formalmente expresado como:

$$\text{Min. } \sum_{i=1}^n C_i(P_{Gi}) = C_1(P_{G1}) + C_2(P_{G2}) + \dots + C_n(P_{Gn}) \quad (1.55)$$

sujeto a:

$$\begin{aligned} \Delta P_i(\delta, V, P_{Gi}) &= 0 \\ \Delta Q_i(\delta, V, Q_{Gi}) &= 0 \end{aligned} \quad (1.56)$$

$$\begin{aligned} P_{Gi,min} &\leq P_{Gi} \leq P_{Gi,max} \\ Q_{Gi,min} &\leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,max} \end{aligned} \quad (1.57)$$

$$|P_{ij}(\delta, V)| \leq P_{ij, \max} \quad (1.58)$$

$$V_{i, \min} \leq V_i \leq V_{i, \max} \quad (1.59)$$

Las ecuaciones (1.56) representan las ecuaciones de flujo de potencia, la ecuación (1.57) los límites del generador, la ecuación (1.58) los límites de transmisión y la ecuación (1.59) los límites de voltaje.

Otros límites, variables de control y ecuaciones relacionadas pueden ser adicionadas a este juego de restricciones. Observe que la potencia activa  $P_{Gi}$  en las barras PV no es definida en este caso, pero esta, es calculada para minimizar costos de operación. Este es un problema de optimización no lineal de difícil solución debido a las restricciones del sistema.

La solución del problema de flujo de potencia óptimo es de gran importancia para las empresas de energía, dadas las implicaciones económicas en que se encuentran envueltas. Existen programas de flujos de carga avanzados con capacidad de solucionar este tipo de problemas. Información más profunda acerca de este tema escapa al propósito de este trabajo pero a modo de referencia se cita [11] y [12].

## 1.9 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] GÖNEN, T. *Modern Power System Analysis*, Wiley, 1988.
- [2] GRAINGER, J. J. and STEVENSON W. D Jr. *Análisis de Sistemas de Potencia*. México, McGraw-Hill, 1996.
- [3] STAGG, G. W. and EL-ABIAD, A. H. *Computer Methods in Power System Analysis*, New York, McGraw-Hill, 1968.

- [4] IEEE Std 399-1990, Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis.
- [5] GRADY W. M. *PowerSystemNotes\_S7*. Documento en formato pdf que se encuentra en <http://www.ece.utexas.edu/~grady/courses.html>.
- [6] BRITTON, J. P. "Improved Load Flow Performance Through a More General Equation Form". IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol pas-90, No. 1, January/february 1971.
- [7] WALLACH, Y. EVEN, R. K. YAVIN, Y. "Improve Methods for Load-Flow Calculations". IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol pas-90, No. 1, January/february 1971.
- [8] DESPOTOVIC, S. T. BABIC, B. MASTILOVIC, V. "A Rapid and Reliable Method for Solving Load Flow Problems". IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol pas-90, No. 1, January/february 1971.
- [9] NORRIS, M. P. SCOTT, M. W. "Automatic Adjustment of Transformer and Phase-Shifter Taps in the Newton Power Flow". IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, vol pas-90, No. 1, January/february 1971.
- [10] ACOSTA A. *Análisis de Sistemas de Potencia*. Universidad Tecnológica de Pereira, 2000.
- [11] ROSECHART, W. D. CAÑIZARES, C. A. VANNELLI, A. "Sequential Methods in Solving Economic Power Flow Problems". Department of Electrical and Computer Engineering, University of Waterloo.

[12] WEBER, J. D. "Implementation of a Newton-Based Optimal Power Flow into a Power System Simulation Environment". Thesis Submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Electrical Engineering in the Graduate College of the University of Illinois at Urbana-Champaign, 1997.

[13] Operation Technology Inc. Etap PowerStation, *User Guide*, Version 3.02.

## **ANEXO II**

### **ANÁLISIS DE CORTO CIRCUITO**

## TABLA DE CONTENIDO

<b>LISTADO DE FIGURAS.....</b>	<b>1</b>
<b>LISTADO DE TABLAS .....</b>	<b>3</b>
<b>2. ANÁLISIS DE CORTO CIRCUITO.....</b>	<b>4</b>
2.1 COMPONENTES SIMÉTRICAS .....	4
2.1.1 DEFINICIÓN .....	4
2.1.2 CIRCUITOS EN ESTRELLA Y EN DELTA.....	7
2.2 CIRCUITOS DE SECUENCIA .....	8
2.2.1 CIRCUITOS DE SECUENCIA PARA ELEMENTOS CONECTADOS EN ESTRELLA Y EN DELTA .....	8
2.2.2 IMPEDANCIAS DE SECUENCIA .....	10
2.2.2.1 IMPEDANCIAS DE SECUENCIA DE LA MÁQUINA SÍNCRONA (GENERADOR SÍNCRONO).....	10
2.2.2.2 IMPEDANCIAS DE SECUENCIA DE LOS TRANSFORMADORES.....	13
2.2.2.3 IMPEDANCIAS DE SECUENCIA DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN.....	14
2.2.2.4 IMPEDANCIAS DE SECUENCIA PARA CARGAS .....	17
2.2.2.5 CONCLUSIONES.....	20
2.3 FALLOS BALANCEADOS Y DESBALANCEADOS.....	20
2.3.1 FALLOS TRIFÁSICOS.....	21
2.3.2 FALLOS LÍNEA A TIERRA.....	23
2.3.3 FALLOS DOBLE LÍNEA A TIERRA.....	25
2.3.4 FALLOS LÍNEA A LÍNEA .....	27
2.4 COMPARACIÓN DE LOS CORTOCIRCUITOS SEGÚN LA PUESTA A TIERRA DEL SISTEMA .....	29
2.5 CÁLCULO DE FALLAS USANDO $Z_{\text{BARRA}}$ .....	30
2.6 ESTUDIOS DE CORTOCIRCUITO.....	32

2.7 APLICACIÓN DE LOS ESTUDIOS DE CORTOCIRCUITO AL DIMENSIONAMIENTO DE DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN .....	33
2.8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35

**LISTADO DE FIGURAS**

	Pág.
Figura 2.1. Circuitos de secuencia para cargas en estrella.	9
Figura 2.2. Diagrama de un generador síncrono.	11
Figura 2.3. Redes de secuencia de un generador síncrono.	12
Figura 2.4. Modelo del transformador para la secuencia positiva y negativa.	13
Figura 2.5. Circuito equivalente para el transformador cuando $\theta=0^\circ$ .	14
Figura 2.6. Redes de secuencia cero para transformadores.	15
Figura 2.7. Sección de una línea de transmisión trifásica.	16
Figura 2.8. Red de secuencia positiva y negativa para las cargas.	18
Figura 2.9. Red de secuencia cero para las cargas.	18
Figura 2.10. Representación en paralelo y en serie de las cargas.	19
Figura 2.11. Representación general de un fallo trifásico.	21
Figura 2.12. Interconexión de redes de secuencia para un fallo trifásico.	22

Figura 2.13. Representación general de un fallo línea – tierra.	23
Figura 2.14. Interconexión de redes de secuencia para fallos línea – tierra.	24
Figura 2.15. Representación general de los fallos doble línea – tierra.	25
Figura 2.16. Interconexión de redes de secuencia para fallos doble línea – tierra.	27
Figura 2.17. Representación general de fallos línea – línea.	28
Figura 2.18. Interconexión de redes de secuencia para fallos línea – línea.	29

## LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1 Ángulos de desfase de transformadores.	13

## 2. ANÁLISIS DE CORTO CIRCUITO

### 2.1 COMPONENTES SIMÉTRICAS

#### 2.1.1 Definición

Los sistemas de potencia reales presentan desbalances por condiciones de operación anormales, como por ejemplo, por fallos que se presentan de manera asimétrica, por cargas desbalanceadas, etc. Aun cuando se dice que el sistema es balanceado, en la práctica esto no es totalmente cierto, pudiéndose encontrar que los sistemas son ligeramente desbalanceados, pero para efectos de cálculo y de análisis se suponen de una manera completamente balanceada [1].

Cuando se estudian las condiciones anormales o de contingencia, las cuales son necesarias para dimensionar equipos de protección, surge la necesidad de analizar los sistemas desbalanceados. Para este tipo de análisis es necesario conocer los voltajes y corrientes en condiciones desbalanceadas. La obtención de estos valores se realiza mediante la aplicación del teorema de Fortescue [4], en el caso particular de  $N = 3$  fasores (sistema trifásico).

Existen entonces **tres componentes simétricas** que son un conjunto de fasores balanceados de igual magnitud y desfasados  $120^\circ$  o  $0^\circ$ , dependiendo de la secuencia. En el caso de sistemas trifásicos, las componentes simétricas son tres sistemas balanceados de fasores: sistema de secuencia positiva, sistema de secuencia negativa y sistema de secuencia cero. El sistema de secuencia positiva tiene una secuencia de fase igual a la del sistema original desbalanceado. El sistema de secuencia negativa tiene una secuencia de fase opuesta a la del sistema original. El sistema de secuencia cero tiene sus tres fasores en fase, es

decir, girando simultáneamente, de ahí el nombre de secuencia cero. Las tensiones y corrientes de cada fase de un sistema desbalanceado trifásico se pueden expresar como se muestra en el conjunto de ecuaciones (2.1).

$$\begin{aligned} V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\ V_b &= V_{b1} + V_{b2} + V_{b0} \\ V_c &= V_{c1} + V_{c2} + V_{c0} \end{aligned} \quad (2.1)$$

Donde:

$V_a, V_b, V_c$ : Voltajes de fase del sistema original.

$V_{a1}, V_{a2}, V_{a0}$ : Componentes simétricas de secuencia positiva, negativa y cero respectivamente, del voltaje de la fase a.

$V_{b1}, V_{b2}, V_{b0}$ : Componentes simétricas de secuencia positiva, negativa y cero respectivamente, del voltaje de la fase b.

$V_{c1}, V_{c2}, V_{c0}$ : Componentes simétricas de secuencia positiva, negativa y cero respectivamente, del voltaje de la fase c.

Con fines de simplificación, se hace uso de un operador denominado **operador a** o  $\alpha$  ( $1 \angle 120^\circ$ ) que rota un fasor  $120^\circ$  y deja su magnitud igual, aprovechando que las componentes simétricas están desfasadas  $120^\circ$  y son iguales en magnitud. Esto permite que las componentes simétricas de las fases del sistema sean expresadas en términos de las componentes simétricas de una de ellas:

$$\begin{aligned} V_{b1} &= a^2 V_{a1} & V_{c1} &= a V_{a1} \\ V_{b2} &= a V_{a2} & V_{c2} &= a^2 V_{a2} \\ V_{b0} &= V_{c0} = V_{a0} \end{aligned} \quad (2.2)$$

Reemplazando las componentes para cada fase se tienen las **ecuaciones de síntesis**:

$$\begin{aligned}
 V_a &= V_{a1} + V_{a2} + V_{a0} \\
 V_b &= a^2 V_{a1} + a V_{a2} + V_{a0} \\
 V_c &= a V_{a1} + a^2 V_{a2} + V_{a0}
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

Resolviendo el sistema anterior para obtener los voltajes de secuencia, se tienen las **ecuaciones de análisis**:

$$\begin{aligned}
 V_{a0} &= \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \\
 V_{a1} &= \frac{1}{3}(V_a + a V_b + a^2 V_c) \\
 V_{a2} &= \frac{1}{3}(V_a + a^2 V_b + a V_c)
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

La demostración de estas ecuaciones se encuentra en **[1]**. En la primera ecuación de análisis se muestra que no hay componentes de secuencia cero si la suma de los voltajes de fase es cero. Las ecuaciones de síntesis y de análisis en forma matricial se expresan en las ecuaciones (2.5) y (2.6):

$$[V_{abc}] = [A] [V_{012}] \tag{2.5}$$

$$[V_{012}] = [A]^{-1} [V_{abc}] \tag{2.6}$$

donde:

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \quad [V_{abc}] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad [V_{012}] = \begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix}$$

Estas ecuaciones también son aplicables para obtener las corrientes de fase y de secuencia:

$$[I_{abc}] = [A] [I_{012}] \quad (2.7)$$

$$[I_{012}] = [A]^{-1} [I_{abc}] \quad (2.8)$$

La potencia compleja trifásica se expresa en términos de componentes simétricas, partiendo del hecho que la potencia trifásica es la suma de las potencias complejas para cada fase, se tiene:

$$S_{3\phi} = S_a + S_b + S_c = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* \quad (2.9)$$

Expresando las tensiones por fase en términos de sus componentes simétricas mediante el uso de la matriz A, se llega al siguiente resultado:

$$S_{3\phi} = 3[V_{a0} I_{a0}^* + V_{a1} I_{a1}^* + V_{a2} I_{a2}^*] \quad (2.10)$$

Del resultado anterior se puede concluir que no hay acoplamiento de potencia entre las secuencias positiva, negativa y cero; además, las componentes simétricas de tensión y de corriente corresponden a la misma fase.

### 2.1.2 Circuitos en Estrella y en Delta

Las corrientes de línea para un circuito en delta son iguales a [2]:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{ab} - I_{ca} \\ I_b &= I_{bc} - I_{ab} \\ I_c &= I_{ca} - I_{bc} \end{aligned} \quad (2.11)$$

La corriente de secuencia cero para cualquiera de las tres fases es igual a:

$$I_{a0} = (I_a + I_b + I_c) / 3 = 0 \quad (2.12)$$

Por lo que se puede decir que en el caso de un circuito en delta, las corrientes de línea no tienen componentes de secuencia cero. Para un circuito conectado en estrella, los voltajes de línea se pueden expresar como:

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_{an} - V_{bn} \\ V_{bc} &= V_{bn} - V_{cn} \\ V_{ca} &= V_{cn} - V_{an} \end{aligned} \quad (2.13)$$

La tensión línea a línea de secuencia cero entre dos fases cualquiera es igual a:

$$V_{ab0} = (V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}) / 3 = 0 \quad (2.14)$$

Por lo anterior se puede concluir que los voltajes línea a línea no tienen componentes de secuencia cero.

## 2.2 CIRCUITOS DE SECUENCIA

### 2.2.1 Circuitos de secuencia para elementos conectados en Estrella y en Delta

Las corrientes de secuencia de un circuito conectado en estrella o en delta dan lugar a caídas de voltaje de la misma secuencia a través de impedancias simétricas en cada fase. En un circuito conectado en estrella con el neutro aterrizado a través de una impedancia  $Z_n$ , la corriente que circula por dicha impedancia es igual a:

$$I_n = I_a + I_b + I_c = 3I_{a0} \quad (2.15)$$

Lo que quiere decir que no hay corrientes de secuencia positiva y negativa entre neutro y tierra y que además las tres corrientes de secuencia cero producen una caída de tensión de  $3I_{a0}Z_n$  entre neutro y tierra. Se pueden expresar las caídas de tensión de cada fase a tierra en términos de sus componentes simétricas como sigue:

$$\begin{bmatrix} V_{a0} \\ V_{a1} \\ V_{a2} \end{bmatrix} = Z_Y \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} + 3I_{a0}Z_n \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Donde  $Z_Y$  es la impedancia por fase del circuito; extendiendo la ecuación matricial anterior se tiene:

$$\begin{aligned} V_{a0} &= (Z_Y + 3Z_n)I_{a0} = Z_0 I_{a0} \\ V_{a1} &= Z_Y I_{a1} = Z_1 I_{a1} \\ V_{a2} &= Z_Y I_{a2} = Z_2 I_{a2} \end{aligned} \quad (2.17)$$

Estas ecuaciones dan origen a tres circuitos de secuencia monofásicos, independientes uno del otro, como se muestra en la Figura 2.1.

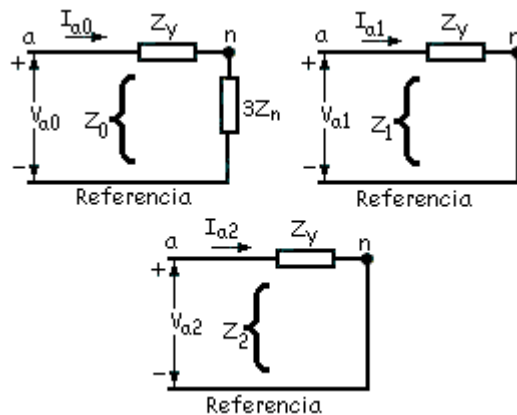


Figura 2.1. Circuitos de secuencia para cargas en estrella.

El primer circuito denominado circuito de secuencia cero, relaciona la tensión de secuencia cero con la corriente de secuencia cero, definiendo así una impedancia de secuencia cero  $Z_0$ . Análogamente los otros dos circuitos son de secuencia positiva y negativa respectivamente y se definen también las impedancias de secuencia positiva y negativa  $Z_1$  y  $Z_2$ . Es importante notar que si no hay conexión del punto neutro a tierra,  $Z_n=\infty$  y no puede existir flujo de corriente de secuencia cero.

Así mismo, para circuitos en delta, las corrientes de línea que fluyen hacia la carga no pueden tener componentes de secuencia cero ya que estos circuitos no tienen trayectoria al neutro.

## 2.2.2 Impedancias de secuencia

### 2.2.2.1 Impedancias de secuencia de la máquina síncrona (Generador síncrono)

En la Figura 2.2 se muestra un generador síncrono. Planteando las ecuaciones para el estado estable y considerando un acople magnético  $M_s$  entre las fases, se tiene la siguiente ecuación matricial para el voltaje en terminales [2]:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = -[R + j\omega(L_s + M_s)] \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + j\omega M_s \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_{an} \\ E_{bn} \\ E_{cn} \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

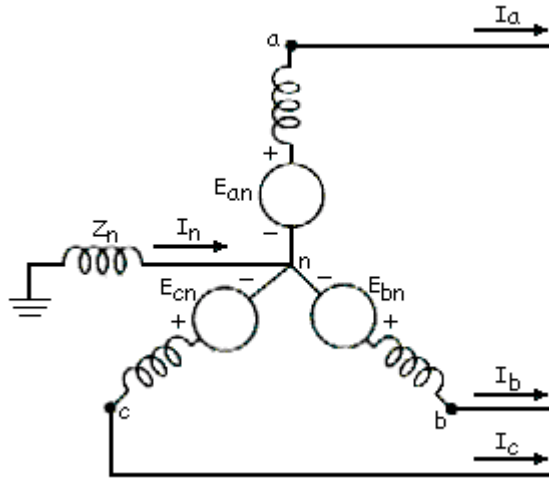


Figura 2.2. Diagrama de un generador síncrono.

Expresando esta ecuación en términos de las componentes simétricas de la fase a se tiene:

$$\begin{bmatrix} V_{an0} \\ V_{an1} \\ V_{an2} \end{bmatrix} = -[R + j\omega(L_s + M_s)] \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} + j\omega M_s \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ E_{an} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Desacoplando esta ecuación para cada secuencia se pueden obtener las redes de secuencia para el generador, tal como se muestra en la Figura 2.3.

$$\begin{aligned} V_{an0} &= -I_{a0}[R + j\omega(L_s - 2M_s)] = -I_{a0}Z_{g0} \\ V_{an1} &= E_{an} - I_{a1}[R + j\omega(L_s + M_s)] = E_{an} - I_{a1}Z_1 \\ V_{an2} &= -I_{a2}[R + j\omega(L_s + M_s)] = -I_{a2}Z_2 \end{aligned} \quad (2.20)$$

Debe observarse que la corriente que circula por  $Z_n$  es  $3I_{a0}$ , por lo que la impedancia del circuito para la corriente de secuencia cero, debe incluir a  $3Z_n$ . La reactancia de secuencia positiva para generadores, corresponde generalmente a la reactancia transitoria  $X_d'$  o subtransitoria  $X_d''$  del eje directo.

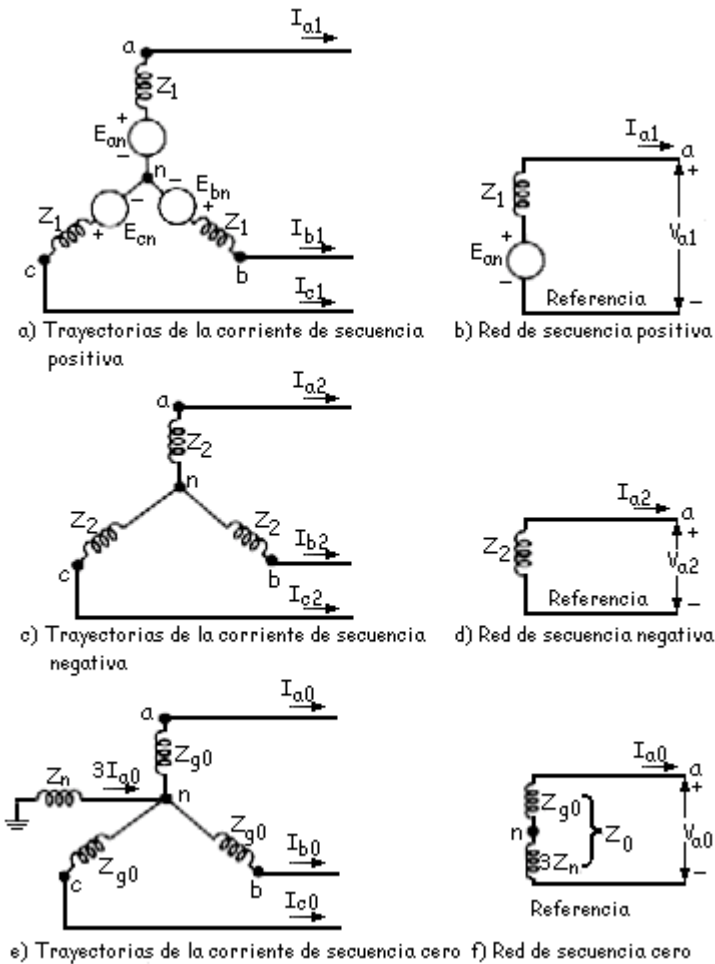


Figura 2.3. Redes de secuencia de un generador síncrono.

Dependiendo del tiempo de reacción de los relés se usa  $X_d'$  o  $X_d''$ ; para relés rápidos, se emplea el valor de la reactancia subtransitoria, mientras que para relés lentos se usa la reactancia transitoria [3].

Para estudios de fallos se asume como reactancia de secuencia positiva, la reactancia subtransitoria. La reactancia de secuencia negativa se calcula según las siguientes ecuaciones:

$$X_2 \approx \frac{X_d' + X_q'}{2} \quad \text{o} \quad X_2 \approx \frac{X_d'' + X_q''}{2} \quad (2.21)$$

Donde  $X_d$  y  $X_q$  son las reactancias del eje directo y del eje de cuadratura respectivamente. En un generador de rotor cilíndrico la reactancia de secuencia negativa es igual a la reactancia subtransitoria [1]. La reactancia de secuencia cero puede ser medida conectando los tres devanados de armadura en serie y aplicando una tensión monofásica; la relación entre la tensión en terminales de una fase y la corriente de la misma, proporciona la reactancia de secuencia cero de la máquina [1].

### 2.2.2.2 Impedancias de secuencia de los transformadores

Las magnitudes de las impedancias de secuencia positiva y negativa de un transformador son iguales. El modelo del transformador corresponde al mostrado en la Figura 2.4, donde  $Z = R_t + jX_t$ , representa la resistencia y la reactancia del transformador. Dependiendo de la conexión del primario y del secundario, el ángulo de desfase  $\theta$  varía como se muestra en la Tabla 2.1 [3], como lo indica la norma ANSI/IEEE.

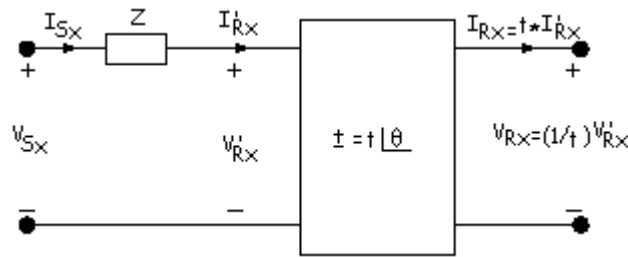


Figura 2.4. Modelo del transformador para la secuencia positiva y negativa.

Tabla 2.1. Ángulos de desfase de transformadores.

Conexión	$\theta$	
	Secuencia positiva	Secuencia negativa
Y-Y	$0^\circ$	$0^\circ$
$\Delta$ - $\Delta$	$0^\circ$	$0^\circ$
$\Delta$ -Y	$-30^\circ$	$+30^\circ$
Y- $\Delta$	$+30^\circ$	$-30^\circ$

Cuando  $\theta$  es igual a  $0^\circ$ , el transformador se puede representar por el circuito equivalente **pi** mostrado en la Figura 2.5. Para las componentes de secuencia cero, el transformador es representado por los circuitos mostrados en la Figura 2.6 dependiendo de las conexiones del primario y del secundario.

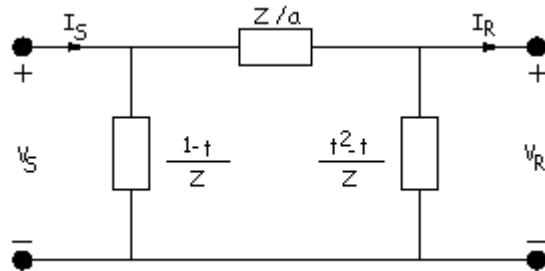


Figura 2.5. Circuito equivalente para el transformador cuando  $\theta = 0^\circ$ .

La única forma en que las corrientes de línea de secuencia cero pueden circular, es cuando existe una ruta de neutro a tierra para circulación de dicha corriente. En el caso de conexiones en delta, las corrientes de secuencia cero existen dentro de los devanados en delta, pero no hay ruta para circulación de esta corriente hacia el exterior. Cuando la conexión del neutro al punto de tierra se realiza a través de una impedancia, ésta debe incluirse en la impedancia de secuencia cero.

### 2.2.2.3 Impedancias de secuencia de líneas de transmisión

Asumiendo que los sistemas de transmisión presentan asimetrías muy pequeñas entre las fases, es decir, se pueden considerar con sus fases balanceadas, y que las líneas de transmisión son transpuestas para eliminar los desbalances electromagnéticos, se pueden expresar las caídas de tensión a través de los conductores de fase por la ecuación matricial (2.22) que se deriva de la Figura 2.7.

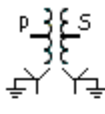
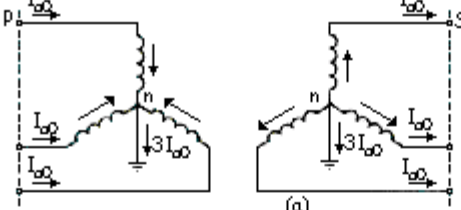
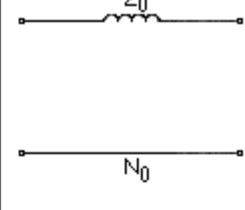
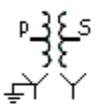
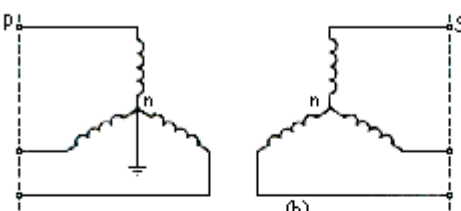
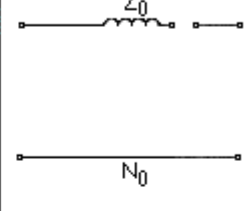
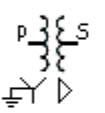
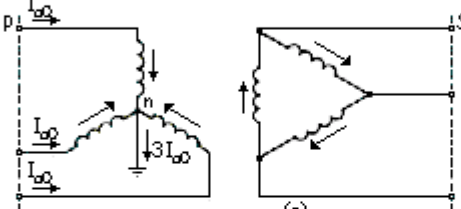
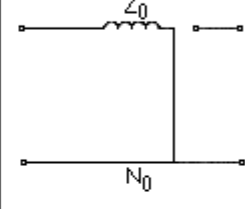
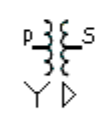
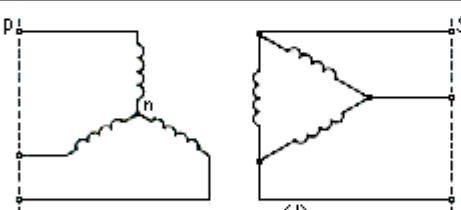
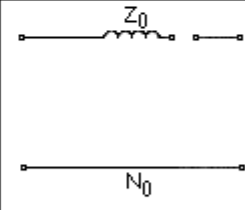
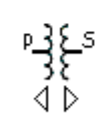
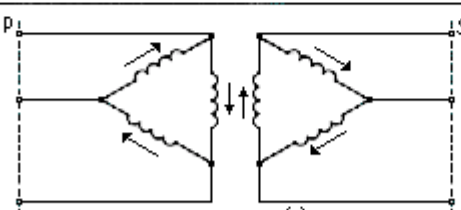
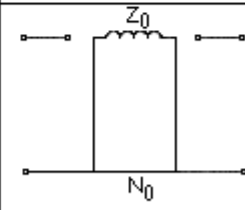
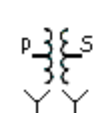
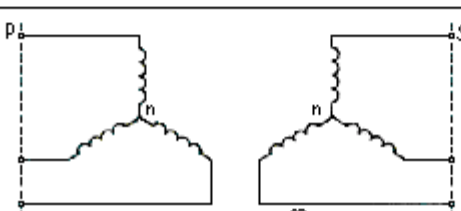
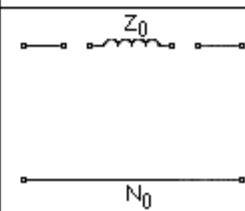
Símbolos	Diagrama de conexión del transformador	Red de secuencia cero
	 <p style="text-align: center;">(a)</p>	
	 <p style="text-align: center;">(b)</p>	
	 <p style="text-align: center;">(c)</p>	
	 <p style="text-align: center;">(d)</p>	
	 <p style="text-align: center;">(e)</p>	
	 <p style="text-align: center;">(f)</p>	

Figura 2.6. Redes de secuencia cero para transformadores [1].

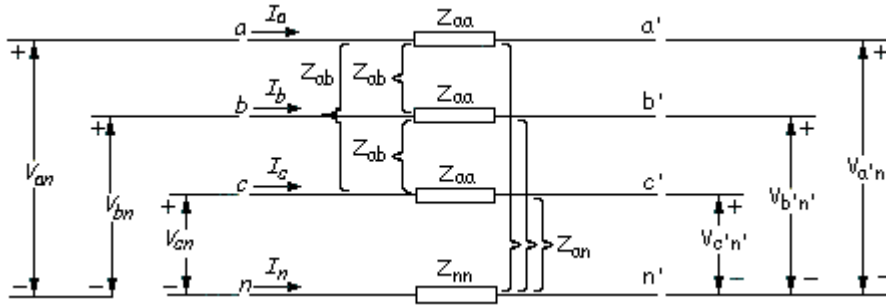


Figura 2.7. Sección de una línea de transmisión trifásica.

$$\begin{bmatrix} V_{aa'} \\ V_{bb'} \\ V_{cc'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{an} - V_{a'n'} \\ V_{bn} - V_{b'n'} \\ V_{cn} - V_{c'n'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Donde:

$Z_s$  : impedancias propias de cada fase incluyendo la presencia del neutro.

$$Z_s = Z_{aa} + Z_{nn} - 2Z_{an}$$

$Z_m$  : impedancias mutuas entre fases incluyendo el conductor neutro.

$$Z_m = Z_{ab} + Z_{nn} - 2Z_{an}$$

Reescribiendo la ecuación matricial en términos de las componentes simétricas de la fase **a** se tiene:

$$\begin{bmatrix} V_{aa'0} \\ V_{aa'1} \\ V_{aa'2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_s + 2Z_m & \cdot & \cdot \\ \cdot & Z_s - Z_m & \cdot \\ \cdot & \cdot & Z_s - Z_m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

con lo cual se definen las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero:

$$\begin{aligned}
 Z_1 &= Z_s - Z_m = Z_{aa} - Z_{ab} \\
 Z_2 &= Z_s - Z_m = Z_{aa} - Z_{ab} \\
 Z_0 &= Z_s + 2Z_m = Z_{aa} + 2Z_{ab} + 3Z_{mn} - 6Z_{an}
 \end{aligned}
 \tag{2.24}$$

Se observa de estas ecuaciones que la impedancia del conductor de retorno se incluye en la impedancia de secuencia cero de la línea y que las impedancias de secuencia positiva y negativa son iguales y no incluyen la impedancia del conductor de retorno. Además debe notarse que la corriente de secuencia cero es idéntica en magnitud y ángulo en cada fase, lo que ocasiona un campo magnético mayor que el producido por las corrientes de secuencia positiva y negativa; por esto la reactancia inductiva de secuencia cero es mayor que la reactancia inductiva de secuencia positiva y negativa. Normalmente es de 2 a 3,5 veces mayor [2].

Para líneas desbalanceadas, es decir, no transpuestas, debe tenerse en cuenta que la matriz de impedancias para el análisis debe considerar impedancias mutuas ( $Z_{ab}$ ,  $Z_{bc}$  y  $Z_{ca}$ ) diferentes (ya no podrían reemplazarse por  $Z_m$ ), así como las impedancias propias  $Z_{aa}$ ,  $Z_{bb}$  y  $Z_{cc}$ .

#### 2.2.2.4 Impedancias de secuencia para cargas

Para las cargas, así como para los transformadores, debe tenerse en cuenta el tipo de conexión de la carga para el caso de la secuencia cero. Los circuitos de secuencia usados para la representación de cargas son:

- Para las secuencias positiva y negativa el equivalente se muestra en la Figura 2.8 [3].

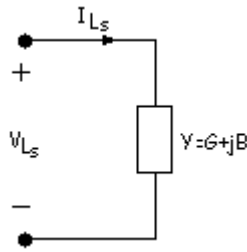


Figura 2.8. Red de secuencia positiva y negativa para las cargas [3].

Donde:

$s$  :Subíndice para indicar la secuencia (1 o 2)

$$G = \frac{P_L}{V_L^2 pf^2}; \quad B = \frac{Q_L}{V_L^2 pf^2} \quad (2.25)$$

$V_L^{pf}$  : Voltaje de carga prefallo

$P_L$  : Potencia activa de la carga

$Q_L$  : Potencia reactiva de la carga

- Para la secuencia cero se debe tener en cuenta la conexión de la carga, como se muestra en la Figura 2.9.

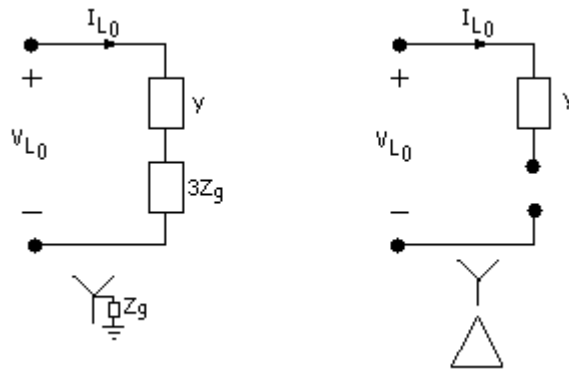


Figura 2.9. Red de secuencia cero para las cargas [3].

Es importante señalar que en los circuitos anteriores se representa la carga como impedancia en paralelo. Es posible también representar las cargas como impedancia serie, como se muestra en la Figura 2.10. Para los casos mostrados en la Figura 2.10 los valores de impedancia en p.u. son [4]:

$$\begin{aligned}
 R_p &= \frac{V_L^{pf^2}}{P_L}; & X_p &= \frac{V_L^{pf^2}}{Q_L} \\
 R_s &= \frac{V_L^{pf^2} S_B P_L}{P_L^2 + Q_L^2}; & X_s &= \frac{V_L^{pf^2} S_B Q_L}{P_L^2 + Q_L^2}
 \end{aligned}
 \tag{2.26}$$

Donde:

$V_L^{pf}$  : Voltaje de la carga en p.u.

$S_B$  : Potencia base.

$P_L$  y  $Q_L$  : Potencia activa y reactiva de la carga.

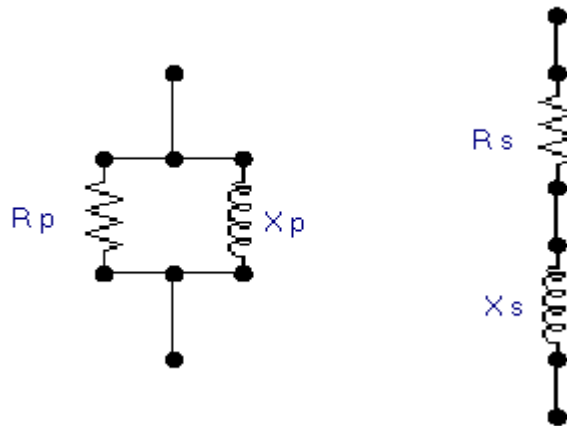


Figura 2.10. Representación en paralelo y en serie de las cargas.

A su vez, se debe tener en cuenta el tipo de carga de acuerdo a su dependencia con el voltaje [5], así: cargas a potencia constante, cargas a impedancia constante y cargas a corriente constante. Estas cargas pueden expresarse como:

$$\left( \frac{S}{S_i} \right) = \left( \frac{V}{V_i} \right)^k
 \tag{2.27}$$

Donde:

$S_i$  : Potencia inicial de la carga

$V_i$  : Voltaje inicial de la carga

$S$  : Potencia de la carga a un voltaje  $V$ .

$K$  : 0 para cargas a potencia constante; 1 para corriente constante; 2 para impedancia constante.

### 2.2.2.5 Conclusiones

En términos generales se define la impedancia de secuencia positiva de un elemento como la relación entre la tensión fase - neutro y la corriente de fase cuando se alimenta con un sistema balanceado de secuencia positiva. Para la impedancia de secuencia negativa, el sistema de alimentación es un sistema balanceado de secuencia negativa. En el caso de la impedancia de secuencia cero, ésta corresponde a la relación entre la tensión fase-neutro y la corriente de fase para un sistema de alimentación monofásico, con tres conductores principales dispuestos en paralelo que transportan la corriente de ida y un conductor de retorno común que lleva una corriente tres veces mayor que la monofásica [6]. Las impedancias de secuencia positiva y negativa para cualquier circuito estático son iguales.

## 2.3 FALLOS BALANCEADOS Y DESBALANCEADOS

Los fallos balanceados o simétricos (fallos trifásicos) tienen una frecuencia de ocurrencia del 5%, es decir, son los que menos se presentan en los sistemas de potencia bajo condiciones normales de operación. Sin embargo, su estudio es muy utilizado en el cálculo de protecciones debido a que presenta las condiciones extremas del sistema. Por el contrario, los fallos desbalanceados (línea a tierra, doble línea, doble línea a tierra) se presentan con mayor frecuencia, siendo el línea a tierra el más común de todos. Para resolver los fallos tanto balanceados como desbalanceados se puede hacer uso del método de las componentes simétricas, mediante el cual se interconectan redes de secuencia positiva, negativa y cero dependiendo del tipo de fallo [1].

### 2.3.1 Fallos trifásicos

La situación que se presenta en un fallo trifásico se muestra en la Figura 2.11.

Las tensiones de fallo entre cada fase y tierra serán:

$$\begin{aligned}
 V_{af} &= I_{af} Z_f + (I_{af} + I_{bf} + I_{cf}) Z_g \\
 V_{bf} &= I_{bf} Z_f + (I_{af} + I_{bf} + I_{cf}) Z_g \\
 V_{cf} &= I_{cf} Z_f + (I_{af} + I_{bf} + I_{cf}) Z_g
 \end{aligned}
 \tag{2.28}$$

Teniendo en cuenta que el sistema está balanceado,  $I_{af} + I_{bf} + I_{cf} = 0$ , por lo que  $Z_g$  es como si no estuviera. Sabiendo que las corrientes de una secuencia solo ocasionan caídas de tensión de esa misma secuencia, se tiene:

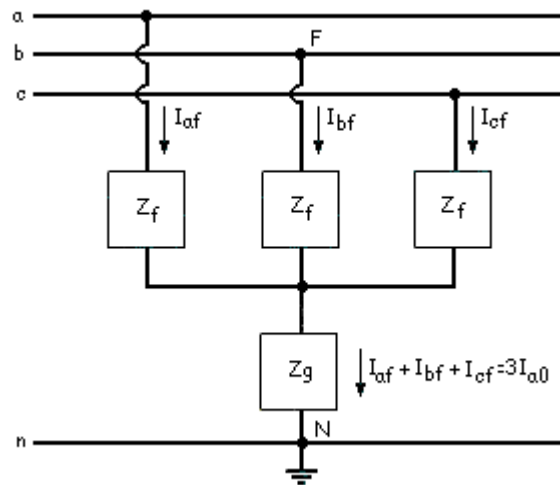


Figura 2.11. Representación general de un fallo trifásico.

$$\begin{aligned}
 V_{a1} &= I_{a1} Z_f \\
 V_{a2} &= I_{a2} Z_f \\
 V_{a0} &= I_{a0} Z_f
 \end{aligned}
 \tag{2.29}$$

Pero también se tiene que para una fuente balanceada las componentes de secuencia son:

$$\begin{aligned} V_{a1} &= V_{pf} - I_{a1}Z_1 \\ V_{a2} &= 0 - I_{a2}Z_2 \\ V_{a0} &= 0 - I_{a0}Z_0 \end{aligned} \tag{2.30}$$

Donde  $V_{pf}$  es el voltaje en la fase **a** antes del fallo (voltaje prefallo). Igualando las tensiones de secuencia de las ecuaciones anteriores se llega a:

$$\begin{aligned} I_{a1} &= \frac{V_{pf}}{Z_1 + Z_f} \\ I_{a2} &= 0 \\ I_{a0} &= 0 \end{aligned} \tag{2.31}$$

Por lo tanto los voltajes de secuencia negativa y cero serán nulos y el voltaje de secuencia positiva igual a:  $V_{a1} = I_{a1}Z_f$ . Las corrientes de fallo para cada fase serán iguales a  $I_{a1}$ . En este tipo de fallos las redes de secuencia están aisladas una de otra como se muestra en la Figura 2.12.

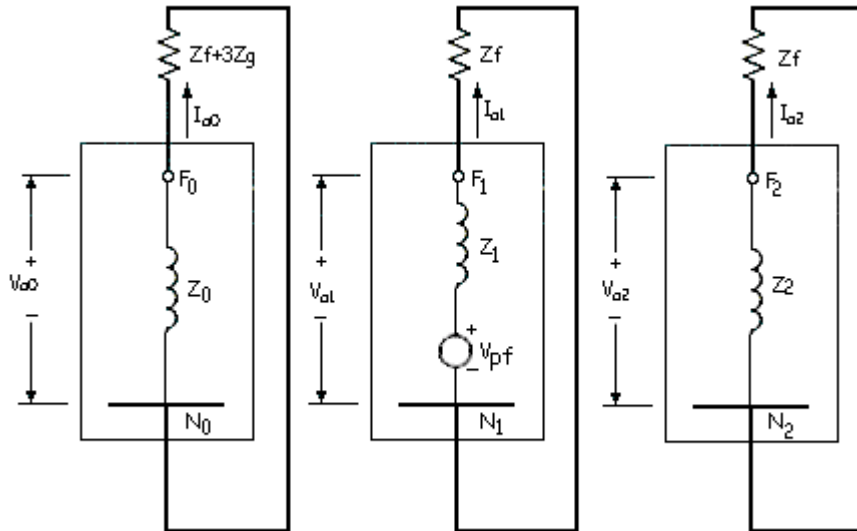


Figura 2.12. Interconexión de redes de secuencia para un fallo trifásico.

### 2.3.2 Fallos línea a tierra

Este tipo de fallos es un ejemplo de los fallos desbalanceados y su esquema general se muestra en la Figura 2.13.

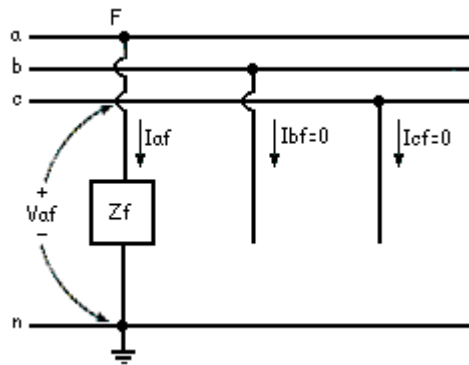


Figura 2.13. Representación general de un fallo línea – tierra.

De la figura se nota que las corrientes por las fases no falladas son iguales a cero, por lo que las corrientes de secuencia, de acuerdo a lo visto en la ecuación (2.4) serán iguales a:

$$I_{a1} = \frac{I_{af}}{3} \quad I_{a2} = \frac{I_{af}}{3} \quad I_{a0} = \frac{I_{af}}{3} \quad (2.32)$$

Teniendo en cuenta la ecuación de los voltajes de secuencia (2.4) y sabiendo que  $V_{af}=I_{af}Z_f$  se tiene:

$$V_{af} = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \quad (2.33)$$

$$I_{af}Z_f = V_{a0} + V_{a1} + V_{a2} \quad (2.34)$$

Aplicando la ecuación de definición de los voltajes de secuencia (2.30) en la ecuación (2.34) y teniendo en cuenta que las corrientes de secuencia son iguales, se tiene:

$$3I_{a0}Z_f = V_{pf} - I_{a0}(Z_1 + Z_2 + Z_0) \quad (2.35)$$

$$I_{a0} = \frac{V_{pf}}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z_f} \quad (2.36)$$

La interconexión de las redes de secuencia para este tipo de fallo se muestra en la Figura 2.14 y la corriente de fallo se puede encontrar entonces con la ecuación (2.32).

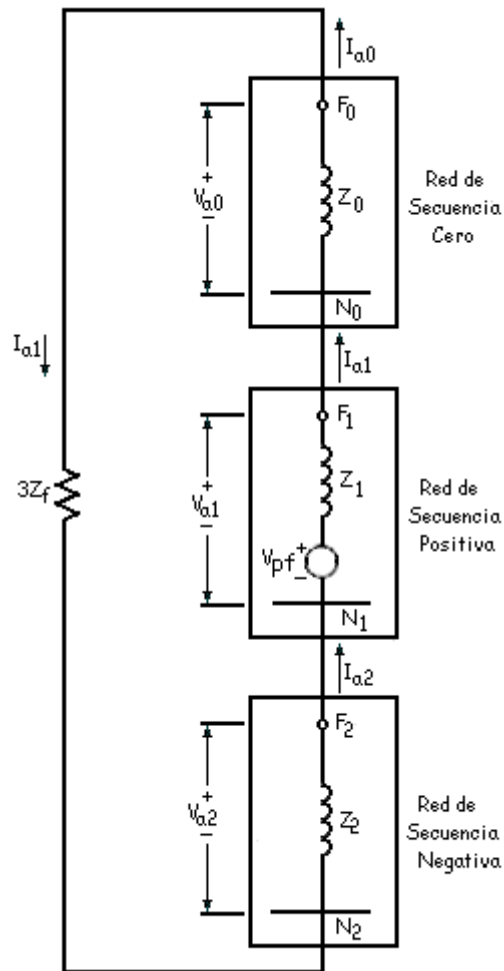


Figura 2.14. Interconexión de redes de secuencia para fallos línea – tierra.

### 2.3.3 Fallos doble línea a tierra

En este tipo de fallos dos fases entran en contacto una con otra y con tierra al mismo tiempo, tal como se muestra en la Figura 2.15. De la figura se pueden obtener las siguientes ecuaciones [7]:

$$I_{af} = 0 \quad (2.37)$$

$$V_{bf} = I_{bf}Z_f + (I_{bf} + I_{cf})Z_g = I_{bf}(Z_f + Z_g) + I_{cf}Z_g \quad (2.38)$$

$$V_{cf} = I_{cf}Z_f + (I_{bf} + I_{cf})Z_g = I_{cf}(Z_f + Z_g) + I_{bf}Z_g \quad (2.39)$$

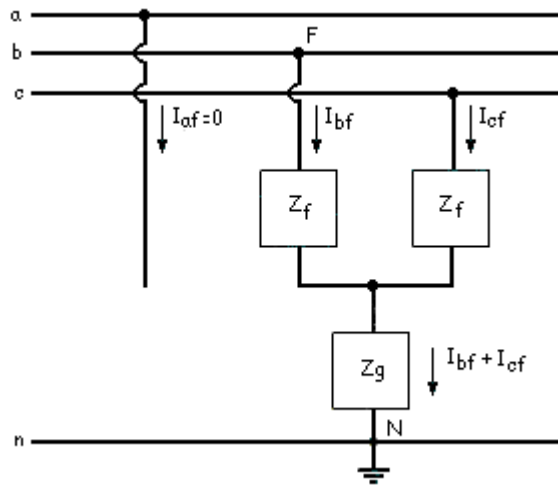


Figura 2.15. Representación general de los fallos doble línea – tierra.

Realizando la diferencia de potencial entre las fases falladas (en este caso **b** y **c**) y expresando dicha diferencia en términos de las componentes de secuencia se llega a:

$$V_{a1} - I_{a1}Z_f = V_{a2} - I_{a2}Z_f \quad (2.40)$$

Realizando la suma de los voltajes de las fases falladas y expresando el resultado en términos de sus componentes simétricas se obtiene:

$$V_{a1} - I_{a1}Z_f = V_{a0} - I_{a0}(Z_f + 3Z_g) \quad (2.41)$$

Igualando las ecuaciones (2.40) y (2.41) y reemplazando por las expresiones para las componentes simétricas de la ecuación (2.30) se tiene:

$$V_{pf} - I_{a1}(Z_1 + Z_f) = -I_{a2}(Z_2 - Z_f) = -I_{a0}(Z_0 + Z_f + 3Z_g) \quad (2.42)$$

De la ecuación (2.42) se nota que los voltajes de secuencia son iguales, por lo que la interconexión de las redes de secuencia es como se muestra en la Figura 2.16 (en paralelo). De la Figura 2.16 se pueden obtener las corrientes de secuencia positiva, negativa y cero:

$$I_{a1} = \frac{V_{pf}}{(Z_1 + Z_f) + \frac{(Z_2 + Z_f)(Z_0 + Z_f + 3Z_g)}{Z_0 + Z_2 + 2Z_f + 3Z_g}} \quad (2.43)$$

$$I_{a2} = -I_{a1} \left( \frac{Z_0 + Z_f + 3Z_g}{Z_2 + Z_0 + 2Z_f + 3Z_g} \right) \quad (2.44)$$

$$I_{a0} = -(I_{a1} + I_{a2}) \quad (2.45)$$

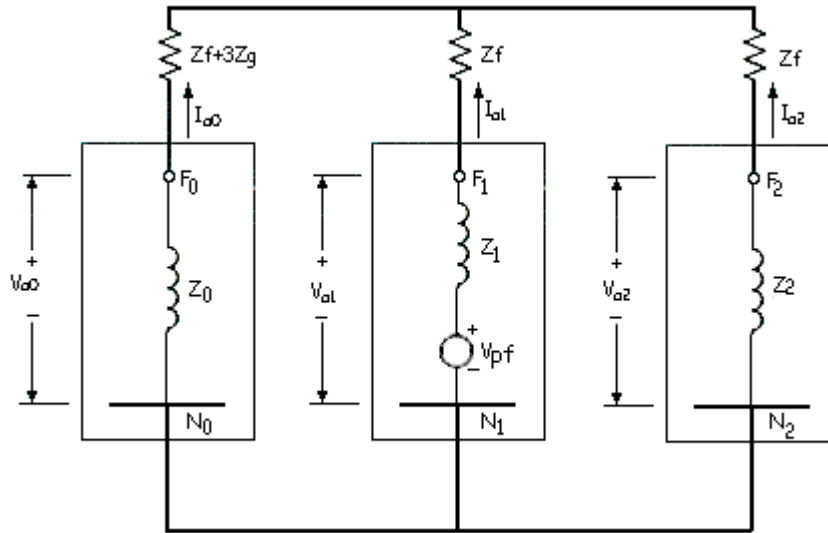


Figura 2.16. Interconexión de redes de secuencia para fallos doble línea – tierra.

### 2.3.4 Fallos línea a línea

Ocurren cuando dos fases entran en contacto una con otra. La situación para este tipo de fallos se muestra en la Figura 2.17. De dicha figura se desprenden las siguientes ecuaciones:

$$I_{af} = 0 \quad (2.46)$$

$$I_{bf} = -I_{cf} \quad (2.47)$$

$$V_b - V_c = I_{bf} Z_f \quad (2.48)$$

Teniendo presente las ecuaciones (2.46) y (2.47) y la definición de las corrientes de secuencia se tiene:

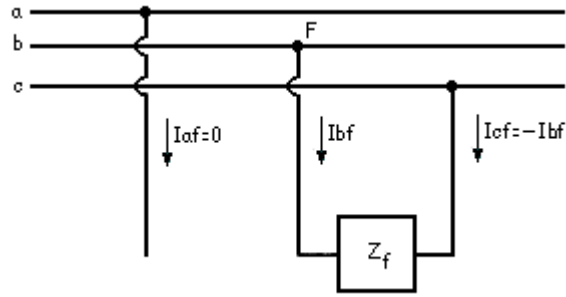


Figura 2.17. Representación general de fallos línea – línea.

$$I_{a0} = 0 \quad (2.49)$$

$$I_{a1} = \frac{V_{a1} - V_{a2}}{Z_f} = -I_{a2} \quad (2.50)$$

$$V_{a1} = V_{pf} - Z_1 I_{a1} \quad (2.51)$$

$$V_{a2} = -Z_2 I_{a2} \quad (2.52)$$

$$V_{a0} = 0 \quad (2.53)$$

$$I_{b f} = -I_{c f} = (a^2 - a)I_{a1} \quad (2.54)$$

Se debe tener presente que  $a = 1 \angle 120^\circ$ .

Por consiguiente en la interconexión de las redes de secuencia no existe la red de secuencia cero y las redes de secuencia positiva y negativa se conectan a través de la impedancia de fallo  $Z_f$ , como se muestra en la Figura 2.18.

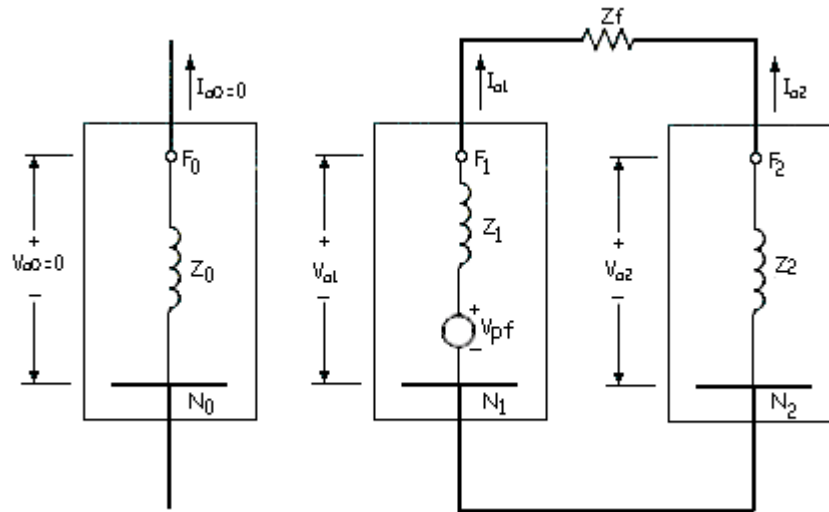


Figura 2.18. Interconexión de redes de secuencia para fallos línea – línea.

## 2.4 COMPARACIÓN DE LOS CORTOCIRCUITOS SEGÚN LA PUESTA A TIERRA DEL SISTEMA

Redes con el neutro aislado: En este tipo de redes la máxima corriente inicial simétrica se presenta en un fallo trifásico balanceado [6]. Un ejemplo de este comportamiento se presenta en la guía de prácticas de corto circuito No. 3, anexo IV.

Redes con puesta a tierra compensante: Son redes en las que el neutro se conecta a tierra a través de una reactancia inductiva, denominada bobina de compensación o bobina de Petersen. En el caso de que la impedancia inductiva sea igual a la impedancia capacitiva de la red respecto a tierra, la corriente inicial simétrica máxima se presenta en un fallo trifásico. En el caso que la impedancia inductiva sea mayor que la impedancia capacitiva de la red respecto a tierra, la corriente de fallo trifásico sigue siendo la más elevada (en la guía de prácticas No. 3 de corto circuito, anexo IV, se presenta un ejemplo de este caso). En los casos donde la impedancia inductiva sea menor que el 50% de la impedancia capacitiva de la red respecto a tierra (puesta a tierra a través de impedancias de bajo valor óhmico), las corrientes iniciales simétricas para fallos línea-línea-tierra y línea-

---

tierra son mayores que las correspondientes a fallos trifásicos [6]. Este caso puede encontrarse en la guía de prácticas No. 4 de corto circuito, anexo IV.

Redes sólidamente aterrizadas: En estas redes las corrientes de cortocircuito entre fase y tierra pueden exceder el 30% a los valores correspondientes para un cortocircuito trifásico y las corrientes para cortocircuitos línea – línea – tierra pueden ser hasta el 50% mayores que las corrientes por fallos trifásicos [6]. Ejemplo de ello puede encontrarse en la guía de prácticas No. 3 de corto circuito, anexo IV.

## 2.5 CÁLCULO DE FALLAS USANDO $Z_{\text{barra}}$

Para el estudio de fallas con la matriz de impedancias de barra, se consideran los generadores como una fuente de tensión equivalente al voltaje interno subtransitorio del mismo en serie con su reactancia subtransitoria, en lugar de la reactancia sincrónica utilizada para el estudio de flujos de carga. Si se quiere simular una falla en una barra  $i$  del sistema, se conectan dos fuentes de tensión  $V_{\text{pf}}$  y  $-V_{\text{pf}}$  en serie, entre la barra fallada y tierra para representar un cortocircuito sólido [2], en donde  $V_{\text{pf}}$  es el voltaje prefallo. Esto da origen a una corriente de rama  $I_f''$  que corresponde a la corriente de fallo. La metodología a seguir para hallar la corriente de fallo y los voltajes en las barras es la siguiente:

- Se cortocircuitan las fuentes de voltaje interno subtransitorio correspondientes a los demás generadores y la fuente  $V_{\text{pf}}$  correspondiente al voltaje prefallo de la barra afectada. Sólo se deja la fuente  $-V_{\text{pf}}$  en el sistema, teniendo en cuenta que la corriente que fluye por dicha fuente hacia la barra afectada es  $-I_f''$ .
- Se plantean las ecuaciones de impedancias de nodos utilizando la matriz  $Z_{\text{barra}}$  ( $V=Z I$ ). Se debe notar que la única corriente que se inyecta es  $-I_f''$  en la barra afectada; para los demás nodos no hay inyección de corriente. Los voltajes son indicados como  $\Delta V_j$  para una barra  $j$  no afectada; ellos representan el cambio

---

de voltaje en tal barra debido a la corriente  $-I_f''$ . Para la barra afectada el voltaje equivale al valor del voltaje prefallo  $V_{pf}$ .

- Como en el vector columna que representa el valor de la corriente inyectada en cada barra, el único valor diferente de cero corresponde a la fila  $i$ , que representa a la barra fallada ( $-I_f''$ ), los únicos valores que se tienen en cuenta en la matriz  $Z_{barra}$  son los correspondientes a la columna  $i$ . Esto hace que la multiplicación de  $Z_{barra}$  por el vector de corrientes sea un vector columna que corresponde a los valores de la columna  $i$  de  $Z_{barra}$  multiplicados por el escalar  $-I_f''$ .
- De la fila  $i$  de la ecuación matricial del paso anterior, se obtiene el valor de la corriente de fallo  $I_f''$  en términos del voltaje prefallo  $V_{pf}$  y de la impedancia del punto de operación de la barra afectada. Este valor es reemplazado nuevamente en la ecuación matricial anterior para obtener los cambios de voltaje  $\Delta V$  en términos del voltaje prefallo  $V_{pf}$  y de las impedancias relacionadas con la barra afectada.
- Se aplica el principio de superposición: los voltajes existentes antes de la falla se suman con los cambios de voltaje  $\Delta V$  que se presentan cuando ocurre la falla para obtener los voltajes totales de las barras después del fallo. Generalmente las redes se suponen sin carga cuando ocurre un fallo, por lo cual los voltajes prefallo en todas las barras del sistema son iguales al voltaje prefallo de la barra afectada  $V_{pf}$ , esto simplifica las ecuaciones resultantes al aplicar el principio de superposición.
- Si se tiene en cuenta la simplificación anterior, los voltajes de barra después del fallo quedan expresados en función del voltaje prefallo  $V_{pf}$  y de las impedancias correspondientes a la columna de  $Z_{barra}$  de la barra fallada. El voltaje en la barra afectada después del fallo (cortocircuito), es cero.

- Con los voltajes de barra después de la falla y las impedancias se pueden calcular los flujos de corriente entre las barras del sistema [2].

## 2.6 ESTUDIOS DE CORTOCIRCUITO

Debido a que los cortocircuitos provocan modificaciones a las magnitudes de un sistema de potencia, es necesario llevar a cabo un estudio de los mismos para dimensionar o comprobar dispositivos de protección, determinar los esfuerzos a que son sometidos los componentes del sistema ante un cortocircuito, determinar la influencia que tiene sobre todo el sistema un cortocircuito en un área específica, entre otros. Los fenómenos transitorios causados por un cortocircuito dependen del tipo de cortocircuito, del instante en que se produce, de las fuentes de cortocircuito involucradas, de las condiciones prefallo, del punto de fallo, de su duración y de la forma o topología de la red [5].

Los pasos a seguir en general para efectuar un estudio de cortocircuito son [5]:

- Elaborar un diagrama unifilar del sistema: este diagrama debe representar completamente el sistema mostrando los elementos del mismo que son necesarios para realizar el estudio de cortocircuito.
- Determinar los requerimientos del estudio: dependiendo de los propósitos del estudio se efectúan los cálculos para los distintos tipos de cortocircuito; es importante notar que no siempre un mismo tipo de fallo es el más severo para todos los sistemas.
- Determinar las impedancias del sistema: es necesario modelar cada elemento teniendo en cuenta las impedancias de secuencia positiva, negativa y cero dependiendo del tipo de fallo a estudiar y del tipo de elementos (activos y pasivos).

- Preparar un diagrama de impedancias: en este diagrama deben indicarse los valores de las impedancias de los componentes en coordenadas rectangulares y teniendo en cuenta para los elementos activos factores de multiplicidad de los valores de impedancia para interrupción de la corriente a medio ciclo, de 3 a 5 ciclos y de 30 ciclos después del fallo, según normas ANSI/IEEE [5]. Se deben incluir en el diagrama los niveles de tensión antes del fallo en cada barra del sistema.
- Calcular las corrientes de cortocircuito: con los valores de impedancia calcular las corrientes de cortocircuito en cada punto de fallo y las corrientes que circulan por el resto del sistema, así como los voltajes en cada barra.
- Interpretar y aplicar los resultados del estudio: estos dependen de cada sistema en particular, así como de los fines para los cuales se realizó el estudio (comprobación de los rangos de corriente de los dispositivos de protección, expansión del sistema de potencia, incorporación de nuevos generadores o de nuevas carga, entre otros).

## 2.7 APLICACIÓN DE LOS ESTUDIOS DE CORTOCIRCUITO AL DIMENSIONAMIENTO DE DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN

Una de las aplicaciones de los estudios de cortocircuito es el dimensionamiento de dispositivos de protección o interruptores (circuit breakers), utilizando las normas ANSI-IEEE C37 por medio del método E/X simplificado [8]. En el cálculo de corrientes de cortocircuito el valor que más importa es la magnitud de la corriente rms de cortocircuito que viene dada por:  $I_{RMS}(t)=(I_{AC}^2+I_{DC}^2)^{1/2}$ , donde  $I_{AC}$  e  $I_{DC}$  son las componentes de corriente alterna y de corriente directa de la corriente de cortocircuito. En los primeros estándares la corriente que se debía calcular para dimensionar los dispositivos de protección incluía el cálculo de la componente directa de la corriente al momento de separación de los contactos. Se incluyó entonces un método simplificado (método E/X) para obtener la corriente rms que

consiste en multiplicar la corriente simétrica de cortocircuito por un factor dependiente de las características del sistema y de la velocidad del dispositivo de protección, para obtener la corriente rms total al momento de separación de los contactos. En este método los generadores son modelados como una fuente de voltaje en serie con la reactancia subtransitoria, para obtener la corriente inicial simétrica de cortocircuito y en serie con la reactancia transitoria para obtener la corriente de cortocircuito a unos pocos ciclos después. La componente DC es ignorada. El método simplificado debe tener en cuenta la impedancia que divide el voltaje de fallo para encontrar la corriente de cortocircuito; la aplicación o no de este método depende de la relación  $X/R$  de esta impedancia.

Encontrar esta relación en un punto de fallo determinado puede realizarse de dos maneras: - Determinando una reactancia equivalente de Thévenin en el punto de fallo sin tener en cuenta las resistencias y una resistencia equivalente de Thévenin sin tener en cuenta las reactancias. La relación  $X/R$  para el punto de fallo es el cociente entre la reactancia de Thévenin y la resistencia de Thévenin. - La otra forma es usando los algoritmos de construcción de  $Z_{\text{barra}}$ ; la primera vez se ejecuta el algoritmo sin tener en cuenta las resistencias para obtener  $X_{\text{barra}}$  y la segunda vez se ejecuta el algoritmo sin tener en cuenta las reactancias para obtener  $R_{\text{barra}}$ . La relación  $X/R$  para cada barra  $i$  se encuentra por la relación del  $i$ -ésimo elemento de la diagonal de  $X_{\text{barra}}$  sobre el  $i$ -ésimo elemento de la diagonal de  $R_{\text{barra}}$ . Es importante hallar esta relación ya que permite seleccionar factores de multiplicidad adecuados según los estándares ANSI C37 y además tiene un significado físico fundamental: representa la constante de tiempo a la cual el término aperiódico (componente DC) de la corriente de cortocircuito decae exponencialmente [8].

Según las últimas normas ANSI, si la relación  $X/R$  es menor o igual a 15 para sistemas de medio y alto voltaje, la corriente simétrica puede utilizarse como la capacidad de interrupción del dispositivo de protección, pero si la relación  $X/R$  es mayor a 15, se deben utilizar curvas para obtener un factor de multiplicación para

la corriente de cortocircuito simétrica y así calcular la capacidad de interrupción del dispositivo. En las normas ANSI también se debe considerar la velocidad de interrupción del dispositivo, que viene expresada por la cantidad de ciclos que transcurren entre el momento que ocurre la falla y el momento en que se extingue el arco [8].

## 2.8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GÖNEN, T. *Power System Analysis*. New York: John Wiley & Sons, 1.988.
- [2] GRAINGER, J. Y STEVENSON W. D. *Análisis de Sistemas de Potencia*. México: McGraw-Hill, 1.994.
- [3] CAÑIZARES, C. *E&CE 465 Computer Simulation of Power Systems: Faults*. University of Waterloo, Dep. Electrical & Computer Engineering, 1.999.
- [4] ANDERSON, P. M. *Analysis of Faulted Power Systems*. New York: IEEE Press, 1.973.
- [5] IEEE. *IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis*. New York: IEEE Inc., 1.990.
- [6] ROEPER, R. *Corrientes de cortocircuito en redes trifásicas*. Barcelona: Marcombo S.A, 1.985.
- [7] EL-HAWARY, M. E. *Electrical Power Systems: Analysis and Design*. New York: IEEE Press, 1.995.
- [8] BRICE, C. W. *Electric Power Systems: Fault Calculations*. Agosto, 1.999.  
<http://www.ece.sc.edu/classes/Spring01/elct751/Notes2.htm>

## **ANEXO III**

**GUÍAS DE PRÁCTICAS DE SIMULACIÓN DE FLUJOS DE CARGA  
Y CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO CON ETAP  
POWERSTATION 3.02**

### OBJETIVOS GENERALES

- Mostrar la aplicación del programa **ETAP PowerStation 3.02** en la solución de flujos de carga y corrientes de corto circuito.
- Obtener los conocimientos básicos necesarios para la solución computacional de flujos de carga y el análisis de corrientes de corto circuito.
- Realizar estudios de sensibilidad con el fin de analizar las condiciones de operación en los sistemas de potencia presentados.

**PRÁCTICAS DE SIMULACIÓN DE FLUJOS  
DE CARGA CON ETAP POWERSTATION  
3.02**

## PRÁCTICA No. 1 TUTORIAL

### 1. OBJETIVOS

- Familiarizarse con el manejo del programa **ETAP POWERSTATION 3.02**.
- Correr el flujo de carga para un sistema básico Generador-Línea-Carga.
- Observar el efecto de las variaciones de carga y parámetros de líneas en la solución del flujo de carga.

### 2. PRELABORATORIO

- Halle  $Y_{\text{barra}}$  para el sistema de la Figura 1.
- ¿Qué es el caso base?
- ¿Para qué sirve un flujo de carga?
- ¿Para qué se utilizan las técnicas de esparcimiento de matrices?
- ¿Presentan alguna utilidad las impedancias de secuencia cero en un estudio de flujo de carga?
- ¿Para que se utilizan las categorías de carga que tiene ETAP PowerStation?

### 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema que se va analizar consiste de un generador alimentando una carga a través de una línea de transmisión. La línea es trifásica con una longitud de 4,5km y tiene una impedancia  $Z$ . Como se muestra en la Figura 1.

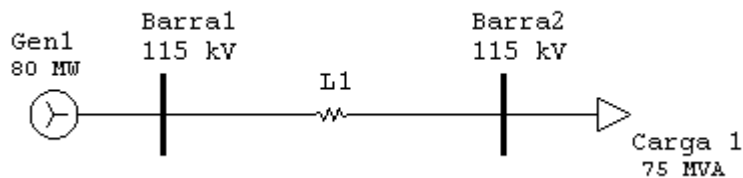


Figura 1. Diagrama unifilar del caso base para la práctica No. 1 de flujo de carga con ETAP PowerStation 3.02.

Los datos de los elementos se encuentran en las siguientes tablas:

**Tabla 1. Datos de las Barra.**

Barra (ID)	kV nominales	%V	Ángulo
Barra1	115	100	0
Barra2	115	100	0

**Tabla 2. Datos de la línea.**

Impedancia		ID	R+ (ohm)	Ro (ohm)	X+ (ohm)	Xo (ohm)	Y+(micro-S)	Yo (micro-S)
De barra	A barra							
1	2	L1	0,4257	1,863	2,0844	6,678	16,182	9,072

**Tabla 3. Datos del generador.**

Generador	ID	kV nominales	MW nominales	Factor de potencia (%)	Modo	Modo Swing	
						%V	Ángulo
Barra 1	Gen1	115	100	85	Swing	100	0

**Tabla 4. Datos de la carga.**

Carga	ID	kV nominales	MW	Factor de potencia (%)
Barra 2	Carga1	115	60	80

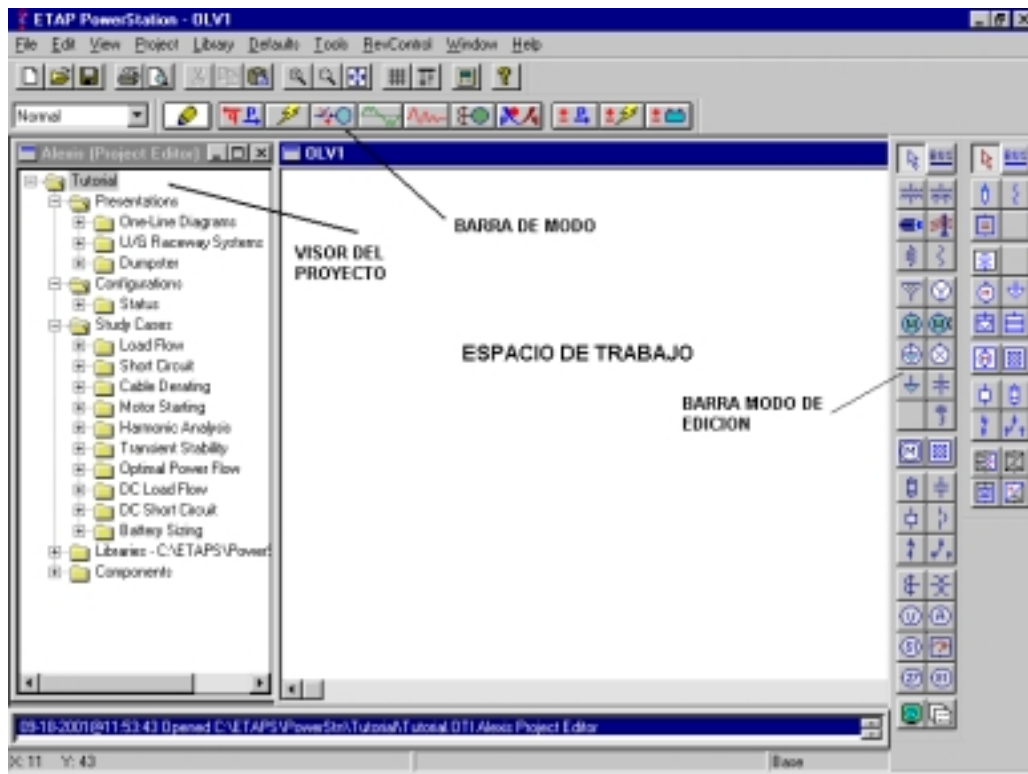
## 4. PROCEDIMIENTO

**4.1** Inicie el programa **ETAP PowerStation 3.02**. En el menú File escoja la opción **New Project** para crear un nuevo proyecto. Digite el nombre del proyecto, por ejemplo flujos1 y de clic en OK. Aparece una ventana llamada **User Information** llene los datos que piden y de clic en OK, con lo que aparece el ambiente de trabajo mostrado en la Figura 2. Recuerde que cuando se cierra el proyecto y se abre por *segunda* vez el programa pregunta por un archivo de librería, busque dentro de la carpeta **Powerstn** el archivo etaplib3.lib y selecciónelo.

**4.2** Cambie el nombre al diagrama unifilar, esto se hace dando doble clic sobre el espacio de trabajo, cuando se está en modo de edición. En el lado derecho se tiene la **barra de herramientas de edición**, que es, donde se encuentran los diferentes elementos disponibles para la simulación, Figura 3. Explore esta barra pasando el cursor del mouse por encima de cada uno de los botones. Coloque dos barras, una impedancia, un generador y una carga estática sobre el espacio de trabajo, esto se realiza haciendo clic sobre cada elemento seleccionado y luego

sobre el lugar de trabajo donde se va a poner. Una los elementos de forma que queden como se muestra en la Figura 1. Para unirlos, haga clic sobre el extremo de uno de los elementos y manténgalo sostenido hasta llegar al elemento con el que se va a unir. Recuerde que las ramas (impedancia, líneas de transmisión, transformadores, etc.) solo pueden ser conectadas a barras, no se pueden unir dos ramas directamente. Una explicación más detallada se encuentra en el capítulo **One-line Diagram GUI** de la ayuda o de la guía de usuario.

**4.3** Para el ingreso de las propiedades de los elementos se debe estar en modo de edición, cuando se crea un proyecto el programa está por defecto en este modo; para volver al modo de edición después de correr cualquier análisis, se debe hacer clic sobre el **botón de modo de edición (Edit)** en la **barra de herramienta de modo**, Figura 5. Ingrese las propiedades de los elementos haciendo doble clic sobre estos o haciendo clic derecho y seleccionando la opción propiedades (**Properties**) de la ventana que se abre, en esta ventana también se puede cambiar el tamaño, la orientación y el símbolo. (En el numeral **(3)** se encuentran los datos mínimos necesarios de los elementos para correr un flujo de carga).



**Figura 2. Ambiente de trabajo de ETAP PowerStation 3.02.**

**4.3.1** Haciendo doble clic en el icono del generador ubicado en el espacio de trabajo se ingresan los siguientes datos como se indica: en la pestaña **Info** se introduce el modo de operación del generador; en la pestaña **Rating** los datos kV nominales, MW nominales, factor de potencia, límites de reactivos y voltaje de

diseño (operación). Haciendo doble clic en el icono de la barra se ingresan los datos kV nominales, voltaje inicial y factor de diversidad en la página **Info**. Haciendo doble clic en el icono de la línea se ingresan los datos de impedancia de secuencia cero y positiva con sus unidades en la pestaña **Rating**. Haciendo doble clic sobre la carga estática se llega al **editor de carga estática** donde se completan los espacios kV nominales, MVA nominales, factor de potencia en % y categorías de carga en la pestaña **Rating** (observe que los espacios MW, Mvar y Amps se asignan automáticamente a partir de la información suministrada).



**Figura 3. Barra de herramientas de edición.**

**4.4** Una vez elaborado el diagrama unifilar vaya al visor de proyecto, Figura 4, haga clic derecho sobre la carpeta **Load Flow** y seleccione **Create New**. Con lo que se crea un caso de estudio de flujo de carga, en nuestro caso LF1. El caso de estudio de flujo de carga **Load Flow Study Case** contiene todas las opciones de configuración necesarias para correr un flujo de carga.

**4.5** Expanda el árbol de **Load Flow** y haga doble clic en LF1. Con esto se edita las opciones del **caso de estudio de flujo de carga**. Para esta práctica se van dejar los datos por defecto por lo tanto haga clic en OK. Haga clic sobre el diagrama unifilar para volver al modo de edición.

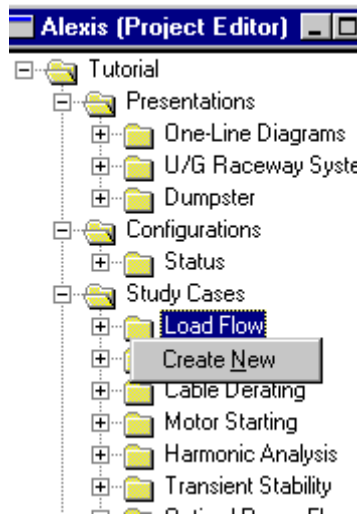


Figura 4. Visor del proyecto.

4.6 En la barra de herramienta de modo **Mode Toolbar**, Figura 5, seleccione el botón de análisis de flujo de carga **Load Flow Analysis**, con lo que aparece al costado derecho la barra de flujo de carga (**Load Flow**), Figura 6, en esta barra se encuentran los botones para **correr el flujo de carga, actualizar la corriente de carga de cables, opciones de muestra y el manejador de reportes**.

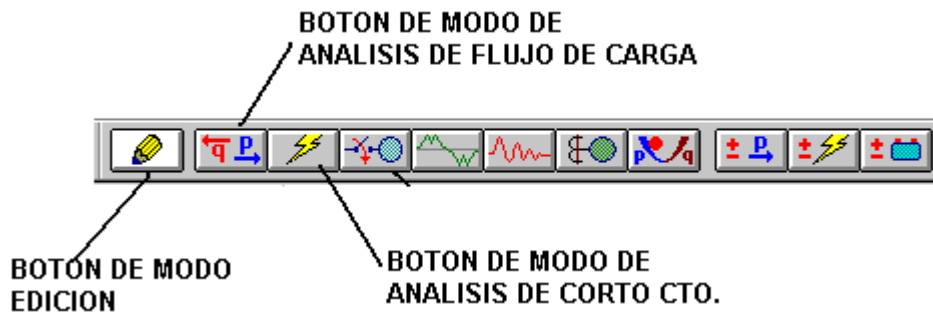


Figura 5. Barra de herramienta de modo (Mode Toolbar).

4.7 Cuando se selecciona el modo de **Load Flow Analysis** también se activa una barra de herramientas de caso de estudio **Study Case Toolbar**, Figura 7. Del menú desplegable de esta barra seleccione LF1. Desde esta barra también se pueden editar las opciones del **caso de estudio de flujo de carga** haciendo clic sobre el botón al lado del menú desplegable, en el que aparece el nombre del caso de estudio.

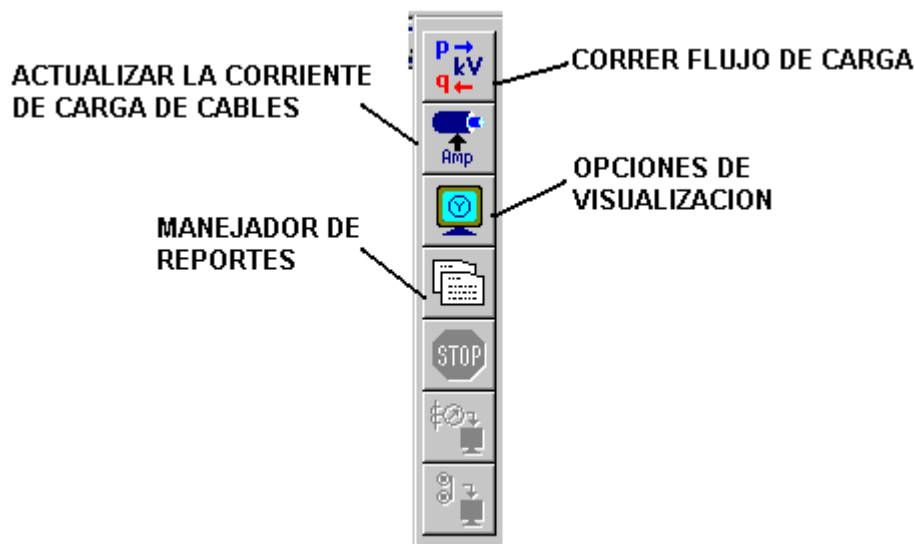


Figura 6. Barra de herramienta de flujo de carga (Load Flow Toolbar).

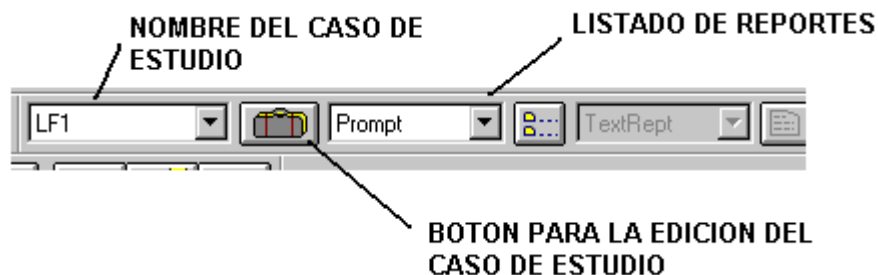


Figura 7. Barra de herramienta de caso de estudio (Study Case Toolbar).

4.8 Haga clic sobre el botón de opciones de visualización **Display Options** en la barra de herramienta de flujo de carga (**Load Flow Toolbar**) y seleccione cuales son las anotaciones de los resultados que se van a mostrar en el diagrama unifilar. Para este caso solo cambie kVA por MVA en el menú desplegable que parece en la sección **Power Flow** de la pestaña **Rating**. Pueden seleccionarse y deseccionarse las diferentes opciones para mirar el cambio en la visualización de resultados sobre el diagrama unifilar.

4.9 Presione el botón correr flujo de carga **Run Load Flow** de la **barra de herramientas de flujo de carga**. La primera vez que se ejecuta esta opción el programa pregunta el nombre del archivo en el que se va guardar el reporte, digite un nombre y espere a que el flujo sea resuelto. Revise y guarde los resultados obtenidos.

4.10 Presione el botón **View Output File** de la **barra de herramienta de flujo de carga**, vaya a la pestaña **Result** del manejador de reportes de flujo de carga **Load Flow Report Manager**, Figura 8, seleccione **Lfreport** y haga clic en OK. Aquí se

visualizan los resultados finales del flujo de carga. En la parte superior de la Ventana hay un botón (**Export**) que permite exportar este documento a otros formatos, presiónelo y elija el formato **Word for Windows**, con destinación al disco. Con esto se puede abrir el resultado en **Word**.

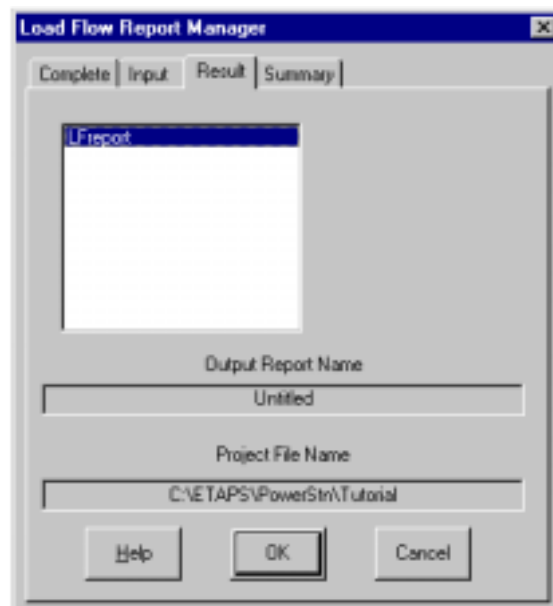
**4.11** Revise las otras pestañas del manejador de reportes, Figura 8, para conocer las otras opciones de muestra de los resultados.

## ESTUDIOS DE SENSIBILIDAD

### Variación de la carga

**4.12** En la opción **Loading Category** dentro de la pestaña **Loading** del **editor de la carga estática**, vaya a la categoría de carga **Shutdown** y coloque 50%, Figura 9.

**4.13** Edite el caso de estudio de flujo de carga, en la sección **Loading** elija la categoría **Shutdown**, Figura 10. Con lo que se corre un flujo con un 50% de la carga, haga clic sobre OK y corra el flujo de carga. Revise y guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con el voltaje de la carga y la carga de operación con respecto al caso base? ¿Por qué? ¿Qué sucede con las pérdidas del sistema con respecto a las del caso base?



**Figura 8.** load flow report manager.

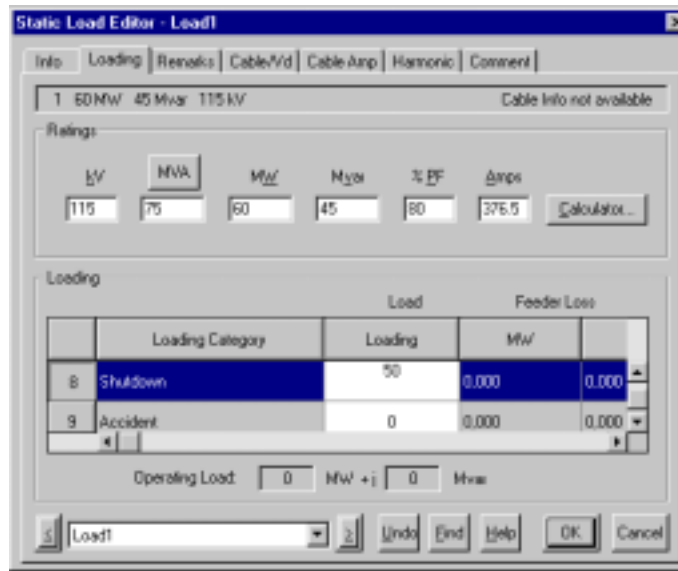


Figura 9. Editor de categorías de carga de la carga estática.

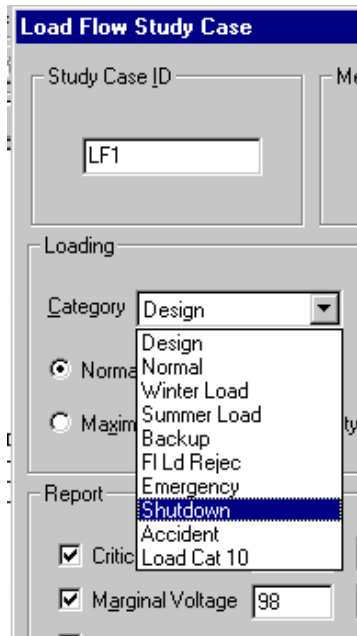


Figura 10. Categorías de carga dentro del caso de estudio de flujo de carga.

4.14 Repita el paso (4.12) colocando 150% en la categoría de carga **Emergency** de la pestaña **Loading** del editor de carga estática.

4.15 En la ventana del **caso de estudio de flujo de carga**, en la sección **Loading** elija la categoría **Emergency** con los que se corre un flujo con un 150 % de la carga, haga clic sobre OK y corra el flujo de carga. Revise y guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con el voltaje de la carga y la carga de operación con

respecto al caso base? ¿Por qué? ¿Qué sucede con las pérdidas del sistema con respecto a las del caso base?

### **Cambio de parámetros de líneas de transmisión**

**4.16** En la pestaña **Rating** del **editor de impedancia** disminuya al 50% los valores de la resistencia, la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva. Corra el flujo de carga con la categoría de carga **Normal**. Revise y guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con el voltaje de la carga y la carga de operación con respecto al caso base? ¿Por qué? ¿Qué sucede con las pérdidas del sistema con respecto a las del caso base? ¿Por qué?

**4.17** En la pestaña **Rating** del **editor de impedancia** aumente al 150% los valores de la resistencia, la reactancia inductiva y la reactancia capacitiva. Corra el flujo de carga con la categoría de carga **Normal**. Revise y guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con el voltaje de la carga y la carga de operación con respecto al caso base? ¿Por qué? ¿Qué sucede con las pérdidas del sistema con respecto a las del caso base? ¿Por qué?

**4.18** En la pestaña **Rating** del **editor de impedancia** coloque nuevamente los valores del caso base y haga  $Y=0$ . Corra el flujo de carga con la categoría de carga **Normal**. Revise y guarde los resultados obtenidos.

### **Métodos de solución de flujos de carga**

**4.19** Corra el flujo de carga para el caso base e identifique cual fue el número de iteraciones realizadas. Para saber cual es el número de iteraciones realizadas, presione el botón **View Output File** en la **barra de herramienta de flujo de carga**, seleccione **Complete** en la pestaña **Complete** y haga clic en OK, luego avance hasta la página 12 (**Summary of Total Generation, Loading and Demand**).

**4.20** En el caso base, cambie el método de solución del flujo de carga, en la página del **caso de estudio de flujo de carga**, por el método de Gauss-Seidel Acelerado con un factor de aceleración de 1.6. Corra el flujo de carga. Identifique el número de iteraciones realizadas.

## **5. INFORME**

**5.1** Parte inicial: solución de las preguntas del prelaboratorio.

**5.2** Parte central: entregar impreso el resultado del flujo de carga **Lfreport** con los resultados del caso base.

**5.3** Parte final: solución de las siguientes preguntas:

- Solución de las preguntas del procedimiento.
- En este caso (línea corta), ¿Qué tanto afecta el desprestigiar la rama Y en paralelo en la solución del flujo de carga? ¿Por qué? Punto (4.18).
- ¿Que método converge más rápido a la solución del flujo de potencia del caso base, Newton-Raphson o Gauss-Seidel? Puntos (4.19) y (4.20).
- ¿El flujo de carga de la barra 1 a la barra 2 para el caso base es igual al flujo de la barra 2 a la barra 1? ¿Por qué? ¿En el punto (4.18) el flujo de la barra 1 a la barra 2 es igual al flujo de la barra 2 a la barra 1? ¿Por qué?
- ¿Cómo se calcula la capacidad máxima de transmisión de potencia de una línea de transmisión?
- ¿A que corresponde el espacio **FLA** en la pestaña **Rating** del **editor del generador**?

## PRÁCTICA No. 2 MODELADO DE CARGAS, ADICIÓN DE LÍNEAS Y TRANSFORMADORES CON TAP FIJO

### 1. OBJETIVOS

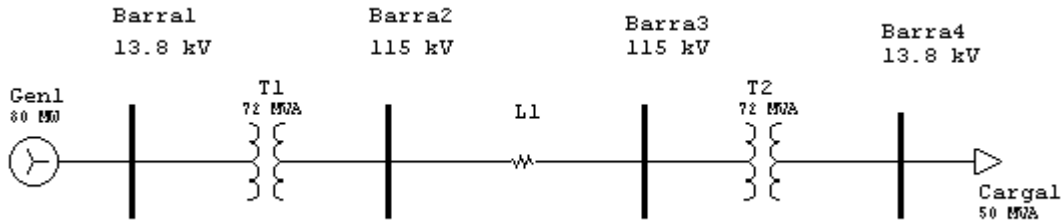
- Simular flujos de carga utilizando los diferentes factores para modelar cargas en **ETAP PowerStation 3.02**.
- Observar el efecto de la adición de transformadores en la solución del flujo de carga.
- Analizar el efecto de la adición de líneas en paralelo en la solución de flujos de carga.

### 2. PRELABORATORIO

- Una barra de interconexión es una que solamente conecta diferentes ramas, esta no tiene generación ni carga conectada a ella. ¿Cómo se clasifica esta barra dentro de la definición de barras típicas en la formulación del problema de flujo de carga? ¿Qué cantidades son conocidas en ella?
- El método de Gauss-Seidel no converge si el sistema tiene impedancia negativas. ¿En que casos se presenta esto?
- ¿Qué es el factor de diversidad y en que interviene en la solución del flujo de carga?
- Cite valores típicos de parámetros, con referencias bibliográficas, para las impedancias de los transformadores y mencione sus valores en función de la potencia y el voltaje.
- ¿Cuáles son los métodos para correr flujos de carga utilizados por **ETAP PowerStation 3.02**?
- Defina los tipos en que se clasifican las cargas.
- ¿Qué es una carga concentrada (mixta)?

### 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema consiste de una carga que se conecta a través de dos transformadores trifásicos y de una línea de transmisión a un generador, Figura 1.



**Figura 1. Diagrama unifilar del caso base para la práctica No 2 de flujo de carga con ETAP PowerStation 3.02.**

Los datos de los elementos se encuentran en las siguientes tablas:

**Tabla 1. Datos de las Barras.**

Barra (ID)	kV nominales	%V	Ángulo
Barra1	13,8	100	0
Barra2	115	100	0
Barra3	115	100	0
Barra4	13,8	100	0

**Tabla 2. Datos de la línea.**

Impedancia		ID	R+ (ohm)	Ro (ohm)	X+ (ohm)	Xo (ohm)	Y+ (micro-S)	Yo (micro-S)
De barra	A barra							
2	3	L1	0,3796	1,728	1,854	5,884	14,516	7,012

**Tabla 3. Datos de los transformadores.**

Transformador		ID	Z (%)	X/R	Tolerancia de Z	kV nominales	MVA
De barra	A barra						
1	2	T1	8,5	34,1	0	13,8 / 115	72
3	4	T2	8,5	34,1	0	115 / 13,8	72

**Tabla 4. Datos del generador.**

Generador	ID	kV nominales	MW nominales	Factor de potencia (%)	Modo	Modo Swing	
						%V	Ángulo
Barra 1	Gen1	13,8	80	0,85	Swing	100	0

**Tabla 5. Datos de la carga.**

Carga	ID	kV nominales	MVA	Factor de potencia (%)
Barra 4	Carga1	13,8	50	95

#### 4. PROCEDIMIENTO

**4.1** Inicie un nuevo proyecto con nombre flujos2. Coloque los elementos utilizados como que se muestra en la Figura 1. Ingrese los datos de los elementos dados en el numeral (3).

**4.2** En el visor de proyecto, expanda la carpeta **Load Flow** y cree un nuevo **caso de estudio de flujo de carga**, llámelo LF1.

**4.3** Seleccione LF1 en la **barra de herramienta de caso de estudio (Study Case Toolbar)** y corra el flujo de carga. Este resultado corresponde al caso base. Revise y guarde los resultados obtenidos.

#### ESTUDIOS DE SENSIBILIDAD

##### Modelado de cargas

**4.4** En el **editor** de la barra 4 modifique los factores de diversidad que se encuentran en la sección factor de diversidad de carga (**Load Diversity Factor**) por los siguientes valores: Mínimo = 85, Máximo = 100.

**4.5** Modifique el **caso de estudio de flujo de carga** LF1, seleccionando **Maximum** en la sección cargabilidad (**Loading**) y corra el flujo de carga. Guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con los voltajes y flujos de carga del sistema, con respecto de los del caso base? ¿Por qué?

**4.6** Modifique el **caso de estudio de flujo de carga** LF1, seleccionando **Minimum** en la sección cargabilidad (**Loading**) y corra el flujo de carga. Guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con los voltajes y flujos de carga del sistema, con respecto de los del caso base? ¿Por qué?

**4.7** Modifique el caso de estudio de flujo de carga LF1, seleccionando **Global Diversity Factor** en la sección cargabilidad (**Loading**), coloque 100 en la ventana **Const kVA** y 100 en **Const Z** (estos valores son en porcentaje) y corra el flujo de carga. Revise y guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con los voltajes y flujos de carga del sistema con respecto a los del caso base? ¿Por qué?

**4.8** Repita el paso anterior colocando 80 en la ventana **Const kVA** y 100 en **Const Z** y corra el flujo de carga. Revise y guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con los voltajes y flujos de carga del sistema con respecto de los del punto (4.6)? ¿Por qué?

**4.9** Repita el paso anterior colocando 100 en la ventana **Const kVA**, 80 en **Const Z** y corra el flujo de carga. Revise y guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con los voltajes y flujos de carga del sistema con respecto de los del punto (4.6)? ¿Por qué?

**4.10** Cambie la carga estática por una carga concentrada (mixta) con igual potencia y factor de potencia. En la sección **Motor / Static Load** de la pestaña **Nameplate** de esta, coloque al 100% el porcentaje de carga motora (**Motor Load**). Modifique el **caso de estudio de flujo de carga** LF1, seleccionando **Global** en la sección cargabilidad (**Loading**), coloque 100 en la ventana **Const kVA**, 100 en **Const Z** y corra el flujo de carga. Guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con los voltajes y flujos de carga del sistema con respecto a los del caso base? ¿Por qué?

**4.11** Repita los pasos (4.8) y (4.9). Guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con los voltajes y flujos de carga del sistema con respecto a los del punto (4.9)? ¿Por qué?

**4.12** Retire la carga concentrada y coloque nuevamente la carga estática. Edite el **caso de estudio de flujo de carga** LF1, seleccionando **Normal** en la sección cargabilidad (**Loading**). (Caso base).

### **Efecto de transformadores con derivaciones manuales para el cambio de la magnitud del voltaje**

**4.13** Cambie el % de tap del transformador T1 colocando -5% en el primario y 0% en el secundario. Corra el flujo de carga. Guarde los resultados obtenidos. ¿Que sucede con los voltajes y flujos con respecto a los del caso base? ¿Parece lógico este resultado? justifique su respuesta basado en un modelo adecuado para este transformador.

**4.14** En el mismo transformador coloque 0% en el primario y 5% en el secundario. Corra el flujo de carga. Guarde los resultados obtenidos. ¿Que sucede con los voltajes y flujos con respecto a los del caso base?

**4.15** Vuelva a cero los porcentajes de tap del transformador. (Caso base).

**4.16** Ajuste el tap del transformador T2 de modo que el voltaje en la barra 4 (barra de carga) quede dentro del 2% (por debajo) del voltaje nominal de la barra. Pruebe modificando el tap del lado de alta y de baja. Guarde los resultados obtenidos. ¿Qué valor de tap en el lado de alta y en el lado de baja permite mantener el voltaje de la carga dentro del 2%?

**4.17** Vuelva a cero los porcentajes de tap del transformador. (Caso base).

### Adición de líneas en paralelo

**4.18** Coloque una línea con impedancia idéntica (iguales parámetros de resistencia y reactancias) en paralelo a la línea existente. Corra el flujo de carga y guarde los resultados obtenidos. ¿Que sucede con los voltajes y flujos con respecto a los del caso base? ¿Por qué?

**4.19** Cambie los parámetros de la nueva línea con siguientes datos:  $R_{Pos} = 0,1898 \Omega$ ,  $X_{Pos} = 0,927 \Omega$ ,  $Y_{Pos} = 0,00000725 \text{ S}$ . Corra el flujo de carga y guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con los voltajes y flujos con respecto a los del paso anterior? ¿Por qué?

## 5. INFORME

**5.1** Parte inicial: solución de las preguntas del prelaboratorio.

**5.2** Parte central: entregar impreso el resultado del flujo de carga con los datos del caso base y el resultado del flujo de carga del paso (4.9).

**5.3** Parte final: solución de las siguientes preguntas:

- Solución de las preguntas del procedimiento.
- ¿De acuerdo a los puntos (4.6) a (4.8) cual de los dos factores (**Const kVA** o **Const Z**) afecta a la carga estática? ¿Por qué?
- ¿De acuerdo a los puntos (4.9) y (4.10) cual de los dos factores (**Const kVA** o **Const Z**) afecta a la carga concentrada? ¿Por qué?
- ¿Basado en el modelo del transformador para este estudio [5], el hecho de tener un valor positivo de tap del lado primario del transformador es igual a tener un valor de tap negativo del lado secundario? ¿Por qué?
- ¿Físicamente como se obtiene el cambio de las impedancias de una línea de transmisión?

## PRÁCTICA No. 3 SALIDA DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN Y TRANSFORMADORES LTC

### 1. OBJETIVOS

- Controlar el voltaje en barras de carga por medio de transformadores LTC.
- Analizar el efecto de la salida de líneas de transmisión en la solución del flujo de carga.

### 2. PRELABORATORIO

- ¿En una barra de carga de voltaje controlado, cuales son las cantidades desconocidas?
- ¿Cuales son los perfiles de voltajes permitidos para sistemas de 115 y 230 kV en el sistema eléctrico Colombiano y según las normas del IEEE?
- ¿Qué es una contingencia en sistemas de potencia y porque es importante su estudio?

### 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema a simular se muestra en la Figura 1.

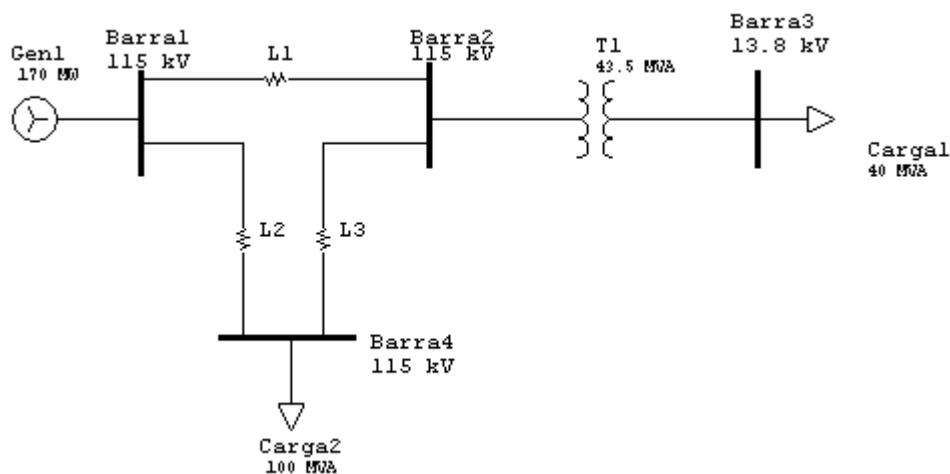


Figura 1. Diagrama unifilar del caso base para la práctica No. 3 de flujo de carga con ETAP PowerStation 3.02.

Los datos de los elementos se encuentran en las siguientes tablas:

**Tabla 1. Datos de las Barras.**

Barra (ID)	kV nominales	%V	Ángulo
Barra1	115	100	0
Barra2	115	100	0
Barra3	13,8	100	0
Barra4	115	100	0

**Tabla 2. Datos de las líneas.**

Impedancia		ID	R+ (%)	Ro (%)	X+ (%)	Xo (%)	Y+ (%)	Yo (%)	kV base	MVA base
De barra	A barra									
1	2	L1	1,677369	7,537543	8,726563	26,399093	1,047848	0,734051	115	100
1	4	L2	3,412083	15,332779	17,751471	53,700718	2,131520	1,471794	115	100
2	4	L3	1,078639	4,888469	5,331947	16,083176	0,706413	0,425911	115	100

**Tabla 3. Datos del transformador.**

Transformador		ID	Z (%)	X/R	Tolerancia de Z	kV nominales	MVA
De barra	A barra						
2	3	T1	8,5	29,5	0	115 / 13,8	43,5

**Tabla 4. Datos del generador.**

Generador	ID	kV nominales	MW nominales	Factor de potencia (%)	Modo	Modo Swing	
						%V	Ángulo
Barra 1	Gen1	115	170	85	Swing	100	0

**Tabla 5. Datos de las cargas.**

Carga	ID	kV nominales	MVA	Factor de potencia (%)
Barra 3	Carga1	13,8	40	85
Barra 4	Carga2	115	100	70

## 4. PROCEDIMIENTO

**4.1** Inicie un nuevo proyecto con nombre flujos3. Coloque los elementos utilizados como se muestra en la Figura 1. Ingrese los datos de los elementos dados en el numeral (3).

**4.2** En el visor del proyecto, expanda la carpeta **Load Flow** y cree un nuevo **caso de estudio de flujo de carga**, llámelo LF1.

**4.3** Seleccione LF1 en la **barra de herramienta de caso de estudio (Study Case Toolbar)** y corra el flujo de carga. Este resultado corresponde al caso base. Revise y guarde los resultados obtenidos.

**4.4** Note que todas las barras a excepción de la barra de generación se muestran en rojo. ¿Qué significa esto? [2].

## ESTUDIOS DE SENSIBILIDAD

### Efecto de los transformadores con cambios de derivaciones bajo carga en el control de la magnitud del voltaje (LTC Transformer)

**4.5** Edite las propiedades del transformador y seleccione **Prim** en la sección **Load Tap Changer** de la pestaña **Tap**, con lo que se activa el botón **LTC**.

**4.6** Haga clic sobre el botón **LTC**, con esto aparece la ventana **Load Tap Changer**, seleccione del menú desplegable de esta ventana la barra a regular en este caso la barra 3 y las otras opciones déjelas tal como están. Corra el flujo de carga. Revise y guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con el voltaje en la barra 3 y el flujo de la barra 2 a la 3 con respecto al caso base? ¿Qué sucede con los voltajes y flujo de carga en el resto del sistema con respecto a los del caso base? ¿Cuál es la posición final del **LTC** del transformador?

**4.7** En la página **Info** del **editor de propiedades** de la carga1 seleccione la opción **Out Service**. Corra el flujo de carga. Guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con el voltaje en la barra 3 y el flujo de la barra 2 a la 3 con respecto al punto anterior? ¿Qué sucede con los voltajes y flujos del resto del sistema con respecto del punto anterior? ¿La posición final del **LTC** del transformador es igual a la del punto anterior? ¿Por qué?

**4.8** Coloque nuevamente en servicio la carga1.

**4.9** En el editor de propiedades del transformador desactive la opción **Prim** que fue activada en (4.5) y vuelva a cero la posición del tap. Active la opción **Sec**.

**4.10** Repita los pasos (4.6), (4.7) y (4.8).

### **Salida de líneas de transmisión**

**4.11** Modifique las propiedades la línea L1 y en la página **Info** seleccione **Out Service**, con lo que se pone fuera de servicio esta línea para simular una contingencia por salida de una línea. Corra el flujo de carga. Guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con los voltajes y flujos de carga del sistema? ¿Por qué? ¿El transformador es capaz de mantener el voltaje en la barra 3? ¿Por qué?

**4.12** Repita el paso anterior con las líneas L2 y L3.

## **5. INFORME**

**5.1** Parte inicial: solución de las preguntas del prelaboratorio.

**5.2** Parte central: entregar impreso el resultado del flujo de carga **Lfreport** con los datos del caso base.

**5.3** Parte final: solución de las siguientes preguntas:

- Solución de las preguntas del procedimiento.
- De los puntos (4.11) y (4.12). ¿Cuál es la condición de salida de líneas es la que afecta menos el comportamiento del sistema? ¿Por qué?
- ¿Existe diferencia entre tener el LTC del lado primario con tenerlo del lado secundario del transformador? ¿Por qué? Puntos (4.5) a (4.10).

## PRÁCTICA No. 4 EFECTO DE LOS GENERADORES

### 1. OBJETIVOS

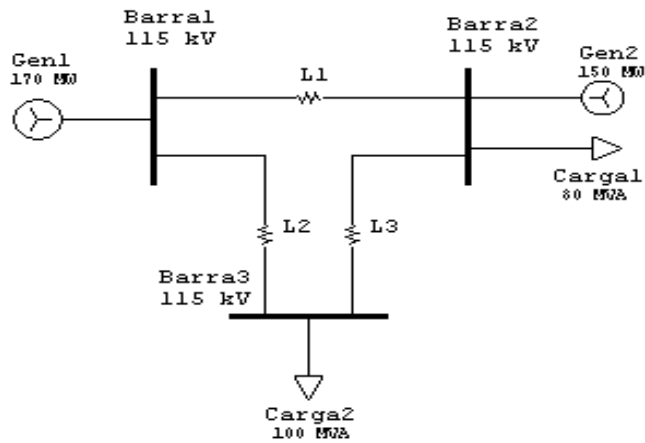
- Observar el efecto que tiene los generadores en la solución del flujo de carga.
- Simular los diferentes modos de operación de generadores.
- Analizar que sucede cuando se exceden los límites de un generador que funciona en modo PV.

### 2. PRELABORATORIO

- ¿Qué variable del generador permite controlar la absorción o suministro de potencia reactiva?
- ¿Cómo se puede variar la potencia real que suministra un generador al sistema?
- ¿Qué es y para que sirve la curva de capacidad del generador sincrónico?

### 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema de potencia para esta práctica consta de dos generadores, dos cargas y tres líneas de transmisión dispuestos como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1. Diagrama unifilar del caso base para la práctica No. 4 de flujo de carga con ETAP PowerStation 3.02.**

Los datos de los elementos se encuentran en las siguientes tablas:

**Tabla 1. Datos de las Barras.**

Barra (ID)	kV nominales	%V	Ángulo
Barra1	115	100	0
Barra2	115	100	0
Barra3	115	100	0

**Tabla 2. Datos de las líneas.**

Impedancia		ID	R+ (ohm)	Ro (ohm)	X+ (ohm)	Xo (ohm)	Y+ (SIMENS)	Yo (SIMENS)	kV base	MVA base
De barra	A barra									
1	2	L1	1,74033	8,2716	8,6925	24,5403	0,0000644	0,0000658	115	100
1	3	L2	1,73667	8,3997	8,71812	25,1076	0,0000640	0,0000375	115	100
2	3	L3	1,74948	7,5213	8,73276	27,633	0,0000651	0,0000377	115	100

**Tabla 3. Datos de los generadores.**

Generador	ID	kV nominales	MW nominales	Factor de potencia (%)	Modo	Modo Swing		Modo PV			
						%V	Ángulo	%V	MW	Qmin	Qmax
Barra 1	Gen1	115	170	85	Swing	100	0				
Barra 2	Gen2	115	150	85	PV			101	140	-15	120

**Tabla 4. Datos de la carga.**

Carga	ID	kV nominales	MVA	Factor de potencia (%)
Barra 2	Carga1	115	80	80
Barra 3	Carga2	115	100	80

#### 4. PROCEDIMIENTO

**4.1** Inicie un nuevo proyecto con nombre flujos4. Coloque los elementos utilizados como se muestra en la Figura 1. Ingrese los datos de los elementos dados en el numeral (3).

**4.2** En el visor del proyecto, expanda la carpeta **Load Flow** y cree un nuevo **caso de estudio de flujo de carga**, llámelo LF1.

**4.3** Seleccione LF1 en la barra de herramienta de caso de estudio **Study Case Toolbar** y corra el flujo de carga. Este resultado corresponde al caso base. Revise y guarde los resultados obtenidos.

#### ESTUDIOS DE SENSIBILIDAD

##### Efectos de los generadores en estudios de flujos de carga

**4.4** Aumente el voltaje de diseño del generador Gen1 a 102%. Corra el flujo de carga y guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con los voltajes y flujos con respecto a los del caso base?

**4.5** Vuelva el voltaje de diseño del generador Gen1 al 100%. (Caso base).

**4.6** Cambie la carga 1 a 125 MVA con un fp del 80%. Corra el flujo de carga y guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con los voltajes y flujos de carga con respecto a los del caso base? ¿El generador Gen2 es capaz de mantener el voltaje en la barra 2 al 101%? ¿Por qué?

**4.7** Coloque nuevamente los valores nominales de la carga 1. (Caso base).

**4.8** Coloque fuera de servicio la carga 2. Corra el flujo de carga y guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con los voltajes y flujos de carga con respecto a los del caso base? ¿Por qué? ¿Qué sucede con las potencias del generador Gen1? ¿tiene algún sentido físico el hecho de que un generador consuma potencia activa?

**4.9** Coloque nuevamente en servicio la carga 2. (Caso base).

**4.10** Cambie el modo de operación del generador Gen 2 a **Mvar Control** y en la página **Rating** de este, en la sección **Setting** coloque **MW** = 140 y **Mvar** = 120. Corra el flujo de carga y guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con los voltajes y flujos de carga con respecto a los del caso base? ¿Por qué? ¿Qué le sucede al generador Gen1? ¿Por qué? ¿Se conserva el voltaje en la barra 2 en el valor especificado previamente?

**4.11** Cambie el modo de operación del generador Gen 2 a **Swing**, con %V = 101% y un ángulo de 0°. Corra el flujo de carga y guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con los voltajes y flujos de carga con respecto a los del caso base?

## 5. INFORME

**5.1** Parte inicial: solución de las preguntas del prelaboratorio.

**5.2** Parte central: entregar impreso el resultado del flujo de carga **Lfreport** con los datos del caso base.

**5.3** Parte final: solución de las siguientes preguntas:

- Solución de las preguntas del procedimiento.
- ¿Qué hace un generador cuando funciona en modo control de Mvar? Punto (4.9).
- ¿Cuáles son las variables conocidas en una barra que tiene un generador trabajando en modo control de Mvar y cuales las desconocidas? Punto (4.9).
- ¿En que casos se tiene más de un generador funcionando en modo **Swing**?
- ¿Qué variable del generador debe modificarse para mejorar el perfil de voltajes de las barras?

## PRÁCTICA No. 5 ELEMENTOS DE COMPENSACIÓN PARALELA

### 1. OBJETIVOS

- Estudiar el efecto de la adición de bancos de condensadores en paralelo con las barras en la solución del flujo de carga.
- Observar el funcionamiento del alternador (generador sincrónico) como condensador sincrónico.

### 2. PRELABORATORIO

- ¿Puede el flujo de potencia activa tener una dirección diferente al flujo de potencia reactiva en una misma rama?
- ¿Qué es un condensador sincrónico y como se simula en **ETAP PowerStation 3.02**?
- ¿Qué otros métodos de compensación existen?
- ¿Para que sirve la compensación con reactores?

### 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema de potencia se muestra en la Figura 1.

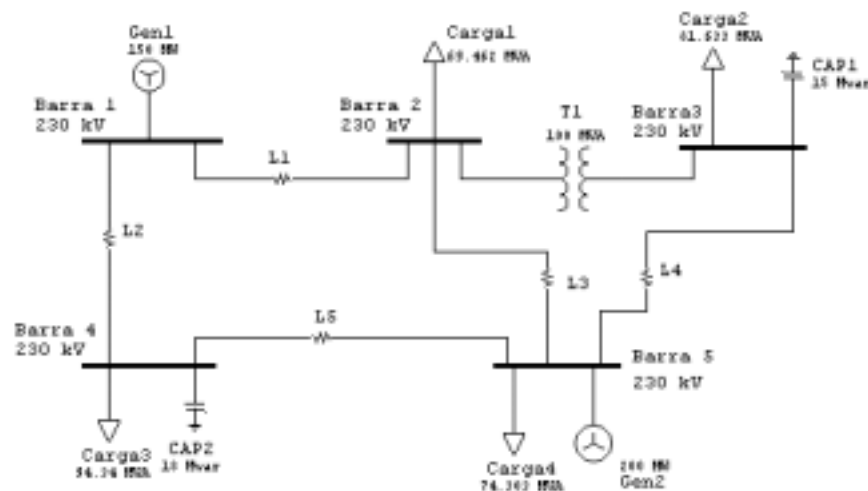


Figura 1. Diagrama unifilar [4] del caso base para la práctica No. 5 de flujo de carga con ETAP PowerStation 3.02.

Los datos de los elementos se encuentran en las siguientes tablas:

**Tabla 1. Datos de las Barras.**

Barra (ID)	kV nominales	%V	Ángulo
Barra 1	230	100	0
Barra 2	230	100	0
Barra 3	230	100	0
Barra 4	230	100	0
Barra 5	230	100	0

**Tabla 2. Datos de las líneas.**

Impedancia		ID	R+ (%)	X+ (%)	Y+ (%)	kV base	MVA base
De barra	A barra						
1	2	L1	1,8	6,49	6,6	230	100
1	4	L2	2,35	9,41	4	230	100
2	5	L3	1,18	4,71	7	230	100
3	5	L4	1,47	5,88	8	230	100
4	5	L5	1,18	5,29	6	230	100

**Tabla 3. Datos del transformador.**

Transformador		ID	Z (%)	X/R	Tolerancia de Z	kV nominales	MVA	Tap	
De barra	A barra							Prim	Sec
2	3	T1	4	9999	0	230/230	100	-2,5%	0%

**Tabla 4. Datos de los generadores.**

Generador	ID	KV nominales	MW nominales	Factor de potencia (%)	Modo	Modo Swing		Modo PV			
						%V	Ángulo	%V	MW	Qmin	Qmax
Barra 1	Gen1	230	150	85	Swing	101	0				
Barra 5	Gen2	230	200	85	PV			100	190	0	235

**Tabla 5. Datos de la carga.**

Carga	ID	kV nominales	MW	Mvar
Barra 2	Carga1	230	60	35
Barra 3	Carga2	230	70	42
Barra 4	Carga3	230	80	50
Barra 5	Carga4	230	65	36

**Tabla 6. Datos de los bancos de condensadores.**

Condensador	ID	kV nominales	Mvar / banco	# de bancos
Barra 3	CAP1	230	18	1
Barra 4	CAP2	230	15	1

#### 4. PROCEDIMIENTO

**4.1** Inicie un nuevo proyecto con nombre flujos5. Coloque los elementos utilizados como se muestra en la Figura 1. Ingrese los datos de los elementos dados en el numeral (3).

**4.2** En el visor del proyecto, expanda la carpeta **Load Flow** y cree un nuevo **caso de estudio de flujo de carga**, llámelo LF1.

**4.3** Seleccione LF1 en la barra de herramienta de caso de estudio **Study Case Toolbar** y corra el flujo de carga. Este resultado corresponde al caso base. Revise y guarde los resultados obtenidos.

#### ESTUDIOS DE SENSIBILIDAD

##### Efectos de la compensación de reactivos con capacitores en paralelo

**4.4** Coloque fuera de servicio el banco de capacitores Cap2. Corra el flujo de carga y guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con los voltajes y flujos con respecto a los del caso base? ¿Qué sucede con las pérdidas del sistema con respecto al caso base? ¿Por qué?

**4.5** Coloque en servicio el banco de capacitores Cap2. (Caso base).

**4.6** En la opción **Loading Category** dentro de la pestaña **Loading** del editor de las cargas estáticas y editor de los condensadores, vaya a la categoría de carga **Shutdown** y coloque 50%.

**4.7** Modifique el caso de estudio de flujo de carga, en la sección **Loading** elija la categoría **Shutdown**. Con lo que se corre un flujo con un 50% de la carga, corra el flujo de carga. Revise y guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con la potencia de operación de los condensadores? ¿Por qué? ¿Qué sucede con los voltajes del sistema con respecto a los del caso base? ¿Por qué?

### **El generador como condensador sincrónico**

**4.8** Modifique el caso de estudio de flujo de carga, en la sección **Loading** elija la categoría **Design**.

**4.9** Coloque fuera de servicio el banco de capacitores Cap1 y en la misma barra coloque un condensador sincrónico con la misma capacidad de Mvar del banco de condensadores (asociar con las cargas a potencia constante). Corra el flujo de carga y guarde los resultados obtenidos. ¿Qué sucede con los voltajes y flujo de potencia con respecto a los del caso base? ¿Por qué?

## **5. INFORME**

**5.1** Parte inicial: solución de las preguntas del prelaboratorio.

**5.2** Parte central: entregar impreso el resultado del flujo de carga **Lfreport** con los datos del caso base y el resultado del flujo del punto (4.8).

**5.3** Parte final: solución de las siguientes preguntas:

- Solución de las preguntas del procedimiento.
- ¿Por qué no son tan utilizados los condensadores sincrónicos?

## PRÁCTICA No. 6 SIMULACIÓN DEL CASO DE PRUEBA DE 14 BARRAS DEL IEEE

### 1. OBJETIVOS

- Simular el caso de prueba de 14 barras del IEEE.
- Manejar el formato común de intercambio de flujos de carga resueltos del IEEE.
- Identificar las restricciones del programa **ETAP PowerStation 3.02** para la simulación de este tipo de casos.

### 2. PRELABORATORIO

- ¿Qué columnas de datos contiene el formato común de intercambio de flujos de carga resueltos del IEEE?

### 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema a analizar es el caso de prueba de 14 del IEEE mostrado en la Figura 1. Los casos de prueba del IEEE sirven para evaluar los diferentes métodos analíticos y programas de computadora utilizados en la solución de problemas de sistemas de potencia. Los datos de los elementos se encuentran en la Figura 2. La descripción del formato **.cf** se encuentra en el documento anexo.

### 4. PROCEDIMIENTO

**4.1** Inicie un nuevo proyecto con nombre flujos6. Coloque los elementos utilizados como se muestra en la Figura 1. Ingrese los datos de los elementos dados en la Figura 2.

**4.2** En el visor del proyecto, expanda la carpeta **Load Flow** y cree un nuevo **caso de estudio de flujo de carga**, llámelo LF1.

4.3 Seleccione LF1 en la barra de herramienta de caso de estudio **Study Case Toolbar** y corra el flujo de carga. Este resultado corresponde al caso base. Revise y guarde los resultados obtenidos.

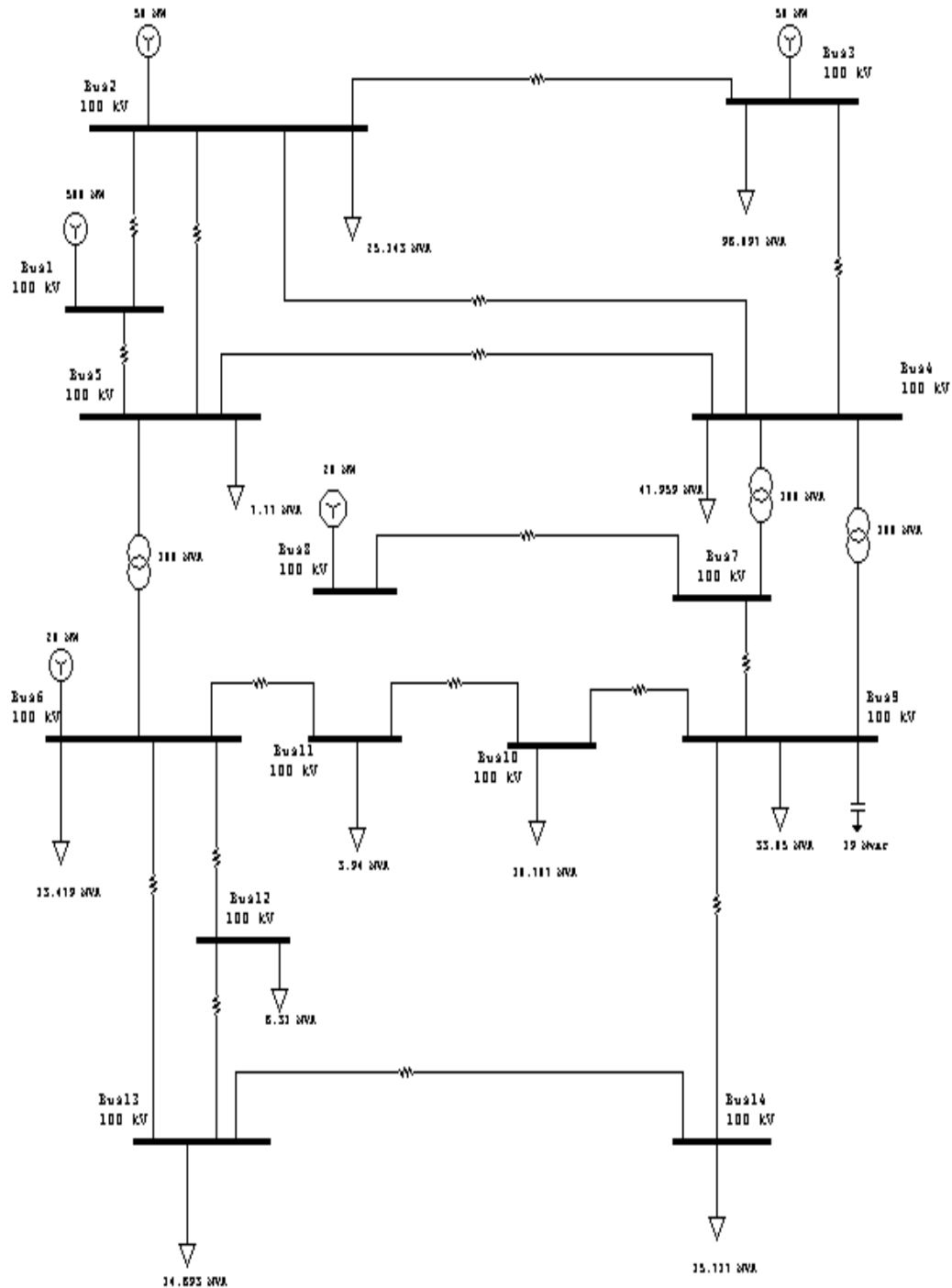


Figura 1. Diagrama unifilar del caso base para la práctica No 6 de flujo de carga con ETAP PowerStation 3.02.

00/00/01		100.0 0 0 0		14 ITEMS		20 ITEMS									
BUS DATA FOLLOWS															
1	BUS-1	100	0.	0.	232.3859-16.8888	100.	1.06	999900	-99990	0.	0.				
2	BUS-2	100	1.1	2 1.045	-4.98	21.7	12.7	40.	42.39645	100.	1.045	50.	-40.	0.	0.
3	BUS-3	100	1.1	2 1.01	-12.71	94.2	19.	0.	23.39357	100.	1.01	40.	0.	0.	0.
4	BUS-4	100	1.1	1.018	-10.32	47.8	-3.9	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.
5	BUS-5	100	1.1	1.02	-8.782	7.6	1.6	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.
6	BUS-6	100	1.1	2 1.07	-14.22	11.2	7.5	0.	12.24036	100.	1.07	24.	-6.	0.	0.
7	BUS-7	100	1.1	1.062	-13.36	0.	0.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.
8	BUS-8	100	1.1	2 1.09	-13.36	0.	0.	0.	17.3566	100.	1.09	24.	-6.	0.	0.
9	BUS-9	100	1.1	1.056	-14.94	29.5	16.6	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.19
10	BUS-10	100	1.1	1.051	-15.1	9.	5.8	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.
11	BUS-11	100	1.1	1.057	-14.79	3.5	1.8	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.
12	BUS-12	100	1.1	1.055	-15.07	6.1	1.6	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.
13	BUS-13	100	1.1	1.05	-15.15	13.5	5.8	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.
14	BUS-14	100	1.1	1.035	-16.03	14.9	5.	0.	0.	100.	1.	0.	0.	0.	0.
-999															
BRANCH DATA FOLLOWS															
5	6	1	1	2	0.	0.25202	0.	0	0	0	0.932	0	0	0	0
4	7	1	1	2	0.	0.20912	0.	0	0	0	0.978	0	0	0	0
4	9	1	1	2	0.	0.58618	0.	0	0	0	0.969	0	0	0	0
1	2	1	1	2	0.	0.01938	0.05917	0.0528	0	0	0	0	0	0	0
2	3	1	1	2	0.	0.04699	0.19797	0.0438	0	0	0	0	0	0	0
2	4	1	1	2	0.	0.05811	0.17632	0.0374	0	0	0	0	0	0	0
1	5	1	1	2	0.	0.05403	0.22304	0.0492	0	0	0	0	0	0	0
2	5	1	1	2	0.	0.05695	0.17388	0.034	0	0	0	0	0	0	0
3	4	1	1	2	0.	0.06701	0.17103	0.0346	0	0	0	0	0	0	0
4	5	1	1	2	0.	0.01335	0.04211	0.0128	0	0	0	0	0	0	0
7	8	1	1	2	0.	0.17615	0.	0	0	0	0	0	0	0	0
7	9	1	1	2	0.	0.11001	0.	0	0	0	0	0	0	0	0
9	10	1	1	2	0.	0.03181	0.0845	0.	0	0	0	0	0	0	0
6	11	1	1	2	0.	0.09498	0.1989	0.	0	0	0	0	0	0	0
6	12	1	1	2	0.	0.12291	0.25581	0.	0	0	0	0	0	0	0
6	13	1	1	2	0.	0.06615	0.13027	0.	0	0	0	0	0	0	0
9	14	1	1	2	0.	0.12711	0.27038	0.	0	0	0	0	0	0	0
10	11	1	1	2	0.	0.08205	0.19207	0.	0	0	0	0	0	0	0
12	13	1	1	2	0.	0.22092	0.19988	0.	0	0	0	0	0	0	0
13	14	1	1	2	0.	0.17093	0.34802	0.	0	0	0	0	0	0	0
-999															
LOSS ZONES FOLLOWS															
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-99															
INTERCHANGE DATA FOLLOWS															
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-9															
TIE LINES FOLLOWS															
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-999															
END OF DATA															

Figura 2. Datos de los elementos del caso de prueba del IEEE.

## 5. INFORME

**5.1** Parte inicial: solución de las preguntas del prelaboratorio.

**5.2** Parte central: entregar impreso el resultado del flujo de carga **Lfreport** con los datos del caso base, además del listado de datos de entrada proporcionado por **ETAP PowerStation** para las ramas, transformadores y barras.

**5.3** Parte final: solución de las siguientes preguntas:

- ¿Qué datos requiere el programa **ETAP PowerStation 3.02** que no vienen incluidos en la Hoja de datos del caso de prueba?
- Compare los voltajes de operación contenidos en la Hoja de datos del caso de prueba, con los obtenidos en el caso base. ¿Son iguales? ¿Por qué?

## ANEXO

### Partial Description of the IEEE Common Data Format for the Exchange of Solved Load Flow Data

The complete description can be found in the paper "Common Data Format for the Exchange of Solved Load Flow Data", Working Group on a Common Format for the Exchange of Solved Load Flow Data, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, No. 6, November/December 1973, pp. 1916-1925.

The data file has lines of up to 128 characters. The lines are grouped into sections with section headers. Data items are entered in specific columns. No blank items are allowed, enter zeros instead. Floating point items should have explicit decimal point. No implicit decimal points are used.

Data type codes: A - Alphanumeric (no special characters)  
I - Integer  
F - Floating point  
\* - Mandatory item

#### Title Data =====

First card in file.

Columns 2- 9 Date, in format DD/MM/YY with leading zeros. If no date provided, use 0b/0b/0b where b is blank.

Columns 11-30 Originator's name (A)

Columns 32-37 MVA Base (F\*)

Columns 39-42 Year (I)

Column 44 Season (S - Summer, W - Winter)

Column 46-73 Case identification (A)

#### Bus Data \* =====

Section start card \*:  
-----

Columns 1-16 BUS DATA FOLLOWS (not clear that any more than BUS in 1-3 is significant) \*

Columns ?- ? NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

Bus data cards \*:

-----

Columns 1- 4 Bus number (I) \*  
 Columns 7-17 Name (A) (left justify) \*  
 Columns 19-20 Load flow area number (I) Don't use zero! \*  
 Columns 21-23 Loss zone number (I)  
 Columns 25-26 Type (I) \*  
     0 - Unregulated (load, PQ)  
     1 - Hold MVAR generation within voltage limits, (PQ)  
     2 - Hold voltage within VAR limits (gen, PV)  
     3 - Hold voltage and angle (swing, V-Theta) (must always  
         have one)  
 Columns 28-33 Final voltage, p.u. (F) \*  
 Columns 34-40 Final angle, degrees (F) \*  
 Columns 41-49 Load MW (F) \*  
 Columns 50-59 Load MVAR (F) \*  
 Columns 60-67 Generation MW (F) \*  
 Columns 68-75 Generation MVAR (F) \*  
 Columns 77-83 Base KV (F)  
 Columns 85-90 Desired volts (pu) (F) (This is desired remote voltage if  
     this bus is controlling another bus.  
 Columns 91-98 Maximum MVAR or voltage limit (F)  
 Columns 99-106 Minimum MVAR or voltage limit (F)  
 Columns 107-114 Shunt conductance G (per unit) (F) \*  
 Columns 115-122 Shunt susceptance B (per unit) (F) \*  
 Columns 124-127 Remote controlled bus number

Section end card:

-----

Columns 1- 4 -999

Branch Data \*

=====

Section start card \*:

-----

Columns 1-16 BRANCH DATA FOLLOWS (not clear that any more than BRANCH  
     is significant) \*  
 Columns 40?- ? NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

Branch data cards \*:

-----

Columns 1- 4 Tap bus number (I) \*  
     For transformers or phase shifters, the side of the  
 model  
     the non-unity tap is on  
 Columns 6- 9 Z bus number (I) \*  
     For transformers and phase shifters, the side of the  
 model  
     the device impedance is on.  
 Columns 11-12 Load flow area (I)

Columns 13-14 Loss zone (I)  
 Column 17 Circuit (I) \* (Use 1 for single lines)  
 Column 19 Type (I) \*  
     0 - Transmission line  
     1 - Fixed tap  
     2 - Variable tap for voltage control (TCUL, LTC)  
     3 - Variable tap (turns ratio) for MVAR control  
     4 - Variable phase angle for MW control (phase shifter)  
 Columns 20-29 Branch resistance R, per unit (F) \*  
 Columns 30-40 Branch reactance X, per unit (F) \* No zero impedance lines  
 Columns 41-50 Line charging B, per unit (F) \* (total line charging, +B)  
 Columns 51-55 Line MVA rating No 1 (I) Left justify!  
 Columns 57-61 Line MVA rating No 2 (I) Left justify!  
 Columns 63-67 Line MVA rating No 3 (I) Left justify!  
 Columns 69-72 Control bus number  
 Column 74 Side (I)  
     0 - Controlled bus is one of the terminals  
     1 - Controlled bus is near the tap side  
     2 - Controlled bus is near the impedance side (Z bus)  
 Columns 77-82 Transformer final turns ratio (F)  
 Columns 84-90 Transformer (phase shifter) final angle (F)  
 Columns 91-97 Minimum tap or phase shift (F)  
 Columns 98-104 Maximum tap or phase shift (F)  
 Columns 106-111 Step size (F)  
 Columns 113-119 Minimum voltage, MVAR or MW limit (F)  
 Columns 120-126 Maximum voltage, MVAR or MW limit (F)

Section end card:

-----

Columns 1- 4 -999

Loss Zone Data

=====

Section start card

-----

Columns 1-16 LOSS ZONES FOLLOWS (not clear that any more than LOSS is significant)

Columns 40?- ? NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

Loss Zone Cards:

-----

Columns 1- 3 Loss zone number (I)

Columns 5-16 Loss zone name (A)

Section end card:

-----

Columns 1- 3 -99

Interchange Data \*

=====

Section start card  
-----

Columns 1-16 INTERCHANGE DATA FOLLOWS (not clear that any more than  
first word is significant).  
Columns 40?- ? NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

Interchange Data Cards \*:  
-----

Columns 1- 2 Area number (I) no zeros! \*  
Columns 4- 7 Interchange slack bus number (I) \*  
Columns 9-20 Alternate swing bus name (A)  
Columns 21-28 Area interchange export, MW (F) (+ = out) \*  
Columns 30-35 Area interchange tolerance, MW (F) \*  
Columns 38-43 Area code (abbreviated name) (A) \*  
Columns 46-75 Area name (A)

Section end card:  
-----

Columns 1- 2 -9

Tie Line Data  
=====

Section start card  
-----

Columns 1-16 TIE LINES FOLLOW (not clear that any more than TIE  
is significant)  
Columns 40?- ? NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

Tie Line Cards:  
-----

Columns 1- 4 Metered bus number (I)  
Columns 7-8 Metered area number (I)  
Columns 11-14 Non-metered bus number (I)  
Columns 17-18 Non-metered area number (I)  
Column 21 Circuit number

Section end card:  
-----

Columns 1- 3 -999

**PRÁCTICAS DE SIMULACIÓN DE  
ESTUDIOS DE CORTO CIRCUITO CON  
ETAP POWERSTATION 3.02**

## PRÁCTICA No. 1 FAMILIARIZACIÓN, APLICACIÓN DE NORMAS INTERNACIONALES Y EFECTO DE LAS CARGAS

### 1. OBJETIVOS

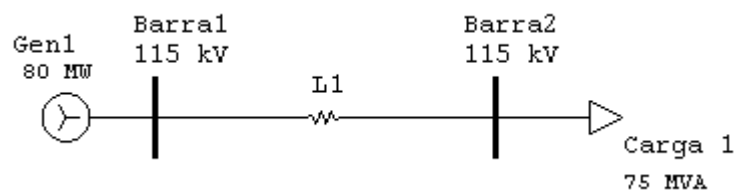
- Familiarizarse con la opción del programa **ETAP PowerStation 3.02** para el análisis de corto circuito.
- Realizar estudios de corto circuito según las normas IEC y ANSI/IEEE.
- Analizar el efecto de la carga sobre las corrientes de corto circuito.

### 2. PRELABORATORIO

- ¿Cuáles son las normas ANSI/IEEE aplicadas al estudio de corto circuito?
- ¿Cuáles son las normas IEC aplicadas al estudio de corto circuito?
- ¿Para que se utiliza un estudio de corto circuito?
- ¿Cómo se calcula la potencia de corto circuito trifásica y monofásica?
- Dibuje la red de secuencia cero para el sistema de la Figura 1.
- ¿Para que se utiliza la relación X/R en un estudio de corto circuito con normas ANSI/IEEE?

### 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema para analizar es el mismo de la práctica No. 1 de flujos de carga. Se quiere encontrar valores de las corrientes de corto circuito para fallos Línea-Tierra, Línea-Línea, Línea-Línea-Tierra y Trifásicos ocurridos en la barra de carga y en la barra de generación.



**Figura 1. Diagrama unifilar del caso base para la práctica No. 1 de análisis de corrientes de corto circuito con ETAP PowerStation 3.02.**

Los datos adicionales de los elementos, necesarios para correr estudios de corto circuito en este programa, se encuentran en la siguiente tabla:

**Tabla 1. Datos del generador.**

Xd" (%)	Xd' (%)	Xo (%)	X/R	Conexión	Aterrizaje	Tdo' (s)
4,96711	7,99342105	4,351974	48	Y	Sólido	1,8217

#### 4. PROCEDIMIENTO

**4.1** Recupere el proyecto de la práctica 1 de flujos de carga con **ETAP PowerStation 3.02** (conservando sus datos).

**4.2** Modifique las propiedades del generador y en la pestaña **Imp/Model**, en la sección **Dinamic Model** seleccione **Subtransient**. Haga clic en **Typical Data**. Una vez realizado lo anterior modifique solo los datos que se encuentran en la tabla 1. Este procedimiento es el mismo para el ingreso de los datos de los generadores de las prácticas siguientes.

**4.3** En el visor del proyecto, vaya a la carpeta Short Circuit y cree un nuevo caso de estudio de corto circuito, en nuestro caso SC1.

#### Estudios de corto circuito basados en las normas IEC

**4.4** Modifique las opciones del caso de estudio de corto circuito (**Short Circuit Study Case**) SC1, en la sección **Bus Selection** de la pestaña **Info** seleccione la barra 2 como barra fallada. En la sección **Standard** de la pestaña **Standard** seleccione **IEC**, deje igual el resto de opciones.

**4.5** Corra un corto circuito trifásico (**Duty**). Recuerde que SC1 debe estar seleccionado en la **barra de herramienta de caso de estudio**. Revise y guarde los resultados (**SHORT-CIRCUIT REPORT**).

**4.6** Aumente la carga a 120 MW y 90 Mvar. Corra nuevamente el corto circuito trifásico (**Duty**). Revise y guarde los resultados (**SHORT-CIRCUIT REPORT**). ¿Qué sucede con la magnitud de la corriente de falla con respecto a la del punto (4.5)? ¿Por qué?

**4.7** Corra un corto circuito trifásico, LG, LL, LLG según la norma **IEC 909**. Revise y guarde los resultados (**SHORT-CIRCUIT REPORT**). ¿Cuál es la corriente inicial simétrica más grande? ¿Cuál es la corriente de estado estable más grande?

**4.8** Seleccione las barras 1 y 2 como barras falladas. Corra el corto circuito trifásico, LG, LL, LLG según la norma **IEC 909**. Revise y guarde los resultados

(**SHORT-CIRCUIT REPORT**). ¿En que barra se presentan corrientes más grandes? ¿Por qué? En la barra del generador, ¿cuál es la corriente inicial simétrica más grande? ¿cuál es la corriente de estado estable más grande?

**4.9** Corra el corto circuito transitorio según la norma **IEC 363**. Revise y guarde los resultados (**SHORT-CIRCUIT REPORT**). ¿Identifique las variables que se muestran en las tablas de salida?

**4.10** Modifique el caso de estudio de corto circuito y coloque una impedancia de falla de  $0,5 + j1,2$  ohmios. Corra el corto circuito trifásico, LG, LL, LLG según la norma **IEC 909**. Revise y guarde los resultados (**SHORT-CIRCUIT REPORT**). ¿Qué sucede con las corrientes de falla con respecto a las halladas en el paso (4.8)? ¿Por qué?

### Estudios de corto circuito basados en las normas ANSI / IEEE

**4.11** Cree un nuevo caso de estudio de corto circuito (SC2). Modifique sus propiedades seleccionando las dos barras como falladas y en la sección **Standard** de la pestaña **Standard** seleccione **ANSI**.

**4.12** Corra un corto circuito trifásico (**Duty**). Recuerde que SC2 debe estar seleccionado en la **barra de herramienta de caso de estudio**. Revise y guarde los resultados (**SHORT-CIRCUIT REPORT**).

**4.13** Calcule las corrientes trifásicas, LL, LG, LLG a  $\frac{1}{2}$  ciclo. Revise y guarde los resultados obtenidos (**Short Circuit Summary Report**) . ¿Cuál de las corrientes de falla es más grande?

**4.14** Calcule las corrientes trifásicas, LL, LG, LLG en 30 ciclos. Revise y guarde los resultados obtenidos (**Short Circuit Summary Report**). ¿Cuál de las corrientes de falla es la más grande? ¿Comparadas con el punto (4.13) cuales son más grandes? ¿Por qué?

## 5. INFORME

**5.1** Parte inicial: solución de las preguntas del prelaboratorio.

**5.2** Parte central: entregar impreso los resultados (**SHORT-CIRCUIT REPORT**) del punto (4.8) y (**Short Circuit Summary Report**) de los puntos (4.13), (4.14).

**5.3** Parte final: solución de las siguientes preguntas:

- Solución de las preguntas del procedimiento.
- ¿Cuáles son los significados de corriente inicial simétrica, corriente pico, corriente simétrica de apertura y corriente de estado estable? Haga una

grafica de la corriente de cortocircuito e identifique cada una de estas corrientes.

- En el reporte de salida (**SHORT-CIRCUIT REPORT**) hay una columna que se llama contribución (**Contribution**), ¿qué significa esta columna?
- Es posible en el análisis de corto circuito según la norma ANSI utilizar como voltajes prefalla los voltajes calculados en un estudio de flujo de carga, ¿cómo se haría esto en **ETAP PowerStation 3.02**?
- ¿Para que se utilizan las corrientes de falla calculadas a  $\frac{1}{2}$  ciclo, 1.5-4 ciclos y 30 ciclos de las normas ANSI?
- ¿Para que se emplea el cálculo de las corrientes de cortocircuito trifásicas con el botón **Duty** de la barra de herramientas de corto circuito según las normas IEC?

## PRÁCTICA No. 2 CONEXIONES Y PUESTA A TIERRA DE TRANSFORMADORES, VARIACIONES DE LAS IMPEDANCIAS DE LÍNEAS DE TRANSMISION

### 1. OBJETIVOS

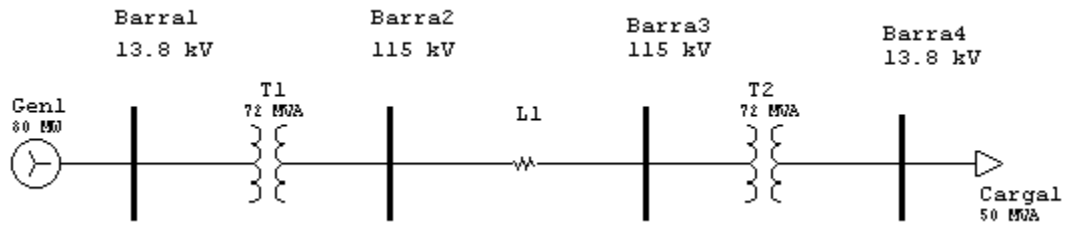
- Observar la influencia de las conexiones y parámetros de puesta a tierra de transformadores en el estudio de corrientes de corto circuito.
- Variar las impedancias de la línea y analizar su efecto en el cálculo de las corrientes de corto circuito.

### 2. PRELABORATORIO

- ¿Cuál es el estudio de fallos más común en sistemas de potencia comerciales?
- ¿En que casos la corriente de corto circuito línea a tierra es mayor que la del corto circuito trifásico?
- ¿Las impedancias de los elementos activos son constantes o variables?
- ¿Para que se utilizan los factores de multiplicación (**MF**) de las normas ANSI?
- ¿Cómo se calcula el valor (en ohmios) de las resistencias y reactores de puesta a tierra de los transformadores? **[1]**.
- ¿Qué es una impedancia limitadora (resistencia o reactancia) de corriente (de puesta a tierra) y donde se emplean?

### 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El análisis de fallos por corto circuito se va a realizar sobre el sistema de la práctica No. 2 de flujos de carga.



**Figura 1. Diagrama unifilar del caso base para la práctica No 1 de análisis de corrientes de corto circuito con ETAP PowerStation 3.02.**

Los datos adicionales de los elementos, necesarios para correr estudios de corto circuito se encuentran en las siguientes tablas:

**Tabla 1. Datos de transformadores.**

Transformador		Conexión	Puesta a tierra
De barra	A barra		
1	2	Y-D	sólido / -
3	4	D-Y	- / sólido

**Tabla 2. Datos del generador.**

Xd" (%)	Xd' (%)	Xo (%)	X/R	Conexión	Puesta a tierra	Tdo' (s)
4,967105	7,993421	4,351974	48	Y	Sólido	1,8217

## 4. PROCEDIMIENTO

**4.1** Recupere el proyecto de la práctica No. 2 de flujos de carga con **ETAP PowerStation 3.02** (conservando sus datos).

**4.2** Ingrese los datos complementarios de los transformadores y del generador, que se encuentran en las tablas 1 y 2.

**4.3** Cree un **caso de estudio de corto circuito** (SC1) basado en normas ANSI, seleccione como barra fallada la barra de carga (Barra 4).

**4.4** Corra el corto circuito trifásico (**Duty**). Revise y guarde los resultados obtenidos (**SHORT-CIRCUIT REPORT**).

**4.5** Calcule las corrientes de corto circuito entre 1.5-4 ciclos. Revise y guarde los resultados obtenidos (**Short Circuit Summary Report**).

## ESTUDIOS DE SENSIBILIDAD

### Efecto de las conexiones de transformadores en la magnitud de las corrientes de corto circuito

**4.6** Cambie la conexión del transformador T2 a delta-delta. Corra el corto circuito trifásico (**Duty**). Revise y guarde los resultados obtenidos (**SHORT-CIRCUIT REPORT**). ¿Qué sucede con la corriente de fallo comparada con la del paso (4.4), ¿Por qué?

**4.7** Calcule las corrientes de corto circuito entre 1.5-4 ciclos. Revise y guarde los resultados obtenidos (**Short Circuit Summary Report**). ¿Qué sucede con las corrientes de fallo comparada con las del paso (4.5), ¿Por qué?

**4.8** Cambie la conexión del transformador T2 a estrella-delta. Calcule las corrientes de corto circuito entre 1.5-4 ciclos. Revise y guarde los resultados obtenidos (**Short Circuit Summary Report**). ¿Qué sucede con las corrientes de fallo comparada con las del paso (4.5), ¿Por qué?

**4.9** Coloque la conexión normal del transformador T2. (Caso base).

### Efecto de la puesta a tierra de transformadores en la magnitud de las corrientes de corto circuito

**4.10** Cambie la puesta a tierra del transformador T2 a Y-abierta. Calcule las corrientes de corto circuito entre 1.5-4 ciclos. Revise y guarde los resultados obtenidos (**Short Circuit Summary Report**). ¿Qué sucede con las corrientes de fallo comparadas con las del paso (4.5), ¿Por qué?

**4.11** Cambie la puesta a tierra del transformador T2 a Y-aterizado a través de una resistencia, con una capacidad de corriente de 400 amperes. Calcule las corrientes de corto circuito entre 1.5-4 ciclos. Revise y guarde los resultados obtenidos (**Short Circuit Summary Report**). ¿Qué sucede con las corrientes de fallo comparadas con las del paso (4.5), ¿Por qué?

**4.12** Repita el paso (4.11) con un reactor. Revise y guarde los resultados (**Short Circuit Summary Report**). ¿Qué sucede con las corrientes de fallo LN y LLN comparadas con las del punto anterior?

**4.13** Cambie nuevamente la puesta a tierra del transformador T2 a Y-aterizado solidamente. (Caso base).

## **Efecto de los cambios de impedancias en las líneas de transmisión, en la magnitud de las corrientes de corto circuito**

**4.14** Típicamente la impedancia de secuencia cero es de al menos tres veces la impedancia de secuencia positiva en líneas de transmisión. En este caso disminuya las impedancias de secuencia cero de la línea de transmisión haciéndolas igual a las impedancias de secuencia positiva. Calcule las corrientes de corto circuito entre 1.5-4 ciclos. Revise y guarde los resultados (**Short Circuit Summary Report**). ¿Qué sucede con las corrientes de fallo comparada con las del paso (4.5), ¿Por qué?

## **5. INFORME**

**5.1** Parte inicial: solución de las preguntas del prelaboratorio.

**5.2** Parte central: entregar impreso los resultados (**SHORT-CIRCUIT REPORT**) del punto (4.4) y (**Short Circuit Summary Report**) del punto (4.5).

**5.3** Parte final: solución de las siguientes preguntas:

- Solución de las preguntas del procedimiento.
- Del análisis de los resultados de los puntos (4.6) a (4.8), ¿Qué tipos de fallos se ven afectados por las conexiones de transformadores (Trifásicos, LL, LG, LLG)?
- ¿Por qué escoger una resistencia de puesta a tierra en lugar de una reactancia de puesta a tierra?
- ¿En que elementos se considera que la impedancia de secuencia positiva es igual a la de secuencia negativa?

## PRÁCTICA No. 3

### EFECTO DE LOS GENERADORES, UTILIZACIÓN DE LOS VOLTAJES DE LA SOLUCIÓN DE FLUJOS DE CARGA COMO VOLTAJES PREFALLO

#### 1. OBJETIVOS

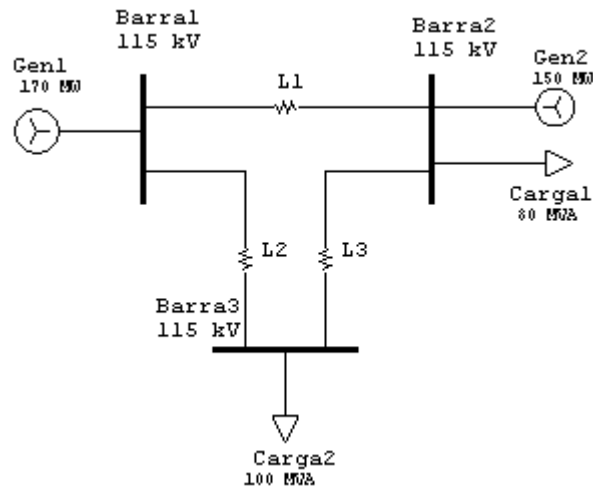
- Analizar el efecto de la distancia del generador al punto de fallo en las corrientes de corto circuito.
- Simular diferentes configuraciones de conexiones y puesta a tierra de generadores.
- Observar el efecto que tiene el tipo de generador en las corrientes de corto circuito.
- Simular fallos teniendo como voltajes prefallo los del flujo de carga (normas **ANSI**).

#### 2. PRELABORATORIO

- ¿Cómo se modelan los generadores en el cálculo de corrientes de corto circuito trifásicas (**Duty**) según las normas **ANSI**?
- ¿Qué impedancia del generador se utiliza en el cálculo de corrientes trifásicas de estado estable (después de 30 ciclos) según las normas ANSI?
- Las normas IEC hacen una corrección a la impedancia del generador antes de calcular los fallos. ¿Cuál es la fórmula que muestra esta corrección?
- Cite dos referencias bibliográficas donde se consigan parámetros típicos para las impedancias de los generadores y mencione sus valores.
- Identifique cada una de las variables de la tabla 1.

#### 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema analizado en esta práctica será igual al utilizado en la práctica No. 4 para flujos de carga.



**Figura 1. Diagrama unifilar del caso base para la práctica No. 3 de análisis de corrientes de corto circuito con ETAP PowerStation 3.02.**

Los datos adicionales de los elementos, necesarios para correr estudios de corto circuito se encuentran en la siguiente tabla:

**Tabla 1. Datos de los generadores.**

Generador	Xd" (%)	Xd' (%)	Xo (%)	X/R	Conexión	Puesta a tierra	Tdo' (s)
Barra 1	15,7232	23,4732	11,8125	48	Y	Sólido	2,17
Barra 2	3,9256	5,8615	2,9487	48	Y	Sólido	2,17

#### 4. PROCEDIMIENTO

**4.1** Recupere el proyecto de la práctica No. 4 de flujos de carga con **ETAP PowerStation 3.02** (conservando sus datos).

**4.2** Ingrese los datos complementarios de los generadores, que se encuentran en la tabla 1.

**4.3** Cree un **caso de estudio de corto circuito** (SC1) basado en normas **ANSI**, seleccione como barras falladas las barra 1,2 y 3.

**4.4** Calcule las corrientes de corto circuito en  $\frac{1}{2}$  ciclo. Revise y guarde los resultados obtenidos (**SHORT CIRCUIT REPORT**) y (**Short Circuit Summary Report**). ¿Cuál es la corriente de falla más grande en la barra 2 (LN, LL, LLN, Trifásica)?

**4.5** Calcule las corrientes de corto circuito entre 1.5-4 ciclos. Revise y guarde los resultados obtenidos (**SHORT CIRCUIT REPORT**) y (**Short Circuit Summary**

**Report).** ¿Cómo son las corrientes de corto circuito comparadas con las del punto anterior? ¿Por qué?

## ESTUDIOS DE SENSIBILIDAD

### Efecto de la distancia del generador al punto de fallo en las corrientes de corto circuito

**4.6** Compare las corrientes de corto circuito (obtenidas en el punto (4.4)) de la barra 2 con las de la barra 3. ¿Cuáles son más grandes? ¿Por qué?

### Efecto de las conexiones y puesta a tierra de los generadores en la magnitud de las corrientes de corto circuito

**4.7** Cambie el tipo de puesta a tierra del generador Gen2 por Y-abierta. Calcule las corrientes de corto circuito en  $\frac{1}{2}$  ciclo. Revise y guarde los resultados obtenidos (**SHORT CIRCUIT REPORT**) y (**Short Circuit Summary Report**). ¿Qué sucede con las corrientes de corto circuito comparadas con las del punto (4.4)? ¿Por qué? ¿Qué barra experimenta los mayores cambios? ¿Por qué?

**4.8** Cambie la conexión del generador Gen2 a delta. Calcule las corrientes de corto circuito en  $\frac{1}{2}$  ciclo. Revise y guarde los resultados obtenidos (**SHORT CIRCUIT REPORT**) y (**Short Circuit Summary Report**). ¿Qué sucede con las corrientes de corto circuito comparadas con las de los puntos (4.4) y (4.7)? ¿Por qué?

**4.9** Cambie el tipo de puesta a tierra del generador Gen2 por Y-aterrizada a través de un reactor de 400 amperes. Calcule las corrientes de corto circuito en  $\frac{1}{2}$  ciclo. Revise y guarde los resultados obtenidos (**SHORT CIRCUIT REPORT**) y (**Short Circuit Summary Report**). ¿Qué sucede con las corrientes de corto circuito comparadas con las del punto (4.4)? ¿Por qué? En la barra 2, ¿cómo es la contribución del generador Gen2 a la corriente de fallo comparada con la del punto (4.4)?

**4.10** Cambie la conexión del generador Gen2 a Y-aterrizado solidamente. (Caso base).

### Efecto del tipo de generador en la magnitud de las corrientes de corto circuito

**4.11** En la sección **SC Designation** de la página **Info** del **editor de generadores**, cambie el tipo del generador Gen2 de **Turbo** a **Hydro**. Modifique los siguientes parámetros,  $X_d''$  (%) = 14,  $X_d'$  (%) = 20,  $X_o$  (%) = 3,  $X/R$  = 20,  $T_{do}'$  (s) = 0.7. Calcule las corrientes de corto circuito en  $\frac{1}{2}$  ciclo. Revise y guarde los resultados

obtenidos (**Short Circuit Summary Report**). ¿Que sucede con las corrientes de corto circuito comparadas con las del punto (4.4)? ¿Por qué?

**4.12** Cambie el tipo del generador Gen2 de **Hydro** a **Hydro w/o Damping**. Modifique los siguientes parámetros,  $X_d''$  (%) = 22,  $X_d'$  (%) = 22,  $X_o$  (%) = 4,  $X/R$  = 20,  $T_{do}'$  (s) = 0.7. Calcule las corrientes de corto circuito en  $\frac{1}{2}$  ciclo. Revise y guarde los resultados obtenidos (**Short Circuit Summary Report**). ¿Que sucede con las corrientes de corto circuito comparadas con las del punto (4.4)? ¿Por qué?

**4.13** A mayor potencia del generador menores son sus valores de impedancias. En este caso aumente la potencia del generador Gen2 a 200 MW con el mismo factor de potencia. Calcule las corrientes de corto circuito en  $\frac{1}{2}$  ciclo. Revise y guarde los resultados obtenidos (**Short Circuit Summary Report**). ¿Que sucede con las corrientes de corto circuito comparadas con las del punto (4.4)? ¿Por qué?

**4.14** Cambie el tipo del generador Gen2 a **Turbo** y modifique sus parámetros colocando los del caso base.

### Utilización de los voltajes hallados en la solución del flujo de carga como voltajes prefalla

**4.15** Corra un flujo de carga de modo que el voltaje inicial de las barras sea igual al voltaje de operación. Seleccione **Vmag X Nominal kV (from bus editor)** en el **editor de caso de estudio de corto circuito**. Calcule las corrientes de corto circuito en  $\frac{1}{2}$  ciclo. Revise y guarde los resultados obtenidos (**Short Circuit Summary Report**). ¿Qué sucede con las corrientes de corto circuito comparadas con las del punto (4.4)? ¿Por qué?

## 5. INFORME

**5.1** Parte inicial: solución de las preguntas del prelaboratorio.

**5.2** Parte central: entregar impreso los resultados (**Short Circuit Summary Report**) y (**SHORT-CIRCUIT REPORT**) del punto (4.4).

**5.3** Parte final: solución de las siguientes preguntas:

- Solución de las preguntas del procedimiento.
- ¿Para que se utilizan los parámetros del modelo dinámico del generador (**Dinamic Model**)? [1].

## PRÁCTICA No.4 EFECTO DE LOS MOTORES SÍNCRONOS

### 1. OBJETIVOS

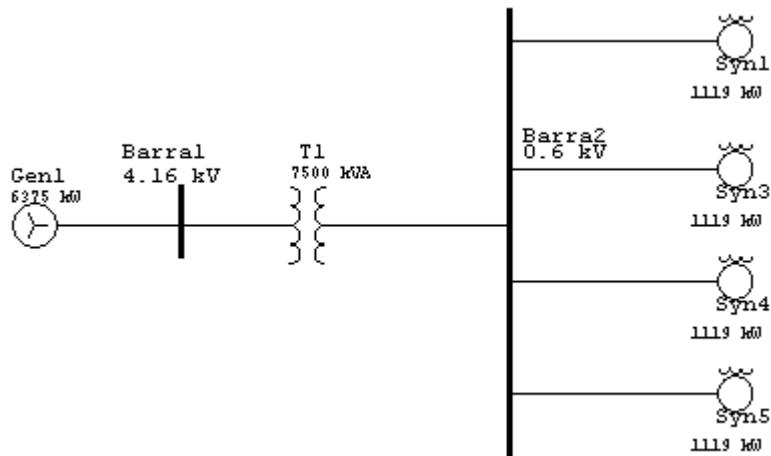
- Observar la contribución de los motores sincrónicos a la corriente de fallo en función de su duración.
- Observar el efecto que tiene sobre la corriente de fallo, el tipo de conexión y puesta a tierra de los motores sincrónicos.

### 2. PRELABORATORIO

- ¿Qué valor de reactancia se considera en el modelado de motores para el cálculo de corrientes de corto circuito trifásicas (**Duty**) según las normas ANSI?
- ¿Después de cuantos ciclos no se tiene en cuenta la contribución de los motores a las corrientes de falla según las normas ANSI? ¿Por qué?
- ¿Que significa la opción **Motor Contribution Based on** de la pestaña **Info** del **caso de estudio de corto circuito**?
- ¿Qué expresión se emplea para el cálculo de la reactancia subtransitoria de motores de inducción?
- Identifique las variables de la tabla 4.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema a analizar es el que se muestra en la Figura 1.



**Figura 1. Diagrama unifilar del caso base para la práctica No. 4 de análisis de corrientes de corto circuito con ETAP PowerStation 3.02.**

Los datos de los elementos se encuentran en las siguientes tablas:

**Tabla 1. Datos de las barras.**

Barra (ID)	kV nominales	%V	Ángulo
1	4,16	100	0
2	0,6	100	0

**Tabla 2. Datos del transformador.**

Transformador		ID	Z (%)	X/R	Tolerancia de Z	kV nominales	kVA
De barra	A barra						
1	2	T1	10	14,23	0	4,16 / 0,6	7500

Transformador		Conexión	Puesta a tierra
De barra	A barra		
1	2	Y-D	sólido / -

**Tabla 3. Datos del generador.**

Generador	ID	KV nominales	kW nominales	Factor de potencia	Modo de operación	Modo Swing	
						%V	Ángulo
Barra 1	Gen1	4,16	6375	0,85	Swing	101	0

Generador	Xd" (%)	Xd' (%)	Xo (%)	X/R	Conexión	Puesta a tierra	Tdo' (s)
Barra 1	10	23	5	48	Y	Reactor (480 Amperios)	3

**Tabla 4. Datos de los motores.**

Motor Sincrono	ID	kV nominales	kW	Factor de potencia (% de la carga)			Eficiencia (% de carga)		
				100%	75%	50%	100%	75%	50%
1	Syn1	0,6	1119	92,54	92,54	92,54	89,50	89,50	89,50
2	Syn2	0,6	1119	92,54	92,54	92,54	89,50	89,50	89,50
3	Syn3	0,6	1119	92,54	92,54	92,54	89,50	89,50	89,50
4	Syn4	0,6	1119	92,54	92,54	92,54	89,50	89,50	89,50

Motor Sincrono	Xd" (%)	X/R	Xd (%)	Xo (%)	Tdo' (s)	%LRC	Conexión	Aterrizaje
1	20	28	110	4	5,6	650	Y	Reactor (173 amperios)
2	20	28	110	4	5,6	650	Y	Reactor (173 amperios)
3	20	28	110	4	5,6	650	Y	Reactor (173 amperios)
4	20	28	110	4	5,6	650	Y	Reactor (173 amperios)

#### 4. PROCEDIMIENTO

**4.1** Inicie un nuevo proyecto con nombre Cortos4. Coloque los elementos utilizados como se muestra en la Figura 1. Ingrese los datos de los elementos dados en el numeral (3).

**4.2** Cree un **caso de estudio de corto circuito** (SC1) basado en normas **ANSI**, seleccione como barra fallada la barra 2.

**4.3** Calcule las corrientes de corto circuito en ½ ciclo. Revise y guarde los resultados obtenidos (**Short Circuit Summary Report**) y (**SHORT-CIRCUIT REPORT**). ¿Cuál es la corriente de falla más grande (LL, LN, LLN, Trifásica)?

**4.4** Calcule las corrientes de corto circuito entre 1.5-4 ciclos. Revise y guarde los resultados obtenidos (**Short Circuit Summary Report**) y (**SHORT-CIRCUIT REPORT**). ¿Cómo son las corrientes de corto circuito comparadas con las del punto anterior?

**4.5** Calcule las corrientes de corto circuito en 30 ciclos. Revise y guarde los resultados obtenidos. ¿Cómo son las corrientes de corto circuito comparadas con las de los puntos (4.3) y (4.4)?

#### ESTUDIOS DE SENSIBILIDAD

**Efecto del tipo de conexión y puesta a tierra de los motores en la magnitud de las corrientes de corto circuito**

**4.6** Cambie el tipo de puesta a tierra del motor Syn1 por Y-abierta. Calcule las corrientes de corto circuito en  $\frac{1}{2}$  ciclo. Revise y guarde los resultados obtenidos (**Short Circuit Summary Report**) y (**SHORT-CIRCUIT REPORT**). ¿Qué sucede con las corrientes de corto circuito comparadas con las del punto (4.3)? ¿Por qué? ¿Cuál es el valor de la contribución de corriente del motor Syn1 a la falla? ¿Por qué?

**4.7** Cambie la conexión del motor Syn1 a delta. Calcule las corrientes de corto circuito en  $\frac{1}{2}$  ciclo. Revise y guarde los resultados obtenidos (**Short Circuit Summary Report**). ¿Qué sucede con las corrientes de corto circuito comparadas con las del punto anterior? ¿Por qué? ¿Cuál es el valor de la contribución de corriente del motor Syn1 a la falla? ¿Por qué?

**4.8** Cambie el tipo de puesta a tierra del generador Syn1 por Y-aterrizada a través de una resistencia de 173 amperes. Calcule las corrientes de corto circuito en  $\frac{1}{2}$  ciclo. Revise y guarde los resultados obtenidos (**Short Circuit Summary Report**). ¿Qué sucede con las corrientes de corto circuito comparadas con las del punto (4.3)? ¿Por qué?

**4.9** Cambie la conexión de todos los motores a Y-abierta. Calcule las corrientes de corto circuito en  $\frac{1}{2}$  ciclo. Revise y guarde los resultados obtenidos (**Short Circuit Summary Report**) y (**SHORT-CIRCUIT REPORT**). ¿Qué sucede con las corrientes de corto circuito comparadas con las del punto (4.3)? ¿Por qué? ¿Cuál es el valor de la contribución de corriente de los motores a la falla? ¿Por qué?

**4.10** Cambie la conexión de todos los motores a Y-solidamente aterrizada. Calcule las corrientes de corto circuito en  $\frac{1}{2}$  ciclo. Revise y guarde los resultados obtenidos (**Short Circuit Summary Report**) y (**SHORT-CIRCUIT REPORT**). ¿Qué sucede con las corrientes de corto circuito comparadas con las del punto (4.3)? ¿Por qué?

## 5. INFORME

**5.1** Parte inicial: solución de las preguntas del prelaboratorio.

**5.2** Parte central: entregar impreso los resultados (**Short Circuit Summary Report** y **SHORT-CIRCUIT REPORT**) de los puntos (4.3), (4.4) y (4.5) .

**5.3** Parte final: solución de las preguntas del procedimiento.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Operation Technology Inc. Etap PowerStation, User Guide, Version 3.01.
- [2] IEEE Std 399-1990, Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis.
- [3] GÖNEN, T. *Modern Power System Analysis*, New York, NY: John Wiley, 1988.
- [4] GRAINGER, J. J. and STEVENSON W. D Jr. *Análisis de Sistemas de Potencia*. McGraw-Hill, 1996.
- [5] DIAZ V. Oscar E., RODRÍGUEZ M. Jorge A. *Prácticas Computacionales sobre Flujos de Carga y Análisis de Corto Circuito en Sistemas Eléctricos de Potencia Utilizando los Programas Etap PowerStation 3.02 y PowerWorld Simulator 7.0*, Manizales:Universidad Nacional de Colombia, 2001.
- [6] IEEE Std 141-1976. Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants (ANSI).
- [7] MILLER, T.J.E. *Reactive Power Control in Electrical System*, New York, NY:John Wiley, 1982.
- [8] ROEPER, R. *Corrientes de Corto Circuito en Redes Trifásica*, Marcombo, 1985.



## **ANEXO IV**

**GUÍAS DE PRÁCTICAS DE SIMULACIÓN DE FLUJOS DE CARGA  
Y CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO CON POWERWORLD  
SIMULATOR 7.0**

## OBJETIVOS GENERALES

- Mostrar la aplicación del programa **PowerWorld Simulator 7.0** en la solución de flujos de carga y corrientes de corto circuito.
- Obtener los conocimientos básicos necesarios para la solución computacional de flujos de carga y el análisis de corrientes de corto circuito.
- Realizar estudios de sensibilidad con el fin de analizar las condiciones de operación en los sistemas de potencia presentados.

**PRÁCTICAS DE SIMULACIÓN DE FLUJOS  
DE CARGA CON POWERWORLD  
SIMULATOR 7.0**

## PRÁCTICA No. 1 SIMULACIÓN DE LOS FLUJOS DE CARGA DE UN SISTEMA DE POTENCIA EN POWERWORLD SIMULATOR 7.0

### 1. OBJETIVOS

- Conocer las acciones básicas para insertar los elementos fundamentales de un sistema de potencia con el programa **PowerWorld Simulator 7.0** así como las opciones de simulación necesarias para correr un flujo de carga.
- Simular un sistema básico: Generador – Línea – Carga para obtener la solución de las ecuaciones del flujo de carga.
- Observar el efecto que se produce al cambiar los valores de potencia de la carga así como los parámetros de la línea y la magnitud del voltaje generado.

### 2. PRELABORATORIO

- ¿Qué información de cada uno de los elementos de un sistema de potencia se necesita para realizar un estudio de flujos de carga?
- ¿Qué información se obtiene como resultado de un estudio de flujos de carga?
- ¿Cómo son representadas las líneas de transmisión en un estudio de flujos de carga?
- ¿Cuáles son los valores típicos de tensión de salida de un generador y cómo se pueden determinar los límites de reactivos de este?
- ¿Por qué no se incluye la reactancia de los generadores en los estudios de flujos de carga?

### 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema que se va analizar consiste de un generador alimentando una carga a través de una línea de transmisión. La línea es trifásica y tiene una impedancia

serie Z. Los datos de la carga conectada y de los demás elementos se muestran en la Tabla 1. En la Figura 1 se muestra el diagrama unifilar del sistema.

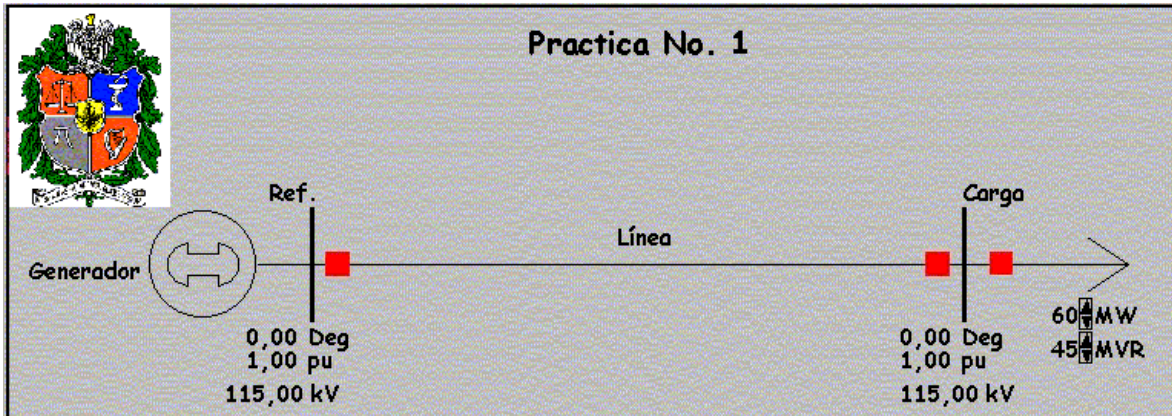


Figura 1. Diagrama unifilar del sistema para la práctica No. 1.

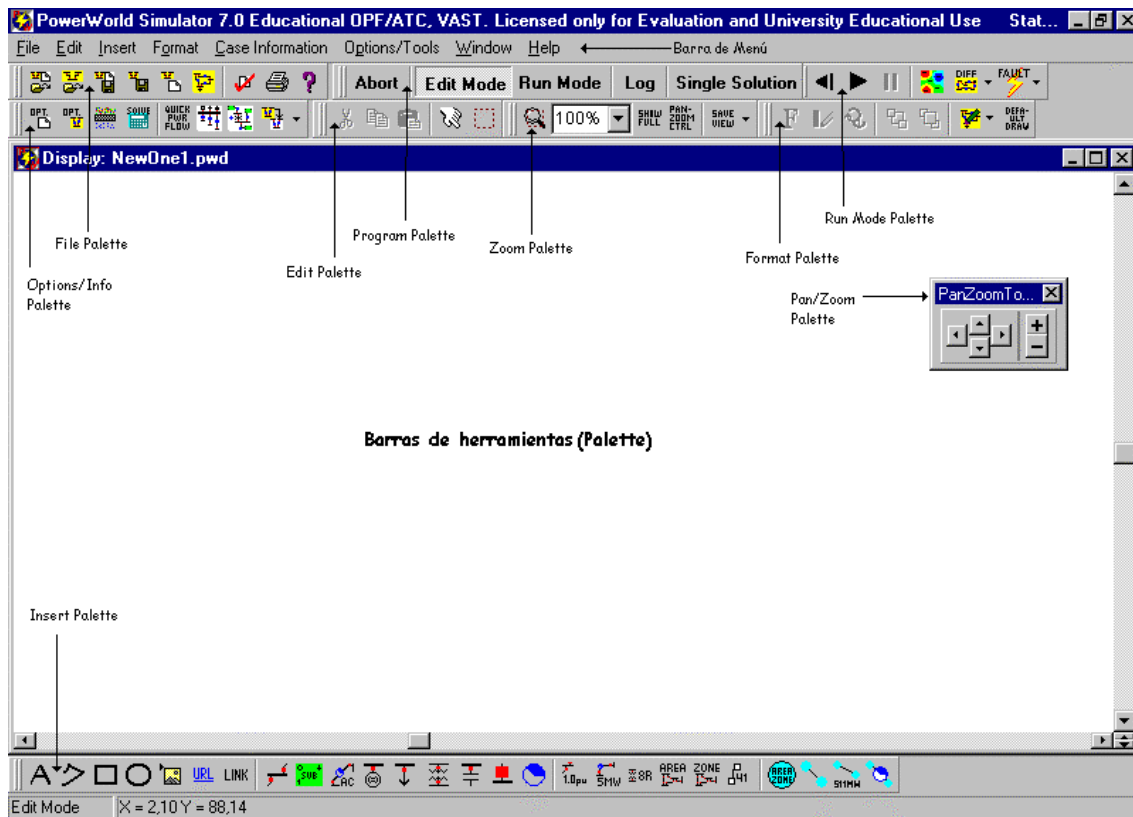
Tabla 1. Datos de los elementos para el sistema de la Práctica No. 1.

Elemento	Voltaje	Potencia	Impedancia
Generador	115 kV	Máxima 80 MW -94<Q<94 MVAR	-
Línea (4,5 km)	115 kV	Límite 100 MVA	$Z_1=0,0946+j0,4632 \Omega/\text{km}$ $Y_1=3,596 \mu\text{S}/\text{km}$
Carga	115 kV	60 MW $\text{fp}=0,8\downarrow$	-

#### 4. PROCEDIMIENTO

- 4.1 Suponga unas bases para el sistema de 115 kV y 100 MVA; halle la impedancia y la admitancia de la línea en p.u. Calcule además la potencia reactiva de la carga.
- 4.2 Inicie el programa **PowerWorld Simulator 7.0**. En el menú **File** escoja la opción **New Case** para crear un nuevo modelo. Identifique las barras de herramientas que se muestran en la Figura 2.
- 4.3 En la barra de herramientas **Insert** ubique el cursor del Mouse sobre cada botón de la barra para identificar los tipos de elementos disponibles. Haga clic sobre el botón **Bus** para insertar la primera barra del sistema. Suelte el botón del Mouse y ubique el puntero sobre el lugar donde se quiere insertar la barra; por último haga clic en dicho lugar.
- 4.4 Al realizar el paso 4.3 se abre una ventana llamada **Bus Options**. En dicha ventana verifique y/o modifique los siguientes campos: **Bus Name**: digite el nombre "Ref" para esta barra. **Shape**: Seleccione la forma de la barra como **Vertical bar**. **Area Number**, **Area Name**: el número de área para este ejemplo será 1 y el nombre será "Area 1". **Nominal Voltage**: coloque en este

campo el número 115. **System Slack Bus**: active esta opción haciendo clic sobre ella (esta será la barra de referencia del sistema). Haga clic en el botón **OK**.



**Figura 2. Ambiente de trabajo de PowerWorld Simulator 7.0 y sus barras de herramientas.**

- 4.5 Haga clic sobre el botón **Generator** en la barra **Insert**. Ubique el puntero del Mouse sobre la barra ya insertada y haga clic sobre ella para abrir la ventana **Generator Options**.

En la sección **Display Information** verifique que el campo **Anchored** este seleccionado (Ver capítulo 4 – sección **Anchored Objects** de la guía de usuario). En la sección **MW and Voltage Control** cambie los siguientes campos: **Max MW Output** = 80, **Regulated Bus Number** = 1, **Setpoint Voltage** = 1, **Min Mvars** = -94, **Max Mvars** = 94. Verifique que el campo **Use Capability Curve** esté desactivado (Ver Capítulo 7 – sección **Generator Reactive Power Capability Curve**). Haga clic en el botón **OK**.

- 4.6 De la misma forma que insertó la primera, inserte ahora la segunda barra. En la ventana de opciones de barra modifique los siguientes campos: En el campo **Shape** seleccione la opción **Vertical Bar**. En el campo **Nominal Voltage** ingrese 115. Cambie el campo **Bus Name** a “Carga”.

- 4.7 Para insertar la carga haga clic en el botón **Load** de la barra **Insert** y ubique el cursor del mouse sobre la barra 2. Haga clic sobre ella para invocar la ventana de opciones **Load Options**. En esta ventana ingrese el valor 60 en el campo **MW Value** de la sección **Constant Power** y en el campo **MVAR Value** el valor hallado en el paso 4.1.
- 4.8 Para insertar la línea de transmisión haga clic en el botón **AC Transmission Line** de la barra de herramientas **Insert**. Ubique el cursor en la barra 1 y haga clic, suelte el botón y mueva el mouse hacia la otra barra; al llegar a ésta haga doble clic sobre la misma. Se abre entonces la ventana **Transmission Line/Transformer Options**; ingrese en dicha ventana los datos hallados en el paso 4.1 para la impedancia y admitancia de la línea en p.u. en los campos **Resistance (R)**, **Reactance (X)**, **Charging (B o C)** (Nota: los valores decimales deben ir separados por comas). Ingrese en el campo **Limit A (MVA)** el valor 100. Haga clic en el botón **OK** para grabar los datos y cerrar la ventana.
- 4.9 Haga clic en el botón **Bus Field** de la barra **Insert**. Ubique el cursor sobre la barra 1 y haga clic nuevamente. Esto abre la ventana **Bus Field Options**; en ella escoja la opción **Bus Voltage**. Repita este mismo paso para insertar los siguientes campos: **Bus Angle** (ángulo del voltaje de barra) y **Bus Volt kV** (voltaje de la barra en kV), explorando para este último campo la opción **Select a Field**. Repita este mismo paso para la barra 2.
- 4.10 De manera similar a lo realizado en el paso anterior para las barras, abra la ventana **Line Field Options** para insertar los siguientes campos de información de la línea: **AC Line MW Flow** y **AC Line MVAR Flow** en cada extremo de la línea, así como **AC Line MW Losses** y **AC Line MVAR Losses**. Seleccione además el campo **Line/Xformer Max Percent** con la opción **Select a Field**.
- 4.11 Haga clic derecho sobre el campo **MW** de la carga; coloque en la opción **Delta per Mouse Clic** el valor 10 (para incrementar la potencia de la carga desde el diagrama unifilar). Haga lo mismo con los MVAR de la carga.
- 4.12 Haga clic en el botón **Text** de la barra **Insert**, ubique el cursor encima del campo correspondiente a las pérdidas en MVAR de la línea y haga clic nuevamente. A continuación se abre un cuadro llamado **Text Options**; escriba aquí el texto: “Pérdidas de MVAR” y haga clic en el botón **OK**. Haga lo mismo para insertar el texto para: “Pérdidas de MW”, “Porcentaje de Carga”, “Práctica No. 1”. También inserte el texto “kV” y ubíquelo enseguida del campo correspondiente al voltaje de barra en kV.
- 4.13 En la barra de herramientas **Format** ubique el botón **Default Drawing Options** y haga clic sobre él. En la ventana resultante (**Default Drawing Values for New Objects**) haga clic en la sección **Background Object**; haga

clic nuevamente en el valor del campo **Fill Color**; escoja un color en la ventana resultante y haga clic en **Aceptar** y luego en el botón **Close**.

- 4.14 En la barra **Insert** haga clic sobre el icono **Background Rectangle**. Ubique el cursor en una esquina y mantenga presionado el clic para dibujar un rectángulo de fondo para el diagrama.
- 4.15 Después de haber seguido los pasos anteriores el diagrama unifilar debe verse de manera similar a la mostrada en la Figura 3.

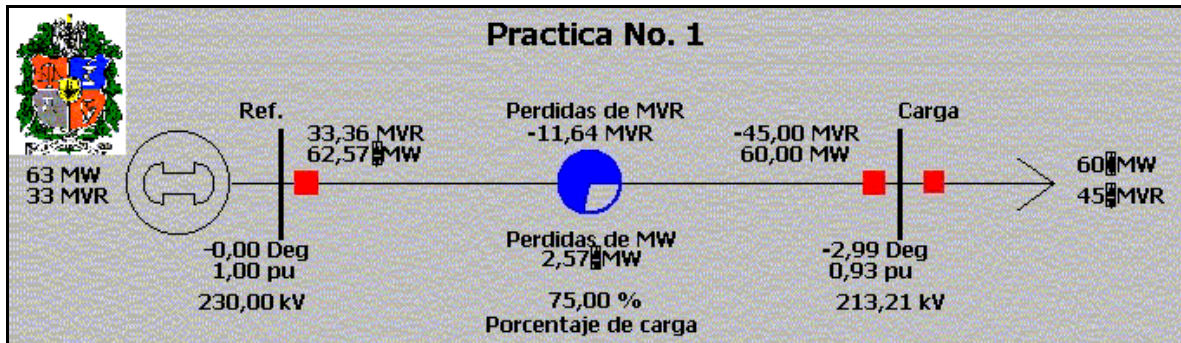


Figura 3. Vista del diagrama unifilar para la práctica No.1 en PowerWorld Simulator.

- 4.16 Se va a realizar una simulación sencilla del flujo de carga. En la barra de menús haga clic en **Options/Tools** y escoja la opción **Solution/Environment**. En la sección **Power Flow Solution** active las opciones **Restore Initial State on Restart** y **Initialize From Flat Start Values**.

Verifique que el campo **MVA Convergence Tolerance** tenga el valor de 0,1. En el campo **Maximum Number of Iterations** coloque 25. Ingrese también en el campo **Assumed MVA Per Unit Base** el valor de 100. Active el campo **Do Not Calculate Bus Loss Sensitivities** y el campo **Full Newton Power Flow**. En la sección **Limits** active las opciones **Enforce Generator MW Limits**, **Automatically Open Overheated Lines during Simulation** y **Highlight Analogs of Objects with Limit Violations**.

- 4.17 Seleccione en la barra de programa (**Program Palette**) la opción **Run Mode** con el clic izquierdo (si esta barra no se encuentra activa, vaya al menú **Window**, escoja la opción **Toolbars** y active la opción **Run Mode**). Haga clic también en el botón **Log** de esta misma barra para que se active el cuadro **Message Log** que muestra un registro de todas las acciones de simulación que se realizan. Estando en modo simulación ejecute el comando **Single Solution** para correr el flujo de carga. Observe la magnitud de los voltajes y ángulos de barra, los MW y MVAR generados, las pérdidas, el porcentaje de carga y los flujos de MW y de MVAR a través de la línea de transmisión por medio de los campos en el diagrama unifilar. Observe el **Message Log** y diga ¿cuál fue el número de iteraciones que se realizaron?

- 4.18 Seleccione la opción **Power Flow List** del menú **Case Information** para visualizar los resultados en forma de tabla. Presione la tecla **F1** y haciendo uso de la ayuda del programa, diga ¿qué significa el caracter **R** que está al lado del valor de MVAR del generador en la barra 1 al ejecutar la opción **Power Flow List**? ¿Qué otras letras pueden aparecer al lado de los MVAR de un generador y qué significan?
- 4.19 En el menú **Case Information** haga uso de la opción **Report Writer** para generar un reporte con los datos de todos los elementos del sistema. En la ventana resultante **Report Criteria Dialog** escoja en el campo **Types of Reports to create** la opción **All**. Haga clic en el botón **Compile Report** para generar el reporte. Después de mostrado el reporte haga uso del clic derecho del mouse y escoja las opciones para seleccionar y copiar la información al portapapeles de windows. Copie esta información a un archivo de texto (informe).
- 4.20 Haga clic en la flecha ascendente del campo MW de la carga y aumente su valor a 100. Haga lo mismo con los MVAR y aumente su valor a 85 (puede colocar los valores de inicio plano haciendo uso de la opción **Reset to Flat start** en el menú **Simulation**, estando en modo simulación). Ahora vuelva a ejecutar el comando **Single Solution** y copie los datos de **Power Flow List** a su archivo haciendo uso del clic derecho del mouse. Respecto a este paso, ¿Qué variables se ven afectadas al aumentar la carga del sistema? ¿Cuáles permanecen iguales y por qué? ¿Qué elementos exceden sus límites al aumentar la carga?
- 4.21 Haga la carga igual a cero y vuelva a correr la solución de los flujos de carga. Observe los cambios ocurridos en el sistema. ¿Por qué aparece una cantidad de MVAR en la línea?
- 4.22 Aplique el paso 4.9 para insertar un campo de visualización del voltaje de referencia del generador (**Gen Setpoint Voltage**) y coloque en la opción **Delta per Mouse Clic** el valor 0,01. Vuelva a colocar los valores de carga nominal. Haciendo uso de este campo determine ¿cuál debe ser la tensión en kV en el generador para que en la carga se tenga una tensión de 115 kV? ¿Cuál será la regulación de tensión? Haga lo mismo para el valor de carga del paso 4.20.
- 4.23 Vuelva la carga a condiciones iniciales. Omita el parámetro de resistencia y de susceptancia de la línea y vuelva a ejecutar la opción **Single Solution**. Actualice su informe con los resultados de este paso haciendo uso de la opción **Report Writer**. Compare los datos de flujos de carga y de pérdidas con los obtenidos en el paso 4.17. ¿Qué conclusión puede obtenerse al efectuar este paso?

- 4.24 Vuelva a las condiciones iniciales del sistema y vaya al menú **File**. Escoja la opción **Save Case**. En el cuadro de diálogo resultante asigne el nombre “prac1flu” en el campo **Nombre de archivo**. Enseguida se le pregunta por el nombre del archivo que almacenará el diagrama unifilar (\*.pwd); asigne el mismo nombre para dicho archivo.

## 5. INFORME

El informe para esta práctica debe contener:

- 5.1 Parte inicial: solución al prelaboratorio de la práctica No. 1.
- 5.2 Parte central:
- Los datos del sistema en p.u.
  - Los datos obtenidos en el paso 4.19 identificados como: “Datos de flujos de carga para condiciones iniciales del sistema”.
  - Los datos de los flujos de carga para las condiciones dadas en el paso 4.20 y 4.23, identificados como: “Datos de flujos de potencia para una carga de 100 MW, 85 MVAR” y “Datos de flujos de potencia cuando se omiten R y C en la línea”, respectivamente.
- 5.3 Parte final:
- Solución de las preguntas del procedimiento.
  - Responda las siguientes preguntas:
    - ¿Qué opciones se encuentran en la sección **Limits** de las opciones de simulación y qué significan? (Capítulo 8 – guía de usuario).
    - ¿Cómo se puede determinar el límite de potencia a transmitir en una línea de transmisión?
    - Conocida la tensión, potencia y factor de potencia de una carga estática, ¿cómo se puede definir esta en ohmios?
    - Demuestre que la susceptancia B de una línea de transmisión es igual a la capacitancia cuando se analizan en p.u.
    - Compare la información de los pasos 4.19 y 4.20 y diga, ¿qué información es mostrada con las opciones **Report Writer** y **Power Flow List**?
    - De los casos simulados, ¿Cuál presenta un porcentaje de pérdidas mayor y por qué?

Debe anexar además el archivo **pwb** (archivo binario que almacena los datos del caso) y el archivo **pwd** (archivo que guarda el diagrama unifilar del caso) de la práctica No. 1. Para esta práctica los archivos son: “prac1flu.pwb” y “prac1flu.pwd”.

## PRÁCTICA No. 2

### FLUJOS DE CARGA A TRAVÉS DE TRANSFORMADORES DE TAP FIJO

#### 1. OBJETIVOS

- Resolver el problema de flujos de carga para un sistema de potencia que involucra transformadores para elevación y reducción del voltaje de barra.
- Observar el efecto producido en el sistema al adicionar carga y también al cambiar el tipo de carga conectada.
- Observar el efecto producido sobre los flujos de carga por la variación del factor de potencia de la carga.
- Explorar diferentes maneras de visualizar los resultados de simulación del sistema mediante el **PowerWorld Simulator 7.0**.

#### 2. PRELABORATORIO

- De acuerdo a su dependencia con el voltaje de barra, ¿Cómo se pueden clasificar las cargas?
- Si a una carga se le aumenta su potencia activa, ¿Cuál variable se verá más afectada en la barra donde está conectada?
- ¿Cuál es el modelo utilizado para representar transformadores fijos en un estudio de flujos de carga?

Con respecto al programa:

- Haciendo uso del manual del programa, diga ¿cuáles son los pasos a seguir para insertar un transformador y cuáles los datos necesarios de éste para correr un flujo de carga? ¿Cómo se vuelve a invocar el cuadro de diálogo para un transformador ya insertado? (Capítulo 4, ver **Transformers**).
- ¿Cómo se llega a la opción **Add New Fields Around Bus** y cómo se insertan campos que no están explícitos en el cuadro de diálogo resultante? ¿Qué otros elementos disponen de la opción para adicionar campos y qué otra opción le permite insertar campos de información? (Capítulo 4, ver **Overview** y **Bus Fields on Onelines**).

- Explore las opciones disponibles en el menú **Case Information** que permiten visualizar los resultados de flujos de carga y de voltajes de barra (Capítulo 10 **Text-Based Information Displays**, ver secciones: **Fundamentals, Summary Displays, Bus Displays, Load Displays** y **Line and Transformer Displays**).
- ¿Cuáles son las opciones para modelar cargas en **PowerWorld Simulator 7.0**? ¿Qué fórmula emplea el Power World Simulator para calcular los MW y los MVAR totales de la carga? (Capítulo 7, ver **Load Properties** y **Load Modeling**).

### 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

Una carga se conecta a través de dos transformadores trifásicos y de una línea de transmisión a un generador, tal como se muestra en la Figura 1. Los valores nominales y las reactancias de los elementos se muestran en la Tabla 1. Bases: 100 MVA, 115 kV en la línea de transmisión.

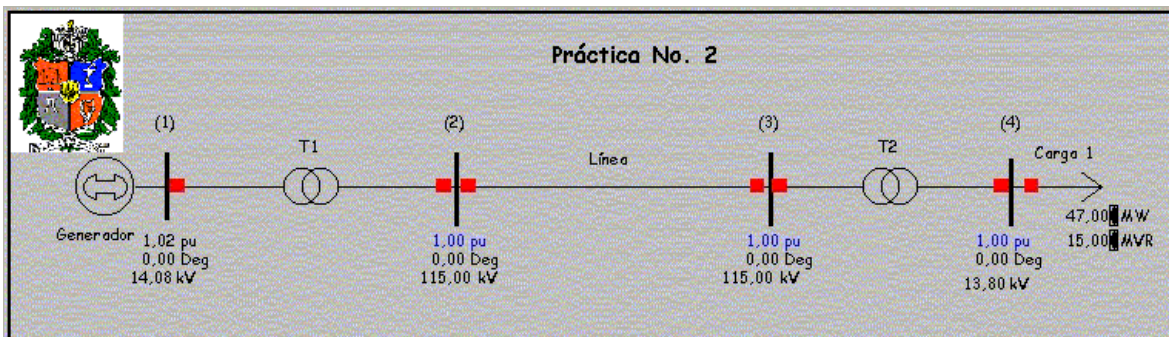


Figura 1. Diagrama unifilar para el sistema de la práctica No. 2.

Tabla 1. Datos del sistema para la Práctica No. 2.

Elemento	Voltaje	Potencia	Impedancia
Generador (referencia 1,02∠0°)	13,8 kV	Máxima 80 MW (Curva de capacidad)	-
Trafo 1 (Barras 1-2)	13,8/115 kV	72 MVA	R <sub>1</sub> =0,0035 p.u. X <sub>1</sub> =0,1181 p.u.
Trafo 2 (Barras 3-4)	115/13,8 kV	72 MVA	R <sub>1</sub> =0,0035 p.u. X <sub>1</sub> =0,1181 p.u.
Línea (Barras 2-3)	115 kV	Límite 120 MVA	Z <sub>1</sub> =0,0029+j0,0140 p.u. Y <sub>1</sub> =0,0019 p.u.
Carga 1 (Barra 4)	13,8 kV	47 MW 15 MVAR	-

#### 4. PROCEDIMIENTO

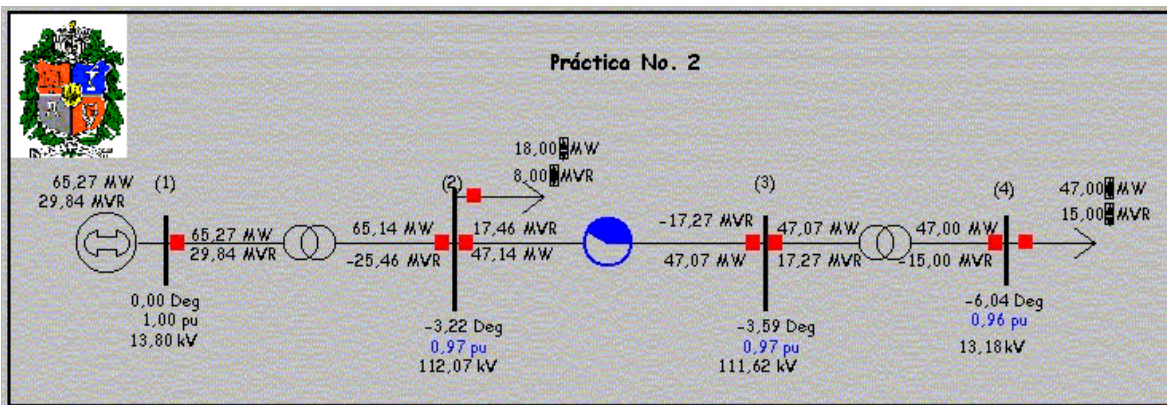
- 4.1 Inserte los elementos del sistema de potencia en el siguiente orden: Barra (1), Generador, Barra (2), Transformador T1, Barra (3), Línea, Barra (4), Transformador T2, Carga. Para las barras, asigne los siguientes nombres: (1), (2), (3) y (4). La barra de referencia es la barra (1). **Nota: Recuerde que para realizar cambios en los elementos debe seleccionar el modo edición; sólo algunos elementos se pueden modificar en el modo simulación (ej.: valores de carga).**
- 4.2 Para el generador se va a utilizar la curva de capacidad cuyos puntos se muestran en la Tabla 2. En la ventana de opciones para el generador active la opción **Use Capability Curve** y en la tabla de la parte inferior de esta ventana ingrese los datos mostrados en la Tabla 2.

**Tabla 2. Datos para definir la curva de capacidad del generador.**

MW	0	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80
Min Mvar	-19,4	-18,1	-17	-15,9	-14,2	-13,1	-11,6	-9,6	-7,5	-3,8	0
Max Mvar	13,7	13,4	13,1	12,8	12,2	11,6	10,6	9,7	8,7	7,2	0

- 4.3 Haciendo uso del comando **Add New Fields around Bus** inserte campos para visualizar el nombre de las barras, su magnitud de voltaje en p.u. y el ángulo del voltaje de barra. De igual manera inserte campos para visualizar el flujo de MW y MVAR en cada extremo de la línea y de los transformadores. Utilice la opción **Field Bus** de la barra **Insert** para insertar campos de visualización del voltaje en kV de la barra, como se muestra en la Figura 2.
- 4.4 Active las opciones de simulación **Initialize from Flat Start Values**, y **Restore Initial State On Restart**.
- 4.5 Ejecute una solución de los flujos de carga para el sistema. Vaya al menú **Options/Tools** y escoja la opción **Difference Flows**. En el cuadro de diálogo resultante ejecute el comando **Set Present as Base Case**, para que las condiciones iniciales del sistema queden guardadas como el caso base. Cuando necesite volver al caso base, escoja de nuevo la opción **Difference Flows** y active el campo **Base Case** en la opción **Case Type to Display**. Haga uso de la opción **Quick Power Flow List** del menú **Case Information** para visualizar los flujos que entran y salen de las barras (1) a (4). Haciendo uso del menú rápido (clic derecho sobre cualquier parte de la tabla) seleccione y copie toda la información al archivo del informe.
- 4.6 Cambie la carga en la barra 4 a un factor de potencia en adelanto (potencia reactiva negativa) y resuelva los flujos de carga del sistema. Copie los resultados al informe. ¿Qué pasa con los flujos cuando la carga tiene un factor de potencia en adelanto?

- 4.7 Modifique la carga de la barra 4 de tal forma que se convierta en resistiva pura. Resuelva de nuevo los flujos de carga y copie los resultados a su informe. Realice incrementos de la carga resistiva pura y diga ¿qué pasa con el voltaje de la barra 4? ¿Cuál valor es más sensible a este cambio en la carga?
- 4.8 Vuelva la carga inductiva pura y simule los flujos de carga. ¿Qué pasa con el voltaje de la barra 4 y con los flujos de carga? ¿Cómo es la regulación de voltaje en este caso? ¿Qué pasa si se aumenta la carga inductiva pura? Repita este mismo paso para una carga capacitiva pura y responda las mismas preguntas.



**Figura 2. Vista del diagrama unifilar de la práctica No. 2 en PowerWorld Simulator 7.0.**

- 4.9 Seleccione el modo edición para insertar una nueva carga en la barra (2). Los valores de esta carga son: 18 MW y 8 MVAR a 115 kV. Modifique la carga en la barra (4) a sus valores nominales. Corra de nuevo el flujo de carga y visualice en el diagrama los límites excedidos. ¿Cuáles fueron los cambios más significativos al insertar la carga en la barra 2? Haciendo uso de la ventana de opciones para el transformador T1 diga ¿cuál es su porcentaje de carga? Visualizando la información del diagrama calcule las pérdidas de potencia para este transformador.
- 4.10 En la opción **Lines and Transformers** del menú **Case Information** visualice los flujos de carga y copie la información al archivo reporte. Diferencie en este archivo los flujos resultantes al adicionar la nueva carga. Visualice también los voltajes de barra haciendo uso de la opción **Buses** del menú **Case Information** y copie la información a su archivo de informe para que compare las magnitudes y ángulos al adicionar la carga.
- 4.11 Coloque fuera de servicio la carga conectada en la barra 2. Ingrese los mismos valores de la carga en la barra 4, pero ahora en el campo **Constant Current** para modelar la carga como dependiente del voltaje de barra.

Vuelva a correr la solución sencilla de flujos de carga **Single Solution** y actualice su informe con los datos de flujos de carga para este punto.

- 4.12 Repita el paso anterior pero modelando ahora la carga como dependiente del cuadrado de la magnitud del voltaje de barra (impedancia constante).
- 4.13 Ahora modele la carga como una combinación de los tres tipos anteriores; ingrese los siguientes valores de MW y MVAR: Para el campo **Constant Power**: 20 MW, 8 MVAR; para **Constant Current**: 20 MW, 4 MVAR y para **Constant Impedance**: 7 MW, 3 MVAR. Simule el sistema y copie la información a su reporte.

## 5. INFORME

El informe para esta práctica debe contener:

- 5.1 Parte inicial: solución al prelaboratorio de la práctica No. 2.
- 5.2 Parte central:
  - Los datos obtenidos en el paso 4.5 identificados como: “Datos resultantes del flujo de carga para el sistema en condiciones iniciales”.
  - Los resultados de la simulación de los pasos 4.6, 4.7 y 4.10, identificados como: “Flujos de carga para una carga 1 capacitiva”, “Flujos de carga para una carga 1 resistiva” y “Flujos de carga resultantes al adicionar la carga 2” respectivamente.
  - Los datos de flujos de los pasos 4.11, 4.12 y 4.13, identificados como: “Flujos de carga para una carga 1 modelada a corriente constante”, “Flujos de carga para una carga 1 modelada a impedancia constante” y “Flujos de carga para una carga 1 modelada a como una combinación de los tres tipos” respectivamente.
- 5.3 Parte final:
  - Solución de las preguntas del procedimiento.
  - Responda las siguientes preguntas:
    - ¿Qué significan los caracteres “1.0000TA” y “1.0000NT” que aparecen en los datos de flujos de carga?
    - ¿Qué datos se encuentran al seleccionar las opciones **Lines and Transformers** y **Buses** del menú **Case Information**?
    - Comparando los resultados de los pasos 4.5, 4.11 y 4.12, diga ¿Qué pasa con los flujos y con el voltaje de la barra 4 al cambiar el tipo de carga?
    - ¿Cuál fue el valor de la carga total resultante en el paso 4.13? ¿Qué diferencias se encuentran con respecto a los modelos anteriores?

Debe anexar además el archivo **pwb** y **pwd** de la práctica No. 2.

## PRÁCTICA No. 3 TRANSFORMADORES DE CAMBIO DE TOMAS BAJO CARGA Y DE DEFASAMIENTO

### 1. OBJETIVOS

- Observar el efecto producido sobre los flujos de carga, al cambiar la posición de la derivación de un transformador LTC (Cambio de tomas bajo carga) así como el ángulo de fase de un transformador de desfase.
- Manejar el control de los transformadores LTC y de desfase de manera manual y automática, cambiando las opciones de control en el caso de un manejo automático.
- Conocer y manejar la opción de Simulación en el tiempo disponible en **PowerWorld Simulator 7.0**, para cambiar algunos parámetros de elementos en el transcurso de la simulación.

### 2. PRELABORATORIO

- ¿Para qué son utilizados los transformadores de cambio de tomas bajo carga (LTC) y los transformadores de desfase? ¿Que parámetros deben especificarse para realizar estudios de flujos de carga con estos transformadores?
- ¿Cómo se puede considerar la derivación de los transformadores regulantes en las ecuaciones de flujos de carga?
- ¿Típicamente en que lado de los transformadores se encuentra el cambiador de tomas?

Con relación al programa:

- ¿Cómo se configuran las opciones de control de los transformadores?; ¿De qué campos depende el control automático de los transformadores para funcionar correctamente? (Capítulo 7, sección **Transformer Properties**).
- ¿Cómo se llega a la ventana de opciones **Area Information Dialog** y en qué sección de esta ventana se encuentra el campo **Automatic Control Options**? (Capítulo 7 sección **Area Information: options**).

- ¿De qué opciones se dispone para realizar una simulación en el tiempo y cómo se ejecutan? (Capítulo 8, sección **Simulation Options**; vea también la sección **Automatic Controls**).
- ¿Qué significa la abreviatura AVR? ¿Generalmente entre qué rangos varía la relación de transformación de los transformadores LTC y el cambio de ángulo de fase de los transformadores de desfaseamiento? (Capítulo 7 sección **Transformer Modeling**).
- Explore la sección **Changing Basic Display Object Properties** del capítulo 6 de la guía de usuario del programa.

### 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema a simular consta de un generador que alimenta dos cargas por medio de tres líneas de transmisión y de un transformador LTC dispuestos como se muestra en la Figura 1.

Los datos de los elementos se muestran en la Tabla 1. La potencia base es de 100 MVA.

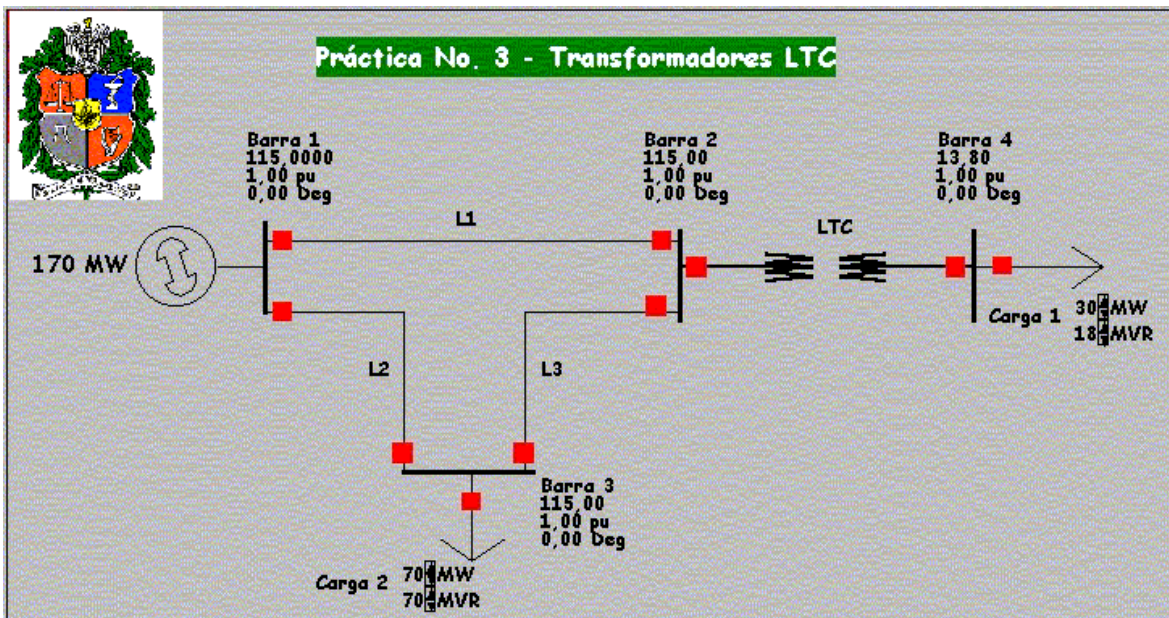


Figura 1. Diagrama unifilar del sistema para la práctica No. 3.

Tabla 1. Datos del sistema para la Práctica No. 3.

Elemento	Voltaje	Potencia	Impedancia
Generador (Referencia 1∠0°)	115 kV	Máxima 170 MW 0<Q<105 MVAR	-
Trafo LTC Barras 2-4	115/13,8 kV	43,5 MVA 0,9<tap<1,1 p.u. paso=0,00625	R <sub>1</sub> =0,0067 p.u. X <sub>1</sub> =0,1954 p.u.
Línea L1 Barras 1-2	115 kV	Límite 120MVA	Z <sub>1</sub> =0,0168+j0,0873 p.u. Y <sub>1</sub> =0,0105 p.u.
Línea L2 Barras 1-3	115 kV	Límite 120MVA	Z <sub>1</sub> =0,0341+j0,1775 p.u. Y <sub>1</sub> =0,0213 p.u.
Línea L3 Barras 2-3	115 kV	Límite 120MVA	Z <sub>1</sub> =0,0108+j0,0533 p.u. Y <sub>1</sub> =0,00706 p.u.
Carga 1 (Barra 4)	13,8 kV	30 MW 18 MVAR	-
Carga 2 (Barra 3)	115 kV	70 MW 70 MVAR	-

#### 4. PROCEDIMIENTO

- 4.1 Haciendo uso de la barra de herramientas **Insert**, ingrese todos los elementos necesitados para simular el sistema mostrado en la Figura 1. Ingrese los nombres de las barras como: Barra 1, Barra 2, Barra 3 y Barra 4.
- 4.2 En el menú **Options/Tools**, seleccione la opción **Solution/Environment** y busque la opción para mostrar los símbolos de los transformadores como bobinas.
- 4.3 Active las opciones de simulación **Initialize from Flat Start Values**, **Restore Initial State On Restart** y **Automatically Open Overheated Lines during Simulation**.
- 4.4 Inserte los siguientes campos alrededor de las barras: Nombre de la barra, voltaje en kV, voltaje en p.u. y ángulo del voltaje en grados. Alrededor de las líneas inserte campos para visualizar el flujo de potencia activa y reactiva en cada extremo de las mismas. Para el transformador inserte campos de visualización de los flujos de potencia y para visualizar la relación de transformación no nominal (**Off-nominal Tap Ratio**; use la opción **Transformer Field** de la barra **Insert** para este campo). Mostrar cuatro decimales para la relación de transformación. Haciendo uso del comando **Add New Fields Around Line/XFMR** ingrese el campo **Transformer XF Tap Pos** para indicar la posición del tap del transformador.
- 4.5 De acuerdo a lo aprendido en el prelaboratorio coloque el transformador en control manual y el tap en el valor 1 con un ángulo de 0°. Ejecute una solución de los flujos de carga. Obtenga el listado de los flujos de carga resultantes de la simulación y copie la información a un archivo de texto.

Identifique estos datos como: “Flujos de carga para la relación de transformación nominal  $a=1$ ”.

- 4.6 Varíe la relación de transformación desde el diagrama unifilar y vuelva a ejecutar una solución de los flujos de carga hasta que el voltaje de la barra 4 sea 1 p.u. Copie los resultados de los flujos para el valor final de la relación de transformación al archivo del informe e identifíquelos como: “Flujos de carga para una relación de transformación no nominal de  $a=?$ ”.
- 4.7 Vuelva a colocar la relación de transformación en 1 con un ángulo de  $0^\circ$  y ejecute la opción **Reset to Flat Start**. Configure ahora el transformador para que regule el voltaje de manera automática en la barra 4 (modo de control **AVR**), con un rango de voltaje permitido de 0,98 a 1 p.u. Vuelva a ejecutar la solución de flujos de carga. ¿Cómo es el valor final del tap del transformador comparado con el obtenido en el paso 4.6? ¿Por qué?
- 4.8 Repita el paso anterior para un rango de voltaje permitido de 0,99 a 1 p.u. ¿Difiere la relación de transformación en este paso de la obtenida en el paso 4.7?
- 4.9 Configure las opciones de simulación en el tiempo, de tal manera que se pueda simular el sistema durante 1 día; en el campo **Simulation Speedup** ingrese el valor de 3600. ¿Qué significa este valor de 3600 y en qué afecta a la simulación?
- 4.10 Vaya al menú **Options/Tools** y escoja la opción **Online Display**; en la sección **Display Options** ingrese un valor de 10 para el campo **Change in Gen Rotor Angle per Refresh** para que el objeto representativo del rotor del generador sea animado durante la simulación en el tiempo. En el menú **Options/Tools** escoja la opción **Solution/Environment** y vaya a la sección **Environment**; allí active el campo **Dialog** en la opción **Clock Style** (muestra el reloj en una ventana).
- 4.11 Con el LTC en control automático inicie una simulación en el tiempo y coloque la carga 1 fuera de servicio; tome nota de las variaciones en el voltaje de barra y en la relación de transformación del LTC. Vuelva a colocar la carga 1. Ahora incremente la carga en cantidades de 5 MW y 5 MVAR y observe los cambios en la relación del transformador. Siga incrementando la carga y observe lo sucedido. ¿El voltaje de la barra 4 es controlado efectivamente ante los cambios en la carga 1? ¿Para qué valor de la carga 1 se llega al límite de la derivación del transformador? ¿Qué elementos llegan a su límite para este valor de carga?
- 4.12 Con el transformador en control automático vuelva la carga 1 capacitiva y simule los flujos de carga; copie la información de los flujos a su informe. Coloque la carga 1 en sus condiciones normales y vuelva ahora la carga 2 capacitiva. Simule y copie la información a su informe. ¿Qué cambios en los

voltajes de barra y en la posición del tap del transformador se presentan al volver capacitiva la carga 1? Responda esta misma pregunta para una carga 2 capacitiva.

- 4.13 Suponga que se quiere controlar el flujo de potencia activa a través de la línea L3 por medio del cambio de ángulo de fase del transformador, ubicado como se muestra en la Figura 2. Grabe el caso del transformador LTC con otro nombre para que pueda modificar el diagrama e ingresar el transformador en la posición indicada (debe insertar una nueva barra). Ahora la carga 1 esta a 115 kV. Los datos de impedancia del transformador son los mismos para el caso anterior. Configure el transformador en modo de control **Phase Shift Control** con un rango del ángulo de fase entre  $-40^\circ$  y  $+40^\circ$ , variando 2 grados por cada derivación. El rango del flujo permitido está entre 14,8 MW y 15 MVAR.

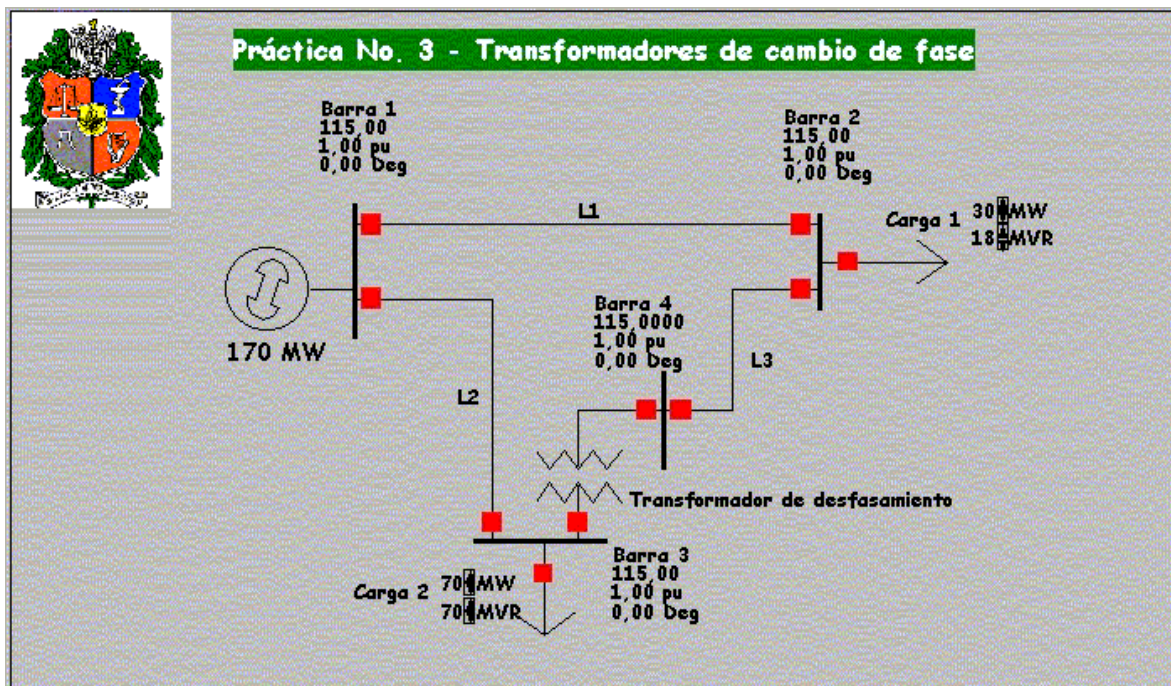


Figura 2. Sistema con transformador de desfase para la práctica No. 3.

- 4.14 Active el control automático del transformador y ejecute los flujos de carga para el sistema del paso 4.13; copie la información de los flujos de carga en el informe.
- 4.15 Inicie una simulación en el tiempo. Coloque fuera de servicio la carga 1. Observe que pasa con los flujos de carga y con el voltaje en la barra 2. Coloque en servicio la carga 1 y la carga 2 fuera de servicio. Simule de nuevo los flujos de carga. ¿El flujo por la línea L3 es controlado en las situaciones anteriores? ¿Con cuál carga fuera de servicio se presenta el caso más desfavorable para el voltaje en las barras de carga?

- 4.16 Coloque los voltajes de barra a valores planos. Vaya al menú **Options/Tools** y escoja la opción **Solution/Environment**. En la sección **Simulation** busque el campo **Case Load Multiplier** e ingrese el valor de 1,5 para colocar las cargas del sistema al 150% de su valor nominal. Coloque el campo **Simulation Speedup** en 3600. Inicie una simulación en el tiempo con el transformador de desfaseamiento en control automático y observe lo sucedido en el sistema. ¿Qué mensaje muestra el programa al simular en el tiempo? ¿Se puede continuar simulando el sistema? ¿bajo qué condiciones?

## 5. INFORME

El informe para esta práctica debe contener:

- 5.1 Parte inicial: solución al prelaboratorio de la práctica No. 3.
- 5.2 Parte central:
- Datos de flujos de carga para el paso 4.5 (relación de transformación nominal).
  - Resultados obtenidos en el paso 4.6.
  - Resultados de flujos para las cargas con factor de potencia capacitivo del paso 4.12.
  - Resultados de flujos de carga para el sistema con transformador de desfaseamiento del paso 4.14 y del paso 4.16.
- 5.3 Parte final:
- Solución de las preguntas del procedimiento.
  - Responda las siguientes preguntas:
    - Compare los resultados obtenidos en el paso 4.5 y 4.6 y responda: ¿Qué variables se modificaron al variar el tap del transformador? ¿Se logró regular el voltaje en la barra 4?
    - Con respecto al paso 4.14 para el transformador de desfaseamiento, compare los flujos obtenidos en este punto con los del caso inicial en el paso 4.5; diga ¿qué pasa con los voltajes de barra cuando se regula el flujo de potencia activa con el transformador de desfaseamiento?

Debe anexar además el archivo **pwb** y **pwd** de la práctica No. 3.

## PRÁCTICA No. 4 BARRAS DE VOLTAJE CONTROLADO Y REGULACIÓN REMOTA

### 1. OBJETIVOS

- Simular un sistema con dos generadores y observar el flujo de potencia a través de las líneas de transmisión, así como los cambios de generación producidos para mantener el voltaje en una barra de voltaje controlado, al aumentar la carga.
- Observar los efectos producidos sobre las variables del sistema al exceder los límites de potencia reactiva del generador conectado a la barra de voltaje controlado.
- Utilizar la opción de regulación remota disponible en **PowerWorld Simulator 7.0** para controlar el voltaje de una barra que no tiene un generador conectado directamente a ella.

### 2. PRELABORATORIO

- ¿Cómo se puede mantener regulada la magnitud del voltaje en una barra determinada?
- ¿Qué pasa con los voltajes de barra cuando un generador excede sus límites de reactivos?

Con relación al programa:

- ¿En qué campo se debe indicar el número de la barra remota y la magnitud de la regulación del voltaje en p.u. que va a controlar el generador? ¿Qué significa el campo **Remote Reg %** en las opciones de control del generador? (Capítulo 7 de la guía de usuario, sección **Generator Properties**).
- ¿Cómo se pueden visualizar los registros de las barras reguladas remotamente? (Capítulo 10, sección **Remotely Regulated Bus Display**).

### 3. DESCRIPCIÓN

El sistema de potencia para esta práctica es similar al descrito en la Práctica No. 3. Consta de dos generadores, dos cargas y tres líneas de transmisión dispuestos como se muestra en la Figura 1.

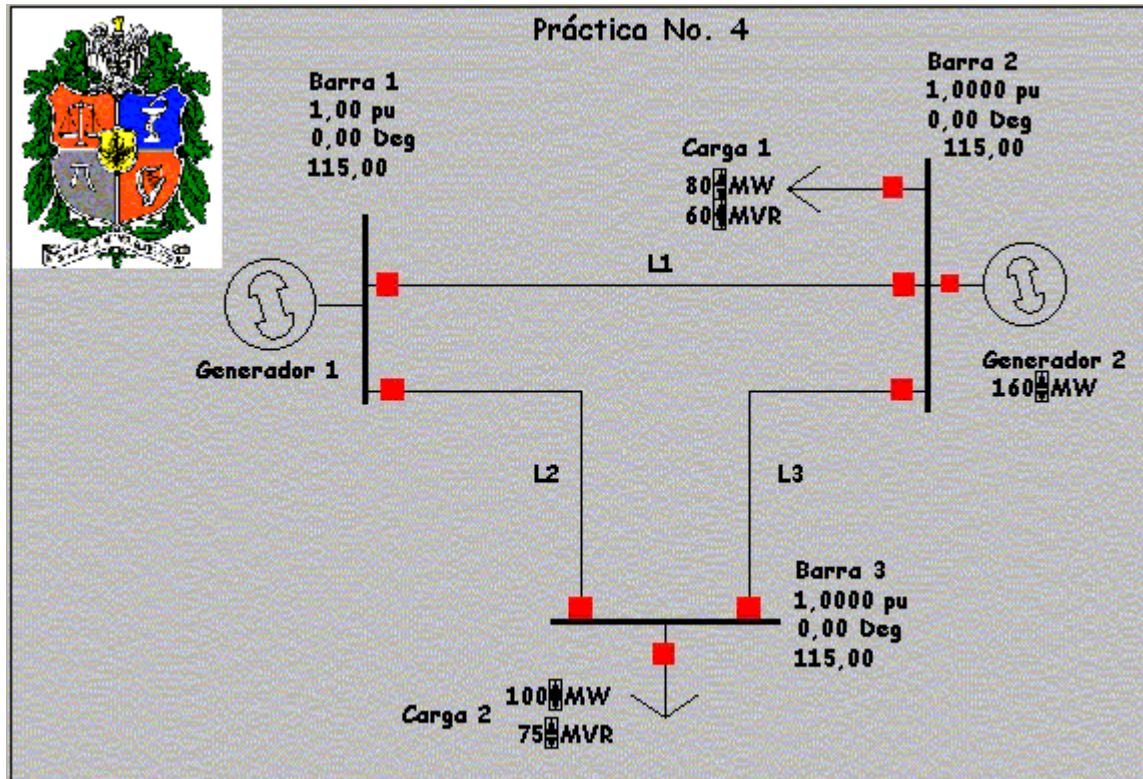


Figura 1. Diagrama unifilar para el sistema de la práctica No. 4.

En la Tabla 1 se muestran los datos para los elementos del sistema. La base para las impedancias de las líneas es de 100 MVA y 115 kV.

### 4. PROCEDIMIENTO

- 4.1 Inserte los elementos necesarios para construir el diagrama unifilar de la Figura 1. Ingrese además campos para visualizar los flujos de carga a cada extremo de las líneas.
- 4.2 Active las opciones de simulación **Initialize from Flat Start Values** y **Restore Initial State On Restart**.
- 4.3 Configure el generador 2 para que mantenga el voltaje en la barra 2 en 1 p.u. Simule el sistema bajo estas condiciones y coloque este caso como el caso base (de igual manera que en la práctica No. 2). Observe los

porcentajes de carga de las líneas y obtenga el listado de los flujos de carga para esta condición inicial; cópielos al informe.

**Tabla 1. Datos para el sistema de la práctica No. 4.**

Elemento	Voltaje	Potencia	Impedancia
Generador 1 (Referencia $1\angle 0^\circ$ )	115 kV	Máx. 170 MW $0 < Q < 105$ MVAR	-
Generador 2 (PV 1 p.u.)	115 kV	160 MW $-170 < Q < 170$ MVAR	-
Línea L1 Barras 1-2	115 kV	Límite 120 MVA	$Z_1=0,0132+j0,0657$ p.u. $Y_1=0,0085$ p.u.
Línea L2 Barras 1-3	115 kV	Límite 150 MVA	$Z_1=0,0032+j0,0162$ p.u. $Y_1=0,0021$ p.u.
Línea L3 Barras 2-3	115 kV	Límite 120 MVA	$Z_1=0,0076+j0,0379$ p.u. $Y_1=0,0049$ p.u.
Carga 1 Barra 2	115 kV	80 MW 60 MVAR	-
Carga 2 Barra 3	115 kV	100 MW 75 MVAR	-

- 4.4 Incremente la carga 1 desde el diagrama unifilar al doble de su valor nominal (160 MW, 120 MVAR). Vuelva a simular para que observe y compare estos flujos de carga con los obtenidos en el paso anterior. Actualice su informe con estos datos. ¿Cuáles flujos presentan los cambios más significativos al aumentar la carga 1 al doble de su valor inicial? ¿Se mantiene controlado el voltaje en la barra 2?
- 4.5 Incremente la carga 1 hasta el valor de 220 MW y 200 MVAR. Ejecute la solución de flujos de carga. ¿Qué elementos se salen de sus límites? ¿Cómo se clasificaría la barra 2 bajo estas condiciones y por qué?
- 4.6 Simule ahora con una carga 1 de 200 MW (0 MVAR) y obtenga los flujos de carga. Siga incrementando su valor hasta 250 MW y observe tanto los voltajes de barra como los valores de generación. Cuando la carga es puramente resistiva y de una potencia mucho mayor que la salida máxima del generador 2, ¿El generador es capaz de controlar el voltaje de la barra 2? ¿Por qué? ¿Qué limita el aumento de la carga resistiva?
- 4.7 Ahora se quiere controlar el flujo de potencia reactiva del generador 2. Para ello desactive la opción **AVR** (Automatic Voltage Regulation) en las opciones del generador e ingrese el valor de 100 MVAR para la salida de reactivos del generador. Simule inicialmente con la carga 1 en su valor normal y luego increméntela a 120 MW y 100 MVAR. Copie los datos de flujos de carga al informe. (Nota: Con este procedimiento la barra 2 se comporta como si fuera de carga). Cuando el generador 2 tiene flujo de reactivos fijo, ¿Qué variables

cambian ahora para la barra 2? ¿Esta situación es igual a la presentada cuando se exceden los límites del generador?

- 4.8 Vuelva al caso inicial, corra los flujos de carga y tome nota de la diferencia angular entre las barras 2 y 3. Incremente la potencia activa de la barra 3 a 120 MW y vuelva a simular. Observe la diferencia angular entre las barras 2 y 3 y compárela con la obtenida para el caso inicial. ¿Qué conclusión se puede obtener al realizar este paso?
- 4.9 Regrese de nuevo al caso inicial; simule y tome nota de la diferencia entre las magnitudes de voltaje entre las barras 2 y 3. Incremente la potencia reactiva de la barra 3 a 100 MVAR; simule y observe la diferencia entre las magnitudes de voltaje entre las barras 2 y 3 y compárela con la obtenida para el caso inicial. Obtenga una conclusión respecto a los resultados de este paso.
- 4.10 Se quiere regular el voltaje de la barra 3 (Regulación remota) para que la carga se mantenga a 115 kV (1 p.u.). Coloque las cargas en sus valores iniciales y configure la opción del generador 2 para que dicha barra sea mantenida en 1 p.u (Ver tercera pregunta del prelaboratorio). En el campo **Remote Reg %** ingrese el valor de 100. Simule de nuevo los flujos de carga y actualice su informe. ¿Se logra mantener el voltaje controlado en la barra 3? Compare la potencia reactiva del generador 2 en este caso con la obtenida en el caso inicial del paso 4.3.
- 4.11 Con el generador 2 configurado como en el paso anterior, simule los flujos de carga cuando la carga 1 sale de servicio. ¿Qué elementos exceden sus límites? ¿Qué pasa con la salida del generador 1?

## 5. INFORME

El informe para esta práctica debe contener:

- 5.1 Parte inicial: solución al prelaboratorio de la práctica No. 4.
- 5.2 Parte central:
- Datos de flujos de carga para las condiciones iniciales del sistema, paso 4.3 (caso base).
  - Datos de flujos de carga para el paso 4.4.
  - Datos resultantes de los pasos 4.7 y 4.10.
- 5.3 Parte final:
- Solución de las preguntas del procedimiento.
  - Responda las siguientes preguntas:
    - ¿Qué cantidad limita la capacidad de un generador para mantener un voltaje regulado?

- ¿En qué situaciones una barra de voltaje controlado se vuelve como barra de carga?
- ¿Es físicamente posible que un generador consuma potencia activa?

Debe anexar además el archivo **pwb** y **pwd** de la práctica No. 4.

## PRÁCTICA No. 5

### ELEMENTOS DE COMPENSACIÓN EN BARRAS Y LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

#### 1. OBJETIVOS

- Conocer y explorar las opciones disponibles en **PowerWorld Simulator 7.0** para modelar y controlar los elementos de compensación en barras y líneas de transmisión.
- Simular un sistema que posea elementos en paralelo con una barra (**Switched Shunt**) para compensación de reactivos y observar el efecto que éstos elementos producen sobre los flujos de carga.
- Observar el efecto producido en las variables del sistema al insertar capacitores en serie e inductores en paralelo con una línea de transmisión.

#### 2. PRELABORATORIO

- ¿Para qué se utilizan los capacitores y los reactores en paralelo con las barras?
- ¿Cuál es el objetivo de la compensación serie y de la compensación paralelo de las líneas de transmisión? ¿Qué tipo de elementos se utilizan en cada una?
- ¿Cuáles de las variables de las barras son más susceptibles de modificarse cuando se incluyen elementos de compensación en paralelo con las mismas?

Con relación al programa

- ¿Cuál es el procedimiento a seguir para insertar un elemento de compensación en paralelo con una barra? (Capítulo 4 Guía del usuario, sección **Switched Shunts**). ¿Qué significa el campo **Nominal Mvar** de las opciones de los elementos de compensación en paralelo con las barras? (Capítulo 7, sección **Switched Shunt Properties**).
- ¿Cuáles son las opciones disponibles en **PowerWorld Simulator 7.0** para efectuar el control de los elementos de compensación en paralelo? Si se quiere que el elemento en paralelo tenga bloques de capacitores y de reactores,

¿Cómo se diferencian unos de otros en los datos del programa? ¿Qué campos hay que revisar para que el control automático pueda funcionar? (Capítulo 7 guía del usuario, sección **Switched Shunt Properties**).

- ¿Cómo se define un capacitor serie y un inductor en paralelo con una línea y cuáles son las opciones disponibles para ser modelados a la hora de realizar una solución de flujos de carga? (Capítulo 7, sección **Line Properties**).

### 3. DESCRIPCIÓN

Considere el sistema de potencia que se muestra en la Figura 1. Los datos de este sistema se muestran en la Tabla 1 y en la Tabla 2. Bases: 100 MVA, 230 kV. (La disposición de este sistema así como sus datos fueron tomados de [1]).

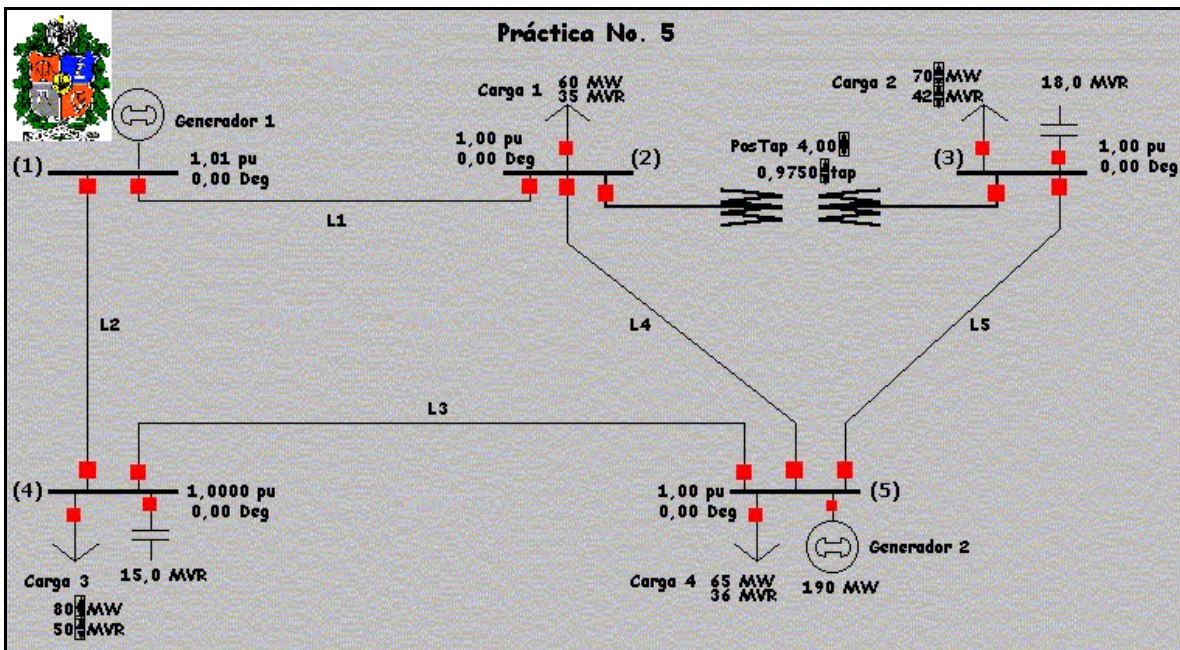


Figura 1. Diagrama unifilar del sistema de la Práctica No. 5.

Tabla 1. Datos de líneas para el sistema de la práctica No. 5.

Línea		Z serie en p.u.		Y paralelo en p.u.	Limite MVA
barra a	barra b	R	X	B	
1	2	0,0108	0,0649	0,066	360
1	4	0,0235	0,0941	0,040	200
2	5	0,0118	0,0471	0,070	400
3	5	0,0147	0,0588	0,080	360
4	5	0,0118	0,0529	0,060	380
Transformador					
2	3	0	0,04	Selección de derivación = 0,975	75

Tabla 2. Datos de barras para el sistema de la práctica No. 5.

Barra No.	Generación		Carga		V p.u.	Tipo
	P (MW)	Q (MVAR)	P (MW)	Q (MVAR)		
1	Máx 200	-120<Q<140	-	-	1,01∠0°	Slack
2	-	-	60	35	1∠0°	PQ
3	-	-	70	42	1∠0°	PQ
4	-	-	80	50	1∠0°	PQ
5	190	-110<Q<130	65	36	1∠0°	PV

Los capacitores para compensación de reactivos en las barras tienen valores de: Barra 3: 18 MVAR. Barra 4: 15 MVAR.

#### 4. PROCEDIMIENTO

- 4.1 Luego de haber insertado los elementos mostrados en la Figura 1 configure las opciones de simulación para que la solución arranque desde inicio plano y restaure a su estado inicial al reiniciar la simulación.
- 4.2 Inserte campos de visualización para los flujos de carga de las líneas, los voltajes y ángulos de barras; para la magnitud de los voltajes de barra mostrar cuatro decimales.
- 4.3 Seleccione en las opciones de los elementos de compensación (**Switched Shunts**) el campo **Fixed** de la sección **Control Mode** (en el campo **Nominal Mvar** debe haber ingresado los valores dados enseguida de la Tabla 2). Simule el sistema y obtenga los flujos de carga a través de las líneas y los valores de voltajes de barra. Copie estos datos al informe; este será el estado inicial del sistema. De acuerdo a lo aprendido en la cuarta pregunta del prelaboratorio, ¿Por qué si los elementos de compensación están en modo de control fijo, su valor final no es exactamente igual a su valor nominal? Observando la sección **Switched Shunt Information (Run Mode)** del capítulo 9 de la guía de usuario, compruebe el valor final en Mvar para cada elemento de compensación.
- 4.4 Vaya al menú **Options/Tools** y escoja la opción **Online Display**. En la ventana resultante vaya a la sección **Animated Flows**. En esta última busque la opción **Flow Visualization Type** y elija el campo **Actual MW & Mvar Power Flow** (para visualizar en el diagrama el flujo de MW y de Mvar). Verifique el balance de potencia reactiva en las barras 3 y 4.
- 4.5 Modifique los elementos de compensación en paralelo con los siguientes datos: 42 MVAR para la barra 3 y 50 MVAR para la barra 4, en modo de control continuo. Coloque una tolerancia de  $\pm 1\%$  para el valor de voltaje regulado. Vuelva a simular el sistema y copie los datos a su informe. ¿Los valores finales de MVAR de los elementos en paralelo coinciden con lo

obtenidos en el estado inicial? Compare los voltajes de barra con los obtenidos en el estado inicial.

- 4.6 Inicie una simulación en el tiempo y realice aumentos de la carga en la barra 3 y en la barra 4. Observe el cambio en los MVAR de los elementos en paralelo y en los voltajes de barra. Reinicie la simulación. Ahora disminuya las cargas durante la simulación en el tiempo. ¿Qué se puede concluir en cuanto al valor de los elementos de compensación y del voltaje de barra, al aumentar y al disminuir la carga? Coloque fuera de servicio las cargas en las barras 3 y 4. ¿Cuánto es el valor final de los elementos de compensación en ausencia de carga?; si no estuvieran en control automático, ¿Qué pasaría con el voltaje de barra cuando no hay carga?
- 4.7 Reconfigure los elementos en paralelo con las barras de tal manera que se puedan compensar cargas capacitivas; el valor del bloque de reactivos es de -42 MVAR para la barra 3 y de -50 MVAR para la barra 4. (Nota: [Aplique lo aprendido en la quinta pregunta del prelaboratorio](#)). Coloque el elemento en modo de control continuo.
- 4.8 Por medio de una simulación en el tiempo disminuya el valor reactivo de las cargas en las barras 3 y 4 hasta que se vuelva negativo; continúe incrementando este valor negativo y observe que pasa con los elementos de compensación en paralelo. ¿Para qué valores de carga los elementos de compensación cambian de tipo?
- 4.9 Para observar el efecto de la compensación serie, suponga que la línea 1-4 tiene una impedancia muy grande y modifíquela a:  $Z=0,08+j0,5$ ,  $Y=j0,4$ . Vuelva a colocar las cargas y los elementos de compensación en los valores iniciales del paso 4.3. Resuelva los flujos de carga y tome nota de sus valores para esta línea. Copie la información de flujos a su informe. Ingrese un capacitor en serie que compense el 70% de  $X_L$  de la línea. Ejecute la solución de los flujos de carga de nuevo y actualice su informe. ¿Qué variables cambian entre las barras 1 y 4? Determine el incremento (en porcentaje) de la potencia transmitida, que se logra con la compensación serie.
- 4.10 Para los mismos valores de línea del paso anterior, retire los valores del capacitor serie. Coloque fuera de servicio la carga en la barra 4 y el elemento de compensación de la barra 4. Simule los flujos de carga. ¿Qué pasa con el voltaje al extremo de la línea 1-4 cuando está sin carga? Coloque un inductor en paralelo con la línea 1-4 en cada extremo de ella para compensar un 70% de la admitancia paralelo total. Vuelva a correr los flujos de carga. ¿Se presentan cambios en el voltaje de la barra 4?

## 5. INFORME

El informe para esta práctica debe contener:

- 5.1 Parte inicial: solución al prelaboratorio de la práctica No. 5.
- 5.2 Parte central:
  - Datos de flujos de carga obtenidos en el paso 4.3.
  - Datos de flujos de carga para elementos de compensación en control automático del paso 4.5.
  - Datos de flujos de carga para el paso 4.9.
- 5.3 Parte final:
  - Solución de las preguntas del procedimiento.
  - Responda las siguientes preguntas:
    - Haciendo uso de la guía del usuario, diga ¿cómo son modelados los capacitores en serie con una línea de transmisión en **PowerWorld Simulator 7.0**?
    - ¿En qué condiciones de carga se deben colocar a funcionar los reactores en paralelo con las líneas de transmisión?

Debe anexar además el archivo **pwb** y **pwd** de la práctica No. 5.

## PRÁCTICA No. 6 SIMULACIÓN DEL CASO DE 9 BARRAS – IEEE

### 1. OBJETIVOS

- Simular los flujos de carga del caso de prueba de 9 barras del IEEE.
- Simular el caso de prueba de 9 barras a partir de su archivo de datos en formato “.cf” (formato común IEEE).
- Con base en el caso de 9 barras realizar un análisis de sensibilidad donde se aplique lo visto en las prácticas anteriores.
- Manejar la opción de variación de carga programada y utilizarla en las cargas del caso de prueba.
- Simular el comportamiento del sistema cuando es dividido en dos islas (partes de un sistema aisladas eléctricamente) a causa de la salida de operación de las líneas 7-5 y 9-6.

### 2. PRELABORATORIO

- ¿Qué expresa una curva de carga y qué datos se necesitan para construirla?
- ¿Para qué intervalos de tiempo se puede definir una curva de carga?

Con relación al programa:

- ¿Cómo se define una variación en el tiempo de la carga del sistema y cómo se configura el programa para activar dicha variación? (Capítulo 7 – Guía de usuario, secciones **Load Properties** y **Area Properties**).
- ¿Qué formatos de archivo de información de sistemas de potencia soporta **PowerWorld Simulator 7.0** y cómo se cargan dichos archivos? (Capítulo 3 – Guía de usuario, sección **Case Formats**).

### 3. DESCRIPCIÓN

El caso de prueba de 9 barras es mostrado en la Figura 1; este diagrama así como los datos del sistema fueron tomados de [2]. En la Tabla 1 y en la Tabla 2 se muestran los datos de las barras y de las líneas para el sistema sobre una base de 100 MVA.

**Tabla 1. Datos de barras para el sistema de la práctica No. 6.**

Barra	kV	Tipo	Carga		Generación		Límites MVAR		Voltaje	
			MW	MVAR	MW	MVAR	Min.	Max.	V	$\delta$
1	16,5	Slack	0	0	-	-	999900	-99990	1,040	0
2	18	PV	0	0	163	-	999900	-99990	1,025	
3	13,8	PV	0	0	85	-	999900	-99990	1,025	
4	230	PQ	0	0	0	0	-	-		
5	230	PQ	125	50	0	0	-	-		
6	230	PQ	90	30	0	0	-	-		
7	230	PQ	0	0	0	0	-	-		
8	230	PQ	100	35	0	0	-	-		
9	230	PQ	0	0	0	0	-	-		

**Tabla 2. Datos de líneas para el sistema de la práctica No. 6.**

Líneas	R p.u.	X p.u.	B (Total) p.u
7 - 8	0,0085	0,0720	0,149
9 - 8	0,0119	0,1008	0,209
7 - 5	0,0320	0,1610	0,306
9 - 6	0,0390	0,1700	0,358
5 - 4	0,0100	0,0850	0,176
6 - 4	0,0170	0,0920	0,158
Trafos	R. p.u.	X p.u.	Tap
4 - 1	0	0,0576	1 $\angle$ 0°
7 - 2	0	0,0625	1 $\angle$ 0°
9 - 3	0	0,0586	1 $\angle$ 0°

### 4. PROCEDIMIENTO

- 4.1 Construya el diagrama unifilar mostrado en la Figura 1 con todos sus elementos y con los datos mostrados en la Tabla 1 y en la Tabla 2; incluya además campos de visualización de los flujos en líneas y de voltajes en barras. Coloque los campos de visualización para voltajes de barra a 3 decimales.
- 4.2 Ejecute una solución sencilla de los flujos de carga y genere un reporte con la opción **Report Writer**; copie el listado al informe. Tome nota de las pérdidas totales del sistema. En la Figura 2 se muestra el diagrama del sistema resuelto.

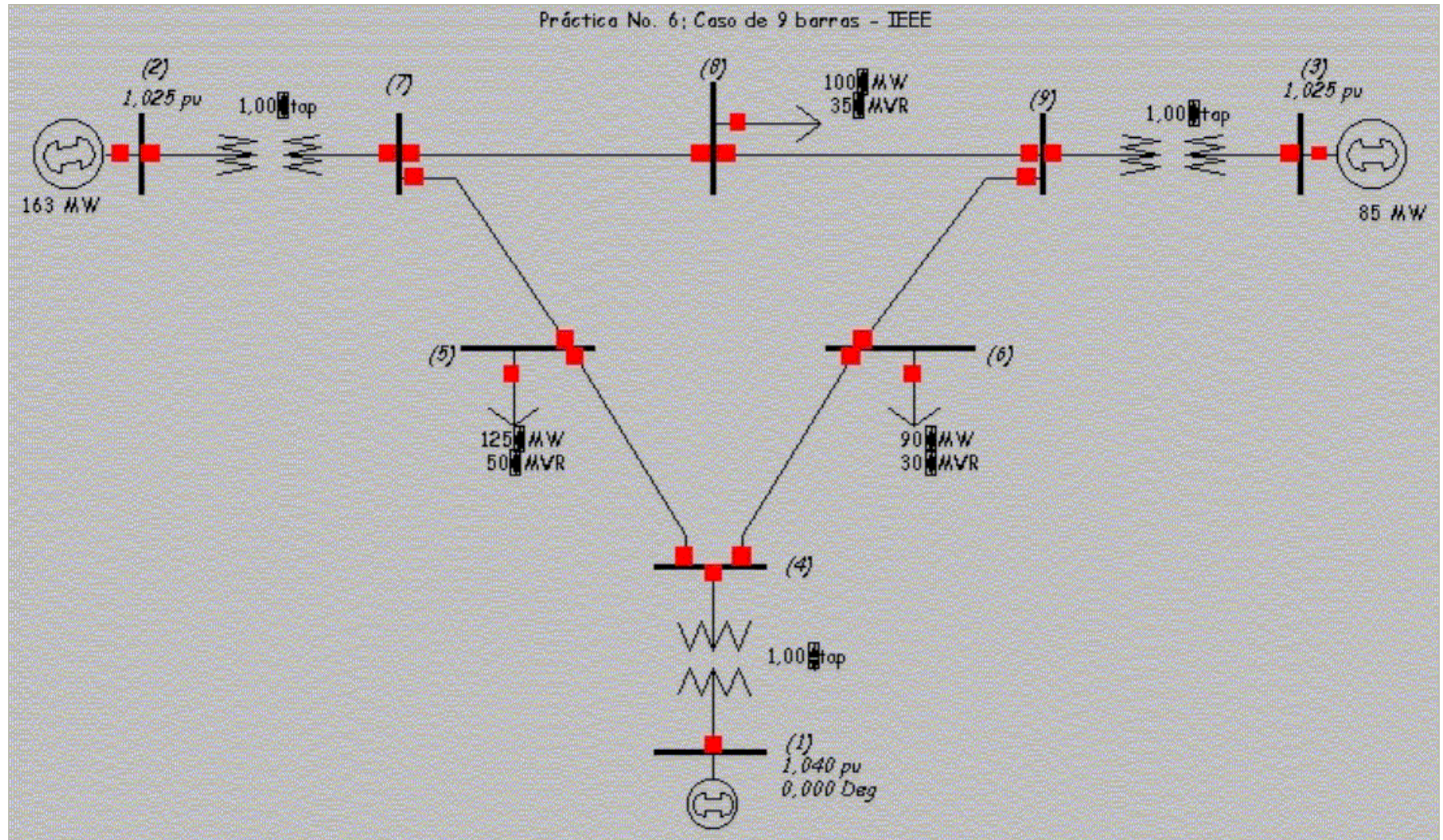


Figura 1. Diagrama unifilar del sistema de 9 barras para la práctica No. 6.

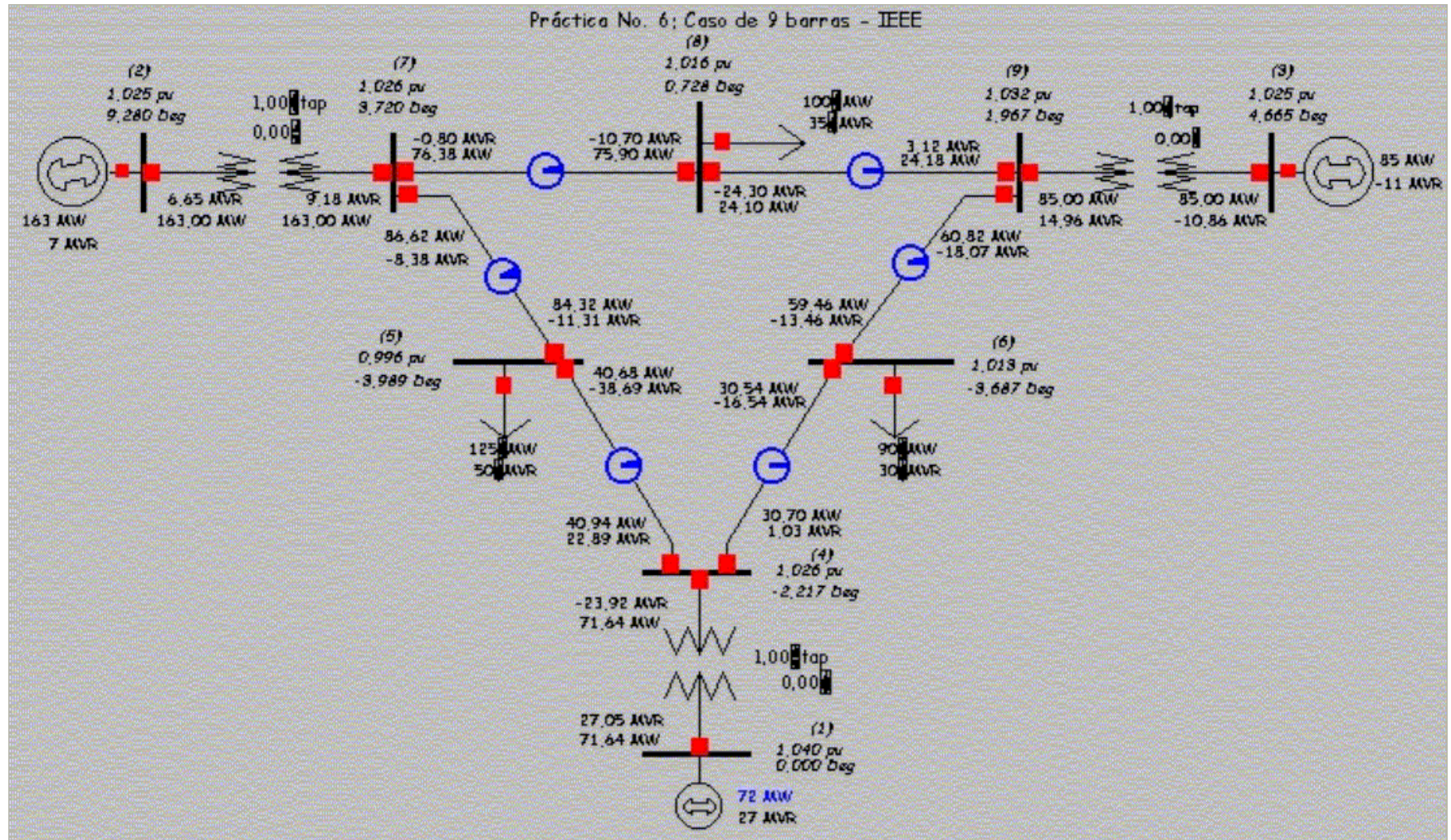


Figura 2. Resultado de los flujos de carga para el sistema de 9 barras del IEEE.

```

00/00/01                100.0  0  0  0
BUS DATA FOLLOWS      9 ITEMS
 1 BUS-1  100  1  1  3  1.04  0.  0.  0.  71.6410227.04592  100.  1.04  999900 -99990  0.  0.  0
 2 BUS-2  100  1  1  2  1.025  9.28  0.  0.  163.  6.65366  100.  1.025  999900 -99990  0.  0.  0
 3 BUS-3  100  1  1  2  1.025  4.6647  0.  0.  85.  -10.8597  100.  1.025  999900 -99990  0.  0.  0
 4 BUS-4  100  1  1  1.025 -2.216  0.  0.  0.  0.  100.  1.  0.  0.  0.  0.  0
 5 BUS-5  100  1  1  0.995 -3.988 125.  50.  0.  0.  100.  1.  0.  0.  0.  0.  0
 6 BUS-6  100  1  1  1.012 -3.687 90.  30.  0.  0.  100.  1.  0.  0.  0.  0.  0
 7 BUS-7  100  1  1  1.025  3.7197  0.  0.  0.  0.  100.  1.  0.  0.  0.  0.  0
 8 BUS-8  100  1  1  1.015  0.7275 100.  35.  0.  0.  100.  1.  0.  0.  0.  0.  0
 9 BUS-9  100  1  1  1.032  1.9667  0.  0.  0.  0.  100.  1.  0.  0.  0.  0.  0
-999
BRANCH DATA FOLLOWS  9 ITEMS
 4  1  1  1  2  0.  0.0576  0.  0  0  0  0  0  1.  0  0  0  0  0  0
 7  2  1  1  2  0.  0.0625  0.  0  0  0  0  0  1.  0  0  0  0  0  0
 9  3  1  1  2  0.  0.0586  0.  0  0  0  0  0  1.  0  0  0  0  0  0
 7  8  1  1  0.0085  0.072  0.149  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
 9  8  1  1  0.0119  0.1008  0.209  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
 7  5  1  1  0.032  0.161  0.306  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
 9  6  1  1  0.039  0.17  0.358  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
 5  4  1  1  0.01  0.085  0.176  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
 6  4  1  1  0.017  0.092  0.158  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0  0
-999
LOSS ZONES FOLLOWS  0 ITEMS
-99
INTERCHANGE DATA FOLLOWS  0 ITEMS
-9
TIE LINES FOLLOWS  0 ITEMS
-999
END OF DATA

```

Figura 3. Datos en formato “cf” del sistema de 9 barras del IEEE.

- 4.3 Los datos del archivo para este sistema de 9 barras en formato “cf” son mostrados en la Figura 3. El archivo de este sistema en formato “cf” puede encontrarse en la dirección <ftp://166.111.60.30/ywzhang/>. La descripción parcial del formato “cf” se encuentra en las hojas anexas a esta práctica. Vuelva a iniciar el programa **PowerWorld Simulator 7.0** y en el menú **File** escoja la opción **Open Case**. En el campo **Archivos de tipo** seleccione la opción **IEEE Common Format** y seleccione el archivo “práctica6.cf” (este archivo se encuentra en el disco anexo al trabajo). Haga clic en el botón **Abrir**.
- 4.4 Luego de realizar el paso anterior aparece el siguiente mensaje: **No default oneline display file exists. Would you like to create one?** Haga clic en el botón **No**. Ejecute una solución sencilla y genere un reporte de los flujos de carga; cópielos a su informe. Compare los resultados obtenidos al cargar el archivo “cf” con los obtenidos al realizar el diagrama unifilar en el paso 4.2.
- 4.5 Vuelva al archivo que contiene el diagrama unifilar. Configure los campos de visualización de potencia activa y reactiva de las cargas para que puedan ser cambiados manualmente en cantidades de 10 MW y 10 MVAR. Incremente las cargas del sistema en 20 MW y 20 MVAR respectivamente. Vuelva a simular y compare el resumen del caso (**Case Summary**) en estas condiciones con el del paso 4.2.
- 4.6 Vuelva a colocar las cargas en sus valores normales. En las opciones de simulación active la opción **Allow Multiples Islands**. Coloque fuera de servicio las líneas 7-5 y 9-6. Vuelva a simular y actualice su informe con el listado de flujos de carga del reporte generado. ¿Cuál es el estado de los generadores del sistema al realizar este paso? ¿En el listado de flujos de carga se da información de las líneas abiertas?
- 4.7 Vaya a la opción **Islands** del menú **Case Information** y observe los datos presentados allí. ¿Cuántas islas quedaron definidas en este caso? ¿Cuál generador se toma como referencia para la nueva isla y por qué?
- 4.8 Vuelva a conectar las líneas e ingrese de nuevo el valor de 163 MW en la salida del generador de la barra 2. Simule de nuevo para condiciones normales. Desactive la opción **Allow Multiples Islands** y simule de nuevo el caso en el que las líneas 7-5 y 9-6 salen de servicio. ¿Qué pasa con las islas en este caso? ¿Por qué la isla que se mantiene funcionando es la que contiene al generador de la barra 1?
- 4.9 Se quiere mantener el voltaje en las barras de carga en 1 p.u. Para ello se desea conocer cuál debe ser la posición del tap de los transformadores. En las opciones de estos últimos active la opción de regulación automática de voltaje **AVR**. Las barras que se quieren regular son: la 5 con el transformador 1-4, la 6 con el transformador 3-9 y la 8 con el transformador 2-7. Se admite un rango de regulación de  $\pm 1\%$ , es decir,  $V_{min} = 0,99$  p.u.y

$V_{m\acute{a}x} = 1,01$ . Ejecute una solución de los flujos de carga; genere un reporte y copie los resultados al informe. ¿Cuál es el valor final de la relación de transformación de cada uno de los transformadores? Compare estos resultados con los obtenidos en el paso 4.2 y diga ¿cuál presenta mayor porcentaje de pérdidas?

- 4.10 Vaya a la ventana de opciones de las barras 2, 3, 7, 8 y 9 y modifique los campos **Zone Number** y **Zone Name** al valor de 2.
- 4.11 Defina dos variaciones programadas de carga diaria aplicando lo leído en la tercera pregunta del prelaboratorio. Los puntos para la variación de la carga en la zona 1 y en la zona 2 se muestran en la Tabla 3 y en la Tabla 4 respectivamente. Para la variación programada de la Tabla 3 asigne el nombre de **zona1** y para la de la Tabla 4 el nombre de **zona2**. Copie las gráficas de las curvas de carga resultantes a su informe.

**Tabla 3. Puntos para la variación de carga de la zona 1 de la práctica No. 6.**

Hora	Multiplicador de la carga	Hora	Multiplicador de la carga
0	0,333	12	0,433
1	0,267	13	0,500
2	0,200	14	0,533
3	0,233	15	0,633
4	0,267	16	0,700
5	0,300	17	0,800
6	0,333	18	0,900
7	0,400	19	1,000
8	0,500	20	0,933
9	0,467	21	0,767
10	0,433	22	0,633
11	0,367	23	0,433

**Tabla 4. Puntos para la variación de carga de la zona 2 de la práctica No. 6.**

Hora	Multiplicador de la carga	Hora	Multiplicador de la carga
0	0,50	12	0,70
1	0,60	13	0,68
2	0,65	14	0,68
3	0,70	15	0,70
4	0,72	16	0,75
5	0,75	17	0,80
6	0,80	18	1,00
7	0,90	19	1,08
8	0,92	20	1,10
9	0,90	21	1,00
10	0,85	22	0,70
11	0,80	23	0,60

- 4.12 Vaya al menú **Case Information** y escoja la opción **Zones**. En la ventana resultante (**Zone Records**) busque la columna **Load Schedule**; en la celda de esta columna correspondiente a la primera fila (zona 1) ingrese el nombre del archivo de variación de carga para la zona 1, es decir, ingrese el texto “zona1”. Para la fila 2 (zona 2) ingrese el texto “zona2” en la misma columna. Cierre la ventana de opciones de zonas. Ahora configure las opciones de simulación de tal manera que se simule 1 día; en el campo **Simulation Speedup** ingrese 1800. Inicie una simulación en el tiempo. Mientras simula vaya a la opción **Charts** del menú **Options/Tools** y elija el comando **Area Load and Generation Chart** para que observe la variación de la carga durante el tiempo (puede hacer clic derecho sobre los ejes del gráfico para cambiar su escala).
- 4.13 Reinicie la simulación en el tiempo y haciendo uso del botón **Pause** deténgala aproximadamente a las 8 y a las 12 horas; tome nota de los valores de carga del sistema en esos instantes y compruebe que coinciden con lo especificado en las curvas de carga para cada zona; escriba la hora y el valor de las tres cargas para ese momento, así como los valores del tap del transformador.

## 5. INFORME

El informe para esta práctica debe contener:

- 5.1 Parte inicial: solución al prelaboratorio de la práctica No. 6.
- 5.2 Parte central:
- Datos de flujos de carga para las condiciones iniciales del paso 4.2.
  - Datos de flujos de carga para el paso 4.4.
  - Datos de flujos de carga para el paso 4.6.
  - Datos de flujos de carga para el caso 4.9.
- 5.3 Parte final:
- Solución de las preguntas del procedimiento.

Debe anexar además el archivo **pwb** y **pwd** de la práctica No. 6.

## Descripción del formato “.cf” del IEEE

Partial Description of the IEEE Common Data Format for the Exchange of Solved Load Flow Data

The complete description can be found in the paper "Common Data Format for the Exchange of Solved Load Flow Data", Working Group on a Common Format for the Exchange of Solved Load Flow Data, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-92, No. 6, November/December 1973, pp. 1916-1925.

The data file has lines of up to 128 characters. The lines are grouped into sections with section headers. Data items are entered in specific columns. No blank items are allowed, enter zeros instead. Floating point items should have explicit decimal point. No implicit decimal points are used.

Data type codes: A - Alphanumeric (no special characters)  
I - Integer  
F - Floating point  
\* - Mandatory item

Title Data  
=====

First card in file.

Columns 2- 9 Date, in format DD/MM/YY with leading zeros. If no date provided, use 0b/0b/0b where b is blank.

Columns 11-30 Originator's name (A)

Columns 32-37 MVA Base (F\*)

Columns 39-42 Year (I)

Column 44 Season (S - Summer, W - Winter)

Column 46-73 Case identification (A)

Bus Data \*  
=====

Section start card \*:  
-----

Columns 1-16 BUS DATA FOLLOWS (not clear that any more than BUS in 1-3 is significant) \*

Columns ?- ? NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

Bus data cards \*:  
-----

Columns 1- 4 Bus number (I) \*

Columns 7-17 Name (A) (left justify) \*

Columns 19-20 Load flow area number (I) Don't use zero! \*

Columns 21-23 Loss zone number (I)  
 Columns 25-26 Type (I) \*  
     0 - Unregulated (load, PQ)  
     1 - Hold MVAR generation within voltage limits, (PQ)  
     2 - Hold voltage within VAR limits (gen, PV)  
     3 - Hold voltage and angle (swing, V-Theta) (must always  
         have one)  
 Columns 28-33 Final voltage, p.u. (F) \*  
 Columns 34-40 Final angle, degrees (F) \*  
 Columns 41-49 Load MW (F) \*  
 Columns 50-59 Load MVAR (F) \*  
 Columns 60-67 Generation MW (F) \*  
 Columns 68-75 Generation MVAR (F) \*  
 Columns 77-83 Base KV (F)  
 Columns 85-90 Desired volts (pu) (F) (This is desired remote voltage if  
     this bus is controlling another bus.  
 Columns 91-98 Maximum MVAR or voltage limit (F)  
 Columns 99-106 Minimum MVAR or voltage limit (F)  
 Columns 107-114 Shunt conductance G (per unit) (F) \*  
 Columns 115-122 Shunt susceptance B (per unit) (F) \*  
 Columns 124-127 Remote controlled bus number

Section end card:

-----

Columns 1- 4 -999

Branch Data \*

=====

Section start card \*:

-----

Columns 1-16 BRANCH DATA FOLLOWS (not clear that any more than BRANCH  
 is significant) \*

Columns 40?- ? NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

Branch data cards \*:

-----

Columns 1- 4 Tap bus number (I) \*  
     For transformers or phase shifters, the side of the  
 model

the non-unity tap is on

Columns 6- 9 Z bus number (I) \*  
     For transformers and phase shifters, the side of the  
 model

the device impedance is on.

Columns 11-12 Load flow area (I)

Columns 13-14 Loss zone (I)

Column 17 Circuit (I) \* (Use 1 for single lines)

Column 19 Type (I) \*

    0 - Transmission line

    1 - Fixed tap

    2 - Variable tap for voltage control (TCUL, LTC)

    3 - Variable tap (turns ratio) for MVAR control

4 - Variable phase angle for MW control (phase shifter)  
Columns 20-29 Branch resistance R, per unit (F) \*  
Columns 30-40 Branch reactance X, per unit (F) \* No zero impedance  
lines  
Columns 41-50 Line charging B, per unit (F) \* (total line charging, +B)  
Columns 51-55 Line MVA rating No 1 (I) Left justify!  
Columns 57-61 Line MVA rating No 2 (I) Left justify!  
Columns 63-67 Line MVA rating No 3 (I) Left justify!  
Columns 69-72 Control bus number  
Column 74 Side (I)  
0 - Controlled bus is one of the terminals  
1 - Controlled bus is near the tap side  
2 - Controlled bus is near the impedance side (Z bus)  
Columns 77-82 Transformer final turns ratio (F)  
Columns 84-90 Transformer (phase shifter) final angle (F)  
Columns 91-97 Minimum tap or phase shift (F)  
Columns 98-104 Maximum tap or phase shift (F)  
Columns 106-111 Step size (F)  
Columns 113-119 Minimum voltage, MVAR or MW limit (F)  
Columns 120-126 Maximum voltage, MVAR or MW limit (F)

Section end card:  
-----

Columns 1- 4 -999

Loss Zone Data  
=====

Section start card  
-----

Columns 1-16 LOSS ZONES FOLLOWS (not clear that any more than LOSS  
is significant)

Columns 40?- ? NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

Loss Zone Cards:  
-----

Columns 1- 3 Loss zone number (I)  
Columns 5-16 Loss zone name (A)

Section end card:  
-----

Columns 1- 3 -99

Interchange Data \*  
=====

Section start card  
-----

Columns 1-16 INTERCHANGE DATA FOLLOWS (not clear that any more than  
first word is significant).

Columns 40?- ? NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

Interchange Data Cards \*:  
-----

Columns 1- 2 Area number (I) no zeros! \*  
Columns 4- 7 Interchange slack bus number (I) \*  
Columns 9-20 Alternate swing bus name (A)  
Columns 21-28 Area interchange export, MW (F) (+ = out) \*  
Columns 30-35 Area interchange tolerance, MW (F) \*  
Columns 38-43 Area code (abbreviated name) (A) \*  
Columns 46-75 Area name (A)

Section end card:  
-----

Columns 1- 2 -9

Tie Line Data  
=====

Section start card  
-----

Columns 1-16 TIE LINES FOLLOW (not clear that any more than TIE  
is significant)

Columns 40?- ? NNNNN ITEMS (column not clear, I would not count on this)

Tie Line Cards:  
-----

Columns 1- 4 Metered bus number (I)  
Columns 7-8 Metered area number (I)  
Columns 11-14 Non-metered bus number (I)  
Columns 17-18 Non-metered area number (I)  
Column 21 Circuit number

Section end card:  
-----

Columns 1- 3 -999

## PRÁCTICA No. 7 INTERCAMBIO DE POTENCIA ENTRE ÁREAS

### 1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de potencia reales operan de manera interconectada para mejorar la calidad del servicio prestado a los usuarios de la energía eléctrica. La interconexión de un sistema de potencia implica tener una conexión eléctrica sobre la cual se puede transportar la potencia de un área a otra. Un área de un sistema de potencia es una parte del sistema que absorbe los cambios en la carga conectada en dicha área [7]. Uno de los principales beneficios de los sistemas interconectados es que se pueden hacer operaciones de potencia entre áreas; estas operaciones consisten en la transferencia de una cantidad específica de energía en MW de un área a otra por un período y un precio específicos. Los cambios en la carga, las pérdidas y las operaciones de energía con otras áreas deben ser igualados por un cambio en la generación de cada área.

En el programa **PowerWorld Simulator 7.0** se pueden simular operaciones de potencia entre áreas de dos maneras: - La primera, denominada **Base Area Interchange** permite especificar la cantidad de potencia en MW que será exportada y/o importada de otras áreas sin tener en cuenta factores de costo ni de tiempo de la operación. – La segunda, denominada **Scheduled Area Interchange** permite especificar una cantidad de potencia específica que va a ser vendida desde un área a otras por un precio y una duración específica. Para propósitos de visualización y comprensión de las operaciones de intercambio de potencia la primera opción es la más adecuada.

### 2. OBJETIVOS

- Simular un caso de intercambio de potencia entre áreas utilizando el programa **PowerWorld Simulator 7.0** para visualizar los flujos de carga en las líneas de interconexión de las mismas.
- Manejar la opción de intercambio base (**Base Area Interchange**) disponible en **PowerWorld Simulator 7.0** y programar una operación de intercambio de potencia para un sistema de 3 áreas.
- Manejar la opción de **AGC** para cada área del sistema y observar su efecto cuando se simulan cambios en la carga.

### 3. PRELABORATORIO

- Mencione algunas ventajas de la interconexión de sistemas de potencia.
- ¿Por qué se producen cambios en la frecuencia del sistema cuando hay interconexión entre áreas dentro un sistema de potencia? [1].

Con respecto al programa:

- ¿Qué significa **AGC** y cuáles opciones dispone el **PowerWorld Simulator 7.0** para implementarla? ¿Qué es el **ACE**? (Ver Capítulo 8 – sección **Area Control** de la guía de usuario).
- ¿Cómo se pueden colocar los factores de participación de los generadores para llevar a cabo el control de un área por el método de los factores de participación? (Capítulo 8 – sección **Set Generator Participation Factors**).

### 4. DESCRIPCIÓN

Considere las tres áreas mostradas en la Figura 1 que constituyen un sistema interconectado a una frecuencia de 60 Hz.

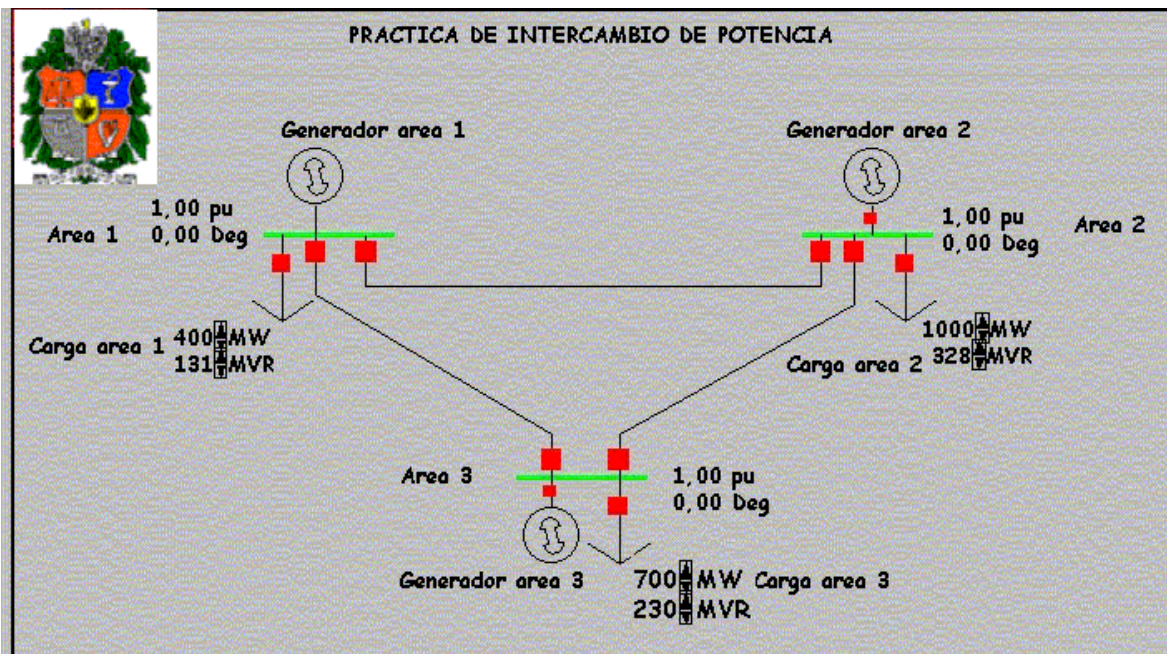


Figura 1. Diagrama unifilar del sistema para la práctica No. 7 de Intercambio.

Los límites de generación para cada área, la carga y los datos de las líneas de interconexión se muestran en la Tabla 1. Las bases para la línea son 115 kV y 100 MVA. El área 1 tiene un intercambio programado con el área 2 de 200 MW, es

decir, está transmitiendo 200 MW para que el área 2 pueda suplir la carga de 1000 MW. El área 3 no tiene intercambio programado con las otras áreas.

**Tabla 1. Datos del sistema para la práctica No. 7 de intercambio**

Elemento	Voltaje	Potencia	Impedancia
Generador Area 1	115 kV	150 MW < P < 800 MW	-
Generador Area 2	115 kV	0 MW < P < 800 MW	-
Generador Area 3	115 kV	100 MW < P < 700 MW	-
Carga Area 1	115 kV	400 MW 131 MVAR	-
Carga Area 2	115 kV	1000 MW 328 MVAR	-
Carga Area 3	115 kV	700 MW 230 MVAR	-
Líneas de interconexión	115 kV	350 MVA	$Z_1 = 0,0125 + j 0,1$ p.u. $Y_1 = 0,0083$ p.u.

## 5. PROCEDIMIENTO

- 5.1 Construya el diagrama unifilar mostrado en la Figura 1 con los datos de la Tabla 1 teniendo en cuenta que al ingresar cada barra debe ingresar también en el campo **Area Number** en la ventana de opciones de barra, el número de área correspondiente a esa barra para que se puedan crear los registros de dichas áreas. Coloque la barra del área 1 como barra de referencia y asigne los nombres para las áreas como: Area 1, Area 2 y Area 3.
- 5.2 Los campos de visualización para los elementos de esta práctica son: Para las barras: voltaje en p.u. y ángulo. Para las líneas: flujo en MW a cada extremo.
- 5.3 Haga clic en el botón **Area Field** de la barra **Insert**; sitúe el puntero del mouse sobre cualquier parte vacía del diagrama y haga clic. En la ventana **Area Field Options** resultante de la acción anterior seleccione el área número 1 en el campo **Area Number**; en la sección **Type of field** seleccione el campo **Area Name**. Vuelva a realizar este mismo paso para insertar el campo **ACE (MW)**. Ingrese de esta misma manera los mismos campos para las áreas 2 y 3.
- 5.4 Haga clic derecho sobre cualquier parte vacía del diagrama y escoja la opción **Area Information Dialog**. En la barra de título de la ventana de opciones resultante aparece el número de área en la que se encuentra; puede seleccionar otra área haciendo clic sobre las flechas del campo **Area Number**. Modifique el campo **Area Number** para seleccionar el área 1, vaya a la sección **Area Control Options** y escoja la opción **No Area Control**. Guarde el cambio efectuado empleando el botón **Save** y repita esta

selección para las áreas 2 y 3. Hecho lo anterior seleccione nuevamente el área 1 en la misma ventana. En la sección **Base Interchange by Area** se definen las cantidades de MW para exportar a otras áreas; ingrese el valor de 200 en el campo **MW Export** correspondiente al área 2 (esto significa que el área 1 va a exportar 200 MW al área 2). Haga clic en el botón **Save Changes** y luego en el botón **OK**.

- 5.5 En la ventana de opciones de los generadores coloque la salida del generador del área 2 en 800 MW y la salida del generador del área 3 en 700 MW. Ejecute una solución de los flujos de carga. Genere un reporte con la opción **Report Writer** y copie la información de este a su archivo de informe.
- 5.6 Observando el diagrama unifilar, diga ¿Cuáles son los errores de control para cada área? ¿Qué significa que el ACE sea positivo o negativo para un área determinada? El flujo programado de 200 MW desde el área 1 hasta el área 2, ¿fluye en su totalidad por la línea 1-2? ¿En este caso, en cuál área la generación no abastece las pérdidas y la carga de la misma?
- 5.7 Vuelva a colocar las cargas del sistema en su valor normal. Invoque la ventana de opciones de área. Para cada área escoja en la sección **Area Control Options** el campo **Participation Factor Control**; haga clic en el botón **Set Factors** de esta misma sección. En la ventana resultante escoja la opción **Max MW Rating of Generator** (con esta opción el programa asigna factores de participación para cada generador de acuerdo a su salida máxima en MW). En la sección **Set Participation Factors for** de esta última ventana escoja la opción **All generators in system**; por último haga clic en el botón **Set Factors** y luego en el botón **Close**.
- 5.8 Verifique en la ventana de opciones para cada generador, que las opciones **Available for AGC** y **Available for AVR** estén activadas. Resuelva los flujos de carga. ¿Coinciden los valores para el ACE con los obtenidos en el paso 5.5 cuando las áreas no tenían control?
- 5.9 Con el control de factores de participación activado coloque la carga del área 1 a 120% de su valor nominal. Ejecute una solución de los flujos de carga. Tome nota de los valores de ACE para cada área. Vuelva a colocar la carga del área 1 en su valor normal. Ahora incremente la carga del área 2 a 120% de su valor nominal. Simule los flujos de carga y tome nota de los valores para el ACE en cada área. Cuando se incrementó la carga del área 1, ¿los valores del ACE aumentaron a disminuyeron con respecto al paso anterior? ¿Qué pasó con el ACE cuando se incrementó la carga del área 2? ¿Por qué no hubo cambio en la generación del área 2 cuando se incrementó su carga?
- 5.10 Vuelva las cargas a sus valores iniciales. Invoque la ventana de opciones de área como en el paso 5.4 y en la sección **Options** busque el campo **Load Multiplier Value**; ingrese allí un valor de 0,8 para colocar la carga al 80% de

su valor nominal; haga esto para las tres áreas. Vuelva a simular los flujos de carga, genere un reporte y cópielo a su informe. ¿Hubo cambio en los valores de generación para cada área? ¿Se mantuvo controlado el voltaje en las barras 2 y 3? ¿Cuál es el cambio en la generación de cada área para una reducción de la carga al 80% de su valor nominal? Compare el ACE de este paso con el obtenido cuando la carga tiene sus valores nominales.

- 5.11 Realice un aumento en la carga para el área 3 a 800 MW. Programe una operación de intercambio entre el área 1 y el área 3 para que esta última pueda suplir su demanda. Con el control de los factores de participación para los generadores activado, simule los flujos de carga. Genere un reporte y copie sus datos al informe. ¿Se cumple con el intercambio programado entre las áreas?
- 5.12 Coloque la carga para el área 3 fuera de servicio y simule los flujos de carga. ¿Qué pasa con los valores para el ACE de cada área? ¿Cuánto es el error de intercambio de potencia entre el área 1 y el área 3? ¿Por qué?
- 5.13 Cambie el límite mínimo de salida en MW para el generador del área 3 a un valor de  $-100$  MW. Con la carga del área 3 fuera de servicio, vuelva a simular los flujos de carga. ¿Cómo es el valor de ACE para las áreas 1 y 3 en este caso? Compare estos valores con los obtenidos en el paso anterior y explique el por qué de estos resultados.

## 6. INFORME

El informe para esta práctica debe contener:

- 6.1 Parte inicial: solución al prelaboratorio de la práctica No. 7 de Intercambio entre áreas.
- 6.2 Parte central:
  - Datos obtenidos en los pasos 5.5 y 5.10.
  - Datos obtenidos en el paso 5.11.
- 6.3 Parte final:
  - Solución de las preguntas del procedimiento.
  - Responda las siguientes preguntas:
    - ¿Qué tipo de información encontró en el reporte generado en el paso 5.5?
    - Por medio de la guía de usuario, diga que datos se necesitan para realizar un intercambio programado entre áreas incluyendo costos. (Capítulo 10, sección **Transactions Displays**).

Debe anexar además los archivos **pwb** y **pwd** para esta práctica.

**PRÁCTICAS DE SIMULACIÓN DE  
CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO CON  
POWERWORLD SIMULATOR 7.0**

## PRÁCTICA No. 1 ANÁLISIS DE FALLOS CON POWERWORLD SIMULATOR SOBRE UNA BARRA DE CARGA

### 1. OBJETIVOS

- Conocer y manejar las opciones disponibles en **PowerWorld Simulator 7.0** para efectuar un análisis de fallos así como los tipos de corto circuito que este realiza.
- Simular los tipos básicos de corto circuito (Línea-tierra, Línea-Línea, Doble Línea-Tierra y Trifásico) disponibles en **PowerWorld Simulator 7.0**, sobre la barra de carga de un sistema Generador – Línea – Carga.

### 2. PREGUNTAS PRELABORATORIO

- ¿Para qué tipo de relés (de acuerdo al tiempo de reacción) se utiliza la reactancia subtransitoria del eje directo como reactancia de secuencia positiva en un estudio de corto circuito?
- ¿Cómo se hallan los valores de admitancia de secuencia para una carga, con y sin conexión a tierra, teniendo sus valores nominales de operación? (tenga en cuenta las dos formas de representar la carga, como impedancia serie y como impedancia paralelo) **[3]**.
- ¿En qué tipo de fallos no existen corrientes de secuencia cero? ¿Para qué tipo de conexiones de generadores, transformadores y cargas pueden circular las corrientes de secuencia cero?

### 3. DESCRIPCIÓN

El sistema para analizar es el mismo de la práctica No. 1 de flujos de carga. Se quiere encontrar los valores de las corrientes de corto circuito para fallos Línea-Tierra, Línea-Línea, Línea-Línea-Tierra y Trifásicos ocurridos en la barra de carga (barra 2). Los datos adicionales para el análisis de corto circuito se muestran en la Tabla 1. La base para los datos en p.u. es de 100 MVA a 115 kV.

Tabla 1. Datos de impedancias de secuencia para el sistema de la práctica No.1.

Elemento	Impedancia
Generador (sólidamente aterrizado)	$R_1=R_2=0,0011$ p.u. $R_0=0,0010$ p.u. $X_d'=0,0849$ ; $X_d''=0,0528$ $X_2=0,0528$ ; $X_0=0,0462$
Línea (4,5 km)	$Z_0=0,414+j1,484$ $\Omega$ /km $Y_0=2,016$ $\mu$ S/km
Carga (sólidamente aterrizada)	$G_2=G_0=0,6$ p.u. $B_2=B_0=-0,45$ p.u.

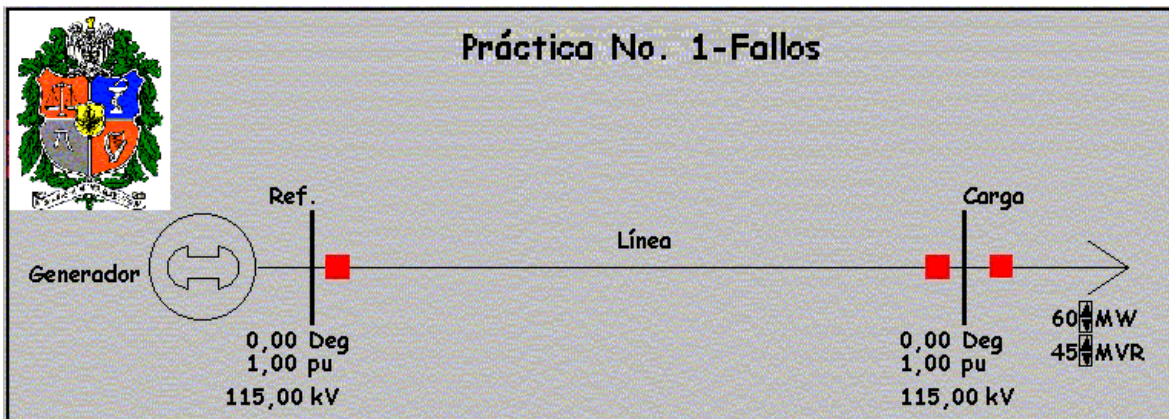


Figura 1. Diagrama unifilar del sistema para la práctica No. 1 de fallos.

#### 4. PROCEDIMIENTO

- 4.1 Recupere los archivos **pwd** y **pwb** de la práctica No. 1 de flujos de carga, con los datos generados al inicio de dicha práctica.
- 4.2 En modo edición, abra la ventana de opciones del generador, vaya a la sección **Fault Parameters** e ingrese los datos mostrados en la Tabla 1 para las impedancias de secuencia del mismo. Suponga que el estudio de corto circuito se realiza para dimensionar relés rápidos; de acuerdo a lo consultado en las preguntas prelaboratorio ingrese el valor adecuado para la reactancia de secuencia positiva del generador. Note además que el generador está sólidamente aterrizado, es decir, la impedancia neutro a tierra vale cero.
- 4.3 Abra la ventana de opciones de la línea de transmisión, vaya a la sección **Fault Parameters** e ingrese los parámetros de fallo de la línea (debe calcular los datos de secuencia cero en p.u. para la línea). Los parámetros de secuencia positiva y negativa son tomados por el programa como los parámetros ingresados en la práctica No. 1 de flujos de carga. (Nota: La sección **Zero Sequence Line Shunt Admittance** es solamente para los

datos de secuencia cero de los elementos de compensación en paralelo con la línea). ¿Cuáles son los valores de impedancia y admitancia de secuencia cero para la línea en p.u.?

- 4.4 En la ventana de opciones de la carga, cambie el tipo de carga a impedancia constante; es decir, ingrese los valores de 47 MW y 15 MVAR en los campos correspondientes a **Constant Impedance**.
- 4.5 Para ingresar las impedancias de secuencia de la carga, abra la ventana de opciones de la barra 2 y vaya a la sección **Fault Parameters**. Ingrese los valores de admitancia de secuencia negativa y cero mostrados en la Tabla 1. (Nota: Se debe tener en cuenta que **Power World Simulator 7.0** no permite definir la conexión de la carga en un campo específico; se deben calcular las admitancias de secuencia teniendo en cuenta la conexión de la carga).
- 4.6 Después de haber ingresado los parámetros de fallos de todos los elementos, seleccione el modo simulación. Vaya a la opción **Fault Analysis** del menú **Options/Tools**. Haciendo uso de la guía del usuario, diga ¿En qué otras formas se puede invocar la ventana de opciones para el análisis de fallos? (Capítulo 13, sección **Fault Analysis**).
- 4.7 En la ventana de opciones resultante para el análisis de fallos ingrese en el campo **Fault Bus** el número 2 para simular una falla en la barra de carga. En la sección **Fault Type** seleccione **Single Line To Ground** para simular un fallo línea - tierra.
- 4.8 Para visualizar la corriente de fallo en Amperios, escoja el campo **Amps** en la sección **Data Type Shown**.
- 4.9 Haga clic en el botón de comando **Calculate** de la ventana de opciones de análisis de fallos (Nota: Si no se visualiza este botón, maximice la ventana de opciones de análisis de fallos).
- 4.10 Tan pronto como se ha ejecutado el comando calcular, se podrán visualizar los datos resultantes del análisis de cortocircuito. La magnitud y ángulo de la corriente de fallo se pueden visualizar en el extremo superior derecho en el campo **Fault Current** (Nota: Es importante aclarar que **Power World Simulator 7.0** no permite generar un reporte con todos los datos del análisis de corto circuito. La opción disponible en la ventana de opciones de fallos es la de copiar y pegar los datos en un documento de texto).
- 4.11 Para llevar los datos a un documento de texto haga clic derecho sobre cualquier celda de la tabla de resultados correspondiente a las barras; seleccione la opción **Copy All** para copiar toda la información de voltajes de barra a un documento de texto. Haga clic en la sección **Lines** de la tabla de resultados de fallo y copie los resultados de las corrientes que circulan por la

línea al informe. Haga lo mismo con los datos de generadores y de cargas. Haciendo uso del clic derecho copie la magnitud y ángulo de la corriente de fallo; coloque un texto en el informe para que distinga estos datos del fallo línea-tierra (Sugerencia: Utilice la opción **Display/Columns Options** del menú resultante al hacer clic derecho sobre cualquier celda de las tablas de información de fallos, para cambiar el tipo de letra de los datos y ajustar el ancho de las columnas automáticamente; esto ayudará a que se puedan visualizar todos los datos en la pantalla).

- 4.12 Puede visualizar datos adicionales para cada elemento de la siguiente manera: haga clic en la sección correspondiente al elemento deseado (ej. **Buses, Lines, Generators...**) y haga clic derecho sobre cualquier celda de la tabla; seleccione la opción **Show Dialog**. Allí puede visualizar los parámetros de fallo de los elementos así como la información resultante del análisis de fallos. Siga este paso para mostrar la ventana de opciones de barras, líneas, generadores y cargas; visualice y diga ¿Qué información aparece en las opciones de cada elemento relacionada con los resultados del análisis de fallos?
- 4.13 Puede también visualizar la información de fallos en el diagrama unifilar; para ello en la sección **Online Display** de la ventana de opciones de fallos escoja la opción **Phase A** para visualizar en el diagrama la información de fallos para dicha fase (Fase fallada). Minimice la ventana de opciones de fallos y vuelva al diagrama unifilar; ¿Qué datos se muestran sobre el diagrama para cada elemento?
- 4.14 Vaya de nuevo a las opciones para Análisis de fallos y simule ahora un fallo línea-línea en la barra 2. Copie la misma información que copió para el fallo línea-tierra al informe. Repita este mismo paso para simular los fallos doble línea-tierra y trifásico en la barra 2 del sistema.
- 4.15 Modifique el valor de impedancia de secuencia positiva para el generador, ingresando un valor de reactancia de tal manera que las corrientes resultantes del estudio de corto circuito sean ahora corrientes transitorias. Vuelva a simular los cuatro tipos de fallos en la barra 2, copiando para cada fallo, la misma información del paso anterior para cada elemento del sistema.
- 4.16 Vaya al diagrama unifilar del sistema y coloque la carga de la barra 2 fuera de servicio. En la ventana de opciones para la barra 2 debe colocar en 0 los valores de admitancia de secuencia negativa y cero en la sección de parámetros de fallo. Vuelva a la ventana de opciones de fallos y realice la simulación de todos los tipos de corto circuito sobre la barra 2 en estas condiciones. Para cada tipo de fallo tome nota de la magnitud y ángulo de la corriente de fallo. Compare estos valores con los obtenidos para el caso en que se consideró la carga en la barra 2. ¿Es muy significativo el considerar o no la carga en el análisis de fallos? ¿Cuál fallo presenta la mayor magnitud

de corriente para este caso? (Nota: Para los fallos doble línea, la corriente que interesa conocer es la que circula por las fases B y C. La pequeña corriente que aparece en el campo **Fault Current** es debida a que **Power World Simulator 7.0** toma una impedancia a tierra en el punto de fallo de valor 999+J999 p.u, para los fallos línea-línea).

- 4.17 Vuelva a las condiciones iniciales del sistema. Aumente el voltaje de referencia del generador de tal manera que en la carga el voltaje sea de 1 p.u. En las opciones de la barra 1 coloque como ángulo de referencia un valor tal que el ángulo en la barra de carga sea de 0°. Simule los cuatro tipos de fallos paralelo sobre la barra 2 y copie al informe el dato de la corriente de fallo para los fallos línea-tierra, doble línea-tierra y trifásico. Para el fallo doble línea copie el dato de la corriente que circula por la fase **B** en la línea de transmisión.

## 5. INFORME

El informe para esta práctica debe contener:

- 5.1 Parte inicial: solución al prelaboratorio de la práctica No. 1 de fallos.
- 5.2 Parte central:
- Datos de barras, línea, generador y carga para los cuatro tipos de fallos en la barra 2, cuando esta es modelada a Impedancia constante, pasos 4.11 y 4.14.
  - Datos de barras, línea, generador y carga para los cuatro tipos de fallos en la barra 2, del paso 4.15.
  - Datos del paso 4.17.
- 5.3 Parte final:
- Solución de las preguntas del procedimiento.
  - Responda las siguientes preguntas:
    - ¿Qué tipo de datos se visualizan para cada elemento en las tablas de resultados del análisis de fallos?
    - Con los datos obtenidos para el fallo línea-tierra en la carga de la barra 2, paso 4.11, realice un balance de corrientes en la fase A, teniendo en cuenta la corriente que llega por la línea, la corriente de fallo y la corriente en la carga. Tenga en cuenta además los ángulos de fase de cada corriente. ¿La carga aporta corriente al fallo? ¿Es significativo este aporte? (Nota: Para visualizar mejor la dirección de los flujos de corriente, vaya a la opción **Online Display** del menú **Options/Tools**; en la sección **Animated Flows** desactive la opción **Animate Size**).
    - ¿Las corrientes de fallo obtenidas en los puntos 4.9 y 4.14 son corrientes transitorias o subtransitorias de corto circuito? ¿Por qué?
    - ¿Cómo son las corrientes del paso 4.15 en comparación con las encontradas en los pasos 4.9 y 4.14?

- Compare las corrientes de fallo para todos los tipos de corto circuito en la barra 2 obtenidas en el paso 4.17 con las obtenidas bajo condiciones iniciales (pasos 4.9 y 4.14). ¿Son muy diferentes los valores hallados en los dos casos?

## PRÁCTICA No. 2

### ANÁLISIS DE FALLOS CONSIDERANDO DIFERENTES CONEXIONES DE TRANSFORMADORES Y CARGAS

#### 1. OBJETIVOS

- Simular fallos paralelo en la barra de referencia y en barras de conexión de transformadores.
- Simular los cuatro tipos de fallos disponibles en **PowerWorld Simulator 7.0** para diferentes conexiones del devanado primario y secundario de un transformador.
- Realizar un análisis de corto circuito para diferente puesta tierra de cargas y transformadores.

#### 2. PRELABORATORIO

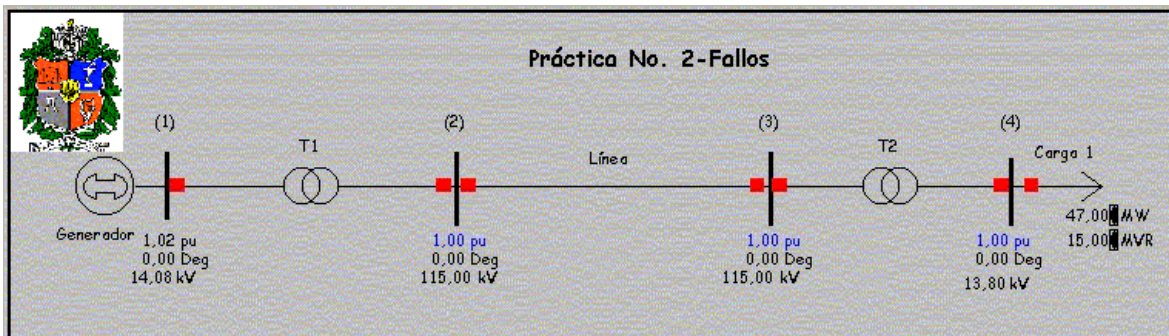
- ¿Por qué se puede asumir el voltaje prefallo como  $1\angle 0^\circ$  para todas las barras de un sistema en un estudio de corto circuito?
- ¿Para qué tipo de conexiones de transformadores no existe paso de corriente de secuencia cero y por qué? ¿Cómo se incluye la resistencia de puesta a tierra de un transformador en sus datos de impedancia de secuencia?
- ¿Por qué en las redes de secuencia positiva y negativa no se considera la impedancia de neutro a tierra de los generadores?
- ¿Qué significado físico tiene la componente DC de la corriente de corto circuito en una máquina síncrona?

#### 3. DESCRIPCIÓN

El análisis de fallos por corto circuito se va a realizar sobre el sistema de la práctica No. 2 de flujos de carga. Los datos adicionales para los elementos del sistema a tener en cuenta en el estudio de fallos se muestran en la Tabla 1 (Base:100 MVA).

**Tabla 1. Datos de impedancias de secuencia para la práctica No.2.**

Elemento	Impedancia
Generador (sólidamente aterrizado)	$R_1=R_2=0,0011$ p.u. $R_0=0,0010$ p.u. $X_d'=0,0849$ ; $X_d''=0,0528$ $X_2=0,0528$ ; $X_0=0,0462$
Línea	$Z_0=0,0131+j0,0445$ p.u. $Y_0=0,0009$ p.u.
Trafo 1 ( $\Delta$ -Yg)	$R_0=R_1=R_2=0,0035$ p.u. $X_0=X_1=X_2=0,118$ p.u.
Trafo 2 (Yg- $\Delta$ )	$R_0=R_1=R_2=0,0035$ p.u. $X_0=X_1=X_2=0,118$ p.u.
Carga barra 4 (sólidamente aterrizada)	$G_2=G_0=0,47$ p.u. $B_2=B_0=-0,15$ p.u.



**Figura 1. Diagrama unifilar para la práctica No. 2 de fallos.**

#### 4. PROCEDIMIENTO

- 4.1 Abra el archivo correspondiente a la práctica No. 2 de flujos de carga, con los datos iniciales de dicha práctica, es decir, con sus valores nominales y sin la carga en la barra 2.
- 4.2 Ingrese los valores mostrados en la Tabla 1 como parámetros de fallo para todos los elementos del sistema. Para el generador ingrese el valor de reactancia subtransitoria como reactancia de secuencia positiva. Cambie el tipo de carga a impedancia constante.
- 4.3 Ejecute el comando **Fault Analysis** para simular los cuatro tipos de fallos sobre la barra 1 (barra de referencia). Haga clic derecho sobre cualquier celda de la última columna en los datos resultantes para las barras, en la ventana del análisis de fallos. Escoja la opción **Display/Column Options**. En el cuadro de diálogo resultante haga clic sobre el botón **Insert New Column**. De esta manera inserte tres columnas. En el campo **Column Number** de este mismo cuadro de diálogo escoja el número 6 (seleccionar columna 6). En el campo **Column Field** escoja la opción **Thevenin Impedance +**. Haga clic en el botón

**Save.** Haga lo mismo para seleccionar la columna 7 y escoja la opción **Thevenin Impedance** – y para la columna 8 la opción **Thevenin Impedance 0**. En cada fallo, copie al informe los datos resultantes del cortocircuito para cada elemento del sistema. Desactive la opción **Animate Size** en las opciones del diagrama unifilar de igual manera que en la práctica anterior. Observe en el diagrama unifilar los resultados de los fallos para la fase A. ¿Cuál es el sentido de la corriente de la fase **A** por el generador y por el transformador T1 después del fallo línea-tierra? Responda esta misma pregunta para los otros tipos de fallo.

- 4.4 Realice el análisis para los mismos tipos de fallo sobre las barras 2 y 3 del sistema. Copie la misma información del paso anterior para los fallos sobre estas barras.
- 4.5 Cambie ahora la configuración del transformador conectado entre las barras 1-2, a  $\Delta$ -Y. Vuelva a simular los cuatro tipos de fallos para las barras 1, 2 y 3 con esta nueva configuración. Copie al informe los datos resultantes para el generador, los transformadores, la línea, la carga y las barras después de cada fallo en las barras 1, 2 y 3.
- 4.6 Vuelva a colocar el transformador 1 en configuración  $\Delta$ -Yg. Para simular la puesta a tierra de los transformadores a través de una resistencia de  $5 \Omega$ , modifique la impedancia de secuencia cero de los mismos a un valor de:  $0,1169+j0,118$  p.u. (Recuerde que la nueva impedancia de secuencia cero incluye a  $3R_n$ ). Simule los cuatro tipos de corto circuito sobre la barra 2. ¿Cómo son las corrientes de fallo en este caso comparadas con las encontradas en el paso 4.4? Ahora modifique la impedancia de secuencia cero de los transformadores para simular una puesta a tierra a través de un reactor de  $5 \Omega$ . ¿Cuál debe ser el nuevo valor de la impedancia de secuencia cero en p.u. para el transformador 1? ¿Cómo son las corrientes de fallo para este caso comparadas con las encontradas en el paso 4.4? ¿Cuál puesta a tierra disminuye en mayor grado la magnitud de la corriente de fallo para los cuatro tipos de fallos?
- 4.7 Coloque la impedancia de secuencia cero de los transformadores en su valor inicial. Para simular la carga conectada en la barra 4 con una configuración sin conexión a tierra, ingrese en el campo de admitancia de secuencia cero de la barra 4 un valor nulo ( $G_0=0$ ,  $B_0=0$ , equivalente a una impedancia infinita). Simule los cuatro tipos de fallos en la barra 4 y copie al informe los datos resultantes del análisis de fallos de todos los elementos. ¿Cuáles valores de impedancias de secuencia de Thévenin son iguales en la barra 4? ¿Por qué? Sustente el valor encontrado para la impedancia de Thévenin de secuencia cero en la barra 4.
- 4.8 Modifique la admitancia de secuencia cero para la carga en la barra 4 al valor  $0,1939-j0,0235$ , de tal manera que pueda simularse una conexión a tierra de

dicha carga a través de una resistencia de  $2 \Omega$ . Simule los cuatro tipos de fallos sobre la barra 4 y copie al informe los datos de los elementos del sistema.

## 5. INFORME

El informe para esta práctica debe contener:

5.1 Parte inicial: solución al prelaboratorio de la práctica No. 2.

5.2 Parte central:

- Datos resultantes de los pasos 4.3 y 4.4.
- Datos resultantes del paso 4.5.
- Datos resultantes de los pasos 4.7 y 4.8.

5.3 Parte final:

- Solución de las preguntas del procedimiento.
- Responda las siguientes preguntas:
  - ¿Cuál es el valor más alto de corriente de fallo y sobre qué barra del sistema ocurre, para cada uno de los tipos de fallos simulados en los pasos 4.3 y 4.4?
  - Comparando las corrientes encontradas a través de las líneas para todos los tipos de fallos en las diversas barras, diga ¿cuál es el caso más desfavorable para la línea de transmisión?
  - ¿Cómo son las corrientes de fallo para el caso en que el transformador 1 cambia de configuración en comparación con las del caso inicial? Pasos 0 y 4.3.
  - Explique los resultados de la impedancia de Thévenin de secuencia cero para el paso 4.5, donde el transformador 1 está en configuración  $\Delta$ -Y.
  - ¿Cómo son los valores de las corrientes de fallo en el paso 4.7 en comparación con los encontrados en el paso 4.8?
  - ¿Qué influencia tiene la conexión de la carga en la barra 4 para todos los tipos de fallo en dicha barra? Paso 4.8.
  - ¿Cómo son los voltajes en las fases **B** y **C** en el fallo línea-línea del paso 4.7 y 4.8? ¿En cuál de los dos pasos el voltaje en la fase **A** es mayor para el fallo doble-línea?
  - ¿Qué conclusión se puede obtener en cuanto a la influencia que tiene la conexión a tierra de transformadores y cargas para los fallos línea-tierra y doble-línea tierra, de acuerdo a los casos simulados?

**PRÁCTICA No. 3**  
**ANÁLISIS DE FALLOS EN LÍNEAS Y EN BARRAS DE VOLTAJE**  
**CONTROLADO INCLUYENDO EL EFECTO DE LA IMPEDANCIA DE FALLO**

**1. OBJETIVOS**

- Simular los cuatro tipos fallos disponibles en **PowerWorld Simulator 7.0** sobre una barra de voltaje controlado variando la puesta a tierra del generador para observar la influencia que esta tiene sobre las corrientes de fallo.
- Realizar un análisis de corto circuito efectuando cada fallo a través de una impedancia  $Z_f$ .
- Simular los cuatro tipos de corto circuito en una de las líneas de transmisión y sobre diferentes secciones de la misma.

**2. PRELABORATORIO**

- ¿Cómo se ven afectadas las corrientes de fallo cuando se considera una impedancia  $Z_f$  diferente de cero?
- ¿Qué condiciones cambian en el caso de fallos doble línea y doble línea a tierra al considerar una impedancia de fallo diferente de cero? ¿Cómo se debe incluir la impedancia de fallo en la interconexión de las redes de secuencia para un fallo línea–tierra?
- ¿Para qué tipo de aterrizaje de los generadores las corrientes de fallo trifásico son mayores que las corrientes para los demás tipos de corto circuito? **[4]**.

Con relación al programa:

- ¿Qué datos adicionales se pueden insertar en los registros resultantes de un análisis de fallos, para las barras, los generadores y las líneas? En el caso de las líneas, ¿qué dirección presentan las corrientes mostradas en los registros del análisis de fallos? (Capítulo 13 – guía de usuario, secciones **Fault Analysis Bus Records**, **Fault Analysis Line Records** y **Fault Analysis Generator Records**).

### 3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema para analizar en esta práctica es igual al utilizado en la práctica No. 4 para flujos de carga. Los valores de las impedancias de secuencia para los elementos de este sistema se muestran en la Tabla 1. La base para las líneas es de 100 MVA, 115 kV.

**Tabla 1. Datos de impedancias de secuencia para la práctica No.3.**

Elemento	Impedancia
Generador 1 (Yg) Base: 200 MVA	$R_1=R_2=0,0033$ p.u. $R_0=0,0025$ p.u. $X_d'=0,2347$ ; $X_d''=0,1572$ $X_2=0,1572$ ; $X_0=0,1181$
Generador 2 (Yg) Base: 188 MVA	$R_1=R_2=0,0020$ p.u. $R_0=0,0015$ p.u. $X_d'=0,1449$ ; $X_d''=0,0971$ $X_2=0,0971$ ; $X_0=0,0729$
Línea L1	$Z_0=0,0625+j0,1856$ p.u. $Y_0=0,0086$ p.u.
Línea L2	$Z_0=0,0156+j0,0467$ p.u. $Y_0=0,0012$ p.u.
Línea L3	$Z_0=0,0326+j0,1199$ p.u. $Y_0=0,0029$ p.u.
Carga 1 (Yg)	$G_2=0,80$ ; $B_2=-0,60$ p.u. $G_0=0,80$ ; $B_0=-0,60$ p.u.
Carga 2 (Yg)	$G_2=1,0$ ; $B_2=-0,75$ p.u. $G_0=1,0$ ; $B_0=-0,75$ p.u.

### 4. PROCEDIMIENTO

- 4.1 Recupere el archivo del caso de la práctica No. 4 para flujos de carga con sus datos iniciales.
- 4.2 Usando la Tabla 1 ingrese los valores de los parámetros de fallo para los elementos del sistema; suponga que se quieren calcular las corrientes iniciales de corto circuito. Cambie además el tipo de cargas del sistema a impedancia constante (Nota: Los datos de secuencia de las cargas fueron calculados tratando a estas como impedancias serie, ver [3]).
- 4.3 Haciendo uso del menú rápido (clic derecho) en los registros de barras, inserte tres nuevas columnas para visualizar las impedancias de Thévenin de las tres secuencias y otras tres columnas para visualizar los voltajes de secuencia en cada barra.

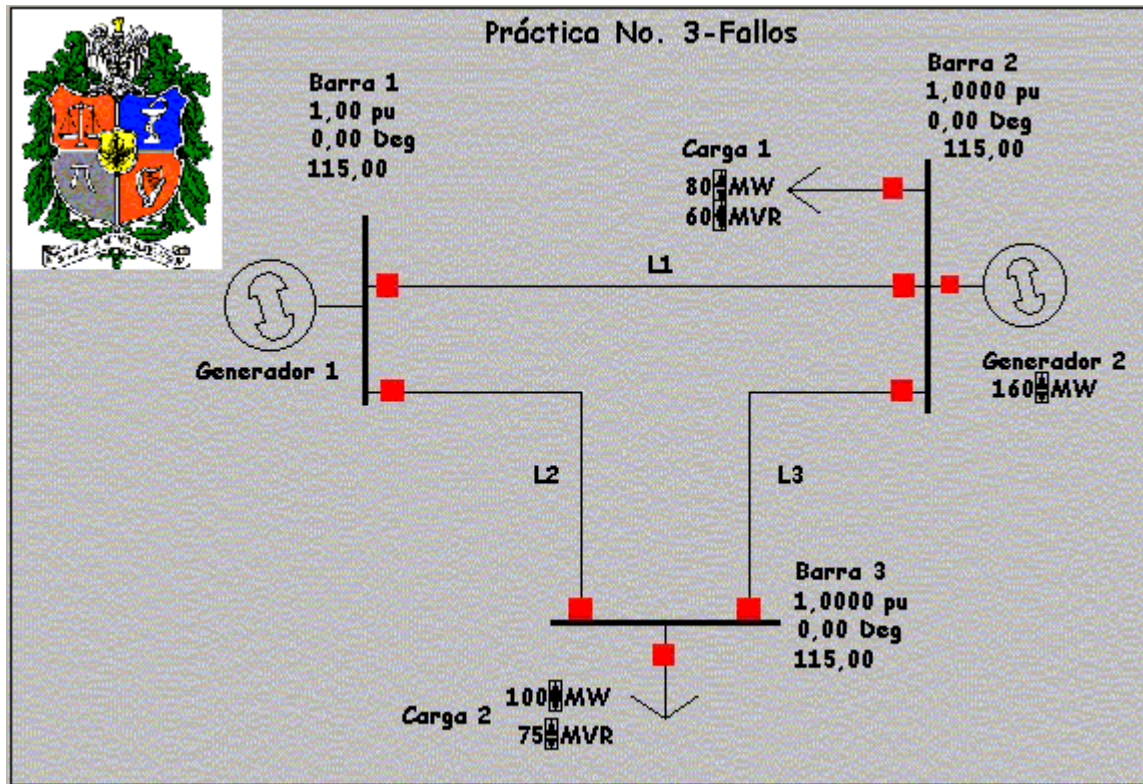


Figura 1. Diagrama unifilar del sistema para la práctica No. 3 de fallos.

- 4.4 Con los dos generadores sólidamente aterrizados, simule los cuatro tipos de corto circuito permitidos en **PowerWorld Simulator 7.0** sobre la barra 2. Copie al informe los datos de los registros de barras, líneas, generadores y cargas para cada fallo. Copie también los valores de la corriente de fallo. Con los datos de impedancia Thévenin obtenidos para la barra 2 y el voltaje en esa barra antes de ocurrir el corto circuito, calcule la corriente de fallo interconectando de manera adecuada las impedancias de Thévenin; compare sus resultados con la corriente de fallo mostrada por el programa, para los fallos línea - tierra, doble línea - tierra y trifásico.
- 4.5 Haciendo uso de los voltajes de secuencia obtenidos para la barra 2, compruebe si para cada tipo de fallo se cumplen las condiciones relacionadas con los voltajes de secuencia.
- 4.6 Cambie el tipo de puesta a tierra del generador 2; suponga que el neutro está conectado a tierra a través de una resistencia de  $5 \Omega$  y vuelva a simular sobre la barra 2 los cuatro tipos de fallos. Para cada fallo copie al informe los datos resultantes para las barras, las líneas, los generadores y las cargas, así como los datos de la corriente de fallo. ¿Cuál es el valor de  $R_n$  en p.u. que debe ingresarse en los parámetros de fallo del generador? Las corrientes de fallo (para cada tipo) en este caso con respecto a las del paso 4.4, ¿aumentan o disminuyen? ¿Por qué? ¿Qué voltajes de secuencia en la

barra 2 cambian cuando se pone a tierra el generador a través de la resistencia?

- 4.7 Ahora suponga un aterrizamiento para el generador 2 a través de un inductor cuya reactancia  $X_n$  es de  $5 \Omega$ . Simule sobre la barra 2 los cuatro tipos de fallos y copie al informe los datos resultantes para las barras, las líneas, los generadores y las cargas, así como los datos de la corriente de fallo. Compare las corrientes de fallo obtenidas en este paso con las resultantes para una puesta a tierra por medio de un resistor.
- 4.8 Para simular el generador 2 en una configuración con neutro aislado, ingrese una impedancia neutro - tierra de un valor muy grande, por ejemplo,  $0+j10^6$  p.u. Simule los cuatro tipos de fallos sobre la barra 2. Para cada tipo de corto circuito compare las corrientes de fallo y las corrientes de fase por el generador 2 con las obtenidas en los casos de puesta a tierra resistiva, inductiva y sólida. Obtenga sus propias conclusiones respecto a la influencia de la puesta a tierra del generador sobre los cuatro tipos de fallos.
- 4.9 Cambie de nuevo la impedancia neutro - tierra del generador para simular una puesta a tierra sólida. En la ventana de opciones del análisis de fallos vaya a la sección **Fault Options** e ingrese en el campo **Fault Impedance** un valor de  $0,0378+j0,0$  p.u (la impedancia de fallo es tomada generalmente entre  $5$  y  $20 \Omega$ , ver [5]). Vuelva de nuevo a la sección **Fault Data** y simule los cuatro tipos de fallos sobre la barra 2. Copie al informe los resultados obtenidos para las barras, las líneas, los generadores y las cargas, así como las corrientes de fallo. Compare los datos de corrientes de fallo obtenidos en este paso con los obtenidos cuando no se considera una impedancia de fallo en el paso 4.4. Observando los registros resultantes para las barras, diga ¿qué variaciones sufren los voltajes de fase y de secuencia en la barra 2 respecto a los obtenidos en el paso 4.4?
- 4.10 Se va a simular ahora un análisis de fallos en la línea de transmisión L3 que está conectada entre las barras 2 y 3. Para ello abra de nuevo la ventana del análisis de fallos. En el campo **Fault Location** escoja la opción **In-Line Fault** (Nota: cuando se cambia la localización de la falla de una barra a una línea de manera directa en las opciones del análisis de fallos, es común que al intentar simular el fallo se presente un error cuyo origen se desconoce. Se debe entonces cerrar la ventana del análisis de fallos y abrirla nuevamente para simular el fallo sobre la línea). Modifique los siguientes campos: **From Bus: 2; To Bus: 3; Circuit: 1; Location %: 75**. Con estos datos se define una ubicación del fallo sobre la línea L3 a un 75% de distancia desde la barra 2. Efectúe en primer lugar un fallo línea - tierra y copie al informe los datos de las barras, las líneas, los generadores y las cargas, así como los valores de la corriente de fallo. En el campo **Online Display** escoja la opción **Phase A**; vaya al diagrama unifilar y observe el punto de fallo. ¿Qué elemento nuevo es adicionado al diagrama unifilar en el punto de fallo?

Observe los registros resultantes para las barras en la ventana del análisis de fallos; ¿qué nombre se le asigna al nuevo elemento del sistema?

- 4.11 Simule los otros tipos de fallos sobre la misma línea en la misma ubicación anterior y actualice su informe con los datos resultantes en este paso.
- 4.12 Cambie ahora la ubicación del fallo sobre la línea L3; simule un punto de fallo al 25% desde la barra 2. Efectúe los cuatro tipos de fallos sobre esta ubicación. Para cada tipo de corto circuito compare el valor de la corriente de fallo con el obtenido cuando el punto está al 75% desde la barra 2. Compare también las corrientes de línea por el generador 2 en los dos casos para cada tipo de fallo. ¿Para cuál de los dos puntos de fallo sobre la línea L3 son mayores las corrientes de fallo y las corrientes de línea que salen del generador 2? ¿Cuál es la conclusión principal que se obtiene al responder la pregunta anterior?
- 4.13 Por último, ubique el punto de fallo sobre la mitad de la línea L1. Simule los cuatro tipos de fallos sobre este punto y copie al informe los datos resultantes para los generadores y para las corrientes de fallo. ¿Cuál generador aporta mayor corriente al fallo y para qué tipo de corto circuito? ¿Por qué?

## 5. INFORME

El informe para esta práctica debe contener:

- 5.1 Parte inicial: solución al prelaboratorio de la práctica de fallos No. 3.
- 5.2 Parte central:
- Datos obtenidos en el paso 4.4 para una puesta a tierra sólida del generador 2.
  - Datos resultantes en el paso 4.6 para una puesta a tierra resistiva del generador 2.
  - Datos obtenidos en el paso 4.7 para una puesta a tierra inductiva del generador 2.
  - Datos del paso 4.9 para los fallos en la barra 2 a través de una impedancia  $Z_f$ .
  - Datos de los pasos 4.10 y 4.11 correspondientes a los fallos sobre la línea L3.
  - Datos solicitados en el paso 4.13 para los fallos en la línea L1.
- 5.3 Parte final:
- Solución de las preguntas del procedimiento.
  - Responda las siguientes preguntas:
    - Observando las corrientes por fase del generador 2 obtenidas en el paso 4.4, diga ¿cuál es el valor más alto de la corriente por fase y en qué tipo de fallo se presenta?

- ¿Para qué tipo de fallo sobre la barra 2 en el paso 4.4 se presenta la mayor contribución de corriente por parte del generador 1?
- Comparando entre los pasos 4.4, 4.6 y 4.7, con cuál caso disminuyen en mayor cantidad las corrientes de fallo, ¿con puesta a tierra resistiva o con puesta a tierra inductiva?
- Cuando un fallo sobre una línea se simula en un punto cercano al generador, ¿cómo son las corrientes por fase que llegan al fallo en relación con las obtenidas cuando se simula en un punto alejado del generador? ¿la situación es igual para todos los tipos de fallo simulados en los pasos 4.10, 4.11 y 4.12?

## PRÁCTICA No. 4 ANÁLISIS DE FALLOS EN BARRAS CON MOTORES SÍNCRONOS

### 1. OBJETIVOS

- Observar el comportamiento de los motores síncronos sobre las corrientes de corto circuito para los cuatro tipos de fallos disponibles en **PowerWorld Simulator 7.0**.
- Observar el efecto que tiene sobre las corrientes de fallo, la puesta a tierra de los motores síncronos.

### 2. PRELABORATORIO

- ¿Qué tipo de fallo produce la inversión del régimen de operación de un motor síncrono en un sistema de potencia? ¿Por qué?
- ¿Qué tipos de corrientes de corto circuito son consideradas en las normas ANSI? [6].

### 3. DESCRIPCIÓN

Un grupo de motores síncronos idénticos se conectan a una barra de 4,16 kV a través de un transformador de 7,5 MVA. Los motores operan a 600 V. El sistema de potencia que alimenta a la barra de 4,16 kV está representado por un generador equivalente de Thévenin de 7,5 MVA. El diagrama unifilar del sistema se muestra en la Figura 1.

Los datos de impedancia de los elementos se encuentran en la Tabla 1. Estos datos están dados sobre una base de 7,5 MVA (excepto para los motores).

### 4. PROCEDIMIENTO

- 4.1 Construya el diagrama unifilar mostrado en la Figura 1 e ingrese para cada elemento los datos mostrados en la Tabla 1 incluyendo los parámetros de fallo (para las máquinas trabaje con la reactancia subtransitoria como reactancia de secuencia positiva). Para representar los motores, inserte un generador y coloque la cantidad de potencia activa y reactiva como un valor negativo.

(Tenga en cuenta que la opción **AVR** este desactivada cuando ingrese las potencias de los motores).

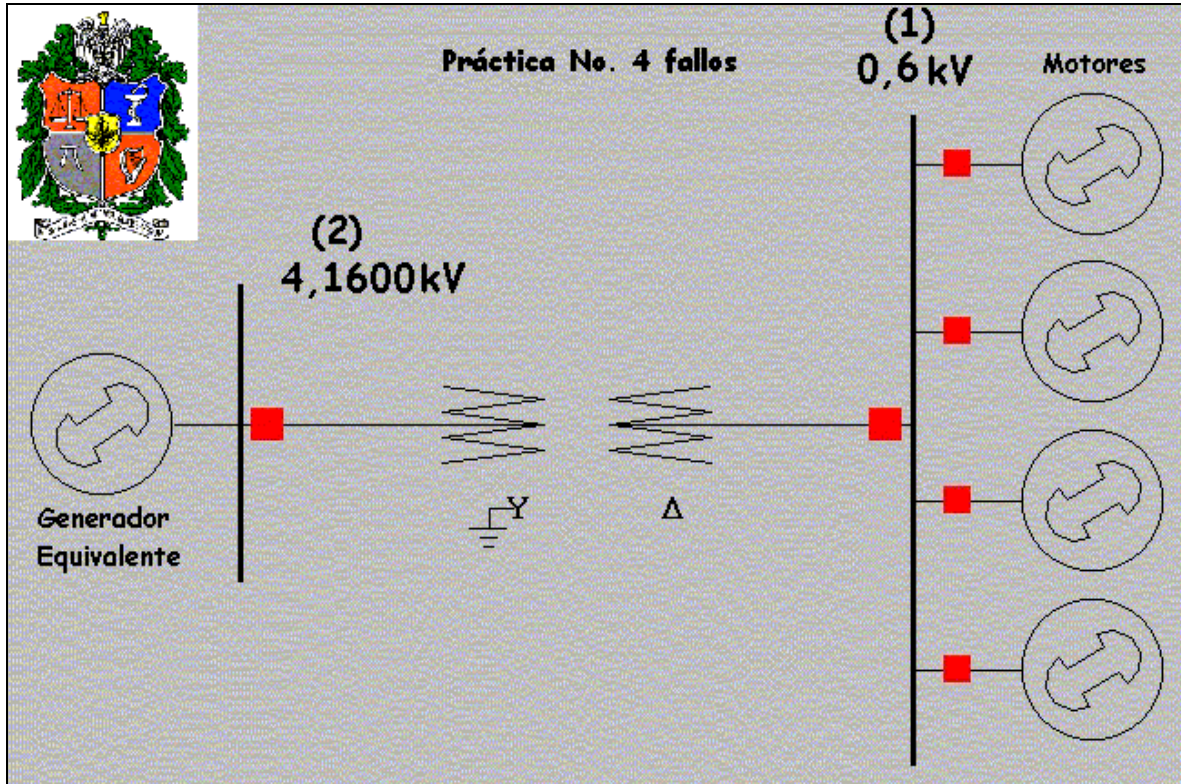


Figura 1. Diagrama unifilar del sistema para la práctica No. 4.

Tabla 1. Datos de los elementos para el sistema de la práctica No. 4.

Elemento	Valores nominales	Impedancia
Generador Equivalente Yg (Barra 2 – Referencia $1\angle 0^\circ$ )	4,16 kV 7,5 MVA FP=0,8	$X_d''=X_2=0,10$ p.u. $X_0=0,05$ p.u. $X_n=0,05$ p.u.
Transformador 1-2 Δ-Yg	4,16kV/600V 7,5 MVA	$X_1=X_2=X_0=0,1$ p.u.
Motores Yg Base: 1,25 MVA	1,25 MVA c/u. FP=0,8. 600V	$X_d''=X_2=0,2$ p.u. $X_0=0,04$ p.u. $X_n=0,02$ p.u.

4.2 En las opciones de simulación, en la sección **Power Flow Solution** ingrese un valor de 7,5 MVA para la potencia base del sistema. Active las opciones **Initialize from Flat Start Values** y **Restore Initial State on Restart**. En la opción **Online Display** del menú **Options/Tools** ingrese un valor de 5 en el campo **Change in Gen rotor angle per refresh**; dentro de las opciones para flujos animados, desactive el campo **Animate Size**.

- 4.3 Vaya a la ventana de análisis de fallos e ingrese nuevas columnas a la tabla de registros de barras para visualizar los valores de las impedancias de Thévenin de las tres secuencias y los voltajes secuencia para cada barra. Para los registros de generadores, ingrese tres nuevas columnas para visualizar el ángulo de fase de las corrientes de línea. Para los registros de líneas, inserte seis nuevas columnas para observar los ángulos de fase de las corrientes en cada extremo (en este caso sólo existe un registro en la sección líneas, correspondiente al transformador). **Nota: Recuerde que Power World Simulator 7.0 asume las corrientes resultantes del análisis de fallos en líneas y transformadores, saliendo de las barras entre las que se encuentran conectados; para el caso de los generadores, las corrientes mostradas se asumen saliendo de los mismos.**
- 4.4 **PowerWorld Simulator 7.0** permite simular fallos mientras se lleva a cabo una simulación en el tiempo. Para ello, inicie una simulación de este tipo y mientras transcurre el tiempo haga clic derecho sobre la barra 1; en el menú resultante escoja la opción **Fault** (esto lo llevará a la ventana de opciones del análisis de fallos). Una vez allí, calcule las corrientes de cortocircuito para un fallo línea – tierra. En la sección **Online Display** escoja la opción para visualizar las corrientes por la fase **A**. Vaya al diagrama unifilar y observe el sentido de los flujos de corriente por todos los elementos del sistema. ¿Qué pasa con el flujo de corriente hacia los motores? ¿Cuánto es la contribución de cada motor y del generador a la corriente de fallo? Haga lo mismo para visualizar el flujo de corriente por las fases no falladas (**B** y **C**) durante la simulación en el tiempo.
- 4.5 Detenga la simulación en el tiempo. Vaya a la ventana del análisis de fallos y copie al informe los datos de las barras, el transformador y los generadores, así como las corrientes de fallo. Haga lo mismo para los otros tres tipos de fallos sobre la barra 1. ¿Para qué tipo de corto circuito se presenta una mayor corriente de fallo? Con los datos de corriente para cada generador y para el transformador efectúe un balance de corrientes sobre la barra 1 para el caso de un fallo línea – tierra.
- 4.6 Simule los mismos tipos de corto circuito sobre la barra 2 (barra de referencia). Copie a su informe los mismos datos del paso 4.5 para los cuatro tipos de fallos. ¿Para cuál tipo de corto circuito se presenta la mayor corriente de fallo?; explique el por qué de este resultado (ver sección 4.6 de la referencia [4]). ¿En cuál de las dos barras se presenta una corriente de fallo mayor para cada tipo de corto circuito? ¿Para cuál de los cuatro tipos de fallos simulados sobre la barra 2 es mayor la contribución de corriente de cada motor?
- 4.7 Cambie el tipo de puesta a tierra de los motores. Ingrese para este caso un valor de impedancia neutro – tierra de  $0+j10^6$  p.u para cada motor. Simule los cuatro tipos de fallos sobre la barra 1 y copie al informe los datos resultantes para las barras, los generadores y el transformador, así como los valores de

las corrientes de fallo. ¿Cómo son las corrientes de fallo de este caso comparadas con las resultantes en el paso 4.5? ¿Por qué?

4.8 Mantenga los motores con el neutro aislado. Simule los cuatro tipos de fallos sobre la barra 2. ¿Para qué tipo de corto circuito se presenta una corriente de fallo mayor? Las contribuciones de cada motor a las corrientes de fallo en la barra 2, ¿son mayores o menores que las resultantes en el paso 4.6?

4.9 Vuelva a colocar el valor de reactancia de puesta a tierra inicial para los motores. Modifique los datos de uno de los motores así:  $S = 3,5$  MVA,  $FP = 0,8$ .  $V = 0,6$  kV.  $X_d''=X_2=0,15$  p.u.;  $X_0=0,03$  p.u.  $X_n=0,02$  p.u. (sobre sus propias bases). Vuelva a simular los mismos tipos de fallos sobre la barra 1. Observe los resultados y compárelos con los obtenidos cuando los motores son de igual potencia. ¿De qué manera influye la potencia nominal de estos en la corriente de fallo?

## 5. INFORME

El informe para esta práctica debe contener:

5.1 Parte inicial: solución al prelaboratorio de la práctica No. 4.

5.2 Parte central:

- Datos resultantes de los pasos 4.5, 4.6 y 4.7.

5.3 Parte final:

- Solución de las preguntas del procedimiento.
- Responda las siguientes preguntas:
  - ¿En qué casos la corriente de fallo trifásica es mayor que las corrientes de fallo para los otros tipos de corto circuito?
  - ¿Para qué tipo de puesta a tierra de los motores se presentó la corriente de fallo más grave sobre la barra 1 y sobre la barra 2?
  - ¿Qué parámetro hace que la contribución de un motor en caso de un fallo sea mayor o menor?

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] GRAINGER, J. y STEVENSON W. D. *Análisis de Sistemas de Potencia*. México: McGraw-Hill, 1.994.
- [2] ANDERSON, P. M y FOUAD, A. A. *Power Systems Control and Stability*. New York: IEEE Press, 1.997.
- [3] ANDERSON, P. M. *Analysis of Faulted Power Systems*. New York: IEEE Press, 1.973.
- [4] ROEPER, R. *Corrientes de cortocircuito en redes trifásicas*. Barcelona: Marcombo S.A, 1.985.
- [5] MCGRAW-EDISON COMPANY. Power System Division. *Distribution – System Protection Manual*.
- [6] ETAP PowerStation User Guide Release 3.01.
- [7] WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION. *Control and Operation of Electric Power Systems*. Advanced Systems Technology. Noviembre, 1.987.
- [8] PowerWorld Corporation. PowerWorld Simulator Version 7.0 User's Guide.

## **ANEXO V**

**RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN DE ESTUDIOS DE FLUJOS DE CARGA Y  
CORTO CIRCUITO EN LA RED A 115 kV DEL SISTEMA CHEC**

## **ANEXO VI**

### **LISTADO DE PROGRAMAS PARA LA SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE POTENCIA**

A continuación se presentan las referencias de algunos de los programas existentes para la simulación de sistemas de potencia.

- **EasyPower:** <http://www.easypower.com>
- **Neplan:** <http://www.neplan.ch>
- **Cyme:** <http://www.cyme.com>
- **Pflow:** <http://www.power.uwaterloo.ca/~claudio/software/pflow.html>
- **Pcflo y Pcfloh:** <http://www.ece.utexas.edu/~grady/pcflo.html>
- **Programa para flujos de potencia con matlab:**  
<http://ece.uwaterloo.ca/~mmadriga/freesoft.html>
- **Netdraw:** [http://home.t-online.de/home/dpannhorst/netdrw\\_e.htm](http://home.t-online.de/home/dpannhorst/netdrw_e.htm)
- **Laku:** [http://home.t-online.de/home/dpannhorst/laku\\_e.htm](http://home.t-online.de/home/dpannhorst/laku_e.htm)
- **Power Vue:** <http://www.megasys.com>
- **Aspen:** <http://www.aspeninc.com>
- **Matpower:** <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>
- **Winflu:** <http://www.geocities.com/siliconvalley/vista/7485>
- **Digsilent:** <http://www.digsilent.de>
- **Sispot:** Consultoría Colombiana, Santa Fe de Bogotá